

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE SUELOS AGRÍCOLAS POR MEDIO DE ÍNDICES

Matías Duval, Fernando López, Juan M. Martínez, Julio Iglesias, Juan A. Galantini y Luis Wall*



Para evaluar la calidad del suelo se deben seleccionar propiedades químicas, físicas y/o biológicas del suelo que sean sensibles a las prácticas de manejos y puedan ser utilizadas como indicadores tempranos de los cambios que se producen. La materia orgánica es el indicador más ampliamente utilizado, si bien los mejores resultados se obtienen combinándolo en los índices relacionados con la funcionalidad del suelo.

La conversión de pastizales naturales en tierras de cultivo puede dar lugar a modificaciones significativas en los procesos y propiedades del suelo y alterando su normal funcionamiento (Dawson & Smith, 2007). Numerosos trabajos han puesto de manifiesto que los cambios en las prácticas de manejo y usos del suelo influyen sobre los indicadores de fertilidad y calidad del suelo (Raiesi, 2007). Para evaluar la calidad del suelo se pueden establecer índices y relaciones vinculadas a la materia orgánica (MO) o carbono orgánico total (COT). Estos índices son indicadores tempranos y eficientes de cambios en la calidad del suelo dados por el sistema de producción (Bayer *et al.*, 2009), incluso antes que cambien los contenidos de COT. Entre ellos se encuentran el índice de manejo del carbono (IMC), el índice de labilidad (IL) y el índice de reserva de carbono (IRC) originalmente propuestos por Blair *et al.* (1995), donde relaciona los niveles de carbono orgánico (CO) y su labilidad. Estos índices pueden proporcionar un parámetro útil para evaluar la calidad del suelo en diferentes sistemas de producción o bajo diferentes prácticas de manejo (Blair *et al.*, 2006, Verma & Sharma 2007).

La estratificación del COT es otro índice que relaciona los contenidos de COT entre dos capas de suelo diferentes. Por lo general, la primera capa es la capa superficial del suelo, que está fuertemente influenciado por el manejo (labranza, sistemas de cultivo, fertilización), mientras que la segunda se ve menos afectada por las prácticas de manejo (Franzuebbers, 2002). Valores elevados de este índice, en general, indican que el

manejo adoptado mejora la calidad del suelo (Franzluebbers, 2002, 2010, Sá & Lal, 2009). Varios estudios señalan que un valor de estratificación mayor a 2,0 es fundamental para mantener la calidad del suelo en climas templados (Franzluebbers, 2002). En siembra directa (SD), varios estudios han demostrado que oscila entre 2,1 a 4,1 (Franzluebbers, 2002, Franzluebbers *et al.*, 2007).

Otros autores proponen las relaciones entre MO total (MOT), MO particulada (MOP) y la fracción fina del suelo (limo+arcilla) como indicador del efecto de las prácticas agrícolas (Quiroga *et al.*, 1996, Galantini *et al.*, 2004, Noellemeyer *et al.*, 2006).

La utilización de índices vinculados al funcionamiento del sistema para detectar los cambios debidos al manejo, en relación a los indicadores, tienen la ventaja de que no son influenciados por las variaciones meteorológicas, edáficas, topográficas y/o estacionales, y los mismos son considerados de crucial importancia en la determinación del estado de degradación o de reconversión de los suelos (Zornoza *et al.*, 2008).

En los últimos años, se ha generado una expansión acelerada de la SD sobre la superficie agrícola-ganadera del país impulsada por los costos de producción más bajos, los mayores rendimientos y la incorporación de las zonas menos fértiles en la producción de cultivos (Derpsch *et al.*, 2010). Además, por cuestiones de mercado favorable, una parte sustancial de la misma se encuentra actualmente dedicada al monocultivo de soja, a menudo combinado con reposición mínima de nutrientes. El impacto negativo en el contenido de MO que se presenta cuando existe una mayor proporción de soja en las rotaciones, con respecto a cultivos como maíz o sorgo, ha sido descrito por varios autores en diversas regiones del mundo (Havlin *et al.*, 1990; Studdert & Echeverría, 2000). Este trabajo tiene por objetivo utilizar una serie de atributos del suelo mediante índices a fin de ver cuáles son mejores para detectar cambios producidos por las prácticas agrícolas en suelos bajo SD.

MATERIALES Y MÉTODOS

En tres sitios de la Región Pampeana (Bengolea, Monte Buey y Pergamino) se evaluaron tres situaciones: dos situaciones agrícolas (buenas prácticas agrícolas (BP) y malas prácticas agrícolas (MP)) y una situación natural (AN). Las BP se presentan manejo agrícola sustentable bajo SD, sujeto a rotación cultivos, reposición de nutrientes y bajo uso de agroquímicos, mientras que MP es un manejo agrícola no sustentable bajo

SD, mínima rotación o monocultivo, baja reposición de nutrientes y alto uso de agroquímicos. En cada situación se tomaron tres muestras de suelo al azar de 0-5, 5-10 y 10-20 cm. Luego de secadas al aire y tamizadas por 2 mm en cada muestra se determinó: COT por combustión (1500°C).

Se realizó un tamizado en húmedo del suelo (Duval *et al.*, 2013), mediante dos tamices, de 53 μm y 105 μm de apertura de malla. Se obtuvieron tres fracciones: fracción gruesa (FG, 105-2000 μm) en la que se encuentra la materia orgánica particulada gruesa (MOP_g) y las arenas medias y gruesas; fracción media (FM, 53-105 μm) constituida por MOP fina (MOP_f) y las arenas muy finas, y la fracción fina (FF, <53 μm). Se determinó el contenido de carbono de la fracción gruesa y media del mismo modo que el COT. El CO de la fracción fina (asociado a la fracción mineral, COM) se obtuvo mediante el cálculo de la diferencia entre el COT y el C de la fracción gruesa y media.

Se calcularon los índices COT/COP y COT/limo+arcilla para la profundidad de 0-20 cm. Las relaciones de estratificación del COT fueron calculadas a partir de la concentración de COT obtenido a la profundidad de 0-5 cm, dividida la correspondiente a 5-20 cm (COT_{r1}), como así también las relaciones de estratificación considerando las profundidades 0-10 cm y 10-20 cm (COT_{r2}).

Se calculó el IMC para cada tratamiento basado en el método de Blair *et al.* (1995):

$$\text{IMC} = \text{IRC} * \text{IL} * 100$$

El IRC e IL se calculan de la siguiente manera:

$$\text{IRC} = \text{COT}_{\text{tratamiento}} / \text{COT}_{\text{referencia}}$$

$$\text{IL} = \text{L}_{\text{tratamiento}} / \text{L}_{\text{referencia}}$$

donde L se refiere a la labilidad del C calculado como:

$$\text{L} = \text{C}_{\text{lábil}} / \text{C}_{\text{no lábil}}$$

El AN se utilizó como suelo de referencia, con un IMC de 100. El C lábil se considera como la porción de CO del suelo en la fracción gruesa COP_g (>105 μm) (Vieira *et al.*, 2007). El contenido de C no lábil fue estimado a partir de la diferencia entre el COT y el C lábil.

Las diferencias de los resultados afectados por los tratamientos fueron evaluados mediante análisis de varianza utilizando el test de Fisher LSD₀₅. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2010).

RESULTADOS

La estratificación del COT mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,001$), sitios ($p < 0,05$) e interacción no significativa ($p > 0,05$) (Tabla 1). Tanto COT_{r1} como COT_{r2} permitieron diferenciar prácticas de manejo agrícola, presentando los mayores índices en BP. Franzluebbbers informó en análisis preliminares que independientemente del tipo de suelo y del régimen climático, valores de estratificación de COT > 2 indicarían que se está fomentando la calidad del suelo y valores < 2 corresponderían a suelos bajo condiciones de degradación. En este caso, valores similares fueron obtenidos en COT_{r1}, donde AN y BP presentaron valores cercanos a 2, mientras que fue significativamente inferior en MP (1,5). Diferencias entre BP y MP para este índice se deben a la mayor intensidad de cultivos en BP, generando mayores entradas de carbono y una reducción del agua disponible para la descomposición por parte de los microorganismos del suelo debido a la mayor absorción de agua por los cultivos.

Tabla 1: Índice de estratificación del COT en los diferentes sitios y tratamientos.

Variables	Índice de estratificación		0-20 cm	
	COT _{r1}	COT _{r2}	COP/COT	COT/limo+arcilla
Bengolea	1,70 a	1,48 a	0,32 c	3,25 c
Monte Buey	1,68 a	1,50 a	0,17 a	2,57 b
Pergamino	1,91 b	1,71 b	0,20 b	2,33 a
AN	1,93 b	1,78 c	0,28 b	3,32 c
BP	1,86 b	1,55 b	0,22 a	2,65 b
MP	1,49 a	1,36 a	0,20 a	2,18 a
Sitio	*	**	***	***
Tratamiento	***	***	***	***
Sitio*trat	ns	ns	ns	ns

AN, Ambiente Natural; BP, Buenas Prácticas; MP, Malas Prácticas. Para cada índice, letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios y los tratamientos ($p < 0,05$). (*), (**), (***) y ns, indican diferencias significativas con ($p < 0,05$), ($p < 0,01$), ($p < 0,001$) y no significativas, respectivamente.

El COP/COT presentó diferencias significativas según sitios y tratamientos ($p < 0,001$) e interacción no significativa. La relación COP/COT fue mayor en suelos arenosos que en suelos de textura fina. En Bengolea, suelo arenoso en condiciones de baja precipitación, la tasa de transformación de los materiales orgánicos podría ser menor que en los demás sitios. Este índice no presentó diferencias entre prácticas agrícolas indicando que el COP ($COP_g + COP_f$) representa entre un 20-22% del COT, diferenciándose de AN (Tabla 1). El efecto agrícola generó una disminución diferencial del COP, evidenciando condiciones muy favorables para su transformación (Galantini, 2008).

El COT/limo+arcilla resultó un índice sensible ya que diferenció AN de cultivados y dentro de éstos diferenció estadísticamente BP de MP (Tabla 1). En este caso, los suelos agrícolas presentaron una disminución del 20 y 34% del COT por unidad de limo+arcilla para BP y MP, respectivamente.

La labilidad del carbono (L) fue calculada dividiendo el contenido de C lábil (COP_g) por el de carbono no lábil (COM) (Tabla 2). Se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, indicando que el COP_g es un 24, 18 y 12% del contenido de COM, para AN, BP y MP respectivamente. Esta fracción es importante ya que tiene una participación activa en la disponibilidad de nutrientes a corto plazo y contribuye a la estructura del suelo. Estos resultados mostraron, al igual que en el COP/COT, que en los suelos cultivados disminuyó en mayor proporción las fracciones más lábiles por sobre el COT. Las diferencias entre BP y MP estarían dadas por condiciones más favorables para la transformación del material orgánico, esto en MP está establecido por la mayor duración de los barbechos y la calidad de los residuos, los cuales provienen principalmente del cultivo de soja con baja relación C/N.

El IL relaciona el COP_g respecto al COM y su proporción respecto a la misma relación en la condición prístina del suelo. Este índice presentó diferencias significativas entre tratamientos, independientemente del sitio. Los mayores valores en BP se deben, principalmente, a la mayor entrada de C anual. Estudios realizados en Brasil, encontraron una relación estrecha entre el contenido de C lábil y la adición directa de C anual bajo diferentes sistemas de labranza y cultivo (Bayer *et al.*, 2002). Valores de IL

entre 0,44 y 0,75 fueron obtenidos por Vieira *et al.* (2007) sobre un Paleudol Típico sobre diferentes sistemas de cultivo bajo SD.

Tabla 2: Labilidad (L), índice de labilidad (IL), índice de reserva de C (IRC) e índice de manejo de C (IMC) en los diferentes sitios y tratamientos en 0-10 cm.

Variables	Índices			
	$L=C_{\text{labil}}/C_{\text{no labil}}$	$IL=L_{\text{trat}}/L_{\text{ref}}$	$IRC=COT_{\text{trat}}/COT_{\text{ref}}$	$IMC=IL*IRC*100$
Bengolea	0,250 b	0,631 a	0,907 b	62
Monte Buey	0,143 a	0,577 a	0,609 a	36
Pergamino	0,149 a	0,675 a	0,643 a	43
AN	0,240 c	1,0	1,0	100
BP	0,182 b	0,735 b	0,826 b	62
MP	0,119 a	0,521 a	0,614 a	32
Sitio	***	ns	***	*
Tratamiento	***	*	***	**
Sitio*trat	ns	ns	ns	*

AN, Ambiente Natural; BP, Buenas Prácticas; MP, Malas Prácticas. Para cada índice, letras diferentes indican diferencias significativas entre los sitios y los tratamientos ($p < 0,05$).

El IRC indica la proporción de COT que quedó en el suelo respecto a la reserva original contenida en suelos bajo condición prístina (AN). El índice distinguió entre suelos cultivados, indicando que en suelos agrícolas se conservó el 83% y el 61% del COT contenido en el AN para BP y MP, respectivamente. En suelos bajo SD, la mayor intensificación de cultivos resulta en un mayor IRC (Ferreira *et al.*, 2013). Para nuestro estudio, BP presentó mayor diversidad e intensidad de cultivos, tanto gramíneas (maíz, sorgo, trigo, cebada) como leguminosas (soja, vicia) mejorando dicho índice. Por lo tanto, el IRC resultó ser un índice sensible para detectar diferencias entre manejos agrícolas, independientemente del sitio evaluado. Estos resultados concuerdan con varios trabajos donde afirman que el IRC es un indicador eficiente de la calidad del suelo (Blair *et al.*, 1995, Vieira *et al.*, 2007).

El IMC permite evaluar los procesos de ganancia o de pérdida de calidad del suelo ya que los valores más altos significan mayor calidad del suelo, y viceversa. Se

encontraron efectos de sitio ($p < 0,05$), tratamiento ($p < 0,01$) e interacción significativa ($p < 0,05$). El efecto de las prácticas agrícolas en cada sitio presentó diferencias significativas solo en Bengolea a favor de las BP, presentando una calidad semejante a AN y una tendencia similar en Monte Buey y Pergamino (Figura 1). En base a estos resultados, se puede decir que las BP son más sostenibles que las MP, a pesar de que en Monte Buey y Pergamino no fue significativamente diferente debido a los altos coeficientes de variación de los datos ($cv=40\%$). El uso agrícola de los suelos resulta en una marcada disminución del IMC, Blair *et al.* (1995) informó valores de IMC entre 23 y 45 para suelos con diferente historia agrícola.

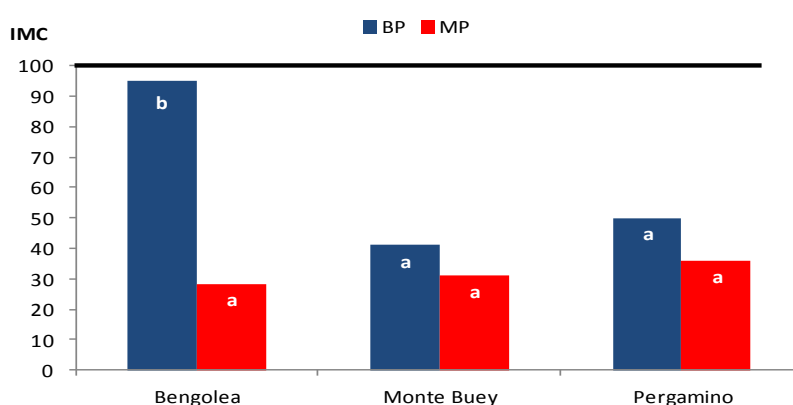


Figura 1: Índice de manejo de carbono (IMC) en buenas y malas prácticas (BP y MP) para los diferentes sitios, en 0-10 cm. Letras diferentes en cada sitio indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

CONCLUSIONES

La combinación de la información obtenida de los diferentes atributos del suelo a través de índices, contribuyó a conocer lo que sucede en el suelo por efecto del uso y manejo.

El COT_{r1} , COT_{r2} , $COT/limo+arcilla$, L, IL y IRC, fueron los índices más sensibles, reflejaron diferencias entre manejos agrícolas, presentando valores mayores cuando el suelo presentaba mayor intensificación de cultivos y menor tiempo de barbechos (BP) y menores en los suelos asociados con escasa diversidad de cultivos o monocultivo y mayores períodos de barbecho (MP).

AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado en el marco del Programa de áreas estratégicas (PAE) del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MINCyT) “Biología del Suelo y Producción Agraria Sustentable (BIOSPAS, N° 36976)”.

BIBLIOGRAFÍA

- Bayer, C; J Mielniczuk; L Martin-Neto & PR Ernani. 2002. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. *Plant Soil* 238: 133–140.
- Bayer, C; J Dieckow; TJC Amado; FLF Eltz & FCB Vieira. 2009. Cover Crop Effects Increasing carbon storage in a subtropical no-till sandy Acrisol. *Commun. Soil Sci. Plant* 40: 1499–1511.
- Blair, GJ; RDB Lefroy. & L Lisle. 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index, for agricultural systems. *Aust. J. Agric. Res.* 46: 1459–1466.
- Blair, N; RD Faulkner; AR Till & PR Poulton. 2006. Long-term management impactions on soil C, N and physical fertility. Part I: broadbalk experiment. *Soil Till Res* 91: 30–38.
- Dawson, JJC & P Smith. 2007. Carbon losses from soil and its consequences for land use management. *Sci. Total Environ.* 382: 165–190.
- Derpsch, R; T Friedrich; A Kassam & H Li. 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3, 1.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. *InfoStat versión 2010*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Ferreira, AO; TJC Amado; RS Nicoloso; JCM Sa; JE Fiorin; DSS Hansel; D Menefee. 2013. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.* 133: 65–74.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till Res* 66: 95–106.
- Franzluebbers, AJ. 2010. Achieving soil organic carbon sequestration with conservation agricultural systems in the southeastern USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74: 347–357.
- Franzluebbers, AJ; HH Schoenberg & DM Endale. 2007. Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA. *Soil Till. Res.* 96: 303–315.
- Galantini, JA. 2008. Calidad de las fracciones orgánicas en suelos naturales y cultivados. En: J Galantini et al. (eds.). *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina*. Pp. 71-95. Editorial Universidad Nacional del Sur.
- Galantini, JA; N Senesi; G Brunetti & R. Rosell. 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123: 143-152.
- Havlin, JL; D Kissel; L Maddux; M Claassen & J Long. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 448-452.
- Noellemeyer, E; AR Quiroga & D Estelrich. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *J. Arid Environ.* 65: 142-155.

- Quiroga, AR; DE Buschiazzo & N Peinemann. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid Argentinian Pampas. *Soil Sci.* 161: 104-108.
- Raiesi, F. 2007. The conversion of overgrazed pastures to almond orchards and alfalfa cropping systems may favor microbial indicators of soil quality in Central Iran. *Agric. Ecosyst. Environ.* 121: 309–318.
- Sá, JCM & R Lal. 2009. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil Till. Res.* 103: 46–56.
- Studdert, G & H Echeverria. 2002. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1496-1503.
- Verma, S & PK Sharma. 2007. Effect of long-term manuring and fertilizer on carbon pools, soil structure, and sustainability under different cropping systems in wet-temperate zone of northwest Himalayas. *Biol Fertil Soils* 19: 235–240.
- Vieira, FCB; C Bayer; JA Zanatta; J Dieckow; J Mielniczuk & ZL He. 2007. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. *Soil Till Res.* 96: 195–204.
- Zornoza, R; J Mataix-Solera; C Guerrero; V Arcenegui; J Mataix-Beneyto & I Gómez. 2008. Validating the effectiveness and sensitivity of two soil quality indices based on natural forest soils under Mediterranean conditions. *Soil Biol. Biochem.* 40: 2079-2087.