

Una realidad que, por su beneficio ambiental, debe ser reivindicada por los agricultores

El secuestro de carbono en la agricultura de secano mediterránea

En el experimento "Malagón" se han estudiado los efectos del sistema de laboreo (no laboreo y laboreo convencional), la rotación de cultivo (rotación bianual de trigo harinero con habas, girasol, garbanzos y barbecho) y la dosis de nitrógeno fertilizante aplicada al trigo (0, 50, 100 y 150 kg/ha), sobre el secuestro de carbono en un vertisol de secano mediterráneo en la campiña del Guadalquivir (Córdoba) durante veinte años. En este artículo se resumen los resultados de dicho experimento.

■ Rafael J. López-Bellido,
José M^a Fontán y Luis López-Bellido.

Departamento de Ciencias y Recursos Agrícolas y Forestales.
Universidad de Córdoba.

El suelo representa la mayor reserva de carbono (C) a escala mundial: sólo de C orgánico existen 1.550 Gt (1 Gt: 1.000 millones de toneladas) hasta 1 m de profundidad; mientras que de C inorgánico hay 950 Gt. Únicamente el C orgánico del suelo representa más que la reserva biótica (560 Gt) y atmosférica (760 Gt) juntas (Lal, 2004). Globalmente, el C atmosférico está aumentando a una tasa de 3,5 Gt/año (IPCC, 2007; WMO, 2008), debido sobre todo a la utilización de combustibles fósiles y a los cambios en el uso del suelo. El C terrestre, el del suelo y el biótico, han sido una fuente de CO₂ atmosférico desde el nacimiento de la agricultura hace aproximadamente 10 milenios. Los suelos representan a medio y largo plazo un

sumidero para el almacenamiento de C y tienen potencial para compensar las emisiones antropogénicas (Swift, 2001). La causa de esta compensación de las emisiones de CO₂ se fundamenta en su captura por los cultivos (raíz, paja y grano) y su almacenamiento (secuestro) bajo forma orgánica en el suelo; siendo el tiempo que el C permanece en el mismo un factor clave. Por esta razón, se habla de tiempo de residencia medio, que es el tiempo que el C reside en alguno de los tres sumideros o reservorios de su ciclo global antes de pasar a otro. Por ejemplo, una molécula de CO₂ permanece un promedio de cinco años en la atmósfera antes de incorporarse a la biosfera terrestre o a los océanos; y un átomo de C perdura una media de diez años en la vegetación y de 35 años en la materia orgánica del suelo antes de regresar a la atmósfera como CO₂ (Schlesinger, 2005).

Con esta escala de tiempo es evidente que la experimentación a largo plazo es la única vía para estudiar la dinámica del C orgánico del suelo, en relación con el tipo de uso y manejo

Vista de la campiña andaluza donde se ubican los suelos vertisoles (bujeos).

que se realiza del mismo. En el mundo existen varios experimentos de campo que se iniciaron hace más de cien años (Rothamsted Experimental Station 1843, the Morrow Plots 1876, Alabama's Old Rotation 1896, etc.), aunque también experimentos mucho más recientes son denominados de larga duración. España está muy retrasada en tal sentido, en comparación con los países pioneros y aquellos otros que vieron más recientemente la importancia de esta forma de investigación, al carecer de experimentos de este tipo que tengan proyección y aceptación en la comunidad científica internacional. Con este objetivo surgió el experimento Malagón en 1986 sobre un vertisol de secano de la campiña andaluza, el cual ha generado numerosos artículos en las mejores revistas de agricultura del mundo.

El incremento del CO₂ atmosférico y el gran potencial de los suelos agrícolas para secuestrar el C han estimulado el desarrollo de prácti-

cas de manejo que incrementen su secuestro. La ganancia neta o pérdida de C orgánico del suelo depende de la cantidad de éste que se añade con los residuos de las plantas y la biomasa radicular, frente a las pérdidas por la retirada de residuos, la respiración microbiana y la erosión. Muchos trabajos han incluido en las ganancias la aplicación de estiércoles y biosólidos; sin embargo ello es considerado como un error y no debe tenerse en cuenta. Schlesinger (2000) demostró que la aplicación de estiércol es una contradicción a la que denominó "el mito del estiércol". El incremento de los niveles de C orgánico del suelo en una finca donde se aplica estiércol conlleva la importación de inputs de C de un área proporcionalmente mayor en otro finca, en la cual tiene lugar un empobrecimiento del mismo. El secuestro de carbono se produce cuando un conjunto de prácticas de manejo incrementan el almacenamiento de C en el suelo. El impacto producido por estas prácticas, tales como el sistema de laboreo, las rotaciones de cultivo o la fertilización, ha sido bien estudiado y difiere según el tipo de suelo, sistema de cultivo, manejo de los residuos y el clima. Por esta razón, es de gran interés el estudio del secuestro de carbono según las prácticas de manejo en diferentes tipos de suelo y climas.

Secuestro de carbono en los suelos vertisoles de secano mediterráneos

En el experimento "Malagón" se han estudiado los efectos del sistema de laboreo (no laboreo y laboreo convencional), la rotación de cultivo (rotación bianual de trigo harinero con habas, girasol, garbanzos y barbecho) y la dosis de nitrógeno fertilizante aplicada al trigo (0, 50, 100 y 150 kg/ha), sobre el secuestro de C en un vertisol de secano mediterráneo en la campiña del Guadalquivir (Córdoba) durante veinte años (1986-2006), y a la profundidad de suelo 0-90 cm (0-30, 30-60 y 60-90 cm).

Aunque la dosis de N fertilizante ha tenido efecto sobre la cantidad de residuos dejados por el trigo durante los veinte años, sin embargo ésta no ha tenido efecto alguno sobre el secuestro de C. La ausencia de influencia del N fertilizante sobre el secuestro de C también ha sido puesta de manifiesto por Halvorson *et al.* (2002) en rotaciones con trigo bajo condiciones semiáridas. No obstante, Khan *et al.* (2007) ha demostrado que la relación entre el secuestro de carbono y el N fertilizante permanece todavía como una cuestión controvertida.

Lo primero que hay que resaltar del agro-sistema estudiado en el experimento "Malagón" es que en un período de veinte años ha



Grietas características de los vertisoles que provocan que el secuestro de carbono sea mayor en horizontes profundos que en la capa superficial.

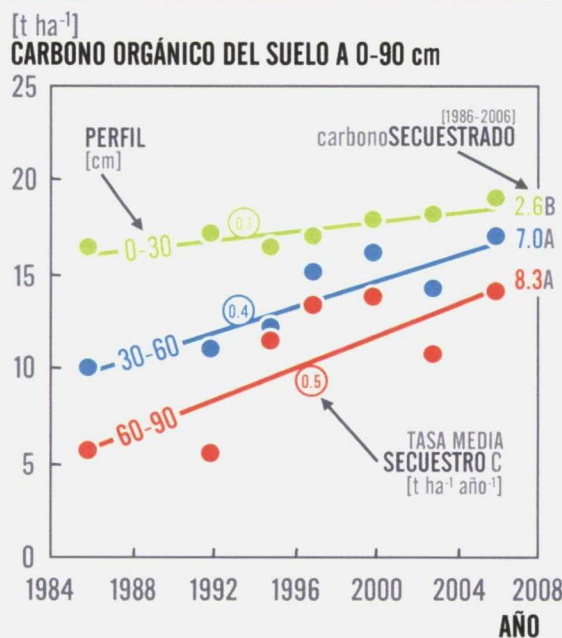
El secuestro de carbono en los vertisoles es mayor en los horizontes más profundos (un 46% por debajo de los 60 cm de profundidad)

secuestrado 17,9 t/ha de C, con una tasa media anual de 0,9 t/ha/año. Este hecho pone de relieve que los sistemas de cultivo de secano en los vertisoles mediterráneos contribuyen

significativamente al secuestro de C, por lo cual deben ser valorados positivamente en el contexto de preocupación ambiental existente sobre los niveles de CO₂ atmosférico. Unas de

las peculiaridades más notables de dichos vertisoles en relación con el secuestro de C ha sido que éste fue mayor en los horizontes de suelo más profundos (> 30 cm) respecto a la capa superficial (figura 1). Por debajo del horizonte de los primeros 60 cm de suelo fue secuestrado casi la mitad del C total (46%), mientras que en la capa superficial (30 cm), solo fue secuestrado el 15% de C. Esto contrasta con otros tipos de suelo donde lo normal es que la mayor cantidad de C se acumule en las capas superficiales; lo cual, sin duda, confiere una ventaja a los vertisoles. La acumulación de C en profundidad es debida a la formación de grietas de grandes dimensiones que se generan en los calurosos veranos mediterráneos, y que dan lugar a que los residuos de los cultivos sean "tragados" por el suelo, que implica la reducción de su mineralización y por tanto una mayor estabilización del C orgánico (Lal y Kimble, 1997). Esta disminución de la mineralización, y en consecuencia de las emisiones

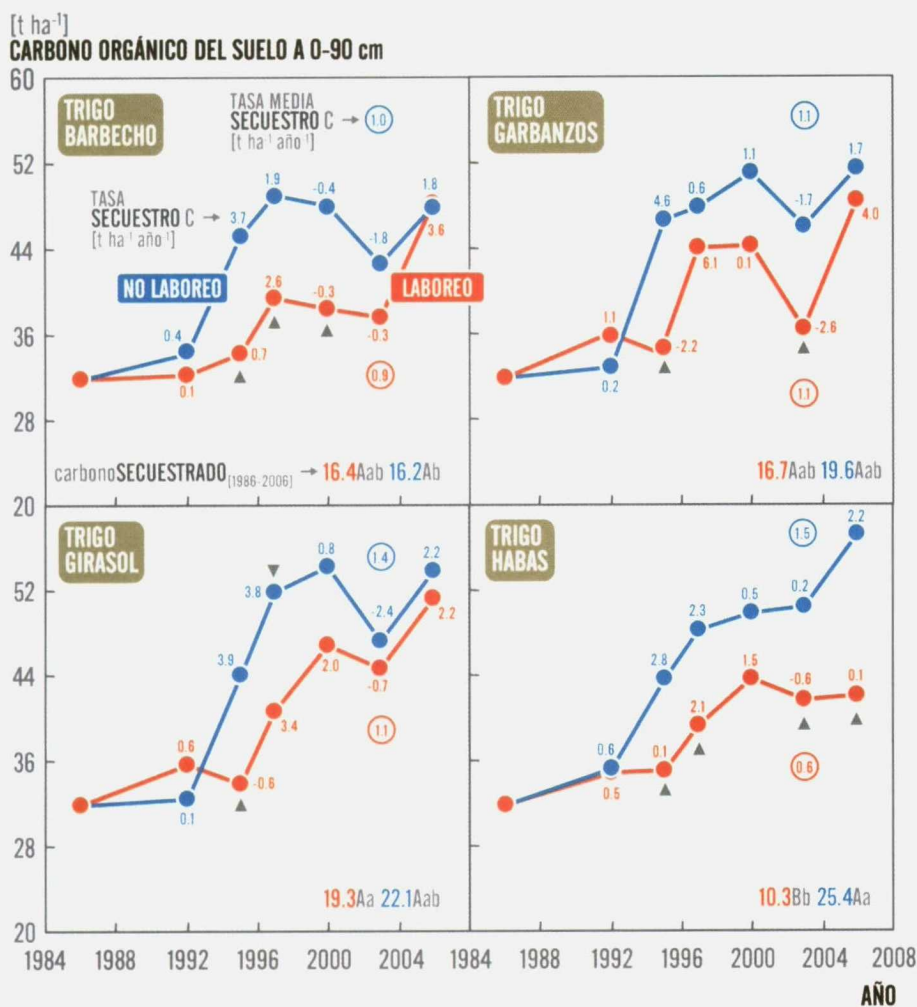
FIGURA 1.
Evolución de las reservas de C orgánico del suelo, C total secuestrado y tasa media anual de secuestro de C a las profundidades de suelo 0-30, 30-60 y 60-90 cm entre 1986 y 2006 en el experimento "Malagón"



Letras diferentes representan la existencia de diferencia significativa.

FIGURA 2.

Evolución de las reservas de C orgánico del suelo, tasa anual de secuestro de C y C total secuestrado a 0-90 cm de profundidad, según el sistema de laboreo y la rotación de cultivo entre 1986 y 2006 en el experimento Malagón.



Los triángulos representan la existencia de diferencia significativa entre sistemas de laboreo para una rotación y año. Letras mayúsculas diferentes representan la existencia de diferencia significativa entre sistemas de laboreo para una rotación. Letras minúsculas diferentes representan la existencia de diferencia significativa entre rotaciones para un mismo sistema de laboreo.

de CO₂, es debida a una limitación en la disponibilidad de oxígeno cuando las grietas se cierran (Piovanelli *et al.*, 2006). A raíz de estos resultados, habría que preguntarse cuánto aumenta el tiempo de residencia del C a dichas profundidades de suelo respecto a la capa superficial; para responder a ello sería necesaria la utilización del isótopo ¹³C.

El secuestro de C en los veinte años según los dos sistemas de laboreo estudiados fue significativamente diferente. El no laboreo secuestró 20 t/ha de C frente a 14 t/ha del laboreo convencional. Esto se tradujo en una tasa

media anual de secuestro de C de 1,3 y 0,9 t/ha/año en el no laboreo y laboreo convencional, respectivamente. Las tasas de secuestro de C en no laboreo, según otros autores, son variables y difieren sobre todo con la profundidad del muestreo del suelo: Bessam y Mrabet (2003) 0,66 t/ha/año de 0-25 cm; Spargo *et al.* (2008) 0,31 t/ha/año de 0-15 cm; Calegari *et al.* (2008) 1,24 t/ha/año de 0-40 cm. Teniendo en cuenta la profundidad de muestreo de los trabajos citados, alrededor de los 30 cm, el experimento "Malagón" secuestraría en dicha profundidad menos C que estos

otros experimentos. Sin embargo, la mencionada peculiaridad de los verticales ya referida hace necesario considerar todo el perfil para poder comparar con otros suelos, donde el secuestro de C por debajo de 30 cm es casi inexistente.

Influencia de las rotaciones

No obstante, los resultados medios analizados en el párrafo precedente deben ser particularizados para cada rotación y año, ya que la tendencia no fue constante; lo cual pone de manifiesto la importancia del año en el efecto del sistema de laboreo y la rotación de cultivo sobre el secuestro de C (figura 2). La rotación que más C secuestró en los veinte años fue trigo-habas en no laboreo (25 t/ha), seguida por trigo-girasol también bajo el sistema de no laboreo (22 t/ha), aunque esta última no se diferenció significativamente del laboreo convencional. El secuestro de C en ambos sistemas de laboreo tampoco se diferenció en las rotaciones trigo-garbanzos y trigo-barbecho, con valores entre 16 y 20 t/ha (figura 2). Sorprende que el barbecho no registre un nivel de secuestro de C más bajo cuando solo se ha sembrado un cultivo cada dos años. De hecho, un estudio anterior que también realizamos en "Malagón" (Fontán *et al.*, 2008) sobre la captura de C, muestra que el balance realizado (C capturado, es decir, C de las raíces y la paja menos las emisiones de CO₂ del suelo), fue negativo en la rotación trigo-barbecho. Ello pone de manifiesto que es más relevante y preciso medir los efectos finales, es decir, el secuestro de C, que pasos intermedios como son la captura y las emisiones de C, donde es más fácil encontrar balances distorsionados.

En síntesis, los resultados obtenidos ponen de relieve varias cosas:

- (I) El trigo es el cultivo clave en el secuestro del C.
- (II) La pobre aportación de C del cultivo del garbanzo.
- (III) La gran capacidad de las habas para secuestrar C en rotación con el trigo, pero sólo bajo no laboreo.
- (IV) El gran potencial del girasol, a pesar de la incertidumbre de este cultivo por la variable disponibilidad de agua.

De cara a mejorar el secuestro de C, tales resultados deberían hacernos reflexionar sobre la introducción de cultivos alternativos en la rotación con el trigo, que se siembren en otoño para aprovechar el ciclo natural de lluvias (López-Bellido *et al.*, 2007). En tal sentido, el

objetivo sería que la tasa de secuestro de C con el cultivo alternativo fuese el doble del obtenido con la rotación trigo-barbecho, es decir, 1,9 t/ha/año.

Los valores de secuestro de C obtenidos podrían llevarnos a pensar que el no laboreo sólo ha sido efectivo, después de veinte años, en la rotación trigo-habas. Sin embargo, esta fotografía del stock de C del experimento entre 1986 y 2006 no muestra la realidad de la dinámica del C en el agrosistema. Es necesario observar como en los años intermedios, donde fue realizado el análisis del C del suelo, el no laboreo secuestró más C que el laboreo convencional en distintos años: cuatro veces en trigo-habas, tres en trigo-barbecho y dos en trigo-girasol y trigo-garbanzos; y siempre con la tendencia a que el secuestro sea mayor en el no laboreo. De hecho, si se calcula la media del secuestro por periodos de análisis, el no laboreo secuestra más C que el laboreo convencional. Otro aspecto esencial que se deduce de los resultados es que han existido periodos donde se ha perdido C al existir tasas anuales de secuestro negativas, aunque la tendencia

de cada rotación y dentro de ésta de cada sistema de laboreo es aumentar el secuestro de C con el tiempo (**figura 2**). Tales pérdidas de C, cuando se han producido, han sido mayores en las rotaciones que incluían cultivos de siembra primaveral (girasol y garbanzos), que están más sometidos a la errática distribución de la lluvia típica del clima mediterráneo. Las fuertes pérdidas de C de ambas rotaciones fueron debidas principalmente a que en ese periodo o no se obtuvo cosecha o ésta fue muy pobre.

Influencia de los residuos en superficie

Según López-Bellido *et al.* (2010), para mantener los niveles de C orgánico del suelo, de acuerdo con los cálculos de Clay *et al.* (2006), es necesario que no se retiren del suelo 2,23 y 1,99 t/ha/año de residuos aéreos en el no laboreo y laboreo convencional, respectivamente. Estos resultados coinciden por los aportados por Johnson *et al.* (2006) procedentes de varios autores. López-Bellido *et al.* (2010) han demostrado que la tasa de C mineralizado en el experimento "Malagón" es menor que los datos reportados por Clay *et al.*

(2006). Este hecho debe ser atribuido a las condiciones secas propias del clima mediterráneo, que reducen la actividad de los microorganismos durante un periodo prolongado del año (Fontán *et al.*, 2008). Johnson *et al.* (2006) sugieren incluir el C radicular y la rizodeposición para el cálculo de los residuos de C que no son cosechados. Estos autores han utilizado valores constantes previamente obtenidos por diferentes investigadores, pero tales cifras no se adaptan a la realidad bajo las condiciones del experimento "Malagón". Muñoz-Romero *et al.* (2010) registraron para el trigo valores de la relación C radicular/C aéreo de 0,55; 0,72 y 0,64 en tres años, mientras que Johnson *et al.* (2006) asumieron que esta proporción era de 0,50.

Influencia de las prácticas de manejo

Finalmente, también cabe preguntarse si el secuestro de C bruto obtenido seguirá siendo positivo cuando se resten las emisiones producidas por las prácticas de manejo (las emisiones del suelo ya están descontadas en el análisis de la reserva de C del suelo). Dichas prácticas



MAQUINARIA DE PRECISIÓN PARA CULTIVOS ESPECIFICOS, PODA, DESHERBAJE ECOLÓGICO, ABONADO Y PREPARACIÓN DE SUELOS



Visítenos en **FIMA 2010**
(pabellón 8, calle I, 2-4)



VITI



HORTI



OLI



ARBO

INDUSTRIAS DAVID

para sus cultivos

INDUSTRIAS DAVID, S.L.U.
P.I. Urbayecla II - c/ Médico Miguel Lucas, s/n - 30510 YECLA (Murcia) ESPAÑA
Tel. (34) 968 718 119 - (34) 968 790 682 - (34) 616 949 784 - Fax. (34) 968 795 851
www.industriasdavid.com - industriasdavid@industriasdavid.com





Siembra de girasol después de trigo bajo no laboreo.



Dejar la paja del trigo es clave para aumentar el secuestro de carbono.

(laboreo, fertilización, siembra, aplicación de herbicidas y cosecha) no emiten a la atmósfera tanto C como se piensa. Si se consideran todas las emisiones de C producidas por las prácticas agrícolas, es decir, no sólo el C que se emite en el campo, sino el de todo el proceso, algunos valores pueden servir de referencia: 86 kg/ha en una aplicación de 100 kg de N fertilizante al trigo; 25 kg/ha en la fertilización fosfórica; 4,7 kg/ha en el herbicida aplicado, etc. La operación de cultivo que más C emite es obviamente el laboreo: 15 kg/ha con un arado de vertedera; 6 kg/ha con una grada ligera y 4 kg/ha con un cultivador. Un cálculo aproximado da como resultado una horquilla de emisiones de C derivadas de las prácticas agrícolas entre 0,15 y 0,2 t/ha/año, como promedio de una rotación bianual bajo laboreo convencional y no laboreo. De esta estimación se deduce que el secuestro de C neto es siempre positivo en los suelos vertisoles de secano mediterráneos, debido a los bajos inputs utilizados en el proceso productivo.

Si se estima que el área de suelos vertisoles de secano dedicada a los cultivos herbáceos en Andalucía es alrededor de 500.000 ha, el secuestro de C medio representaría 362.000 t/ha/año. La media per cápita española de emisiones de C a la atmósfera por combustión, en el período 1990-2007 es 1,9 t/persona/año según IEA (2009). Utilizando este valor y cifrando la población andaluza en 8,29 millones (INE, 2009), el área de vertisoles de secano dedicada a cultivos herbáceos, que solo representa el 5,7% de la superficie de la región, estaría compensando el 2,3% de las emisiones de C totales a la atmósfera. Estas cifras aparentemente bajas, muestran el gran beneficio ambiental que está produciendo este agrosistema, puesto que no sólo se

compensa asimismo sino que secuestra suficiente C para compensar emisiones procedentes de otras actividades.

Conclusiones

Los cultivos herbáceos de secano en los suelos vertisoles mediterráneos tienen un potencial de secuestro de C neto y contribuyen a compensar las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Nuestra investigación demuestra que esto ocurre cuando no se retira la paja del trigo, práctica que es bastante habitual en el área. Dicha retirada de la paja puede tener efectos negativos sobre el balance de secuestro de C, los cuales están siendo actualmente estudiados en el experimento "Malagón" (Proyecto: Carbon Dynamics and Sequestration in a Rainfed Mediterranean Agroecosystem. AGL2009-07854. Plan Nacional I+D+I, Ministerio de Ciencia y Tecnología). La posibilidad de que esta retirada de paja tradicional se incremente para la producción de etanol celulósico plantearía una situación controvertida, secuestro de C *versus* bioenergía, de no fácil solución.

La clave del secuestro de C en los agrosistemas de secano mediterráneos sobre suelos vertisoles, está en la mayor cantidad de almacenamiento de C en los horizontes de suelo de más de 30 cm de profundidad, preservándolo de una mineralización más rápida. Después de veinte años del experimento "Malagón" hay que destacar que el no laboreo tiene un efecto extraordinariamente positivo sobre el secuestro de C en la rotación trigo-habas; mientras que en las rotaciones trigo-girasol, trigo-garbanzos y trigo-barbecho su efecto depende más de las condiciones ambientales. Además, la aplicación de nitrógeno fertilizante no parece tener efecto alguno sobre el secuestro de C. ●

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la empresa Abecera propietaria de la finca "Malagón" donde se ubica el experimento, por toda la colaboración prestada. También a INIA por la ayuda aportada en los últimos años para el mantenimiento de este experimento de larga duración. Esta investigación ha sido financiada por los siguientes proyectos del Plan Nacional de I+D: AGF95-0553, AGF97-0498, AGL2000-0460, AGL2003-03581 y AGL2006-02127/AGR.

Bibliografía ▼

- Bessam F, Mrabet R. 2003. Soil Use Management 19, 139.
- Calegari A, Hargrove WL, Rheinheimer DDS, Ralisch R, Tessier D, Tourdonnet S, Guimarães MF. 2008. Agronomy Journal 100, 1013.
- Clay DE, Carlson CG, Clay SA, Reese C, Liu Z, Chang J, Ellsbury MM. 2006. Agronomy Journal 98, 443.
- Fontán JM, López-Bellido RJ, Benítez J, López-Bellido L. 2008. Vida Rural 277 (15 octubre), 20.
- Halvorson AD, Wienhold BJ, Black AL. 2002. Soil Science Society of America Journal 66, 906.
- IEA. 2009. CO₂ Emissions from Fuel Combustion - Highlights. OECD/IEA, Paris, France.
- INE. 2009. Cifras de población referidas al 01/01/2009. Resumen por Comunidades Autónomas. Instituto Nacional de Estadística. España.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Johnson JMF, Allmaras RR, Reicosky DC. 2006. Agronomy Journal 98, 622.
- Khan SA, Mulvaney RL, Ellsworth TR, Boast CW. 2007. Journal of Environmental Quality 36, 1821.
- Lal R. 2004. Science 304, 1623.
- Lal R, Kimble JM. 1997. Nutrient Cycling in Agroecosystems 49, 243.
- López-Bellido RJ, Fontán JM, López-Bellido FJ, López-Bellido L. 2010. Agronomy Journal 102, 310.
- López-Bellido RJ, López-Bellido L, Benítez-Vega J, López-Bellido FJ. 2007. Agronomy Journal 99, 66.
- Muñoz-Romero V, Benítez-Vega J, López-Bellido RJ, Fontán JM, López-Bellido L. 2010. Plant Soil 326, 97.
- Provanelli C, Gamba C, Brandi G, Simonini S, Batistoni E. 2006. Soil Tillage Res. 90, 84. Schlesinger WH. 2000. Agriculture, Ecosystems & Environment 82, 121.
- Schlesinger WH. 2006. En Encyclopedia of Soil Science (ed. R. Lal), 879.
- Spargo JT, Alley MM, Follett RF, Wallace JV. 2008. Soil and Tillage Research 100, 133.
- Swift RS. 2001. Soil Science 166, 858.
- WMO. 2008. Greenhouse Gas Bulletin: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Using Global Observations through 2007. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.