

CARBONO EXTRAÍBLE EN AGUA CALIENTE COMO INDICADOR DE SALUD DE MOLISOLES DEL SUDESTE BONAERENSE

SILVIA RODRIGUEZ^{1*}; MARÍA CECILIA BAEZA¹⁻²; GISELA VANESA GARCÍA¹⁻³; GERMÁN FRANCO DOMÍNGUEZ¹; NATALIA LILIANA CLEMENTE¹; GUILLERMO ALBERTO STUDDERT¹

Recibido: 21/10/2019

Recibido con revisiones: 16/03/2020

Aceptado: 16/03/2020

RESUMEN

Una agricultura sustentable requiere indicadores tempranos del estado de salud edáfica (ISE). Se necesitan variables fácilmente medibles como el carbono extraíble en agua caliente (CAC) para favorecer su uso. El objetivo fue evaluar el CAC como ISE analizando: i) la magnitud de los cambios en CAC producidos por el uso agrícola, en comparación con los producidos en el COT y en el COP, y ii) la relación entre CAC, COP, COT, nitrógeno de amonio producido durante incubaciones anaeróbicas cortas (NAN) con estabilidad de los agregados. Se analizaron muestras de suelo (0-5 y 5-20 cm) de 32 lotes de producción (LP) y situaciones pseudoprístinas (SP) localizados en el sudeste bonaerense. Se determinó: densidad aparente (DA), cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP), COT, COP, NAN y CAC. En 0-20 cm, el CAC varió entre 0,69 y 1,41 g kg⁻¹ para los LP y entre 0,75 y 2,36 g kg⁻¹ para las SP, representando, en promedio, 3,23% y 3,57% del COT, respectivamente. Se relacionó negativamente con la DA y el CDMP, y positivamente con COT y COP expresados como stock referidos a una masa equivalente (COT_{ME} y COP_{ME}, respectivamente) y con NAN. Además, el CAC en los LP cayó 35%, respecto a las SP, y COP_{ME} y COT_{ME} cayeron 62% y 25%, respectivamente. El CAC podría utilizarse como ISE, ya que fue sensible a los cambios por el uso agrícola del suelo y se relacionó con otras propiedades edáficas utilizadas como ISE. Su determinación es sencilla, rápida y económica, favoreciendo su adopción por los laboratorios de análisis.

Palabras clave: carbono orgánico particulado, estabilidad de los agregados, nitrógeno mineralizable

HOT-WATER EXTRACTABLE CARBON AS INDICATOR OF SOUTHEASTERN BUENOS AIRES PROVINCE MOLLISOL'S HEALTH

ABSTRACT

Sustainable agriculture requires early soil health indicators (ISE). Some easily measurable variables, as hot-water extractable carbon (CAC), are needed to monitor soil health status frequently. The aim of this study was to evaluate CAC as an ISE. We explored: i) the magnitude of the changes in CAC, total organic carbon (TOC), and particulate organic carbon (POC) due to cropping, and ii) the relationship between CAC, POC, TOC, and ammonium nitrogen mineralized in anaerobiosis (NAN) with aggregate stability. Soil samples (0-5 and 5-20 cm) from 32 production fields (LP) and pseudo-pristine situations (SP) from Southeastern Buenos Aires province were analyzed for: bulk density (DA), change of mean weight aggregate diameter (CDMP), TOC, POC, NAN, and CAC. At 0-20 cm depth, CAC ranged between 0.69 and 1.41 g kg⁻¹ for LP and between 0.75 and 2.36 g kg⁻¹ for SP. Hot-water extractable carbon represented 3.23% and 3.57% of TOC for LP and SP, respectively. Hot-water extractable carbon was negatively related to DA and CDMP, and positively related to TOC or POC expressed as stock related to an equivalent mass (TOC_{ME} and POC_{ME}), and to NAN. Under LP CAC dropped 35% respect to SP, whereas POC_{ME} and TOC_{ME} decreased 62% and 25%, respectively. The CAC could be used as an ISE, given it was sensitive to the changes produced by cropping and it related to some other soil properties that indicate soil health status. Its determination is simple, fast, and cheap, which favors its adoption by commercial soil testing laboratories.

Key words: particulate organic carbon, aggregate stability, mineralizable nitrogen.

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

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina

3 Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Argentina

* Autor de contacto: rodriguez.si@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El creciente interés a nivel internacional por la degradación del recurso suelo y la reducida sostenibilidad agrícola ha conducido a la necesidad de evaluar la capacidad que tienen los suelos bajo uso agrícola para cumplir adecuadamente con su función en el agroecosistema, lo que se conoce como salud edáfica (Lal *et al.*, 2007). Ésta no puede ser medida directamente, sino que se requiere integrar la información proporcionada por indicadores de salud edáfica (ISE) (físicos, químicos y/o biológicos) (Karlen *et al.*, 2019). Las variables a utilizar como ISE deben poseer ciertas características tales como ser sensibles para detectar cambios en el corto a mediano plazo, fáciles de medir e interpretar, sencillas y económicas de determinar, y deberían relacionarse con una o más funciones y/o propiedades edáficas (Doran *et al.*, 1999).

La materia orgánica (MO) es el componente del suelo más utilizado como ISE y de la sustentabilidad agronómica (Chen *et al.*, 2009). La MO es una mezcla heterogénea de sustancias carbonadas de complejidad variable y en continuo estado de transformación (Lehmann & Kleber, 2015). En el suelo, la MO puede estar protegida de la descomposición microbiana o libre y/o formando parte de macroagregados poco estables y muy expuesta a la acción de los organismos, es decir, no protegida, constituyendo la fracción más lábil (Six *et al.*, 2002).

La fracción lábil de la MO está muy relacionada con el ciclado y la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la formación y estabilidad de los agregados (EA) y, por lo tanto, está estrechamente asociada con la productividad del suelo (Quiroga & Studdert, 2014). Si bien esta fracción representa una proporción comúnmente pequeña de la MO total, es la más sensible a los efectos de diferentes usos del suelo. Por ello, su variación puede utilizarse como indicador temprano del efecto de la rotación de cultivos, de la fertilización o del sistema de labranza sobre la salud edáfica (Haynes, 2005). La mayoría de los estudios realizados sobre suelos de la Región Pampeana Argentina han reportado que los cambios en el corto plazo debidos al manejo agronómico se manifiestan en la MO lábil en mayor medida que en la fracción estable (Eiza *et al.*, 2005; Cozzoli *et al.*, 2010; Álvarez & Álvarez, 2016; Duval *et al.*, 2016a; Duval *et al.*, 2016b). En tal sentido,

es necesario identificar y caracterizar qué fracciones lábiles de la MO reúnen las características para ser consideradas ISE (Doran *et al.*, 1999; Haynes, 2005).

En el sudeste bonaerense (SEB) se ha demostrado que, tanto el carbono (C) orgánico (CO) en la denominada fracción liviana o libre separada por densidad (Galantini, 2008), como el CO en la fracción particulada (COP) separada por tamaño de partícula (Cambardella & Elliott, 1992), son indicadores más sensibles que el CO total (COT) para manifestar diferencias por efecto del manejo (Studdert *et al.*, 1997; Eiza *et al.*, 2005; Diovisalvi *et al.*, 2008). Asimismo, se ha demostrado la estrecha relación del COP con la capacidad del suelo de proveer nitrógeno (N) y con la EA (Domínguez *et al.*, 2016). Si bien, la determinación de CO en la fracción liviana y de COP son métodos relativamente simples, demandan mucho tiempo y horas-hombre, lo que desalienta su uso generalizado y de rutina (Janzen *et al.*, 1992; Diovisalvi *et al.*, 2014) y los limita como ISE accesibles al uso por parte de productores y asesores.

Existen otros métodos que cuantifican fracciones lábiles de la MO que podrían ser más fácilmente utilizados, pero que aún no están estandarizados para las condiciones edafoclimáticas del SEB. Entre ellos puede mencionarse el método conocido como C extraíble en agua caliente (CAC) (Ghani *et al.*, 2003). Esta técnica implica la separación de una fracción lábil de la MO (empleando solamente agua destilada y un reducido número de horas-hombre) y la posterior cuantificación de C en dicha fracción (Ghani *et al.*, 2003).

El CAC podría utilizarse como ISE ya que, dada su labilidad y tamaño cuantificable (representa hasta un 5-6% del COT), podría dar una indicación temprana de la pérdida de MO (Ghani *et al.*, 2003). El CAC se ha utilizado como un indicador sensible de los cambios en la MO y en la EA inducidos por el manejo de un amplio rango de tipos de suelo (Haynes, 2005). Numerosos autores han informado una mejor correlación de la EA con el contenido de carbohidratos extraíbles en agua caliente (componentes del CAC) que con la de carbohidratos totales medidos por hidrólisis ácida (Haynes & Francis, 1993; Haynes & Beare, 1997). Además, el CAC se relacio-

na significativamente con otras fracciones lábiles de la MO como el C de la biomasa microbiana, el C soluble en agua, y el N de amonio producido durante incubaciones anaeróbicas cortas (NAN) (Ghani *et al.*, 2003). Estos autores informaron que el CAC reflejó cambios más pronunciados ante distintas intensidades de pastoreo y fertilización en comparación con otras variables edáficas (e.g. COT y C soluble en agua). Asimismo, Haynes y Francis (1993) reportaron un incremento en el CAC cuando suelos cultivados por un tiempo prolongado fueron destinados a pastura, y una disminución cuando se cultivaron suelos vírgenes.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento del CAC como ISE a través del aná-

lisis de: i) la magnitud de los cambios en CAC producidos por el uso agrícola, en comparación con los producidos en el COT y en el COP, y ii) la relación de CAC, COP y COT entre sí y con otras propiedades del suelo (*i.e.* EA y NAN).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de estudio

Se seleccionaron 32 sitios de estudio correspondientes a establecimientos de producción agrícola distribuidos en el SEB (partidos de Balcarce, Benito Juárez, General Pueyrredón, General Alvarado, General Madariaga, Lobería, Necochea, San Cayetano, Tandil y Tres Arroyos) (**Figura 1**), cubriendo las clases texturales superficiales fran-

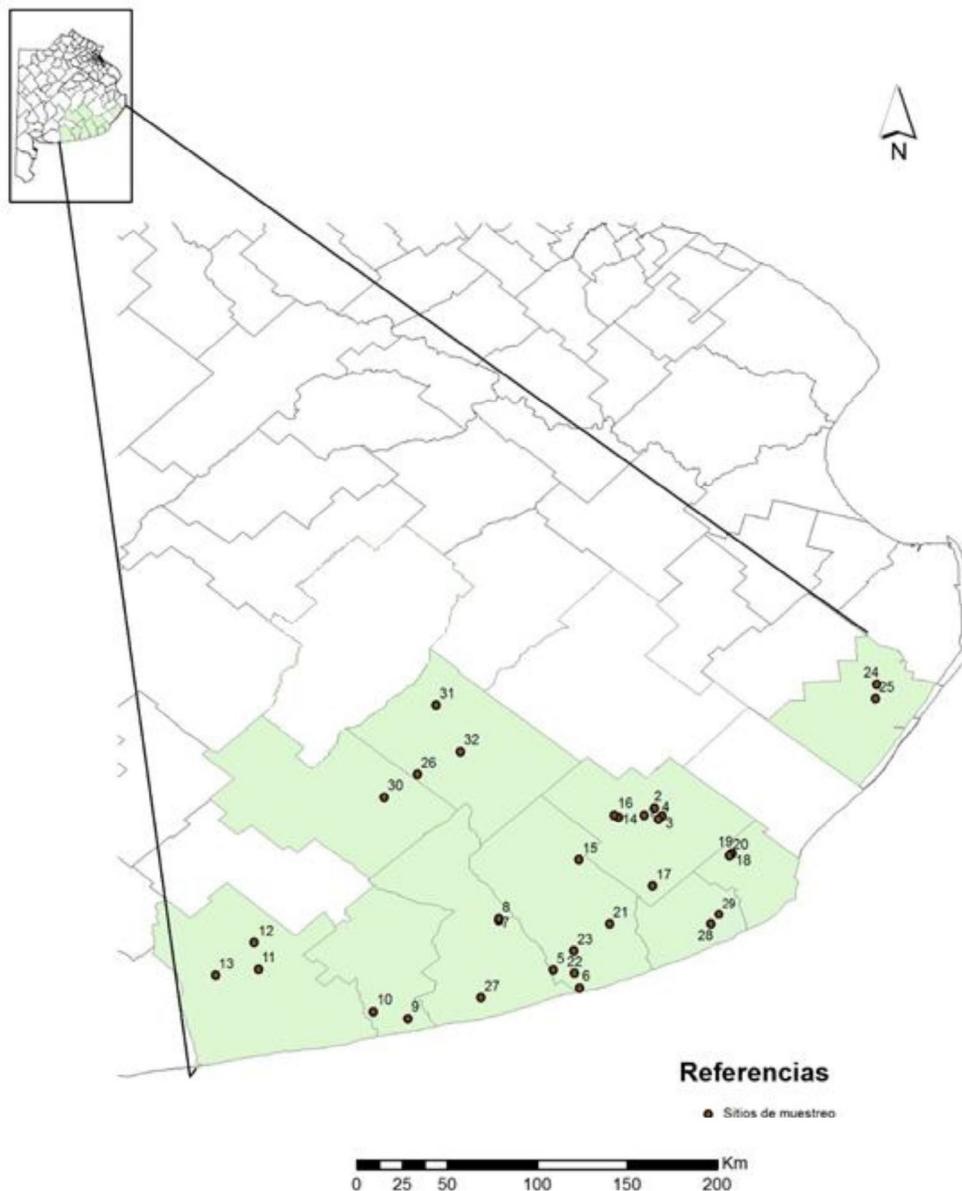


Figura 1: Localización de los sitios de muestreo en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. n=32.

Figure 1: Soil-sampling-sites location in the Southeastern Buenos Aires province. n=32.

co arenoso, franco arcillo arenoso, franco y franco arcilloso (Soil Survey Staff, 2014). En cada sitio de muestreo, se extrajeron muestras de suelo de un lote de producción agrícola (LP) y de una situación de referencia representada por sectores de parque o zonas sin disturbar por lo menos durante los últimos 30 años (*i.e.* equiparable a la condición original para ese sitio), denominadas de aquí en adelante como pseudoprístinas (SP). La mayoría de los LP tenía más de 15 años de agricultura continua y más de 10 años bajo siembra directa (SD).

Muestreo de suelos y determinaciones analíticas

En los LP y en las SP de cada sitio de muestreo se delimitaron áreas de 400 m² en las que se extrajeron muestras de suelo en julio-agosto de 2016 con un muestreador tubular de 4,41 cm de diámetro, a dos profundidades, 0-5 y 5-20 cm (compuestas, respectivamente, por 15 y 5 sub-muestras por muestra). Se registró el volumen, el peso húmedo y se tomó una porción para la determinación gravimétrica del contenido de agua, para determinar la densidad aparente (DA) (Agostini *et al.*, 2014). El resto de la muestra se secó en estufa a 50°C, con circulación forzada de aire, se molió hasta pasar por un tamiz de 2000 μm , y se reservó para las determinaciones de contenido de limo más arcilla (Li+As), COT, COP y NAN.

El contenido de Li+As se determinó aplicando parcialmente el método de Bouyoucos (Gee & Bauder, 1986), separando solamente la fracción arena de Li+As por tamizado en húmedo de las partículas minerales libres de fracción orgánica con tamiz de 50 mm de apertura de malla y pesado de las arenas recuperadas en el tamiz. El contenido de Li+As se obtuvo por diferencia entre el peso de la fracción mineral total y la fracción arena recuperada. La concentración de COT fue determinada por combustión húmeda manteniendo la temperatura de reacción (120°C por 90 min) (Schlichting *et al.*, 1995). Para la determinación de COP se realizó el fraccionamiento granulométrico de las muestras previamente dispersadas mediante tamizado en húmedo a través de un tamiz de 50 μm (Cambardella & Elliott,

1992). Se recuperó la fracción más fina (< 50 μm), se secó en estufa a 50°C, se molió y se determinó la concentración del CO asociado a los minerales (COA) según lo descrito anteriormente para COT (Schlichting *et al.*, 1995). El contenido de COP se determinó por diferencia entre el de COT y el de COA (Cambardella & Elliott, 1992). Los contenidos de COT y COP se expresaron también en stock referido a una masa de suelo fija (masa equivalente, COT_{ME} y COP_{ME}, respectivamente) calculados según Ellert *et al.* (2007). Dado que las situaciones SP presentaron las menores DA, se tomó su masa como masa de suelo de referencia para los correspondientes LP. Para la determinación del NAN se utilizó el método de incubación anaeróbica corta a 40°C durante 7 días, según Keeney (1982) y la determinación de N de amonio producido durante la incubación, se realizó por destilación por arrastre con vapor (Keeney & Nelson, 1982).

Además, se extrajeron muestras de suelo (compuestas por 5 submuestras) con una pala a las mismas profundidades anteriormente mencionadas, desechando las partes de suelo afectadas por el corte de la herramienta. Estas muestras fueron disgregadas a mano por sus planos naturales de ruptura hasta pasar por un tamiz de 8000 μm . Una parte de esta muestra se conservó a 4°C, con el contenido de agua de campo (*i.e.* aproximadamente capacidad de campo), para la posterior determinación de CAC. El resto se secó en estufa a 50°C, con circulación forzada de aire, y se determinó el cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP) siguiendo el procedimiento descrito por Six *et al.* (1998) y Six *et al.* (2000) para expresar la EA.

El contenido de CAC se determinó según Ghani *et al.* (2003), con la adaptación de la mecánica de agitado propuesta por Zhang *et al.* (2006). Brevemente, el CAC se extrajo con agua desionizada en una relación suelo:agua de 1:10, durante 16 h en baño termostático a 80°C. Antes y después de la extracción, las suspensiones se agitaron durante 30 min (agitador rotacional, 50 rpm). Los extractos se obtuvieron por centrifugación (1300 RCF por 10 min) y se filtraron (filtro de membrana de nitrato de celulosa de 0,45 μm). El contenido de C en el sobrenadante se deter-

minó por combustión húmeda según se describió más arriba (Schlichting *et al.*, 1995).

Todas las determinaciones se realizaron en las muestras correspondientes a las profundidades de 0-5 y de 5-20 cm. Se calculó, además, el valor de las variables para la profundidad de 0-20 cm, mediante el promedio de los resultados obtenidos en los dos estratos mencionados (0-5 y 5-20 cm) ponderado por su espesor (5 y 15 cm, respectivamente) o la suma, según correspondiera.

Análisis estadístico

El presente trabajo fue un estudio de tipo observacional y, por lo tanto, sin un diseño experimental pre-planeado. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa estadístico "R" (R Core Team, 2015) con un nivel de significación del 0,05. Las variables se analizaron mediante el ajuste de modelos mixtos en función de la situación de uso (LP y SP) y la profundidad (0-5 y 5-20 cm) y la interacción entre ambas. Además, se consideró la dependencia espacial de las profundidades en la muestra. Cuando la interacción fue significativa, se realizaron contrastes de medias de a pares a través del paquete Estimated Marginal Means (emmeans). Para la profundidad de 0-20 cm se realizó el análisis de la varianza en función de la situación de uso. Se comprobó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Para establecer el grado de asociación entre las variables evaluadas se obtuvieron coeficientes de correlación de Pearson.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de Li+As presentó un valor promedio general de $581,7 \pm 89,2 \text{ g kg}^{-1}$ y mostró un amplio rango de variación ($335,9 \text{ g kg}^{-1}$ a $741,1 \text{ g kg}^{-1}$). El contenido promedio de Li+As no difirió significativamente entre los LP y las SP, para ninguna de las profundidades estudiadas (datos no mostrados).

La DA en los LP fue significativamente mayor que en las SP a 0-5, 5-20 y 0-20 cm, posiblemente debido a una mayor compactación del suelo producto de los años bajo SD. Esto coincide con lo reportado por Fabrizio *et al.* (2005) para

suelos del SEB bajo SD por un período de 4 años. Para la capa de 0-20 cm, los valores de DA variaron entre 1,04 y 1,45 Mg m^{-3} (promedio $1,28 \pm 0,08 \text{ Mg m}^{-3}$) en los LP y entre 0,93 y 1,32 Mg m^{-3} (promedio $1,15 \pm 0,10 \text{ Mg m}^{-3}$) en las SP. Asimismo, a 0-20 cm se registró un mayor y significativo CDMP (menor EA) en los LP (1,72 a 3,23 mm, promedio $2,59 \pm 0,32 \text{ mm}$) que en las SP (0,23 a 2,30 mm, promedio $1,28 \pm 0,67 \text{ mm}$). Esta tendencia fue también observada en los 5 cm superficiales y en la capa subyacente (5-20 cm) (datos no mostrados). La gran diferencia en CDMP detectada entre los LP y las SP, confirma que la EA es un parámetro físico del suelo sensible al uso y manejo (Aparicio & Costa, 2007).

En los LP, si bien el sistema de labranza empleado en la gran mayoría fue SD, el contenido de COT_{ME} fue significativamente menor que el de las SP, para las tres profundidades estudiadas. Para la capa de 0-20 cm, el contenido de COT_{ME} en los LP fue, en promedio $71,7 \pm 14,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$, un 25% menor respecto a las SP ($95,5 \pm 19,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$), lo cual se debería, principalmente, a diferencias en la cantidad y calidad del material orgánico que vuelve al suelo en cada caso (Studdert & Echeverría, 2000; Domínguez *et al.*, 2009; Duval *et al.*, 2016a). Para la profundidad de 0-20 cm, el contenido de COP_{ME} en los LP fue en promedio $9,40 \pm 4,53 \text{ Mg C ha}^{-1}$, un 62% menor respecto a las SP ($24,7 \pm 10,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Esta mayor variación en el contenido de COP_{ME} en comparación con COT_{ME} pone de manifiesto una sensibilidad superior del COP_{ME} para detectar cambios en el uso del suelo (Eiza *et al.*, 2005; Haynes, 2005; Diovisalvi *et al.*, 2008; Domínguez *et al.*, 2009), lo que podría deberse a que el COP_{ME} comprende a las fracciones orgánicas fácilmente mineralizables (Gregorich *et al.*, 2016).

Otro parámetro del suelo relacionado estrechamente con los cambios en las fracciones lábiles de la MO y muy sensible al efecto de las prácticas de manejo es el NAN (Soon *et al.*, 2007). En los sitios muestreados en el presente trabajo, las SP presentaron mayores valores promedio de NAN que los LP para las tres profundidades estudiadas. Para la capa de 0-20 cm, los valo-

res promedio de NAN fueron de $109,7 \pm 35,3$ mg N-NH₄⁺ (kg de suelo)⁻¹ en las SP, y de $62,0 \pm 15,3$ mg N-NH₄⁺ (kg de suelo)⁻¹ para los LP.

En la **Tabla 1** se presentan los contenidos mínimo, máximo y promedio de CAC y el CAC como porcentaje del COT (CAC/COT) para todas las situaciones estudiadas. Independientemente de la situación de uso, el contenido promedio de CAC, al igual que el contenido de COP y el de COT (datos no mostrados), disminuyó con la profundidad. Esta disminución del contenido de C para la capa de 5-20 cm, respecto a los 5 cm superficiales se produce por la ausencia de remoción y la disposición superficial de los residuos tanto en las SP como en los LP bajo SD (Franzluebbers, 2002). Numerosos autores, trabajando en otras condiciones edafoclimáticas y bajo diferentes situaciones de uso del suelo, han reportado una disminución del contenido de CAC a medida que aumenta la profundidad (Zhang *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2009; Armas-Herrera *et al.*, 2013; Hamkalo & Bedernichek, 2014; Bongiorno *et al.*, 2019).

El contenido promedio de CAC fue significativamente mayor en las SP que en los LP, para las tres profundidades estudiadas (**Tabla 1**). Las diferencias en los contenidos de CAC entre los LP y las SP ponen de manifiesto el deterioro que han

sufrido los suelos en el SEB como consecuencia del uso agrícola. En la capa de 0-20 cm, el contenido de CAC en los LP fue, en promedio, 35% menor respecto a las SP (**Tabla 1**). Esta disminución fue menor que la reportada por Fan *et al.* (2013) y por Hamkalo y Bedernichek (2014). Fan *et al.* (2013) informaron disminuciones del 58,8% al considerar los 30 cm superficiales de Molisoles en China cultivados respecto a los no cultivados. Asimismo, Hamkalo y Bedernichek (2014) reportaron disminuciones del 43,3% para la capa de 0-50 cm de Alfisoles (tipo *podzólicos*) en Ucrania, al comparar suelos cultivados por varias décadas con los mismos suelos bajo la vegetación de bosque original.

La relación CAC/COT, tanto para las SP como para los LP (**Tabla 1**), se encuentra dentro del rango reportado en la bibliografía para diferentes tipos de suelos y situaciones de uso (Haynes, 2005; Balaria *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2009; Armas-Herrera *et al.*, 2013; Bongiorno *et al.*, 2019). La relación CAC/COT en los LP tendió a disminuir con la profundidad, lo cual coincide con lo reportado por Chen *et al.* (2009), Armas-Herrera *et al.* (2013) y Bongiorno *et al.* (2019). Además, en los LP dicha relación tendió a ser menor, aunque no significativamente ($P=0,16$), respecto a las SP en la capa de 0-5 cm de profun-

Tabla 1. Contenidos mínimo, máximo y promedio (\pm desvío estándar) de carbono extraíble en agua caliente (CAC) y contenido promedio (\pm desvío estándar) de CAC como porcentaje del contenido de carbono orgánico total (COT) (expresado en concentración a profundidad fija) (CAC/COT), en los lotes de producción (LP) y en las situaciones seudoprístinas (SP), a tres profundidades (Prof.), en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires. Letras iguales indican diferencias no significativas ($\alpha=0,05$) entre situaciones de uso dentro de una misma profundidad.

Table 1. Minimum, maximum and average (\pm standard deviation) contents of hot-water extractable carbon (CAC) and average (\pm standard deviation) CAC content as proportion of total soil organic carbon content (COT) (expressed as concentration at fixed depth) (CAC/COT), in production fields (LP) and pseudo-pristine situations (SP), at three depths (Prof.), in soils of the Southeastern Buenos Aires province. Equal letters indicate significantly differences ($\alpha=0,05$) between soil use situations within the same soil depth.

Situación de uso	Prof.	CAC			CAC/COT
		Mínimo	Máximo	Promedio	
	-- cm --	----- g C (kg de suelo) ⁻¹ -----			---- % ----
LP	0-5	0,68	1,63	1,19 \pm 0,23 b	3,36 \pm 0,60 a
	5-20	0,65	1,37	0,91 \pm 0,19 b	3,18 \pm 0,67 b
	0-20	0,69	1,41	0,97 \pm 0,18 b	3,23 \pm 0,62 b
SP	0-5	0,93	3,09	2,03 \pm 0,59 a	3,57 \pm 0,51 a
	5-20	0,69	2,12	1,32 \pm 0,40 a	3,58 \pm 0,69 a
	0-20	0,75	2,36	1,49 \pm 0,43 a	3,57 \pm 0,56 a

dididad y fue significativamente menor en las otras dos capas estudiadas. Esto puede deberse a que el uso agrícola de los suelos produce una disminución de las fracciones lábiles de C (Domínguez *et al.*, 2016). Además, en las SP la mayor masa radical daría como resultado una mayor rizodeposición de material carbonado y, por lo tanto, una mayor biomasa microbiana, lo que favorece la acumulación de CAC (Haynes & Francis, 1993; Haynes & Beare, 1997; Šeremešić *et al.*, 2013).

El contenido de CAC se relacionó significativamente con el resto de las propiedades del suelo estudiadas. Respecto a las propiedades físicas del

suelo, se observó una relación negativa y altamente significativa ($P < 0,01$) entre el CAC y la DA y entre el CAC y el CDMP. Los coeficientes de correlación de Pearson entre el CAC y la DA fueron $-0,70$, $-0,53$ y $-0,64$ para 0-5, 5-20 y 0-20 cm, respectivamente. Esto indica que, a mayor contenido de CAC, la DA es menor, ya que el CO contribuye a la agregación y, en consecuencia, promueve un mayor espacio poroso (Martínez *et al.*, 2008).

En la **Figura 2** se muestra la relación entre el CDMP y los contenidos de COT_{ME} , COP_{ME} y CAC, para las tres profundidades estudiadas.

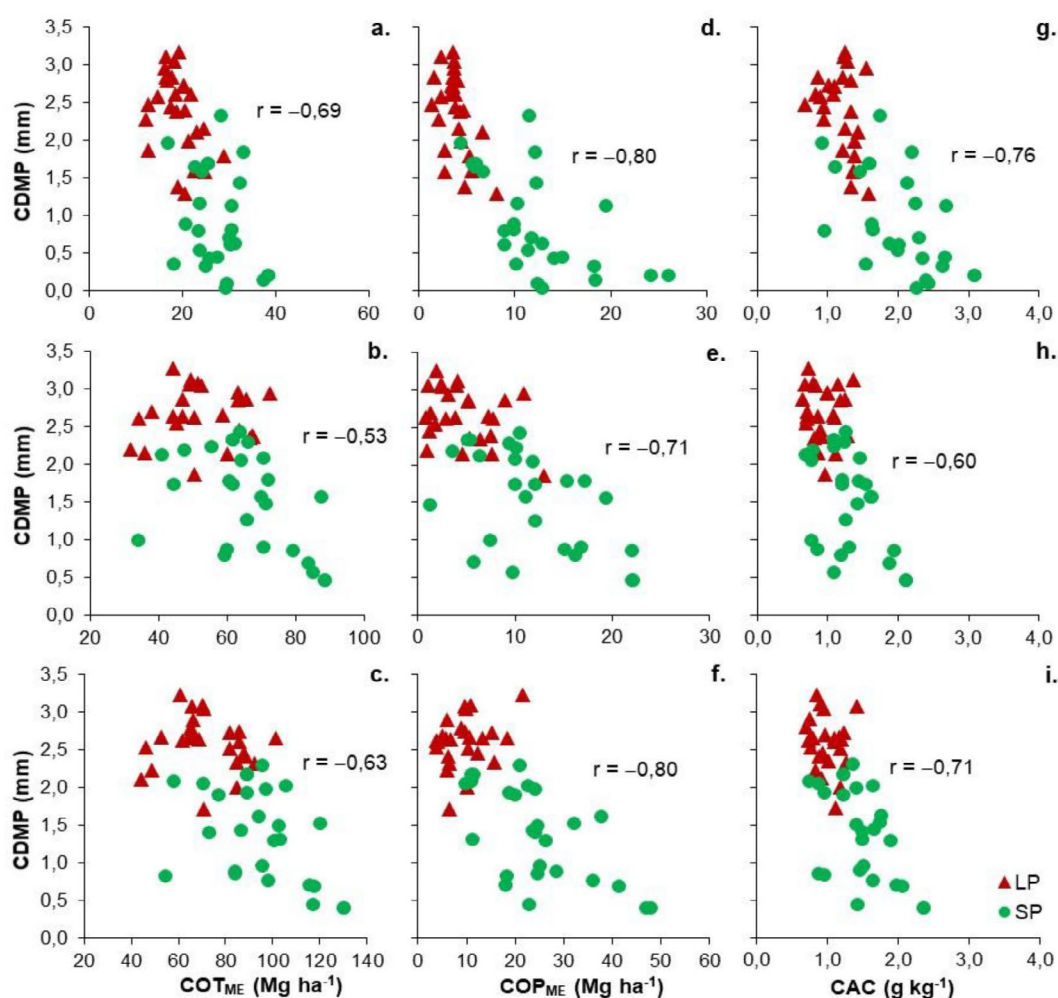


Figura 2. Relación entre el cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP) y los contenidos de carbono orgánico total (COT_{ME}) (a, b, c), carbono orgánico particulado (COP_{ME}) (d, e, f) expresados en stock referido a una masa de suelo fija y carbono extraíble en agua caliente (CAC) (g, h, i), para tres profundidades: 0-5 (a, d, g), 5-20 (b, e, h) y 0-20 cm (c, f, i), en los lotes de producción (LP) y las situaciones pseudoprístinas (SP), en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires. Se presenta el coeficiente de correlación de Pearson (r) ($n = 62$). Todas las correlaciones fueron significativas ($P < 0,05$).

Figure 2. Relationship between change of aggregate mean weight diameter (CDMP) and total soil organic carbon (COT_{ME}) (a, b, c), particulate organic carbon (COP_{ME}) (d, e, f) expressed as stock referred to a fixed soil mass, and hot-water extractable carbon (CAC) (g, h, i) contents, at three depths: 0-5 (a, d, g), 5-20 (b, e, h) and 0-20 cm (c, f, i), in production fields (LP) and pseudo-pristine situations (SP), in soils of the Southeastern Buenos Aires province. It is shown the Pearson correlations were significant ($P < 0,05$).

En todos los casos, el CDMP estuvo más fuertemente correlacionado con las fracciones lábiles (COP_{ME} (**Figura 2D, E, F**) y CAC (**Figura 2G, H, I**)) que con el contenido de COT_{ME} (**Figura 2A, B, C**), lo que coincide con lo reportado por Six *et al.* (1998). Para diferentes situaciones edafoclimáticas, se ha reportado mejor correlación entre la EA y el CAC, en comparación con la existente entre la EA y el COT (Haynes & Francis, 1993; Haynes & Beare, 1997; Chen *et al.*, 2009; Jensen *et al.*, 2019). Esto podría estar relacionado con la naturaleza del CAC, ya que una importante proporción de esta fracción estaría representada por un conjunto de carbohidratos que contribuyen a la estabilización de los agregados (Haynes & Francis, 1993; Haynes & Beare, 1997), lo que lleva a que el contenido de CAC se relacione más estrechamente con la EA.

Respecto a las relaciones entre el contenido de CAC y las propiedades químicas del suelo estudiadas en el presente trabajo para las tres profundidades, se determinó una relación altamente significativa ($P < 0,01$) entre el contenido de CAC y los contenidos de COT_{ME} (**Figura 3A, B, C**) y de COP_{ME} (**Figura 3D, E, F**), lo cual coincide con lo reportado por numerosos autores para diferentes ambientes (Ghani *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2009; Šeremešić *et al.*, 2013; Hamkalo & Bedernichek, 2014; Bongiorno *et al.*, 2019; Jensen *et al.*, 2019). Los contenidos de CAC estuvieron más fuertemente correlacionados con COT_{ME} y COP_{ME} en los 5 cm superficiales en comparación con la capa de 5-20 cm. Los valores más bajos de correlación registrados en la capa de 5-20 cm pueden deberse a que, como se mencionó anteriormente, las variables hasta aquí evaluadas disminuyeron su contenido con la profundidad, pero esta disminución no fue de la misma magnitud, particularmente para las fracciones lábiles. Esto puede estar asociado con la naturaleza de cada una. El CAC comprende carbohidratos y compuestos orgánicos ricos en N (amidas y aminas) derivados de microorganismos del suelo, enzimas y exudados radicales, que pueden estar disueltos en la solución del suelo o débilmente adsorbidos a las superficies minerales (Haynes & Beare, 1997; Ghani *et al.*, 2003; Haynes, 2005; Balaría *et al.*, 2009; Armas-He-

rrera *et al.*, 2013). La naturaleza del CAC sería la causa de una distribución algo más homogénea de esta fracción lábil en la capa de 0-20 cm, es decir una menor estratificación entre los 5 cm superficiales y la capa inmediatamente inferior (**Tabla 1**). Esto podría estar relacionado con que una parte del CAC está constituida por compuestos solubles que podrían sufrir cierto movimiento vertical con el agua de drenaje (Ghani *et al.*, 2003). En promedio el CAC a 0-5 cm fue 31% y 54% mayor que el CAC a 5-20 cm, para los LP y las SP, respectivamente (**Tabla 1**). El COP está compuesto principalmente por residuos orgánicos apenas descompuestos, restos de plantas con una estructura celular reconocible, hifas de hongos, esporas, semillas, esqueletos de fauna y biomasa microbiana (Haynes, 2005; Sequeira *et al.*, 2011), protegido dentro de los agregados y menos sujeto a los movimientos del agua en el perfil. Así, el COP muestra una mayor estratificación respecto al CAC. En promedio el COP a 0-5 cm fue 151% y 244% mayor que el COP a 5-20 cm, para LP y SP, respectivamente (datos no mostrados).

En la capa de 0-20 cm la correlación entre el contenido de CAC, y los de COT_{ME} y COP_{ME} fue muy alta (**Figura 3C, F**, $r=0,82$ y $0,85$, respectivamente), a pesar de la diferente correlación observada de 0-5 y de 5-20 cm. Esto es sumamente alentador para la utilización del CAC como ISE a una profundidad de muestreo habitual para los productores, ya que se encuentra fuertemente relacionado con los ISE mundialmente adoptados. Asimismo, la estrecha relación del contenido de CAC con los de COT_{ME} y COP_{ME} estaría indicando que las variaciones del CAC podrían utilizarse como un predictor de la dinámica de la MO. Las fracciones lábiles del C son, de hecho, el punto de partida en el secuestro de C en los suelos, ya que los productos microbianos de la descomposición de las fracciones lábiles de C serían los principales precursores de formas más estables de la MO (Cotrufo *et al.*, 2013). Así, una disminución del CAC podría alertar de manera temprana sobre la disminución del contenido de C en los suelos (Chen *et al.*, 2009). Consecuentemente, podría estar indicando una posible alteración de las propiedades químicas, físicas y biológicas

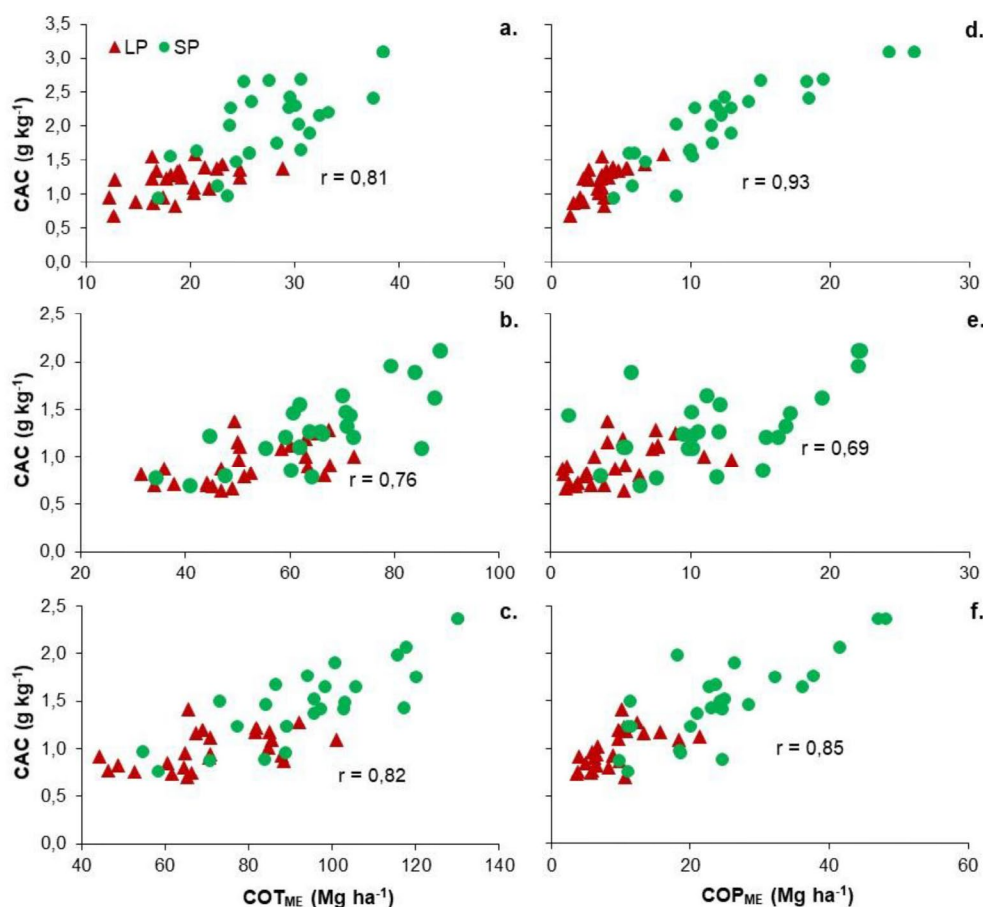


Figura 3. Relación entre carbono extraíble en agua caliente (CAC) y carbono orgánico total (COTME) (a, b, c) y carbono orgánico particulado (COPME) (d, e, f) expresados como stock referidos a una masa de suelo fija, para tres profundidades: 0-5 (a, d), 5-20 (b, e) y 0-20 cm (c, f), en los lotes de producción (LP) y las situaciones pseudoprístinas (SP), en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires. Se presenta el coeficiente de correlación de Pearson (r) ($n=62$). Todas las correlaciones fueron significativas ($P<0,05$).

Figure 3. Relationship between hot-water extractable carbon (CAC) and total soil organic carbon (COTME) (a, b, c) and particulate organic carbon (COPME) (d, e, f) expressed as stock referred to a fixed soil mass, at three depths: 0-5 (a, d), 5-20 (b, e) and 0-20 cm (c, f), in production fields (LP) and pseudo-pristine situations (SP), in soils of the Southeastern Buenos Aires province. It is shown the Pearson correlation coefficient (r) ($n = 62$). All correlations were significant ($P<0.05$).

vinculadas con el funcionamiento del suelo y la productividad de los cultivos.

El comportamiento del NAN podría ser explicado a través de la dinámica de las fracciones lábiles (Domínguez *et al.*, 2016; García *et al.*, 2016). En la **Figura 4** se muestra la relación entre el NAN y el COT_{ME} (**Figura 4A, B, C**), entre el NAN y el COP_{ME} (**Figura 4D, E, F**) y entre el NAN y el CAC (**Figura 4G, H, I**). Para las tres profundidades, las relaciones entre las mencionadas variables fueron positivas y altamente significativas ($P<0,01$). En los 5 cm superficiales, el NAN estuvo relacionado de manera similar con el CAC, el COP_{ME} y el COT_{ME} (**Figura 4A, D, G**), lo cual no coincide con

lo reportado por Domínguez *et al.* (2016) ni con lo informado por Studdert *et al.* (2017) para el SEB. Estos autores reportaron relaciones más estrechas entre el NAN y el COP en comparación con aquéllas entre el NAN y el COT, posiblemente debido a que trabajaron con un solo tipo de suelo. Para las capas de 5-20 y de 0-20 cm, la correlación entre el CAC y el NAN fue levemente más elevada (**Figura 4H, I**) que entre el CAC y las otras dos variables (**Figura 4B, E, C, F**). Esto podría deberse a que el CAC se compone principalmente de carbohidratos y compuestos orgánicos ricos en N, tales como amidas y amino azúcares (Haynes, 2005; Balaria *et al.*, 2009), con alto potencial de mineralización de N (Curtin *et al.*, 2006).

Keeney y Bremner (1966) sugirieron utilizar el método de extracción en agua caliente para la determinación del contenido de N disponible para las plantas y, por lo tanto, era esperable encontrar una fuerte correlación positiva entre el CAC y el NAN. La fuerte correlación entre estas variables sería otro indicio de que el CAC comprende una fracción de la MO del suelo susceptible a la mineralización (Ghani *et al.*, 2003).

Se observó que las SP presentaron una mayor amplitud de valores tanto para el CDMP como en los contenidos de COT_{ME} , COP_{ME} y CAC y el NAN si se comparan con los valores obtenidos para los LP (Figuras 2, 3 y 4). En éstos, los años de agricultura continua tenderían a uniformar los valores originando un menor rango para cada una de las variables determinadas. Asimismo, es importante resaltar que, para las clases texturales

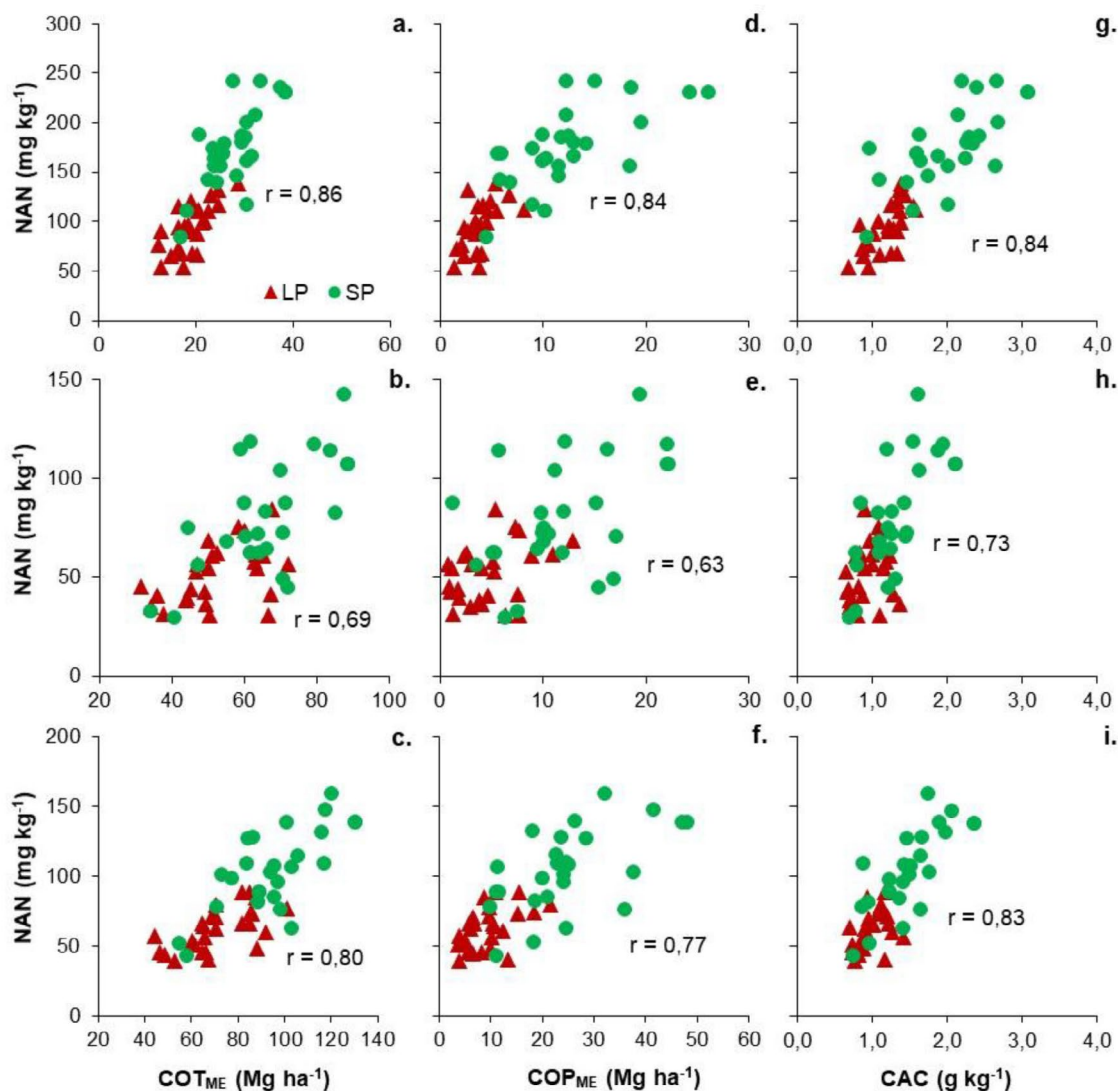


Figura 4. Relación entre nitrógeno de amonio mineralizado durante incubaciones anaeróbicas cortas (NAN) y carbono orgánico total (COT_{ME}) (a, b, c), carbono orgánico particulado (COP_{ME}) (d, e, f) expresados como stock referidos a una masa de suelo fija y carbono extraíble en agua caliente (CAC) (g, h, i), para tres profundidades: 0-5 (a, d, g), 5-20 (b, e, h) y 0-20 cm (c, f, i), en los lotes de producción (LP) y las situaciones pseudoprístinas (SP), en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires. Se presenta el coeficiente de correlación de Pearson (r) (n=62). Todas las correlaciones fueron significativas (P<0,05).

Figure 4. Relationship between ammonium nitrogen mineralized in anaerobiosis (NAN) and total soil organic carbon (COT_{ME}) (a, b, c), particulate organic carbon (COP_{ME}) (d, e, f) expressed as stock referred to a fixed soil mass and hot-water extractable carbon (CAC) (g, h, i) contents, at three depths: 0-5 (a, d, g), 5-20 (b, e, h) and 0-20 cm (c, f, i), in production fields (LP) and pseudo-pristine situations (SP), in soils of the Southeastern Buenos Aires province. It is shown the Pearson correlation coefficient (r) (n = 62). All correlations were significant (P<0.05).

analizadas (franco arenoso, franco arcillo arenoso, franco y franco arcilloso), las relaciones entre variables (Figuras 2, 3 y 4) fueron similares dentro de cada una (datos no mostrados). Por otro lado, los coeficientes de correlación de Pearson mostrados en las Figuras 2, 3 y 4, no mejoraron al relativizar las diferentes propiedades del suelo con respecto al contenido de Li+As (datos no mostrados). En todas las situaciones se observó que las mejores relaciones se presentaron en los primeros 5 cm de profundidad, lo que coincide con lo reportado por Hamkalo y Bedernichek (2014).

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados mostrados, para suelos del SEB, el CAC podría ser utilizado como ISE, ya que cumple con las características requeridas para que una variable del suelo sea utilizada como tal. El CAC fue sensible a los cambios producidos por el uso agrícola del suelo y se relaciona con otras propiedades edáficas comúnmente utilizadas como ISE. Además, su determinación es muy sencilla, relativamente rápida y económica, y requiere poco equipamiento. Asimismo, todas estas características favorecerían su implementación por los laboratorios comerciales de análisis, por lo que, podría ser fácilmente adoptado por el sector productivo.

Para mejorar la confiabilidad de los resultados mostrados se deberían continuar los estudios. En experimentos futuros, sería valioso evaluar cómo responde esta variable en sitios con diferentes prácticas de manejo (por ejemplo, diferentes rotaciones de cultivos, diferentes sistemas de laboreo, etc.).

AGRADECIMIENTOS

La información presentada en este trabajo es parte de la Tesis de Maestría de la primera autora, Área de Posgrado en Ciencias de las Plantas y Recursos Naturales, Programa de Posgrado en Ciencias Agrarias, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Asimismo, los resultados de parte de los ensayos de fertilización nitrogenada correspondieron a la Tesis de Maestría de Ignacio M. Queirolo Derio (2018) en la misma Área de Posgrado. Este

trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Mar del Plata (proyectos AGR570/18 y AGR595/19) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (proyecto PNCyO 1127032).

BIBLIOGRAFÍA

- Agostini, MA; MG Monterubbianesi; GA Studdert & S Maurette. 2014. Un método simple y práctico para la determinación de la densidad aparente. *Ciencia del Suelo* 32(2):171-176.
- Álvarez, CR & R Álvarez. 2016. Are active organic matter fractions suitable indices of management effects on soil carbon? A meta-analysis of data from the Pampas. *Arch. Agron. Soil Sci.* 62(11):1592-1601.
- Andriulo, A; J Galantini; C Pecorari & E Torioni. 1990. Materia orgánica del suelo en la región Pampeana Argentina. I. Un método de fraccionamiento por tamizado. *Agrochimica (Italia)* 34(5-6):475-489.
- Aparicio, V & JL Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 96(1-2):155-165.
- Armas-Herrera, CM; JL Mora; CD Arbelo & A Rodríguez-Rodríguez. 2013. Labile carbon pools and biological activity in volcanic soils of the Canary Islands. *Spanish J. Soil Sci.* 3(1):7-27.
- Balaria, A; CE Johnson & Z Xu. 2009. Molecular-scale characterization of hot-water-extractable organic matter in organic horizons of a forest soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(3):812-821.
- Bongiorno, G; EK Bünemann; CU Oguejiofor; J Meier; G Gort; R Comans; P Mäder; L Brussaard & R De Goede. 2019. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecol. Indic.* 99:38-50.
- Cambardella, CA & ET Elliott. 1992. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56(3):777-783.
- Chen, H; R Hou; Y Gong; H Li; M Fan & Y Kuzyakov. 2009. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China. *Soil Till. Res.* 106(1):85-94.
- Cotrufo, MF; MD Wallenstein; CM Boot; K Deneff & E Paul. 2013. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Glob. Change Biol.* 19(4):988-995.
- Cozzoli, MV; N Fioriti; GA Studdert; GF Domínguez & MJ Eiza. 2010. Nitrógeno liberado por incubación anaeróbica y fracciones de carbono en macro- y microagrega-

- dos bajo distintos sistemas de cultivo. *Ciencia del Suelo* 28(2):155-167.
- Curtin, D; CE Wright; MH Beare & FM McCallum. 2006. Hot water-extractable nitrogen as an indicator of soil nitrogen availability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70(5):1512-1521.
- Diovisalvi, NV; GA Studdert; GF Domínguez & MJ Eiza. 2008. Fracciones de carbono y nitrógeno orgánicos y nitrógeno anaeróbico bajo agricultura continua. *Ciencia del Suelo* 26(1):1-11.
- Diovisalvi, NV; GA Studdert; NI Reussi Calvo; GF Domínguez & A Berardo. 2014. Estimating soil particulate organic carbon through total soil organic carbon. *Ciencia del Suelo* 32(1):85-94.
- 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 Till. Res.* 102(1):93-100.
- Domínguez, GF; GV García; GA Studdert; MA Agostini; SN Tourn & MN Domingo. 2016. Is anaerobic mineralizable nitrogen suitable as soil health indicator? *Spanish J. Soil Sci.* 6(2):82-97.
- Doran, JW; AJ Jones; MA Arshad & JE Gilley. 1999. Determinants of soil quality and health. In: R Lal (ed.) *Soil Quality and Soil Erosion*. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, EEUU. pp. 17-36.
- Duval, ME; JA Galantini; JM Martínez & JO Iglesias. 2016a. Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. *Ciencia del Suelo* 34(2):197-209.
- Duval ME; JA Galantini; JM Martínez; FM López & LG Wall. 2016b. Sensitivity of different soil quality indicators to assess sustainable land management: Influence of site features and seasonality. *Soil Till. Res.* 159:9-22.
- Eiza, MJ; N Fioriti; GA Studdert & HE Echeverría. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Ciencia del Suelo* 23(1):59-67.
- Ellert, B; H Janzen; A Vandenbygaert & E Bremer. 2007. Measuring change in soil organic carbon storage. En: Carter, M & E Gregorich (eds.) *Soil Sampling Methods of analysis*. 2da ed. CRC Press. Boca Raton, Florida, EEUU. pp. 25-38.
- Fan, R; X Zhang; Y Shen; X Yang & A Liang. 2013. Near-infrared spectroscopic assessment of hot water extractable and oxidizable organic carbon in cultivated and uncultivated Mollisols in China. *Acta Agr. Scand. B-S P* 63(1):37-45.
- Fabrizzi, KP; FO García; JL Costa & LI Picone. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 81(1):57-69.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66(2):95-106.
- Galantini, JA. 2008. Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. En: JA Galantini (ed.) *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina*. Ediuns, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. pp. 19-39.
- García, GV; GA Studdert; MN Domingo; GF Domínguez. 2016. Nitrógeno mineralizado en anaerobiosis: relación con sistemas de cultivo de agricultura continua. *Ciencia del Suelo* 34(1):127-138.
- Gee, GW & JW Bauder. 1986. Particle size analysis. In: GR Blake & KH Hartge. (Eds.) *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods – Agronomy Monograph 9*. 2nd Ed. Am. Soc. Agron. Inc. – Soil Sci. Soc. Am. Inc., Madison, Wisconsin, USA. pp. 383-411.
- Ghani, A; M Dexter & KW Perrott. 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. *Soil Biol. Biochem.* 35(9):1231-1243.
- Gregorich, EG; MH Beare; UF McKim & JO Skjemstad. 2006. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70(3):975-985.
- Hamkalo, Z & T Bedernichek. 2014. Total, cold and hot water extractable organic carbon in soil profile: impact of land-use change. *Zemdirbyste-Agriculture* 101(2):125-132.
- Haynes, RJ. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview. *Adv. Agron.* 85:222-268.
- Haynes, RJ & MH Beare. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biol. Biochem.* 29(11-12):1647-1653.
- Haynes, RJ & GS Francis. 1993. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *J. Soil Sci.* 44(4):665-675.
- Janzen, HH; CA Campbell; SA Brandt; GP Lafond & L Townley-Smith. 1992. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56(6):1799-1806.
- Jensen, JL; P Schjønning; CW Watts; BT Christensen; C Peltre & LJ Munkholm. 2019. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. *Geoderma* 337:834-843.
- Karlen, DL; KS Veumb; KA Sudduth; JF Obyryckic & MR Nunesd. 2019. Soil health assessment: Past accomplish-

- ments, current activities, and future opportunities. *Soil Till. Res.* 195:104365.
- Keeney, DR. 1982. Nitrogen-availability indexes. In: AL Page (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties. Agronomy Monograph 9.* American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, EEUU. pp. 643-698.
- Keeney, DR & JM Bremner. 1966. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. *Agron. J.* 58(5):498-503.
- Keeney, DR & DW Nelson. 1982. Nitrogen inorganic forms. In: AL Page (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties. Agronomy Monograph 9.* American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, EE.UU. pp. 643-698.
- Lal, R. 2007. Soil science and the carbon civilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71(5):1425-1437.
- Lehmann, J & M Kleber. 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528(7580):60-69.
- Martínez, E; JP Fuentes & E Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Rev. Cienc. Suelo Nutr.* 8(1):68-96.
- Quiroga, AR & GA Studdert. 2014. Manejo del suelo e intensificación agrícola: agua y materia orgánica, dos aspectos clave. En: HE Echeverría & FO García. (eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. 2da edición.* Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. pp. 73-100.
- R Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing [en línea] <http://www.R-project.org/> [consulta: 03 de abril de 2015].
- Schlichting, E; HP Blume & K Stahr. 1995. *Bodenkundliches Praktikum.* Paul Parey. Hamburg, Berlin, Alemania. 209 p.
- Sequeira, CH; MM Alley & BP Jones. 2011. Evaluation of potentially labile soil organic carbon and nitrogen fractionation procedures. *Soil Biol. Biochem.* 43(2):438-444.
- Šeremešić, S; D Milošev; P Sekulić; L Nešić & V Ćirić. 2013. Total and hot-water extractable carbon relationship in Chernozem soil under different cropping systems and land use. *J. Central Europ. Agric.* 14(4):1479-1488.
- 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(5):1367-1377.
- Six, J; ET Elliott & K Paustian. 2000. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 64(3):1042-1049.
- Six, J; RT Conant; EA Paul & K Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241:155-176.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to soil taxonomy.* USDA, Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, EEUU. 372 pp.
- Soon, YK; A Haq & MA Arshad. 2007. Sensitivity of nitrogen mineralization indicators to crop and soil management. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 38(15-16):2029-2043.
- Studdert, GA & HE Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64(4):1496-1503.
- Studdert, GA; HE Echeverría & EM Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61(5):1466-1472.
- Studdert, GA; MN Domingo; GV García; MG Monterubbiani & GF Domínguez. 2017. Carbono orgánico del suelo bajo sistemas de cultivo contrastantes y su relación con la capacidad de proveer nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 35(2):285-299.
- Zhang, JB; CC Song & WY Yang. 2006. Land Use Effects on the Distribution of Labile Organic Carbon Fractions through Soil Profiles. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70(2):660-667.