



STOCK DE CARBONO ORGÁNICO E INDICES DE CALIDAD DE SUELO EN SISTEMAS FORESTALES Y GANADEROS

Yogui, D. R.¹, Lupi, A. M.^{2*}, Kurtz, D. B.², Gándara, L.².

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste. Provincia de Corrientes, Argentina. ² Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria. Argentina. *autor de contacto: lupi.ana@inta.gob.ar

RESUMEN: La materia orgánica (MO) es el indicador utilizado con más frecuencia para evaluar la calidad del suelo. También es frecuente el empleo de índices de calidad del suelo basados en el carbono orgánico y sus fracciones al comparar sistemas de manejo. El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de diferentes sistemas productivos, pastizal cielo abierto (PCA) pastizal bajo sistema silvopastoril (SSP) y sistema forestal puro (FP) sobre las reservas de COS; sobre el contenido y sobre calidad de diferentes fracciones orgánicas en suelos de textura gruesa, y comparar diferentes índices de calidad de suelos. El área experimental se localiza en el Dpto. Concepción; Corrientes, en el gran paisaje de lomas y planicies arenosas, sobre un suelo Psamacuente típico. Se tomaron muestras de suelo de las profundidades 0-5 cm y 5-15 cm. Se cuantificó la concentración y la cantidad de COS del suelo entero (COS) y en la fracción gruesa ($CO_{\text{lábil}}$) y en la fracción fina (CO_{min}). Se calcularon las proporciones $CO_{\text{lábil}}/COT$, CO_{min}/COT y se utilizaron índices propuestos por distintos autores. Los resultados indican que a los 9 años de establecidos los tratamientos no se observaron campos en las concentraciones y en las reservas de COS. La cantidad de COS almacenada en el espesor 0-15 cm fue de 11,7 Mg/ha; 12,1 Mg/ha y 13,2 Mg/ha para FP, SSP y PCA respectivamente, sin diferencias significativas entre ellos. Las fracciones del CO no fueron modificadas por los tratamientos a los 9 años de su aplicación. Los índices calculados no detectan diferencias entre tratamientos, sin embargo, se encuentran cercanos a los valores umbrales citados por la bibliografía.

PALABRAS CLAVES: fracciones de la materia orgánica; estratificación del carbono, suelos arenosos

INTRODUCCIÓN

En la Provincia de Corrientes, se estiman aproximadamente 516.771 ha de plantaciones forestales (Baruzzo, et al., 2020). En las últimas dos décadas, el avance de las forestaciones se produjo a partir del reemplazo de pastizales naturales. Además de los planteos forestales puros existe un aumento en la superficie ocupada por los sistemas silvopastoriles (SSP), implantándose bosques con diseños que permiten el aprovechamiento del pastizal por parte de la hacienda y que a su vez producen madera de alta calidad (Pizzio et al., 2021). En estos sistemas los aportes de MO al suelo pueden verse modificada y la dinámica y el almacenamiento de COS puede variar en comparación a sistemas puros, (Jackson et al., 2000, 2002) siendo particularmente poco estudiado estos cambios en la región de suelos de textura gruesa de Corrientes. A diferencia de las fracciones estables que tienen un ciclado más lento, las fracciones lábiles son más sensibles a los efectos del uso de la tierra y pueden utilizarse como indicadores tempranos del efecto de la rotación de cultivos, de la fertilización o del sistema de labranza sobre la calidad del suelo (Haynes, 2000; Six et al., 2002). El uso de índices también puede emplearse para evaluar los cambios en la calidad del suelo bajo diferentes sistemas de manejo y condiciones ambientales. Se han propuesto varios tales



como el de Franzluebbbers, (2002), Quiroga *et al.*, 1996; Noellemeyer *et al.*, (2006). El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de diferentes sistemas productivos (SSP, sistema pastoril a cielo abierto (PCA) y forestal puro (FP) sobre las reservas de COS; sobre el contenido y sobre calidad de diferentes fracciones orgánicas en suelos de textura gruesa del centro – oeste de la provincia de Corrientes. Asimismo, se pretende comparar diferentes índices de calidad de suelos empleados frecuentemente en sistemas agrícolas de otras regiones del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en la Estancia La Corona, departamento Concepción, Corrientes (W58°04'33,04" S28°21'39,97"). El área experimental se localiza en el gran paisaje de lomas y planicies arenosas, sobre suelos pertenecientes a la serie Chavarría (Psamacuente típico) (Escobar *et al.*, 1996; Navarro de Rau y Kurtz, 2019). El clima de la zona es subtropical, muy cálido en verano, pero con heladas en invierno. La temperatura media es de 20,04 °C, la máxima promedio es de 26,5 °C y la temperatura mínima media es de 13,8 °C. Las precipitaciones anuales oscilan entre 1600 y 1900 mm, con frecuentes excesos en otoño y primavera y eventuales déficits principalmente en verano. El ensayo se localizó en pastizales naturales de similar composición florística. El tapiz vegetal se caracteriza por pastos que crecen en forma de matas, siendo la paja colorada (*Andropogon lateralis*) y *Rhynchospora tenuis* las especies dominantes; mientras que en la inter-mata dominan especies como *Axonopus sp.* y *Paspalum notatum* (Carnevali, 1994). En este trabajo se evaluaron 3 tratamientos, con 3 repeticiones. En cada tratamiento, las repeticiones corresponden al mismo circuito de pastizal y manejo del pastoreo, perteneciendo a diferentes potreros, alejados al menos 1 km entre sí, y al menos 3 km entre tratamientos. Los tratamientos evaluados fueron: (i) Forestación pura con 833 pinos/ha (plantados a 6 x 2 metros entre hileras y plantas respectivamente), plantados en el año 2010 con pastoreo (FP), (ii) Pastizal bajo pastoreo a cielo abierto (PCA) y, (iii) Sistema silvopastoril, con 409 pinos/ha (12 x 6 x 2 metros, marco de plantación igual al anterior, pero con callejón ancho de 12 metros) marco de plantación con hileras dobles, plantados en año 2012 y también bajo pastoreo (SSP). Los animales (vacas de cría) tuvieron acceso a todos los potreros, con una carga continua promedio de 0,5-0,6 EV/ha. Los análisis se realizaron en muestras tomadas en el año 2018, al octavo y sexto año de plantación FP y SSP respectivamente. El muestreo de suelos se realizó a los 9 años de establecer el cultivo forestal en el SSP y el FP. Se tomaron 54 muestras en total; 9 repeticiones, en los 3 tratamientos y a 2 profundidades (a 0-5 y de 5-15 cm). Se realizaron las siguientes determinaciones en suelos: carbono orgánico total (COT); textura (método Bouyoucos), densidad aparente (Dap) por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986). Se calculó el % de limo más arcilla (Li+Arc). Para el fraccionamiento granulométrico del COT, se utilizó el tamizado en húmedo del suelo (Cambardella & Elliott, 1992; Galantini, 2005). Se obtuvieron dos fracciones con características diferentes. 1) fracción gruesa (>53 µm) en la que se encuentra el CO particulado asociado a las arenas medias, gruesas y finas (CO_{labil}). Por otro lado, el CO estable asociado a la fracción fina o mineral < 53 µm (CO_{min}) se obtuvo mediante el cálculo de la diferencia entre el COT en el suelo y el CO_{labil}. Se calculó las proporciones CO_{labil}/COT y CO_{min}/COT. Para detectar los cambios en la calidad de suelo, se utilizaron índices propuestos por distintos autores: 1) el índice de MO (IMO) según Quiroga *et al* (2006) donde $IMO = \frac{\%CO}{\%Li + \%Arc} \times 100$. En suelos con buen manejo y prácticas agronómicas adecuadas, el valor del índice en regiones semiáridas debería ser mayor a 5 en un rango de 2 a 12. 2) El índice de MO-arcilla (MOA) de Ferraris *et al.*, (2002) donde $MOA = \frac{\%CO}{\%Arc} \times 100$. Y 3) la relación de estratificación de COT de Franzluebbbers (2002) donde $RE = \frac{\%COT_{0-5\text{ cm}}}{\%COT_{5-15\text{ cm}}} \times 100$. Un valor de RE > 2 indicaría que el manejo adoptado mejora a largo plazo la calidad del suelo. Con los valores de DAP obtenidos y la COT en el suelo y en cada fracción se obtuvo el stock de carbono orgánico almacenado (SCO; Mg ha⁻¹) haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$SCO = \%CO * DA * p * 10000$$

Dónde: %CO es la concentración de COT en la muestra de suelo, DAP: densidad aparente (Mg m^{-3}) y p: el espesor de la capa de suelo muestreada (m).

Para para evaluar las diferencias en los resultados se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) bajo un diseño completamente aleatorizado y el test de tuckey para la comparación de medias ($p \leq 0,05$). También se realizó análisis de regresión simple. El análisis estadístico se realizó con el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran las características de los suelos por tratamiento y estrato de muestreo. Los valores se muestran homogéneos e indican que se trata de un suelo ácido y de textura gruesa tal como se describe para la serie de suelo (Escobar et al, 1996).

Tabla 1: Características de suelos en los sitios experimentales

	Profundidad	FP	PCA	SSP
pH	0-5 cm	5,18	5,15	4,94
	5-15 cm	5,10	5,26	4,98
Arena (g/kg)	0-5 cm	849,7	807,4	817,6
	5-15 cm	847,0	805,9	813,3
Limo+arcilla (g/kg)	0-5 cm	150,3	192,9	182,7
	5-15 cm	153,1	194,6	186,8

FP: forestación pura; SSP: sistema silvopastoril; PCA: ganadería con pastizal natural a cielo abierto

En la Tabla 2 se muestran los valores promedio por tratamiento y estrato, la concentración de COT, para la fracción lábil del CO (CO_{labil}), la fracción estable (CO_{min}) y la densidad aparente (DA). Los sistemas evaluados no afectaron significativamente ninguna de las variables estudiadas ($p > 0,05$).

Tabla 2: Concentración de carbono orgánico en el suelo entero (COT), CO lábil, CO asociadas a la fracción mineral del suelo y densidad aparente en las profundidades 0-5 cm y 5-15 cm

	Profundidad	FP	PCA	SSP
COT (%)	0-5 cm	0,88± 006a	1,05±0,1a	0,97±007a
	5-15 cm	0,49±004a	0,53±005a	0,49±001a
CO_{labil} (%)	0-5 cm	0,49±0,08 a	0,71±0,08 a	0,64±0,09 a
	5-15 cm	0,16±003a	0,2±004a	0,23±004a
CO_{min} (%)	0-5 cm	0,39±004a	0,34±004a	0,33±005a
	5-15 cm	0,33±002a	0,32±003a	0,26±003a
DA (Mg/m^3)	0-5 cm	1,25±0,03	1,25±001a	1,24±002a
	5-15 cm	1,28±0,006a	1,28±001a	1,26±001a

FP: forestación pura; SSP: sistema silvopastoril; PCA: ganadería con pastizal natural a cielo abierto. El valor seguido a \pm corresponde al error estándar

La cantidad de COS almacenada en el espesor 0-15 cm fue de 11,7 Mg/ha; 12,1 Mg/ha y 13,2 Mg/ha para FP, SSP y PCA respectivamente, sin diferencias significativas entre ellos.

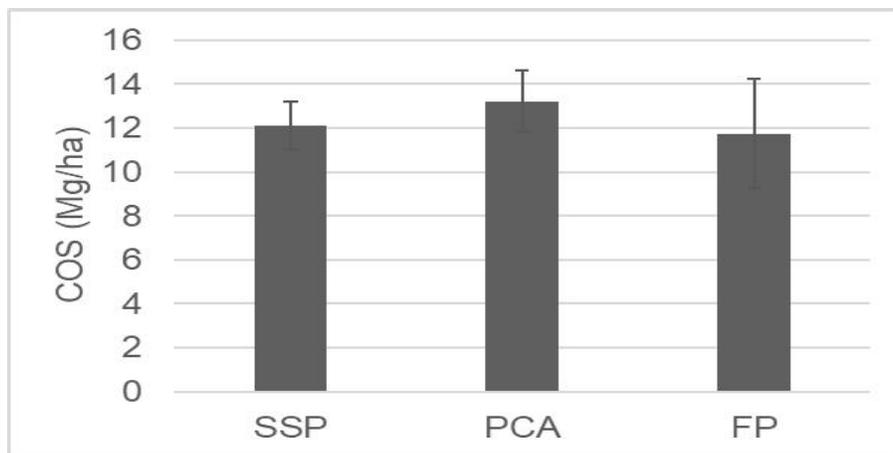


Figura 1: Cantidad de carbono orgánico del suelo almacenado en la profundidad 0-15 cm. FP: forestación pura; SSP: sistema silvopastoril; PCA: ganadería con pastizal natural a cielo abierto

La cantidad de CO_{min} fue de 5,3 Mg/ha (SSP); 6,3 Mg/ha (PCA) y 6,6 Mg/ha (FP), sin diferencias ($P>0,05$) entre usos del suelo. Similar respuesta se obtuvo para CO_{labil} donde las cantidades fueron de 5,2 Mg/ha (FP); 6,8 Mg/ha (SSP) y 6,9 Mg/ha (PCA) (Figura 2)

Se encontró una asociación positiva entre el stock de COS del suelo y la cantidad de CO_{labil} . En PCA, el 50% de la variación de la COS del suelo se explicó a partir de la cantidad de CO_{labil} . Para FP y SSP esta relación fue más débil, aunque alcanzó al 45% y 33% respectivamente. Por el contrario, no se observaron relaciones entre la cantidad de COS y la cantidad de CO_{min} . Esto podría sugerir que el CO_{labil} juega un rol central en las reservas de COS de estos suelos de textura gruesa.

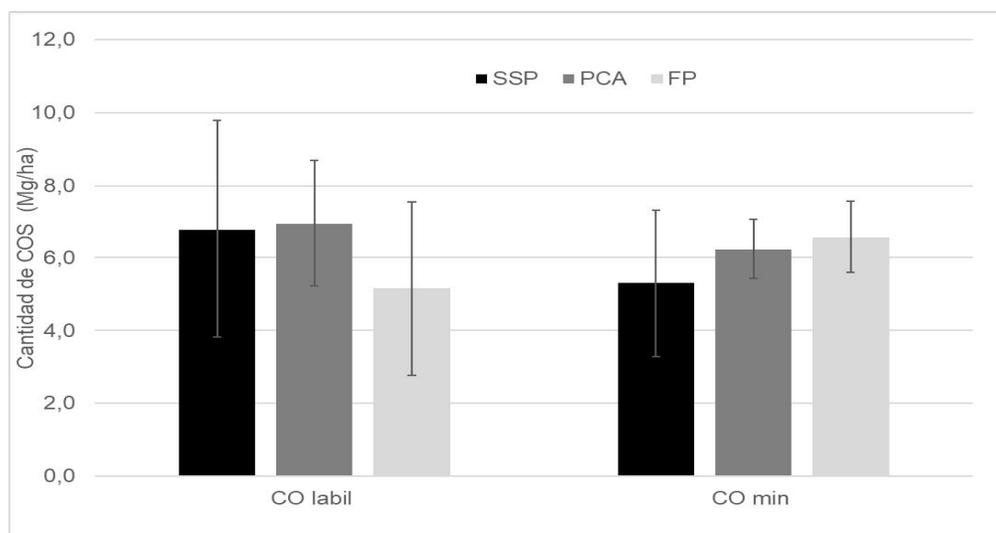


Figura 2: Cantidad de carbono orgánico en almacenado en la fracción lábil y asociada a la fracción mineral en la profundidad 0-15 cm

FP: forestación pura; SSP: sistema silvopastoril; PCA: ganadería con pastizal natural a cielo abierto

La cantidad de CO_{labil} representa en promedio el 50% (entre 44 a 56,2%) del stock de COT, la porción restante, el restante 49,5% (43,8 a 55,9%). En promedio, CO_{labil} representó el 61% y 38% del COT para las profundidades 0-5 cm y 5-15 cm respectivamente, en tanto que el CO_{min} el 39 y 62%. En relación al IMO, en términos nominales el orden decreciente del índice fue $FP>PCA>SSP$ (Tabla 3). Un valor de IMO por debajo de 5 sugiere la pérdida de MO en

relación a la fracción mineral fina del suelo (Li + Arc), condicionando la calidad del mismo (Quiroga et al., 2006; Quiroga y Bono, 2012; Vanzolini et al., 2015). El MOA, en términos nominales marcó más las diferencias entre situaciones, en este caso a favor de las forestaciones. El término nominales el orden decreciente del índice fue FP>SSP>PCA. Ninguno de los índices fue significativamente diferente entre manejos.

Tabla 3: Índices y relaciones basados en el COT para evaluar la calidad del suelo en diferentes modelos productivos

Índices	FP	PCA	SSP
IMO/Li+Arc	5,9± 0,5a	5,6 ±0,53a	5,5 ±0,56a
MOAc	12,7 ± 1,09a	9,7± 0,99a	11,1± 1,05a
RE	1,8 ±0 ^a 15a	2,2± 0,29a	2,0± 014a

FP: forestación pura; SSP: sistema silvopastoril; PCA: ganadería con pastizal natural a cielo abierto. El valor seguido a ± corresponde al error estándar

En cuanto a la RE, el orden decreciente del índice fue PCA>SSP>FP. Se encontró una relación positiva entre la cantidad de COS 0-15 cm y la RE (r: 0,54) Una RE>2 indica que el manejo adoptado mejora la calidad del suelo. El SSP se encuentra en el umbral y la FP no cumple con el requisito. De acuerdo a Franzluebbers (2002) el concepto asociado a la relación de estratificación se basa en el aumento de las reservas de COS desde las capas superficiales, ya que constituyen la interfaz en donde comienzan los mecanismos que afectan la productividad y calidad ambiental. Todos los índices calculados no fueron significativamente diferentes para los distintos manejos lo cual podría sugerir la necesidad de un mayor periodo de tiempo para que se expresen los tratamientos. A diferencia de los observado por Sá et al., (2009) y Alvarez et al., (2014) no encontramos una asociación entre el stock de COS y los índices calculados

CONCLUSIONES

En este trabajo no se encontraron evidencias de cambios significativos en el contenido del COS por el cambio de uso. En suelos de textura gruesa del centro de Corrientes no se observaron cambios en las concentraciones y en las reservas de COS al comparar sistemas mixtos (SSP) respecto de los sistemas puros (PCA y FP), a los 9 años de su aplicación. Las fracciones del CO no fueron modificadas por los tratamientos a los 9 años de su aplicación. Los índices calculados no detectan diferencias entre tratamientos; sin embargo, se encuentran cercanos a los valores umbrales citados por la bibliografía. Independientemente del tratamiento, las reservas de COS se relacionan con la cantidad de CO_{labil} del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los propietarios del establecimiento La Corona (Guillermo Perrens) por la predisposición para llevar adelante este y otros trabajos con más de 10 años de datos in situ.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, C., Álvarez, C.R., Costantini, A., Basanta, M. 2014. Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). *Soil Till. Res.* 142: 25-31.
- Álvarez, C.R., Costantini, A.O., Bono, A., Taboada, M.A., Boem, F.G.B., Fernández, P.L., Prystupa, P. 2011. Distribution and vertical stratification of carbon and nitrogen in soil under different managements in the Pampean Region of Argentina. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 35(6): 1985-1994.
- Baruzzo, M. N., Smichowski, H., Martínez, S. E. y Contreras, F. I. (2020). Plantaciones Forestales: crecimiento y expansión de la actividad forestal en las Lomadas Arenosas en Corrientes, Argentina. *Revista Investigaciones y Ensayos Geográficos (IEG)*. UNAF, 1(17), 71-82.
- Carnevali, R. 1994. Fitogeografía de la provincia de Corrientes. Corrientes, INTA – Gobierno de la provincia de Corrientes. 324 p.

- Escobar, E.H., Melgar, R., Ligier, D., Matteio, H., Vallejos, O. 1996. "Mapa de suelos de la Provincia de Corrientes. 1:500.00. Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales. EEA INTA Corrientes. 432p.
- Franzluebbers, A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66: 95-106
- Galantini, J.A., 2001. Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA-INTA)* 30 (1) 125-146.
- Gándara, F. R., Casco, J. F., Goldfarb, M. C., Correa, M. 1990. "Evaluación Agronómica de pastizales en la Región Occidental de Corrientes (Argentina). II Sitio Chavarría. *Revista Argentina de Producción Animal.* Vol. 10, Supl. 1, p g. 21
- Gándara L., Faverin C., Cambareri G.S., Tieri, M. P., Cosentino, V.R.N., Recavarren P.M., Beltran M.J., Yogi D.R., Perrens G.A., Colcombet, L., Peri P.L. 2021. ¿Podrán los sistemas silvopastoriles mejorar los balances de carbono en Argentina?. En: Rivera J., Colcombet L., Santos-Gally R., Murgueitio E., Díaz M., Mauricio R., Peri P., Chará J. 2021. *Sistemas Silvopastoriles: Ganadería Sostenible con Arraigo e Innovación.* CIPAV. Cali, Colombia. ISBN: 978-958-9386-99-6 © 2021. CIPAV
- Haynes, R.J., 2000. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biol. Biochem.* 32: 211-219.
- Jackson, R.B., Banner, J.L., Jobbagy, E.G., Pockman, W.T., Wall, D.H. 2002. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature* 418:623–626.
- Jackson, R.B., Schenk, H.J., Jobbagy, E.G., Canadell, J., Colello, G.D., Dickinson, R.E., Field, C.B., Friedlingstein, P., Heimann, M., Hibbard, K., Kicklighter, D.W., Kleidon, A., Neilson, R.P., Parton, W.J., Sala, O.E., Sykes, M.T. 2000. Belowground consequences of vegetation change and their treatment in models. *Ecol. Appl.* 10:470–483.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food Security Science. 304(5667):1623-1627.
- Navarro de Rau, M.F., Kurtz, D.B. 2019. Soils of Corrientes. In: Rubio G.; Lavado R. & Pereyra F. (eds) *The Soils of Argentina.* World Soils Book Series. Springer, Cham.
- Pereira L.F., Oliveira R.R.M., Kurtz D.B., de Siqueira Castro J., dos Santos V.J., do Carmo Alves S., Calijuri M.L. 2023. It is possible to conciliate policy-driven forestry expansion and "malezales" wetlands conservation in Argentina? *Environmental Science and Policy*, 142 , pp. 153-163.
- Pizzio, R., Bendersky, D., Barbera P., Maidana, E. 2021. *Caracterización y manejo de los pastizales correntinos / Rafael [et al.].* – Buenos Aires : Ediciones INTA; Estación Experimental Agropecuaria Mercedes, 2021. 289 p.
- Quiroga, A.R., Estelrich, D. 2006. Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *J. Arid Environ.* 65: 142-155.
- Quiroga, A.R., Buschiazzo, D.E., Peinemann, N. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semiarid Argentinean Pampas. *Soil Sci.* 161: 104-108.
- Sa, J.C., de, M., Lal, R., 2009. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil Tillage Res.* 103, 46–56.
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for Csaturation of soils. *Plant Soil* 241: 155-176.
- Tan, Z., Lal, R., Owens, L., Izaurrealde, R.C. 2007. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil Till. Res.* 92: 53-59