

EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL EN UN MOLISOL DEL SUDESTE BONAERENSE

SANTIAGO NÉSTOR TOURN^{1,*}, MARÍA DE LOS ÁNGELES AGOSTIN¹,
GERMÁN FRANCO DOMÍNGUEZ¹, GUILLERMO ALBERTO STUDDERT¹

Recibido: 20/03/2019

Recibido con revisiones: 07/01/2020

Aceptado: 07/01/2020

RESUMEN

La salud edáfica está relacionada con la estabilidad de los agregados (EA), y es importante poder realizar el seguimiento frecuente de su estado. Para ello, se necesitan métodos que simulen las fuerzas de disrupción que ocurren en el suelo, que sean sensibles y rápidos y que se adapten a diferentes condiciones edáficas. No hay acuerdo respecto a la mejor metodología para suelos de textura franca y elevada materia orgánica como los del sudeste bonaerense (SEB). El objetivo de este trabajo fue evaluar tres métodos de laboratorio de determinación de EA. Se seleccionaron cuatro situaciones de uso y manejo sobre un suelo Argiudol Típico: a) parque, b) agricultura continua bajo siembra directa, c) agricultura continua bajo labranza convencional y d) degradado. Se extrajeron muestras de suelo a 0-5 y 5-20 cm y se les determinó la EA utilizando: M1: Six *et al.* (1998); M2: De Leenher & De Boodt (1958) modificado por Suero & Garay (1978), y M3: Le Bissonnais (1996). Se determinó el contenido de carbono orgánico total (COT), particulado (COP) y asociado (COA). Los resultados se presentaron a 0-5, 5-20 y 0-20 cm. La EA obtenida por cada método tuvo una relación altamente significativa con el contenido de COT y COP del suelo en todas las profundidades (r 0,91-0,98). Los tres métodos insumieron un tiempo similar para la obtención del resultado final para cada muestra y se correlacionaron de manera muy significativa entre sí (r 0,86-0,98). Sin embargo, los métodos M1 y M2 permitieron separar las situaciones más sensible y eficazmente que M3. Por lo tanto, se recomienda cualquiera de ellos para estudios específicos de la EA en suelos como los del SEB con textura superficial franca. No obstante, es necesario evaluar el desempeño de estos métodos en un rango mayor de texturas y manejos para confirmar los resultados.

Palabras clave: Salud del suelo, diámetro medio ponderado, cambio de diámetro medio ponderado.

EVALUATION OF METHODS TO DETERMINE SOIL STRUCTURAL STABILITY IN A SOUTHEASTERN PAMPAS MOLLISOL

ABSTRACT

Soil health is related to aggregate stability (EA) and, therefore, it is important to monitor its status frequently. The methods to do this should simulate the disruption forces that occur in the soil, ought to be sensitive and fast, and would have to be usable for different soil conditions. There is not agreement about the best methodology for the loam and high-organic-matter soils of the Southeastern Buenos Aires province (SEB). The objective of this work was to evaluate three laboratory methods to determine EA. Four soil use and management situations of a Typic Argiudoll soil were selected: a) park, b) continuous cropping under no-tillage, c) continuous cropping under conventional tillage, and d) degraded soil. Soil samples were taken at 0-5 and 5-20 cm and their EA was determined through: M1: Six *et al.* (1998); M2: De Leenher & De Boodt (1958) modified by Suero & Garay (1978), y M3: Le Bissonnais (1996). Soil total (COT), particulate (COP), and mineral-associated (COA) organic carbon were also determined. Results are shown for 0-5, 5-20, and 0-20 cm layers. The EA determined through all three methods showed a highly significant correlation with COT and COP for all three depths (r 0.91-0.98). All the methods required approximately the same time to obtain the final result of each sample. Besides, their results highly correlated with the results of each other (r 0.86-0.98). However, methods M1 and M2 allowed distinguishing soil use and management situations more sensitively than M3. Therefore, it is recommended to use either M1 or M2 for specific studies of EA on soils of the SEB with loam surface texture. Nevertheless, it is necessary to evaluate the performance of these methods for a broader range of textural classes and management situation to be able to confirm this.

Keywords: Soil health, mean weight diameter, change of mean weight diameter.

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

* Autor de contacto: stourn@mdp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Los suelos de la Región Pampeana Argentina presentan una pérdida generalizada de su salud que provoca que no cumplan con sus funciones ecosistémicas (Sainz Rozas *et al.*, 2019). La salud edáfica está fuertemente relacionada con la estabilidad de los agregados (EA) y gran parte de los procesos degradativos generados por el uso inadecuado del suelo están directamente relacionados con su pérdida (Aparicio & Costa, 2007). La EA influye sobre el comportamiento del sistema poroso, la dinámica del agua y del aire en el suelo, la resistencia a la erosión, el ciclo de nutrientes, la penetración de las raíces y el rendimiento de los cultivos (Bronick & Lal, 2005; Rabot *et al.*, 2018). Además, los cambios en la EA pueden estar relacionados con cambios en los contenidos de carbono (C) orgánico total (COT) de los suelos. Esto es así porque la tasa de formación, la estabilización y la degradación de macroagregados (MA) y microagregados (MI) están directamente relacionadas con la dinámica del COT y, especialmente, con la del C orgánico particulado (COP) (Six *et al.*, 1998). Por lo tanto, sería necesario hacer monitoreos frecuentes de la EA para evaluar el estado de la salud física edáfica.

La EA de un suelo es función de la resistencia generada por las fuerzas de cohesión entre partículas respecto a la energía de disrupción sufrida por las precipitaciones, procesos de humedecimiento repentino, laboreo, entre otras. Por lo tanto, para evaluar la EA se deberían buscar técnicas que simularan lo mejor posible las fuerzas de disrupción que ocurren a campo (Kemper & Rosenau, 1984), para, de esta manera, cuantificar la reacción de los agregados (Amezketta, 1999). Sin embargo, si bien se ha buscado caracterizar el mecanismo de disrupción más apropiado para evaluar la EA en distintos tipos y condiciones de suelo (Castiglioni & Behrends Kraemer, 2019), no existe o no se ha reportado un mecanismo apropiado para todas las situaciones a evaluar (Le Bissonnais, 1996; Almajmaie *et al.*, 2017). Esto es así debido a la naturaleza dinámica del proceso de agregación y a la interacción de diferentes agentes orgánicos e inorgánicos durante la formación y la estabilización de los

agregados (Kemper & Rosenau, 1986). Algunos métodos se basan en mecanismos de desagregación asociados a sumergir la muestra en agua (De Leenher & De Boodt, 1958; Le Bissonnais, 1996; Six *et al.*, 1998), otros simulan el impacto de la lluvia (Bruce-Okine & Lal, 1975), y otros utilizan vibración por ultrasonido (Almajmaie *et al.*, 2017). Así, la utilización de diferentes métodos para determinar la EA genera resultados que son difícilmente comparables (Amézqueta, 1999).

En suelos del Sudeste de Buenos Aires (SEB) (desarrollados en clima templado frío y caracterizados por sus altos niveles de COT (Duran *et al.*, 2011)), no existe un consenso sobre qué metodología de evaluación de EA utilizar. Los reportes que existen se basan en técnicas de disgregación del suelo por efecto del agua como la propuesta por De Leenher & De Boodt (1958) utilizadas por Agostini *et al.* (2014) y Domínguez *et al.* (2016), y la propuesta por Six *et al.* (1998) utilizadas por Roldan *et al.* (2014), Tourn *et al.* (2019) y García *et al.* (2020). Estos métodos han permitido distinguir diferentes situaciones de uso y manejo a través de los niveles de EA resultantes. Asimismo, para molisoles del norte de Buenos Aires, se ha informado que el método propuesto por Le Bissonnais (1996) resultó ser más adecuado que el propuesto por De Leenher & De Boodt (1958). El primero permitió separar mejor los efectos de situaciones contrastantes de manejo, siendo, además, más consistente (menor variabilidad) (Castiglioni & Behrends Kraemer, 2019). Asimismo, utilizando el método de Le Bissonnais (1996) y comparando suelos de tres órdenes distintos (molisoles, alfisoles y vertisoles), Gabioud *et al.* (2011) observaron que este método fue sensible para discriminar situaciones de uso y manejo en los tres órdenes. Además de la capacidad de simular fuerzas disruptivas que permitan distinguir situaciones de EA, existen diferencias entre métodos respecto al tiempo que requieren y la cantidad de procedimientos involucrados para lograr los resultados. Cuanto más tedioso y complejo es un procedimiento analítico, más difícil es que la variable elegida pueda ser usada como indicador de salud de suelo (Karlen *et al.*, 2013) e inhibe su utilización rutinaria (García *et al.*, 2020). Así, para poder hacer un seguimiento fre-

cuenta del estado de la salud física edáfica, se necesitan métodos sencillos y rápidos que se adapten a diferentes tipos y condiciones de suelo. Por lo tanto, los objetivos de este trabajo fueron, por un lado, evaluar la sensibilidad y efectividad para distinguir situaciones de manejo contrastantes de tres métodos de laboratorio de determinación de EA, M1: Six *et al.* (1998), M2: De Leenher & De Boodt (1958), y M3: Le Bissonnais (1996) y en suelos de textura franca y elevado contenido de COT del SEB y, por el otro, el tiempo insumido en obtener el resultado de una muestra con cada metodología.

MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se llevó a cabo en la Unidad Integrada Balcarce (UIB, 37° 45' 09" S; 58° 18' 48" O; 140 msnm) sobre un suelo Argiudol Típico (Soil Survey Staff, 2014) serie Mar del Plata con predominancia de arcillas illíticas (INTA, 1979) con menos de 2% de pendiente y textura superficial franca en los primeros 20 cm de suelo arcilla: 23,6 %, limo: 36,9% y arena 39,4 % (Tourn *et al.*, 2019). El clima es meso-termal subhúmedo húmedo. La mediana de la precipitación anual y el promedio de la temperatura media diaria son 930 mm año⁻¹ y 14,1 °C, respectivamente (INTA, 2017). Se evaluaron cuatro situaciones de uso y manejo de suelo: 1) Parque (PQ): corresponde a un suelo con vegetación espontánea mayoritariamente gramíneas y no disturbado en los últimos 40 años; 2) Agricultura continua bajo siembra directa (SD), suelo con 18 años de SD continua con una rotación maíz (*Zea mays* L.) - soja (*Glycine max* (L.) Merr.) - trigo (*Triticum aestivum* L.) luego de 18 años de una rotación de papa (*Solanum tuberosum* L.) - avena (*Avena sativa* L.)/vicia (*Vicia sativa* L.) - trigo bajo labranza convencional con arado de rejas, rastra de discos y vibrocultivador o rastra de dientes con la intensidad mínima necesaria y la oportunidad adecuada (LC); 3) Agricultura continua bajo LC, suelo con 18 años de una rotación maíz - soja - trigo luego de 18 años de una rotación papa - avena - trigo; 4) Suelo degradado (DEG), suelo con historia agrícola bajo LC continua durante 50 años implementada con menor cuidado que el descripto más arriba, con una ro-

tación con predominancia de soja en los últimos 20 años. Los muestreos fueron realizados en el otoño del 2013. En este periodo las temperaturas son predominantemente bajas y la actividad de la micro-, la meso- y la macro-biota del suelo es menos intensa disminuyendo la probabilidad de cambios en el suelo en el corto plazo por demoras en el muestreo (Studdert *et al.*, 2015). Del mismo modo, el muestreo en otoño permite evaluar el estado suelo en un momento en que las últimas operaciones de laboreo ocurrieron varios meses antes. La extracción de las muestras se hizo con un contenido de agua del suelo cercano a capacidad de campo. De cada una de las situaciones se extrajeron muestras compuestas por 5 submuestras de las profundidades 0-5 cm y 5-20 cm con tres repeticiones. Las muestras se tomaron con pala procurando que se generara el mínimo disturbio de la estructura y se pasaron en fresco cuidadosamente por un tamiz de 8000 μm . Posteriormente, se secaron a 40 °C en estufa con circulación forzada de aire para luego aplicarles las siguientes metodologías:

Método 1 (M1): Método de Six et al. (1998):

A dos alícuotas individuales de 100 g de los agregados <8000 μm de cada muestra se les aplicaron dos formas de re-humedecimiento de los agregados, el repentino (HR) (se sumergió directamente la muestra seca en agua desionizada) y por capilaridad (HC) (se esparció la muestra seca sobre una placa con papel de filtro humedecido con la cantidad de agua desionizada necesaria para llevar el contenido de agua de los agregados secos a niveles cercanos a capacidad de campo y se los incubó a temperatura ambiente durante 24 h). Luego de cada forma de re-humedecimiento ambas alícuotas fueron sometidas por separado a tamizados sucesivos en agua a través de distintas aberturas de malla (2000, 250 y 50 μm) con un equipo diseñado para tal fin (Germán y Roberto Domínguez, construcción *ad hoc*) que genera movimientos oscilantes de arriba hacia abajo del tamiz (50 ciclos durante un periodo de 2 min, Six *et al.* (1998)) con un recorrido de 3 cm haciendo que los agregados entraran y salieran del agua en cada movimiento. Esto permitió la separación de la masa del suelo en MA (>250 μm) con dos

tamaños, 8000-2000 μm (MA grandes) y 2000-250 μm (MA chicos), MI (250-50 μm) y, por último, la fracción fina (FF) (limo + arcilla) <50 μm . Los agregados retenidos en los tamices de 2000, 250 y 50 μm fueron secados a 50°C en estufa con circulación forzada de aire hasta peso constante (48-72 h) y luego pesados. La FF fue calculada por diferencia. Para cada alícuota a la que se le aplicó un pre-tratamiento de re humedecimiento, se determinó el diámetro medio ponderado (DMP, mm) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (X_i W_i)$$

donde i identifica a cada fracción de agregados, n es el número total de fracciones de agregados, X_i es el diámetro promedio de la fracción i (mm) calculado como la media aritmética de la apertura de malla de dos tamices sucesivos, y W_i es la masa de la fracción i que quedó sobre cada tamiz. Por diferencia entre los DMP de HC y HR se obtuvo el cambio en DMP (CDMP, mm) como una medida inversa de la EA (a mayor valor de CDMP menor EA).

Método 2 (M2): Método de De Leenheer y De Boodt (1958):

La muestra de agregados secos <8000 mm fue tamizada en seco a través de una batería de tres tamices (4800, 3360 y 2000 μm). Luego se conformó una alícuota de 100 g de agregados según las proporciones remanentes sobre cada tamiz. Los agregados de la alícuota resultante se humedecieron hasta aproximadamente capacidad de campo con ayuda de una bureta a 30 cm de la muestra de suelo y se incubaron por 24 h a 30°C. Luego, los agregados fueron tamizados en agua a través de una batería de seis tamices (4800, 3360, 2000, 840, 500 y 300 μm). El tamizado se realizó por 30 min en reemplazo de los 5 min propuesto por la técnica original, de acuerdo con la modificación propuesta para el SEB por Suero & Garay (1978) para suelos francos del SEB. Los agregados retenidos en cada tamiz fueron secados a 105°C en estufa con circulación forzada de aire hasta peso constante (24-48 h) y luego pesados. Se calculó

el DMP (mm) de los agregados para cada tamizado (en seco y en agua) según la ecuación 1 y, por diferencia entre ambos, se determinó el CDMP (a mayor valor de CDMP menor EA).

Método 3 (M3): Método de Le Bissonnais (1996):

Los agregados secos <8000 μm se tamizaron en seco por tamices de 5000 y 3000 μm . De la masa de agregados remanente sobre el tamiz de 3000 μm (5000-3000 μm) se separaron tres alícuotas de 10 g cada una. A cada alícuota se le aplicó uno de los pretratamientos a) humedecimiento repentino en agua (la alícuota se sumergió en un recipiente con agua desionizada durante 10 min), b) disgregación mecánica luego de humedecimiento en etanol (la alícuota se sumergió en un recipiente con etanol durante 30 min y luego en un erlenmeyer con agua desionizada al que se le realizaron manualmente 10 giros completos), y c) humedecimiento con agua por capilaridad (la alícuota se esparció la sobre una placa con papel de filtro humedecido con la cantidad de agua desionizada necesaria para llevar el contenido de agua de los agregados secos a niveles cercanos a capacidad de campo y se los dejó a temperatura ambiente durante 60 min). Luego de estos pretratamientos, los agregados fueron tamizados en etanol por un tamiz de 50 μm con el mismo equipo que para la M1 generando 5 ciclos de movimiento oscilante. Los agregados que quedaron retenidos sobre el tamiz de 50 μm , se secaron en estufa con circulación forzada de aire a 40 °C hasta peso constante (48-60 h) y posteriormente se tamizaron en seco en una batería de 6 tamices (2000, 1000, 500, 200, 100 y 50 μm) y se pesaron los agregados retenidos en cada tamiz. Para cada alícuota se determinó el DMP según ecuación 1, clasificándose como DMP_r (DMP luego del humedecimiento repentino), DMP_d (DMP disgregación luego de humectación con etanol) y DMP_c (DMP luego del humedecimiento por capilaridad). Con el promedio de los tres DMP se obtuvo el DMP medio (DMP_m).

Por otro lado, una alícuota de cada muestra fue molida hasta pasar por tamiz de 2000 μm y se le realizó un fraccionamiento físico por tamizado en agua con tamiz de 50 μm para sepa-

rar la fracción orgánica asociada a los minerales (limo más arcilla, $<50 \mu\text{m}$) y la fracción orgánica particulada ($>50 \mu\text{m}$) según el método descrito por Cambardella y Elliott (1992). Se cuantificaron el COT y C orgánico asociado a la fracción mineral (COA) y, por diferencia entre éstos, se calculó el COP (Cambardella & Elliott, 1992). Para ello se utilizó el método de oxidación húmeda con dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y con mantenimiento de la temperatura de reacción (120°C por 90 min) (Schlichting *et al.*, 1995). Para los resultados de COT, COP y COA y para los de EA se calculó el promedio ponderado por espesor de las dos capas muestreadas (0-5 y 5-20 cm) para obtener los valores a la profundidad 0-20 cm.

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el paquete Rcmdr del sistema R (R Core Team, 2018). En todas las pruebas de hipótesis y comparación de medias (Tukey) y regresiones lineales y no lineales se consideró un nivel de significación del 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Figura 1** se muestran los contenidos de COT, COA y COP de las cuatro situaciones de uso y manejo del suelo para las profundidades analizadas. Los contenidos de COT y COP permitieron separar entre situaciones distintas y a todas las profundidades, no así el de COA. Sin embargo, en general para las profundidades, el contenido de COP fue el que mostró las diferencias con más sensibilidad ($p < 0,05$) (Figura 1), confirmando la importancia de su determinación para percibir cambios tempranos debidos al manejo (Dominguez *et al.*, 2009; Tourn *et al.*, 2019). El COP es una fracción muy lábil del CO y se asocia a mecanismos de estructuración del suelo y disponibilidad de nutrientes para los cultivos. Asimismo, interviene en la formación y reciclaje de MI y en la formación y estabilidad de MA y puede controlar gran parte de la productividad de los agroecosistemas en el corto plazo (Beare *et al.*, 1994; Six *et al.*, 1998, 2004). Por lo tanto, es probable

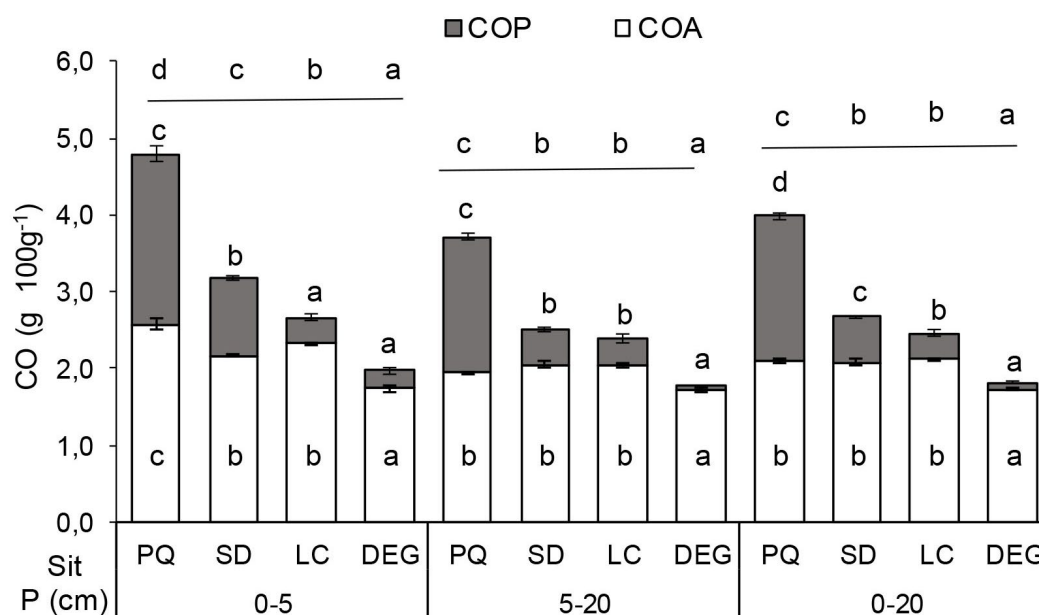


Figura 1. Contenidos de carbono orgánico (CO) total (COT) (columnas completas), CO particulado (COP) y CO asociado a los minerales (COA) para diferentes situaciones de uso (Sit) (PQ: parque, SD: siembra directa, LC: labranza convencional, DEG: degradado) y tres profundidades (P). Letras iguales en cada sección de las columnas (COP y COA) o por encima de las columnas enteras (COT) indican que no existen diferencias significativas entre Sit dentro de cada profundidad ($p > 0,05$). Las barras verticales en cada sector de cada columna indican error estándar de la media.

Figure 1. Total organic carbon (COT), particulate organic carbon (COP) and mineral associated organic carbon (COA) under different soil use situations (Sit): (PQ: park; LC: conventional tillage; SD: no-tillage; DEG: degraded) at three depth (P). Equal letters within each column section (COP and COA) or above the whole column (COT) indicate no significant differences among Sit for the corresponding organic carbon fraction within each depth ($p > 0,05$). Vertical bars in each column section indicate standard error of the mean.

que los diferentes contenidos de COP registrados entre las situaciones de uso y manejo (**Figura 1**) se asocien a niveles diferentes de EA.

Los niveles de EA obtenidos por cada método tuvieron una relación altamente significativa ($p < 0,01$) con el contenido de COT y COP del suelo en todas las profundidades evaluadas (**Tabla 1**). Los valores absolutos de los coeficientes de correlación fueron muy altos y oscilaron entre 0,91 y 0,98. Estos resultados están en línea con los elevados niveles de correlación entre COT y EA reportados por Domínguez *et al.* (2016) ($r = 0,75$ COT vs EA por M2 a 0-20 cm) y Tourn *et al.* (2019) ($r = 0,80$ COT vs EA por M1 a 0-20 cm) para molisoles del SEB y por Novelli *et al.* (2013) ($r = 0,76$ COT vs EA por M3 a 0-15 cm) para molisoles de Entre Ríos. Asimismo, Domínguez *et al.* (2016) y Tourn *et al.* (2019) informaron elevados coeficientes de correlación entre CDMP y COP a 0-20 cm ($r = -0,64$ con M2 y $r = -0,83$ con M1, respectivamente) para molisoles del SEB. Los resultados de este trabajo confirman la fuerte rela-

Tabla 1. Coeficientes de correlación de Pearson entre la estabilidad de agregados en términos de cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP) o diámetro medio ponderado medio (DMPm) determinados por a) Método de Six (CDMP) (M1), b) Método de De Lennher y De Boodt (CDMP) (M2), y c) Método de Le Bissonnais (DMPm) (M3) y el contenido de carbono orgánico (CO) total (COT) y CO particulado (COP) a tres profundidades. Todas las correlaciones fueron altamente significativas ($p < 0,01$).

Table 1: Pearson correlation coefficients between aggregate stability in terms of change of mean weight diameter (CDMP) or averaged mean weight diameter (DMPm) determined by a) Six method (CDMP) (M1), b) De Leenher y De Boodt method (CDMP) (M2) and c) Le Bissonnais method (DMPm) (M3) and total organic carbon (COT) and particulate organic carbon (COP) at three depths. All correlations were highly significant ($p < 0.01$).

Profundidad (cm)	Carbono orgánico	Método de determinación		
		M1	M2	M3
0-5	COT	-0,98	-0,93	0,95
	COP	-0,98	-0,91	0,98
5-20	COT	-0,95	-0,97	0,93
	COP	-0,98	-0,98	0,98
0-20	COT	-0,97	-0,98	0,94
	COP	-0,98	-0,98	0,98

ción entre los contenidos de COT y COP con la EA (Six *et al.*, 2004) en los molisoles, independientemente del método de determinación.

Los métodos de EA utilizados permitieron separar con diferente sensibilidad las situaciones de uso y manejo del suelo en todas las profundidades analizadas (**Figura 2**). Con todos los métodos y a todas las profundidades la situación PQ, considerada como inalterada, presentó el nivel más alto de EA (CDMP más bajo para M1 y M2 (**Figura 2a** y **2b**) y el DMPm más alto (**Figura 2c**), $p < 0,05$) respecto a las otras situaciones. Asimismo, la situación más contrastante, (DEG), presentó siempre la menor EA con todos los métodos y a todas las profundidades (**Figura 2**). Sin embargo, sólo M1 y M2 fueron suficientemente sensibles para diferenciar estadísticamente DEG de LC ($p < 0,05$) a todas las profundidades. A la profundidad de 0-5 cm, M1 y M2 (**Figura 2a** y **2b**) fueron más sensibles que M3 (**Figura 2c**) ya que permitieron diferenciar todas las situaciones de uso y manejo evaluadas ($p < 0,05$). A esa misma profundidad, además de PQ, todos los métodos permitieron separar las dos situaciones bajo agricultura (SD y LC) (**Figura 2**). En la capa arable (0-20 cm), la EA de la situación DEG obtenida con M3 no se diferenció ($p < 0,05$) de LC y ésta tampoco de SD, aún mostrando aquella menor contenido de COT y COP (**Figura 1**). En este sentido, Gabioud *et al.* (2011) y Novelli *et al.* (2013) trabajando sobre molisoles franco-limosos registraron escasas diferencias entre situaciones bajo agricultura bajo SD utilizando el DMPm de M3. Por ello, aquellos autores recomendaron la evaluación de los DMP de cada uno de los pretratamientos por separado cuando el DMPm no permitía separar situaciones que se suponían contrastantes.

En la **Figura 3** se presenta la EA en términos de DMP obtenidos con los diferentes pretratamientos de M3. A diferencia de lo reportado por Gabioud *et al.* (2011) y Novelli *et al.* (2013), los diferentes DMP obtenidos por M3 (**Figura 3**) no permitieron separar las situaciones con agricultura continua bajo SD (situación 2) de aquellas bajo LC (situación 3), al igual que lo mencionado para DMPm (**Figura 2**). El pretratamiento de humedecimiento por capilaridad fue el que,

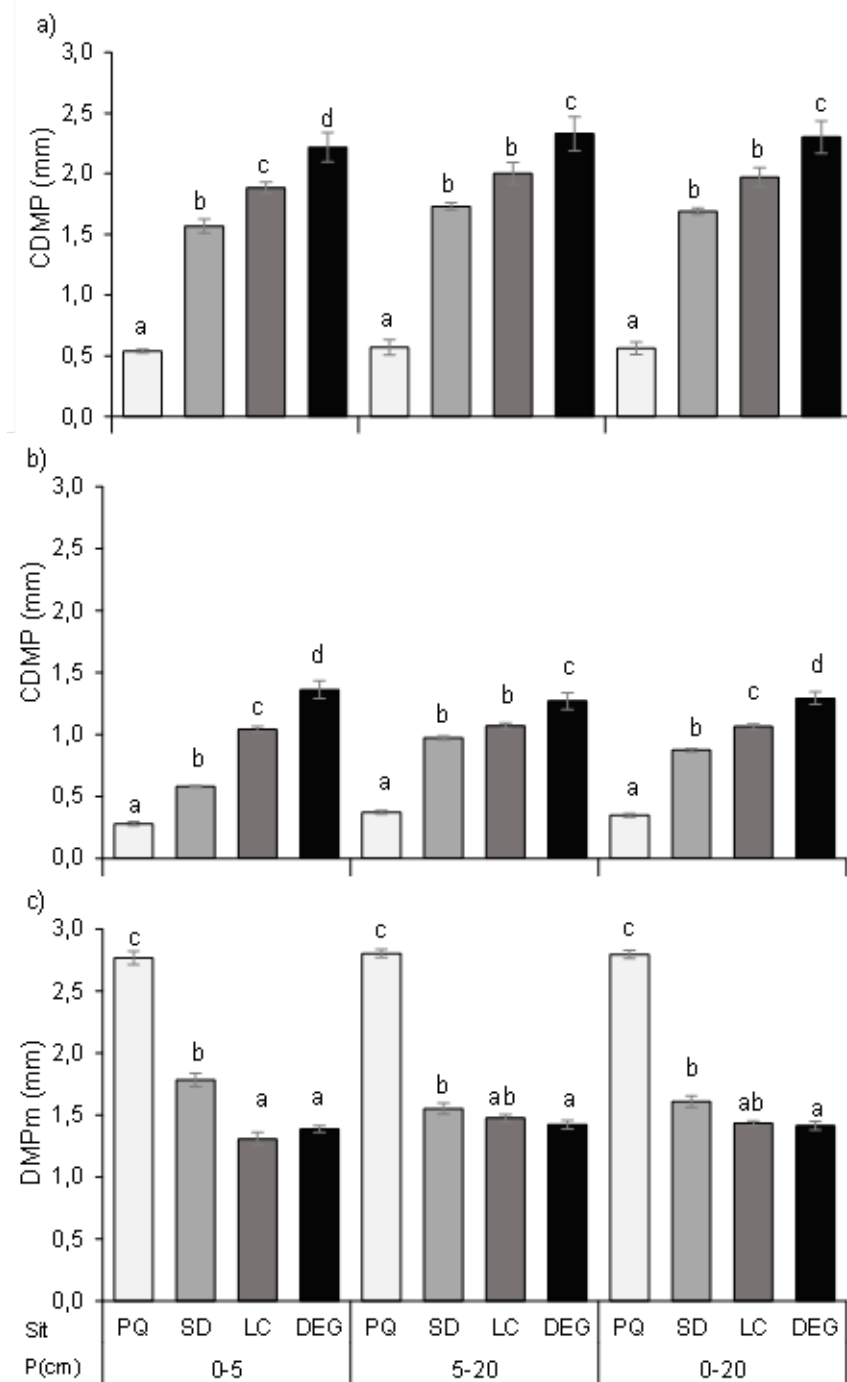


Figura 2. Estabilidad de agregados en términos de cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP) o diámetro medio ponderado medio (DMPm) determinados por a) Método de Six (CDMP) (M1), b) Método de De Lennher y De Boodt (CDMP) (M2), y c) Método de Le Bissonnais (DMPm) (M3) bajo diferentes situaciones de uso (Sit) (PQ: parque; LC: labranza convencional; SD: Siembra directa; DEG: degradado) y tres profundidades (P). Letras iguales sobre cada columna indican que no existen diferencias significativas entre situaciones de uso para cada profundidad ($p > 0,05$). Las barras verticales en cada columna indican el error estándar de la media.

Figure 2. Aggregate stability in terms of change of mean weight diameter (CDMP) or averaged mean weight diameter (DMPm) determined by a) Six method (CDMP) (M1), b) De Leenher y De Boodt method (CDMP) (M2) y c) Le Bissonnais method (DMPm) (M3), under different soil use situations (Sit) (PQ: park; LC: conventional tillage; SD: no-tillage; DEG: degraded) at three depths (P). Equal letters above each column indicate not significant difference among soil use situations within each depth ($p > 0,05$). Vertical bars for each column indicate standard error of the mean.

en promedio, registró mayor DMPc (**Figura 3**) y, a su vez, las menores diferencias ($p > 0,05$) entre las situaciones evaluadas (**Figura 3c**). Asimismo, los resultados de DMPr y DMPd mostraron similar sensibilidad entre sí para separar situaciones (**Figura 3a** y **3b**). Por otro lado, Amezketa *et al.* (1996) informaron que en situaciones o bien muy inestables o bien muy estables los tres pretratamientos presentaron DMP similares entre sí. En este trabajo, sólo en PQ los DMP fueron consistentemente mayores ($p < 0,05$) que las otras

situaciones entre pretratamientos, mientras que, en la situación considerada más inestable (DEG), el DMPc fue superior a las demás bajo agricultura (**Figura 3**). Esto indica que DEG mostró una más elevada EA cuando los agregados fueron humedecidos por capilaridad (explicado especialmente por la masa remanente de agregados $> 2000 \mu\text{m}$, datos no mostrados). Sin embargo, la EA se redujo de manera importante (menor DMP) cuando los agregados fueron sometidos a una disgregación mecánica o un humedecimiento repentino

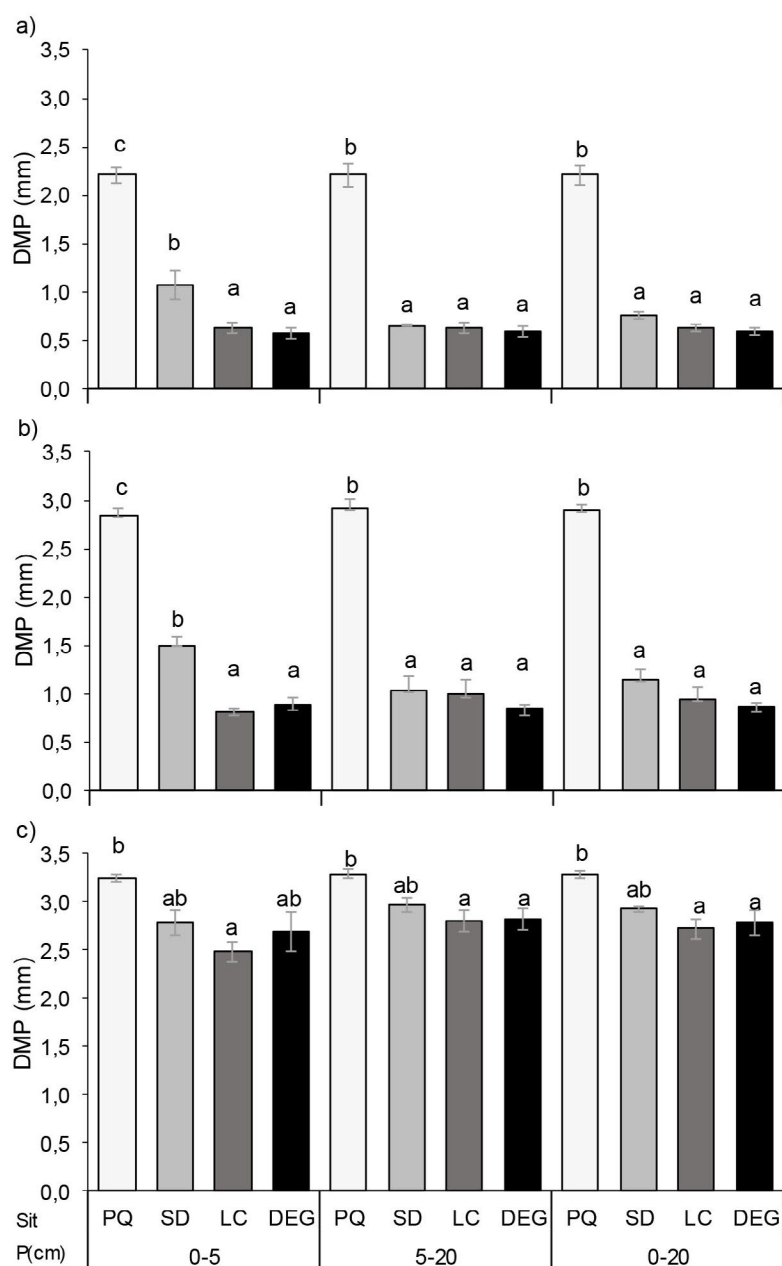


Figura 3. Estabilidad de agregados en términos de diámetro medio ponderado (DMP) para los tres pretratamientos del método Le Bissonnais, a) humedecimiento repentino, b) disgregación y c) humedecimiento por capilaridad, bajo diferentes situaciones de uso (Sit) (PQ: parque; LC: labranza convencional; SD: Siembra directa; DEG: degradado) y tres profundidades (P). Letras iguales sobre cada columna indican que no existen diferencias significativas entre situaciones de uso para cada profundidad ($p > 0,05$). Las barras verticales en cada columna indican el error estándar de la media.

Figure 3. Aggregate stability in terms of mean weight diameter (DMP) for the three pretreatments of the method of Le Bissonnais, a) fast wetting, b) mechanical disintegration, and c) wetting by capillarity, under different soil use situations (Sit): (PQ: park; LC: conventional tillage; SD: no-tillage; DEG: degraded) at three depths (P). Equal letters above each column indicate not significant difference among soil use situations within each depth ($p > 0,05$). Vertical bars for each column indicate standard error of the mean.

(Figura 3b y 3c). Según lo mencionado, los métodos más sensibles para separar las situaciones de uso y manejo planteadas serían M1 y M2, pero M2 tendió a presentar menor variabilidad total que M1 en la capa arable del suelo (0-20 cm) lo que implica la obtención de resultados más consistentes (menos erráticos) de EA que con M2 (coeficiente de variación M1=8,9±2,7 % y M2=5,1±1,1 %).

Otro criterio de selección entre métodos de determinación de EA podría ser el tiempo insumido para obtener el resultado final (CDMP o DMPm, según correspondiera). Se realizó una estimación

del tiempo requerido para obtener la EA de una muestra con cada metodología tomando como modelo lo informado por Gabioud *et al.* (2011) para M3. Se tomó como criterio la consideración del máximo tiempo insumido por cada paso de las metodologías (pesaje, pretratamientos, tamizados y procesamiento de la información, ver Materiales y Métodos) y el máximo tiempo de espera requerido para el correcto secado de las muestras con la capacidad operativa del equipamiento disponible en el laboratorio (72 h de secado de muestras a 50°C para M1, 24 h de secado de muestras a 105°C para M2 y 60 h de secado de muestras

a 40°C para M3). Para cada se método se tuvieron en cuenta los solapamientos entre pasos para optimizar el tiempo global del procedimiento y la cantidad de muestras simultáneas que podrían procesarse. El tiempo transcurrido para obtener la EA (*i.e.* desde que se cuenta con la muestra tamizada por 8000 μm y seca hasta que se obtiene el resultado final) de una muestra individual fue de 130, 57 y 74 h para M1, M2 y M3, respectivamente. Sin embargo, cuando se ajustó al número de muestras que se podían realizar en simultáneo se determinó un tiempo requerido por muestra de 8,7, 9,5 y 9,2 h para M1 (15 muestras en simultáneo), M2 (6 muestras en simultáneo) y M3 (8 muestras en simultáneo), respectivamente. Por lo tanto, bajo las condiciones de pericia y entrenamiento del operario y la capacidad operativa del equipamiento disponible para este trabajo, el tiempo requerido resultó ser similar para los tres métodos de determinación de EA. Por tal motivo, el tiempo de procesamiento de las muestras no resultó un criterio discriminante para la selección de metodologías en este estudio. Asimismo, los métodos correlacionaron muy significativamente entre sí (**Tabla 2**). Por lo tanto, la selección de los métodos de determinación de EA se limi-

ta a la sensibilidad para separar las situaciones de uso y manejo de suelo evaluadas. Así, para estudios específicos de la EA para los suelos del SEB con textura superficial franca se recomendarían los métodos M1 o M2.

Se ha documentado que la estabilidad de la fracción de los agregados más grandes (fracción $>250 \mu\text{m}$, MA), presentaría mayor sensibilidad a los cambios en el uso del suelo que la EA de la masa total del suelo (Six *et al.*, 1998; Panettieri *et al.*, 2015). En este sentido, la obtención de la masa o la estabilidad de alguna de estas fracciones de agregados podría permitir simplificar las técnicas para monitorear la EA. Recientemente se ha reportado para suelos del SEB una muy alta correlación entre la masa remanente de MA grandes ($>2000 \mu\text{m}$) luego de un HR y tamizado en agua con la EA obtenida por M1 (García *et al.*, 2020). Por lo tanto, podría considerarse la obtención de esta fracción de agregados para un monitoreo rápido y sencillo de la EA de los suelos lo que favorecería el seguimiento frecuente de la EA como un indicador de la salud física edáfica.

CONCLUSIÓN

Para las condiciones de este trabajo, los tres métodos evaluados para determinación de la EA insumieron un tiempo similar para la obtención del resultado final para cada muestra. Además, si bien los tres métodos permitieron separar situaciones de uso y manejo del suelo por su EA y estuvieron correlacionados muy significativamente entre sí, M1 y M2 lo hicieron con mayor sensibilidad y efectividad que M3, siendo recomendable cualquiera de ellos para estudios específicos de la EA en suelos como los del SEB con textura superficial franca. Sin embargo, es necesario evaluar el desempeño de estos métodos en un rango más grande de clases texturales y de situaciones de uso y manejo para poder dar mayor soporte a la recomendación de su uso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado durante el desarrollo de una Beca de Entrenamiento del primer autor en el marco del convenio INTA-AUDEAS-

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los métodos de estabilidad de agregados evaluados (M1: Método de Six; M2: Método de De Leenher y De Boodt, y M3: Método de Le Bissonnais) a tres profundidades. Todas las correlaciones fueron altamente significativas ($p < 0,01$).

Table 2. Pearson correlation coefficients (r) between the aggregate stability methods evaluated (M1: Six method; M2: De Leenher y De Boodt method, and M3: Le Bissonnais method) at three depths. All correlations were highly significant ($p < 0.01$).

Profundidad (cm)	Método	r
0-5	M1 vs M2	0,93
	M1 vs M3	-0,95
	M2 vs M3	-0,86
5-20	M1 vs M2	0,97
	M1 vs M3	-0,95
	M2 vs M3	-0,96
0-20	M1 vs M2	0,98
	M1 vs M3	-0,96
	M2 vs M3	-0,94

CONADEV. La investigación fue financiada por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (a través del proyecto PICT 2012-1092), la Universidad Nacional de Mar del Plata (a través de los proyectos AGR595/19 y AGR614/20 y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (a través del proyecto específico PNCYO 1127032).

BIBLIOGRAFÍA

- Agostini, MA; GF Domínguez; GA Studdert & SN Tourn. 2014. Intensificación del uso del suelo en el Sudeste Bonaerense: impacto sobre algunas variables edáficas. Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- Almajmaie, A; M Hardie; T Acuna & Colin Birch. 2017. Evaluation of methods for determining soil aggregate stability. *Soil Tillage Res.* 167:39–45. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.003>
- Amezqueta, E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *J. Sustain. Agr.* 14:83–151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08.
- Amezqueta, E; MJ Singer & Y Le Bissonnais. 1996. Testing a new procedure for measuring water-stable aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:888–894. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000030030x>
- Aparicio, VC & JL Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 96:155–165. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.05.006>.
- Beare M; M Cabrera; P Hendrix & D Coleman. 1994. Aggregate-protected and unprotected organic matter pool in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:787–795. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030021x>
- Bronick, CJ & R LaL. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124:3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Bruce-Okine, E & R Lal. 1975. Soil erodibility as determined by a raindrop technique. *Soil Sci.* 119:149–157.
- Cambardella, C & E Elliott. 1992. Particulate soil organic matter. Changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:777–783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.
- Castiglioni, MG & FB Behrends Kraemer. 2019. Short-term effect of cover crops on aggregate stability assessed by two techniques. *Ciencia del Suelo* 37 (2): 298–314.
- De Leenher, L & M De Boodt. 1958. Determination of aggregate stability by change in mean weight diameter. En: Proc. Int. Symp. On Soil Structure. Medeligen. Van de Landbowhoge School. Ghent, Belgium. pp 290–300.
- Domínguez, GF; NV Diovisalvi; GA Studdert & MG Monterubianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on Mollisols of the Southeastern Pampas. *Soil Tillage Res.* 10:293–100. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.020>.
- Domínguez, GF, GV García, GA Studdert MA Agostini, SN Tourn & MN Domingo. 2016. Is anaerobic mineralizable nitrogen suitable as soil health indicator? *Spanish Journal of Soil Science.* 6:82–97. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2016.V6.N2.01>.
- Durán, A; H Morrás; GA Studdert & X Liu. 2011. Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America. *Chin. Geogr. Sci.* 21, 511–530. <https://doi.org/10.1007/s11769-011-0491-z>.
- Gabioud, EA; MG Wilson & MC Sasal. 2011. Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del Suelo.* 29:129–139.
- García, GV; SN Tourn; MF Roldán; M Mandiola & GA Studdert. 2020. Simplifying the determination of aggregate stability indicators of Mollisols. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 51:481–490. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1717513>.
- INTA, 1979. Cartas de suelo de la República Argentina. Hoja 3757-31 Balcarce. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Secretaría de Agricultura de Ganadería y Pesca, Buenos Aires, Argentina.
- INTA. 2017. Estación Meteorológica de Unidad Integrada Balcarce. [en línea]. <https://inta.gob.ar/paginas/agrometeorologia-balcarce>. Último acceso: 10 de junio de 2017].
- Karlen, D; C Cambardella; J Kovar & T Colvin. 2013. Soil quality response to long-term tillage and crop rotation practices. *Soil Tillage Res.* 133:56–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.05.013>
- Kemper, WD & RC Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution, In: Klute A (Ed). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods.* Agronomy Monograph N° 9 (2nd Edition), American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, EUA. 425–442
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47:425–437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>.
- Novelli, LE; OP Caviglia; MG Wilson & MC Sasal. 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.013>.
- Panettieri, M; A Berns; B Knicker; J Murillo & E Madejón. 2015. Evaluation of seasonal variability of soil biogeochemical properties in aggregate-size fractionated soil

- under different tillages. *Soil Tillage Res.* 151:39–49. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.02.008>
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Acceso 20 Marzo 2019. <https://www.R-project.org/>.
- Rabot, ER; M Wiesmeier; S Schlüter & HJ Vogel. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* 314:122-137.
- Roldán, MF; GA Studdert; CC Videla; S San Martino & LI Picone. 2014. Distribución de tamaño y estabilidad de agregados en molisoles bajo labranzas contrastantes. *Ciencia del Suelo.* 32:247-257.
- Sainz Rozas, H; M Eyherabide; G Larrea; N Martínez Cuesta; H Angelini; N Reussi Calvo & N Wyngaard. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. *Actas Simposio Fertilidad 2019. Conocer más, crecer mejor.* Rosario, Santa Fe, Argentina. Mayo 2019. P 141-158.
- Schlichting, E; HP Blume & K Stahr. 1995. *Bodenkundliches Praktikum.* Paul Parey. Hamburg, Germany.
- Six, J; ET Elliott; K Paustian & JW Doran. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 62:1367-1377. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200050032x>
- Six, J; H Bossuyt; S Degryze & K Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79:7–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to soil taxonomy.* USDA, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.
- Studdert, GA; GF Domínguez; M Zagame & JC Carabaca. 2015. Variación estacional del carbono orgánico particulado y nitrógeno anaeróbico. *Ciencia del Suelo* 33:65-77.
- Suero E & A Garay. 1978. Estado estructural del horizonte superficial de suelos Argiudoles del S.E. bonaerense. II. Modificaciones producidas por el manejo a que han sido sometidos los suelos. *Actas 8ª Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo.* Buenos Aires, Argentina.
- Tourn, SN; GA Studdert & CC Videla. 2019. Ecological agriculture intensification through crop-pasture rotations does improve aggregation of Southeastern-Pampas Mollisols. *Soil Tillage Res* 195:104411. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104411>