

El estado estructural como indicador de calidad de suelo bajo siembra directa

María Carolina Sasal¹, Adrián Enrique Andriulo², Hubert Boizard³,
Joel Leonard² y Marcelo Germán Wilson¹

Introducción

La evolución del funcionamiento físico de los suelos y su relación con la dinámica del agua son aspectos clave en la sustentabilidad ambiental de los agroecosistemas. No es posible manejar sustentablemente un medio tan complejo y vulnerable como el suelo a menos que comprendamos sus atributos, funciones internas e interacciones con el ambiente (Hillel, 2004). Los indicadores de calidad permiten conocer las tendencias a la recuperación o a la degradación del recurso suelo bajo determinadas prácticas de manejo y eventualmente generar alertas tempranas.

El comportamiento físico de los suelos limosos de

clima húmedo ha sido considerablemente estudiado. En general, se caracterizan por su susceptibilidad a compactarse, a formar estructura masiva y homogénea (Voorhees & Lindstrom, 1984; Alakukku, 1998). La escasa capacidad natural de regeneración de porosidad se agrava en suelos bajo uso agrícola debido al tránsito continuo y no controlado de implementos agrícolas y se mitiga con labores de remoción del suelo. Sin embargo, es también ampliamente conocido que el laboreo convencional conduce a la degradación de suelos agrícolas, la cual incluye pérdidas de espesor del suelo por erosión y reducción de los stocks de

¹ INTA, Estación Experimental Paraná. Oro Verde 3101. Entre Ríos, Argentina.

² INTA, Estación Experimental Pergamino. Pergamino 2700, Buenos Aires, Argentina.

³ INRA, UPR 1158 AgrolImpact, site d'Estrées-Mons, F-80203 Péronne, France.

carbono y de nutrientes. La siembra directa (SD) resulta una práctica adecuada para mitigar procesos erosivos asociados a la labranza en Molisoles. Sin embargo, combinada con la simplificación de las secuencias de cultivos y particularmente con el monocultivo de soja, genera la necesidad de estudiar nuevos aspectos de la degradación física de los suelos cultivados.

La mayoría de los trabajos que describen características edáficas bajo SD abordan aisladamente la descripción de algunos indicadores de ciertas características de la porosidad edáfica, la agregación o algunas propiedades hidrológicas en situaciones contrastantes de tipos de suelo o climas luego de transcurrido cierto número de años de SD (Dabney et al., 2004; Hubbard et al., 2001; Kay & VandenBygaart, 2002; Lal & Vandoren, 1990). En general, la SD es comparada con situaciones testigo bajo labranza convencional. Sin embargo, los parámetros tradicionalmente utilizados para caracterizar la aptitud física de un suelo, como la densidad aparente, la distribución de poros por tamaño y la estabilidad de agregados, no permiten explicar las variaciones en la tasa de infiltración de lotes agrícolas bajo SD continua (Sasal et al., 2006). Tampoco permiten visualizar los cambios en la organización de las estructuras del horizonte superficial del suelo. En efecto, bajo SD, la ausencia de labores tiene como efecto indirecto la ausencia de homogeneización de propiedades edáficas.

Es escasa la bibliografía sobre la evolución de la estructura del suelo bajo SD y raramente se realiza un análisis integrado entre las modificaciones inducidas en los estados estructural e hídrico del suelo. En el estudio de la organización estructural de suelos limosos sin remoción, cobran relevancia las escalas de tiempo y espacio analizadas. Particularmente, Argentina carece de una cronosecuencia de mediciones reproducibles de la estruc-

tura de suelos bajo SD para analizar y comprender su evolución desde su adopción masiva en la década de 1990. En efecto, resulta necesario tener una mirada integral y dinámica del funcionamiento del suelo y adecuada al sistema de SD.

Para poder analizar la evolución de la estructura, es necesario valerse de una metodología adecuada que permita evaluar la variación temporal y espacial de la estructura observada a campo, integrando los estados estructural e hídrico del suelo (Roger-Estrade et al., 2004; Boizard et al., 2016). La técnica del perfil cultural es un método semi-cuantitativo de descripción morfológica de la estructura de suelos cultivados. Permite diferenciar visualmente distintas estructuras en el perfil de suelo, clasificarlas por las características macroscópicas que le imprimen los sistemas de cultivo y mapearlas (Manichon 1987), sin generar disturbios como se haría con un muestreo o un tamizado, e independientemente de la humedad del suelo al momento de la medición (Boizard et al., 2002). En los últimos años, el alcance de esta metodología se ha potenciado al ser combinada con el análisis de imágenes (fotografías parciales del perfil).

La complementación de la técnica del perfil cultural con el análisis del sistema de porosidad permite corroborar en laboratorio, los tipos de estructura identificados visualmente a campo (Stengel, 1979). Sin embargo, no exime al primer método de la subjetividad que imprime la habilidad del operador, al delimitar zonas o espesores correspondientes a los distintos tipos de estructura. Por ello se propone la medición de resistencia al corte de suelos (RC) como herramienta de medición in situ, para discernir cuantitativamente qué tipo de estructura se presenta en cada perfil analizado. (Sasal et al., 2016)

Estado estructural del horizonte superficial de Argiudoles bajo siembra directa

La mayoría de los trabajos que describen el estado estructural del horizonte superficial de los Argiudoles bajo SD, informan densificación del horizonte por aumento en la cohesión de las partículas del suelo cuando se suspenden los labores (Senigagliaesi & Ferrari, 1993; Taboada et al., 1998; Cosentino & Pecorari, 2002), o por capas compactadas por tránsito o por antiguos pisos de arados o rastras (Alakukku et al., 2003). Sin embargo, la evolución de la estructura masiva o la caracterización de otros tipos de estructura presentes bajo SD son, al presente, aspectos considerablemente menos estudiados.

En los últimos años, diversos trabajos en suelos limosos bajo SD (Alvarez et al., 2009; Ball & Robertson, 1994; Bonel et al., 2005; Morrás et al., 2004; Pagliai et al., 1983; Sasal et al., 2006; Shipitalo & Protz, 1987; Soracco et al., 2010; VandenBygaart et al., 1999), han registrado una estructura laminar (con agregados alargados orientados paralelamente a la superficie del suelo) dentro de los primeros diez centímetros del horizonte superficial (Figura 1). La presencia de estructura laminar constituye un aspecto de importancia dado que restringe el ingreso de agua al suelo (Sasal et al. 2010).

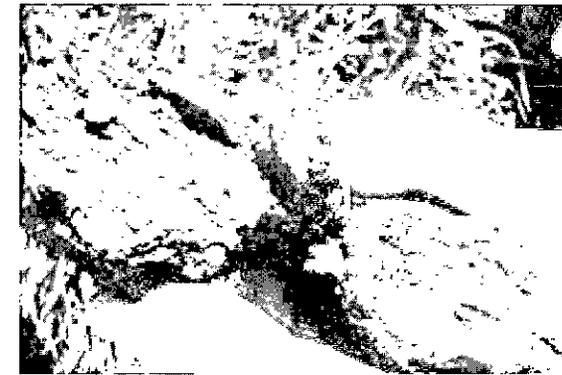


Figura 1. Estructura laminar de los primeros centímetros de un Argiudol típico bajo SD. Ensayo de largo plazo (INTA Pergamino).

En estudios realizados en el centro-norte de la Pampa húmeda, región relativamente homogénea respecto a tipo de suelo, clima y características de la agricultura, el método del perfil cultural con análisis de imágenes fue la metodología seleccionada para conocer la organización estructural de suelos limosos bajo SD, poner en evidencia la extensión regional de la estructura laminar y estudiar su evolución, (Sasal et al., 2016). En lotes de distinta antigüedad de SD, se analizó la magnitud de la extensión de la estructura laminar. El 100% de los lotes muestreados presentó estructura laminar. Este resultado fue posible de hallar gracias a la utilización de la aproximación del perfil cultural, que permite la observación del horizonte superficial del suelo en pozos de gran tamaño, dado que la realización de pozos tradicionales, pequeños y para extracción de muestras a profundidades fijas no hubiera permitido identificar estructuras laminares muy delgadas o discontinuas.

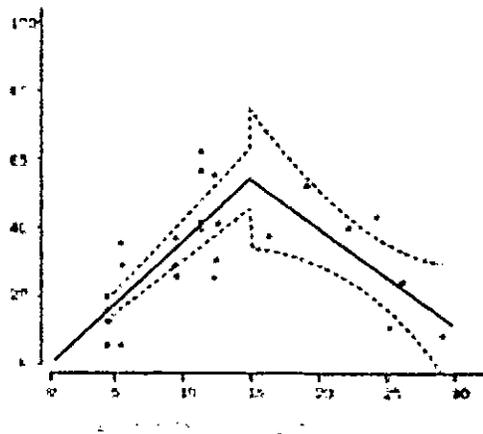


Figura 2. Relación entre la proporción de estructura laminar (CP) en el perfil del horizonte superficial y los años bajo SD en la pampa húmeda norte (puntos negros= observaciones, línea roja= modelo lineal-fitted piecewise, línea gris cortada= 95% intervalo de confianza).

El estudio a escala regional de la estructura laminar, permitió identificar algunos factores condicionantes de su proporción en el horizonte superficial. Para ello, se consideró la antigüedad de SD de cada lote muestreado y se incorporó al análisis el índice de intensificación de la secuencia (ISI), que integra características de los sistemas de cultivo difíciles de cuantificar, como la duración de los barbechos, los momentos de siembra y cosecha, y la continuidad de la actividad biológica asociada a las raíces activas en el suelo. (Novelli et al., 2013)

Los perfiles culturales realizados consecutivamente en distintos ensayos, muestran que la proporción de los distintos tipos de estructuras es dinámica en el corto plazo y aún luego de más de 20 años de establecidas las secuencias de cultivos. La proporción de estructura laminar en el perfil está asociada con el número de años bajo SD (Figura 2) y la intensificación de la secuencia de cultivos (Figura 3).

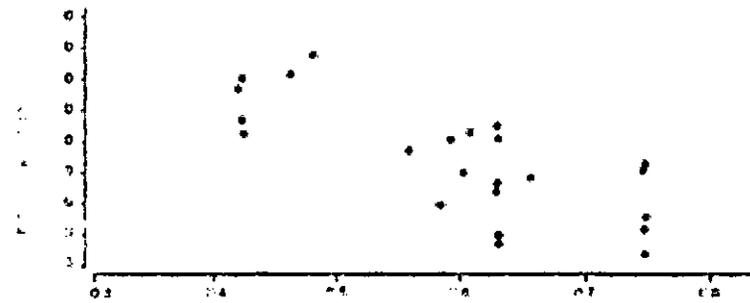


Figura 3. Regresión lineal entre la proporción de estructura laminar (%) y el índice de intensificación de la secuencia (ISI)

Efecto del estado estructural de Argiudoles bajo siembra directa sobre la dinámica del agua

La disponibilidad de parcelas de escurrimiento con 10 años de SD en la EEA INTA Paraná (Figura 5) y diferentes secuencias de cultivos, permitió contar con una amplia gama de proporciones de estructuras en el perfil de horizonte A, y encontrar funciones para relacionarlas con algunos

componentes del balance de agua. Se realizó la medición directa de escurrimiento y la utilización del trazador Blue Brilliant para visualizar el movimiento del agua en el suelo. Estas técnicas no son novedosas en sí mismas, sino en su aplicación.



Figura 4. Parcelas de escurrimiento de INTA EEA Paraná

Se demostró que la estructura laminar altera el patrón de drenaje, restringe el ingreso de agua al suelo y aumenta el escurrimiento superficial en función de su proporción en el perfil del ho-

rizonte A. La proporción de estructuras laminar y granular explicaron el 80% de la variación del escurrimiento (Figura 6).

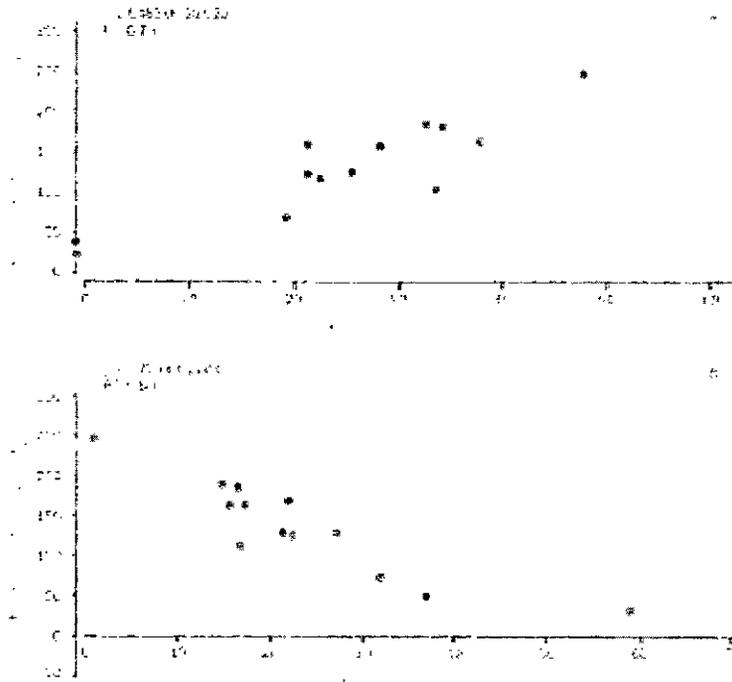


Figura 5. Regresión lineal entre porcentaje de estructura laminar (a) o granular (b) y escurrimiento acumulado promedio de cuatro campañas analizadas.

Los porcentajes de estructura laminar y granular explicaron el 70 y el 60% de la variación del escurrimiento acumulado promedio de cuatro campañas analizadas. Es decir, que a mayor proporción de estructura laminar y menor proporción de estructura granular, el espesor coloreado por el trazador fue menor. De esta manera, puede visualizarse el efecto negativo de la estructura laminar y positivo de la estructura granular superficial sobre el ingreso de agua al suelo. En la figura 7 puede

observarse la relación negativa entre el espesor de suelo que fue coloreado con el trazador y el escurrimiento acumulado promedio. El espesor coloreado explicó un 87 % de la variación del escurrimiento promedio de las cuatro campañas. Aplicando una regresión múltiple ($y=133,11-2,11*\text{granular}+1,95*\text{laminar}$), la combinación de la estructura laminar y la granular explican el 85 % de la variación del escurrimiento promedio.

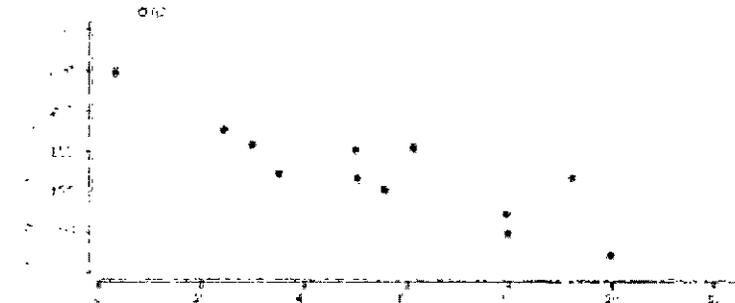


Figura 6. Correlación entre espesor coloreado con trazador Blue Brillant y escurrimiento acumulado promedio de cuatro campañas analizadas.

La secuencia de cultivos implementada bajo SD condiciona la formación y las características de esta estructura. La comparación de distintas secuencias, características de la región, y con la misma antigüedad de SD indicó que el ingreso

de agua al suelo fue mayor en las secuencias de cultivos más intensificadas (>ISI) (Figura 8). Así, el ISI se robustece como indicador, no sólo del estado estructural, sino también del funcionamiento hídrico del horizonte superficial del suelo.

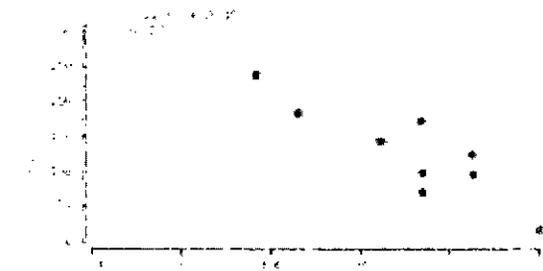


Figura 7. Regresión lineal entre el índice de intensificación de la secuencia (ISI) y el escurrimiento acumulado promedio de cuatro campañas (mm).

La descripción del estado estructural edáfico bajo SD resultó indicadora de efectos negativos de la simplificación del sistema de cultivo, evidenciado en la expansión del monocultivo de soja, sobre la sustentabilidad del agroecosistema. Entre estos

efectos negativos se destacan la formación de estructura laminar de considerable espesor, la ausencia de estructura granular superficial, la menor proporción de macroporos mayores a 300 µm y la baja estabilidad de la estructura gamma subya-

cente y en consecuencia, la restricción al ingreso del agua que favorece el escurrimiento superficial. Por ejemplo, un aumento de la proporción de estructura laminar en el horizonte superficial de 20 a 50% puede duplicar las pérdidas de agua por escurrimiento.

Las secuencias más intensificadas en la región son las que presentan trigo, ya que es el principal cultivo de invierno y precede a una soja de segunda fecha de siembra. De esta manera, se mantiene el suelo con elevado tiempo de ocupación, similar al tiempo que ocuparía una pastura. Además, el trigo se siembra con poca distancia entre hileras y así puede favorecer la interrupción de capas continuas de estructura laminar con sistemas radicales en cabellera y la formación de estructura granular superficial. Un incremento del 10 a 20% en la proporción de estructura granular en el horizonte superficial puede reducir las pérdidas de agua por escurrimiento en un 20%.

Consideraciones finales

La caracterización del estado estructural de suelos en SD permite detectar patrones estructurales favorables o desfavorables y caracterizarlos, resultando un buen indicador de la dinámica del agua a la escala de lote. A partir de estos resultados, la descripción de la organización estructural con el método del perfil cultural adquiere mayor relevancia y se comprueba su valor como herramienta de diagnóstico para predecir el ingreso de agua al suelo. Además, las ecuaciones generadas permiten identificar, mediante el índice ISI, secuencias de cultivos con proporciones de estructuras laminar y granular que mejoran la captación de agua para aumentar rendimientos de cultivos y minimizar riesgos ambientales asociados a las pérdidas de agua por escurrimiento.

La valorización de herramientas de diagnóstico para detectar las causas de mal funcionamiento estructural disponibles permitirá dar precisión a la toma de decisiones para mejorar la planificación de las secuencias de cultivos a implementar. Por ejemplo, la bibliografía indica que la clásica medición de conductividad hidráulica, tanto a campo como en laboratorio, no ha resultado un buen indicador del ingreso del agua al suelo y de los cambios generados en el suelo por su uso. Sin embargo, la complementación de la técnica con la aplicación del trazador Blue Brillant permitió visualizar el efecto negativo de la estructura laminar y positivo de la estructura granular superficial sobre el ingreso de agua al suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alakukku, L. 1998. Properties of compacted fine-textured soils as affected by crop rotation and reduced tillage. *Soil Till. Res.*, 47:83-89.
- Alakukku, L., Weisskopf, P., Chamen, W.C.T., Tijink, F.G.J., Van der Linden, J.P., Pires, S., Sommer, C. y Spoor, G. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil Till. Res.*, 73:145-160.
- Alvarez, C.R., Taboada, M.A., Gutierrez Boem, F.H., Bono, A., Fernandez, P.L. y Prystupa, P. 2009. Topsoil Properties as Affected by Tillage Systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73: 1242-1250.
- Ball, B.C. y Robertson, E.A.G. 1994. Effects of soil water hysteresis and the direction of sampling on aeration and pore function in relation to soil compaction and tillage. *Soil Till. Res.*, 32:51-60.
- Boizard, H., Richard, G., Roger-Estrade, J., Dürr, C. y Boiffin, J. 2002. Cumulative effects of cropping systems on structure of the tilled layer in northern France. *Soil Till. Res.*, 64:149-164.
- Boizard, H., Yoon, S.W., Leonard, J., Lheureux, S., Cousin, I., Roger-Estrade, J. y Richard, G. 2013. Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage. *Soil Tillage Res.* 127, 34–44. doi:10.1016/j.still.2012.04.007
- Boizard, H.; Peigné J; Sasal MC; Guimaraes, M.F.; Piron, D.; Tomis, V.; Vian, F.; Cadoux, S.; Ralisch, R.; Tavares Filho, J.; Heddad, D.; De Battista, J.; Duparque, A.; Franchini, J.C. y Roger-Estrade, J. 2016. Developments in the profil cultural method for an improved. *Soil Tillage Res.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.07.007>
- Bonel, B., Morrás, H.J.M. y Bisaro, V. 2005. Modificaciones en la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo*, 23:1-12.
- Cosentino, D.J. y Pecorari, C. 2002. Limos de baja

densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*, 20: 9-16.

Dabney, S.M., Wilson, G.V., McGregor, K.C. y Foster, G.R. 2004. History, residue, and tillage effects on erosion of loessial soil. *Trans ASAE*, 47:767-775.

Hillel, D. 2004. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press. USA. 494 p.

Hubbard, R.K., Lowrance, R.R. y Williams, R.G. 2001. Preferential flow in clayey Coastal Plain soil as affected by tillage. *ASAE*, 261-262

Kay, B.D. y VandenBygaart, A.J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.*, 66: 107-118.

Lal, R. y Vandoren, D.M.Jr. 1990. Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration for two soils in Ohio. *Soil Till. Res.*, 16:71-84.

Manichon, H. 1987. Observation morphologique de l'état structural et mis en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. Pp. 39-52 en Monnier, G., Goss, H.J. (eds). *Soil compaction and regeneration*. Balkema. Rotterdam. The Netherlands

Morrás, H.J.M., Tonel, B. y Michelena, R. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. En *Actas del XIX Congreso Arg. de la Ciencia del Suelo*, Paraná.

Novelli, L.E., Caviglia, O.P., Wilson y M.G., Sasal, M.C. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196: 260-267.

Paglial, M., LaMarca, M. y Lucamante, G. 1983. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in vitiviculture under zero and conventional tillage. *J. Soil Sci.*, 34:391-403.

Roger-Estrade, J., Richard, G., Caneill, J., Boizard,

H., Coquet, Y., Défossez, P. y Manichon, H. 2004. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil Till. Res.*, 79: 33-49.

Sasal, M.C., Andriulo, A.E. y Taboada, M.A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in argentinian pampas. *Soil Till. Res.*, 87:9-18.

Sasal, M.C., Castiglioni, M.G. y Wilson, M.G. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.*, 108:24-29.

Sasal, M.C.; Boizard, H.; Andriulo, A.; Wilson, M.G. y J. Léonard. 2016. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil Tillage Res.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.08.014>

Senigaglia, C. y Ferrari, M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. Pp. 27-35 en Buxton, D.R., Shibles, R., Forsberg, R.A., Blad, B.L., Asay, K.H., Paulsen, G.M., Wilson, R.F., (eds.). *International crops science 1*. Madison, Wis., Crop Science Society of America, Inc.

Shipitalo, M.J. y Protz, R. 1987. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Can. J. Soil Sci.*, 67: 445-456.

Soracco, C.G., Lozano, L.A., Sarli, G.O., Gelati, P.R. y Filgueira, R.R. 2010. Anisotropy of Saturated Hydraulic Conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. *Soil Till. Res.*, 109:18-22.

Stengel, P. 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.*, 30: 27-51.

Taboada, M.A., Micucci, F.G., Cosentino, D.J. y Lavado, R.S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Till. Res.*, 49:57-63.

VandenBygaert, A.J., Protz, R., Tomlin, A.D. y Miller, J.J. 1999. Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loams soils of southern Ontario. *Soil Till. Res.*, 51:139-149.

Voorhees, W.B. y Lindstrom, M.J. 1984. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:152-156.

Indicadores biológicos de calidad de suelo

Cecilia Videla¹, Liliana Picone¹

Con el fin de promover el desarrollo de una agricultura sustentable, es importante desarrollar indicadores de calidad de suelo que reflejen tempranamente los cambios a los que son sometidos los ecosistemas a través de las prácticas de manejo y que puedan ser empleados por agricultores, asesores agropecuarios e investigadores.

Particularmente, los indicadores biológicos de la calidad de suelo proveen información sobre los organismos vivos del suelo, y miden propiedades y procesos que permiten detectar, con la mayor sensibilidad, los cambios en las funciones del suelo. Miden propiedades del suelo dinámicas, es decir, aquellas que están más sujetas a cambios debido a la actividad del hombre y son fuertemente afectadas por las prácticas agronómicas.

Se considera importante monitorearlos porque estos indicadores biológicos responden más rápidamente a cambios en el manejo o en las condiciones ambientales que los indicadores físicos y químicos. Además de seleccionar cuáles propiedades biológicas cuantificar, es necesario tener en cuenta la variación espacial y temporal de las mismas. Debido a que la actividad de los organismos del suelo es fuertemente regulada por las condiciones ambientales, ellos presentan una gran variabilidad en el tiempo, por lo cual es importante considerar en función al objetivo del trabajo, si se realizarán muestreos estacionales o, de realizarse anuales, tener especial cuidado en hacerlos siempre en la misma época del año. Con respecto a la variación espacial, los indicadores que son altamente no homogéneos en su distribución requerirán un

¹-Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias.