

Nitrógeno: La espada de doble filo

Dra. Christine Jones

<http://www.amazingcarbon.com>

El nitrógeno es un componente de las proteínas y el ADN y como tal es imprescindible para todos los seres vivos. Previo a la revolución industrial, aproximadamente 97% del nitrógeno que mantenía la vida en la tierra era fijado biológicamente. Durante el siglo XX, la intensificación de la producción agrícola junto con una falta de entendimiento de la función de las comunidades microbianas del suelo, han dado lugar a la reducción de la actividad biológica y al aumento de la aplicación de formas de nitrógeno producido de manera industrial en las tierras de cultivo.

A nivel global, se aplican fertilizantes de nitrógeno por valor de más de 100 billones de dólares a cultivos y pastos todos los años. Entre el 10% y el 40% de este N lo utilizan las plantas. El otro 90-60% se filtra en el agua, volatiliza en el aire o queda inmovilizado en el suelo.

Impactos del nitrógeno inorgánico

La aplicación de altas tasas de N inorgánico en sistemas agrícolas ha tenido muchas consecuencias negativas no buscadas en el funcionamiento del suelo y la salud ambiental. Los datos del experimento de campo que más tiempo ha estado en funcionamiento en Norteamérica acerca de los impactos de los métodos de producción agrícola en la calidad del suelo han revelado que altos aportes de N agotan el carbón del suelo, atrofian su capacidad para retener agua - e irónicamente, también agotan el N del suelo (Khan *et al.* 2007, Larson 2007).

Conjuntamente, estos factores conforman la causa subyacente de los abundantes informes del estancamiento de las cosechas en el mundo (Mulvaney *et al.* 2009).

La evidencia sugiere que aunque el N sea fundamental para el crecimiento vegetal, la aplicación de grandes cantidades de N como fertilizante inorgánico es perjudicial para el suelo. Y también perjudicial para el agua. El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos estima que el costo de eliminar los nitratos del agua potable del país es de más de 4,8 billones de dólares al año, mientras que las pérdidas de N de las tierras agrícolas son la principal fuente de contaminación nutricional que han contribuido a la masiva "zona muerta" del Golfo de México (Ceres 2014).

Afortunadamente, no todas las noticias son malas. Las tasas de aplicación de fertilizante han bajado en los últimos años en algunos países desarrollados. Francia, Alemania y el Reino Unido han tenido éxito manteniendo altos rendimientos en las cosechas con la mitad de fertilizante del que usaban en los 80 (Krietsch 2014).

Un manejo rentable del N es la clave para una agricultura productiva y lucrativa. También es la clave para formar carbono del suelo. Las formas estables de carbono (como el humus) no se pueden formar en presencia de altas tasas de nitrógeno inorgánico, debido a la inhibición de los microbios esenciales para su captura.

Fijación biológica de nitrógeno (FBN)

En una escala global, alrededor del 65% del N utilizado por los cultivos y los pastos proviene de la fijación biológica de N. Hay perspectivas para un incremento considerable. El suministro de N es inagotable, ya que el dinitrógeno (N₂) forma casi el 80% de la atmósfera terrestre. La clave es transformar el gas N inerte en una forma biológicamente activa.

Gran parte del N utilizado actualmente en agricultura deriva del proceso de Haber-Bosch, desarrollado a principios de 1900. Este proceso combina de manera catalítica el N atmosférico con hidrógeno derivado del gas natural o el carbón, para producir amoníaco bajo condiciones de alta temperatura y presión. El proceso Haber-Bosch utiliza recursos no renovables, requiere un alto consumo de energía y es caro.

Afortunadamente, gracias a la “magia enzimática”, el N atmosférico puede ser transformado en amoníaco por una gran cantidad de bacterias y arqueobacterias fijadoras de nitrógeno – de forma gratuita..

Idealmente, el amoníaco recién fijado es incorporado rápidamente en moléculas orgánicas como aminoácidos y humus. Estas moléculas estables son vitales para la fertilidad del suelo y no pueden ser volatilizadas o lixiviadas del sistema del suelo. Es importante destacar que la estabilización de nitrógeno requiere un suministro constante de carbono - también fijado biológicamente. Vamos a llegar a eso en un momento.

¿Cuáles son los microbios involucrados?

Es importante reconocer que la capacidad de fijar N no está limitada a las bacterias asociadas con las leguminosas. La clorofila es parte de un complejo de proteínas, por tanto donde vea plantas verdes habrá también una asociación con bacterias y arqueobacterias fijadoras de N.

A diferencia de las bacterias rizobio, la mayoría de los microbios que fijan el nitrógeno no son capaces de ser cultivados en el laboratorio. Esto ha planteado dificultades técnicas para evaluar su función ecológica. Métodos biomoleculares recientes para determinar la presencia de nifH, el gen de la nitrogenasa reductasa, han revelado una vertiginosa diversidad de bacterias y arqueobacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre y asociativas en una amplia variedad de entornos.

Aunque faltan los procedimientos para cuantificar la cantidad de N fijado por muchos

de estos grupos, lo que sí sabemos es que la diversidad y abundancia de microbios fijadores de N son mucho mayores donde hay cubierta vegetal todo el año (en particular las plantas de la familia de las gramíneas), en comparación con los suelos en barbecho desnudo.

Además de las bacterias fijadoras de nitrógeno y arqueobacterias, los hongos micorriza también son de vital importancia para el proceso de fijación del N. Aunque los hongos micorriza no fijan el nitrógeno, transfieren la energía en forma de carbono líquido (Jones 2008) a los fijadores asociativos de nitrógeno. También transportan nitrógeno fijado biológicamente a las plantas en forma orgánica, por ejemplo, como aminoácidos, incluyendo glicina, arginina, quitosano y glutamina (Leake *et al.* 2004, Whiteside *et al.* 2009).

La adquisición y transferencia de nitrógeno orgánico por parte de los hongos micorrizas es de alta eficiencia energética. Esta vía cierra el ciclo del N, reduciendo la nitrificación, desnitrificación, volatilización y lixiviado. Además, el almacenamiento de nitrógeno orgánico previene la acidificación del suelo.

La vía del carbono líquido

A pesar de su abundancia en la atmósfera, el nitrógeno es con frecuencia el elemento más restrictivo para las plantas. Hay una razón. El carbono, esencial para la fotosíntesis y el funcionamiento del suelo, se da como un gas traza, el dióxido de carbono, que actualmente es el 0,04% de la atmósfera. La manera más eficiente de transformar el CO₂ en complejos orgánicos estables de suelo (que contienen tanto C como N) es a través de la vía líquida del carbono. La necesidad de N fijado biológicamente determina este proceso.

Si las plantas fueran capaces de acceder al nitrógeno directamente desde la atmósfera, su crecimiento sería impedido por la ausencia de una capa arable del suelo rica en carbono. Estamos siendo testigos de una situación análoga en la agricultura actual. Cuando se proporciona N inorgánico, el suministro de carbono a los microbios asociativos fijadores de nitrógeno se inhibe, dando lugar a suelos pobres en carbono.

La reducción de los flujos de carbono tiene un impacto sobre una vasta red de comunidades microbianas, restringiendo la disponibilidad de minerales esenciales, oligoelementos, vitaminas y hormonas necesarios para la tolerancia de las plantas al estrés ambiental, como heladas y sequías y la resistencia a insectos y enfermedades. La disminución de la densidad de micronutrientes en las plantas también se traduce en una reducción del valor nutricional de los alimentos.

Sobre la tierra, el crecimiento de plantas a menudo parece "normal", por eso la conexión con fallos en la función del suelo puede no ser inmediatamente obvia. Pero en el fondo, nuestros suelos están siendo destruidos.

Idealmente, las prácticas de manejo de la tierra - y cualquier mejora utilizada en la agricultura - deberían mejorar la tasa fotosintética y aumentar el flujo de carbono al suelo, mediante su apoyo a las comunidades microbianas asociadas a las plantas (Fig.1).

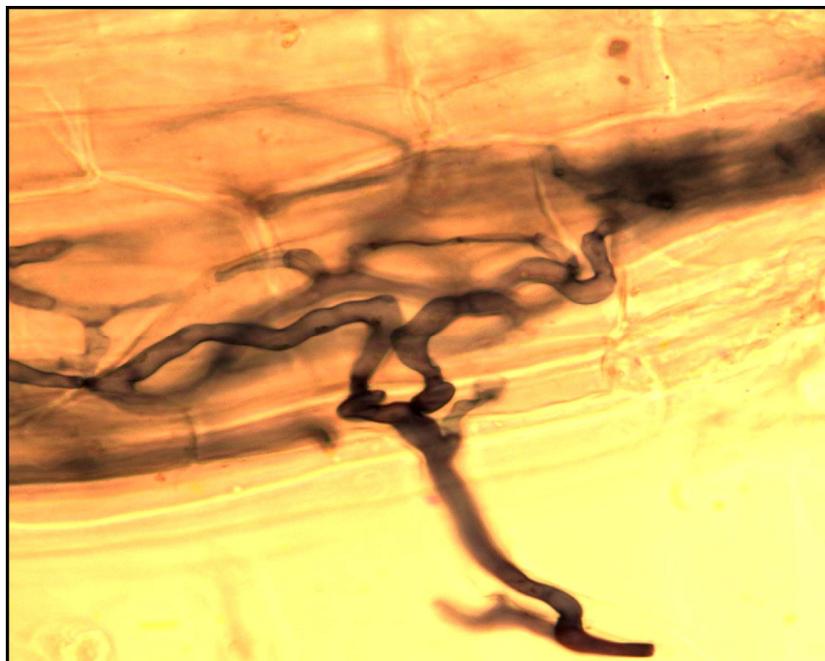


Fig 1. Sección transversal de la raíz de una planta que muestra las hifas, con forma de hilos, de hongos micorriza. La micorriza envía energía solar en forma de carbono líquido a una amplia gama de microbios del suelo que intervienen en la nutrición vegetal y la supresión de las enfermedades. El nitrógeno orgánico, fósforo, azufre, potasio, calcio, magnesio, hierro y oligoelementos esenciales tales como zinc, manganeso y cobre retornan a las plantas hospedero a cambio de carbono. Las transferencias de nutrientes son inhibidas cuando se aplican altas tasas de nitrógeno y / o fósforo inorgánicos. Foto: Jill Clapperton.

Calcular los grados Brix con un refractómetro es una manera fácil de evaluar la velocidad a la que las hojas verdes hacen la fotosíntesis y por lo tanto apoyan a los microbios asociativos del suelo. Cualquier variable que reduzca la capacidad fotosintética de la tierra o la tasa fotosintética de la vegetación NO es sostenible.

¿Cómo podemos utilizar nuestra comprensión de la vía de carbono líquido para restaurar la fertilidad natural de las tierras agrícolas?

Los agregados son la clave

Los agregados son pequeños “bultos” en el suelo que proporcionan condiciones para el cultivo, porosidad y capacidad de retención de agua. A no ser que se de una agregación en los suelos de manera activa, estos no fijarán cantidades significativas de N atmosférico ni secuestrarán formas estables de carbono. Las tres funciones (agregación, fijación de N biológica y secuestro de C estable) son interdependientes.

Los microbios que participan en la formación de los agregados del suelo requieren una fuente de energía. Esta energía inicialmente proviene del sol. En el milagro de la fotosíntesis, las plantas verdes transforman la energía de la luz, el agua y el dióxido de carbono en energía bioquímica, que se transfiere al suelo como carbono líquido a través de una intrincada red de hongos micorrizas y bacterias asociadas.

¿A qué se parecen los agregados del suelo?



Fig 2. Las dos plantas de trigo de la izquierda fueron cultivadas con gramíneas perennes en pastos mientras que la planta de trigo de la derecha se cultivó en un suelo desnudo adyacente, con una aplicación de 100 kg/ha de difosfato de amonio (DAP).

Fíjese como los pequeños bultos que se adhieren a las raíces del trigo cultivado en pastos (Fig. 2). Estas agrupaciones son formadas por los microbios que utilizan carbono líquido de las raíces. Los microagregados, demasiado pequeños para ser vistos a simple vista, están unidos por pegamentos y gomas microbianas y las hifas de los hongos micorriza (también usando carbono líquido), para formar bultos más grandes llamados macroagregados, generalmente de 2-5 mm de tamaño.

Los macroagregados son esenciales para las condiciones del suelo, estructura, aireación, infiltración, capacidad de retención de agua, fijación biológica de nitrógeno y captura de carbono. En resumen, no es posible mantener suelos sanos sin ellos.

Vamos a echar un vistazo dentro de un macroagregado, cortesía de esta fabulosa ilustración (Fig. 3) de Rudy García, agrónomo estatal del Servicio de Conservación de Recursos Naturales, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, en Nuevo México.

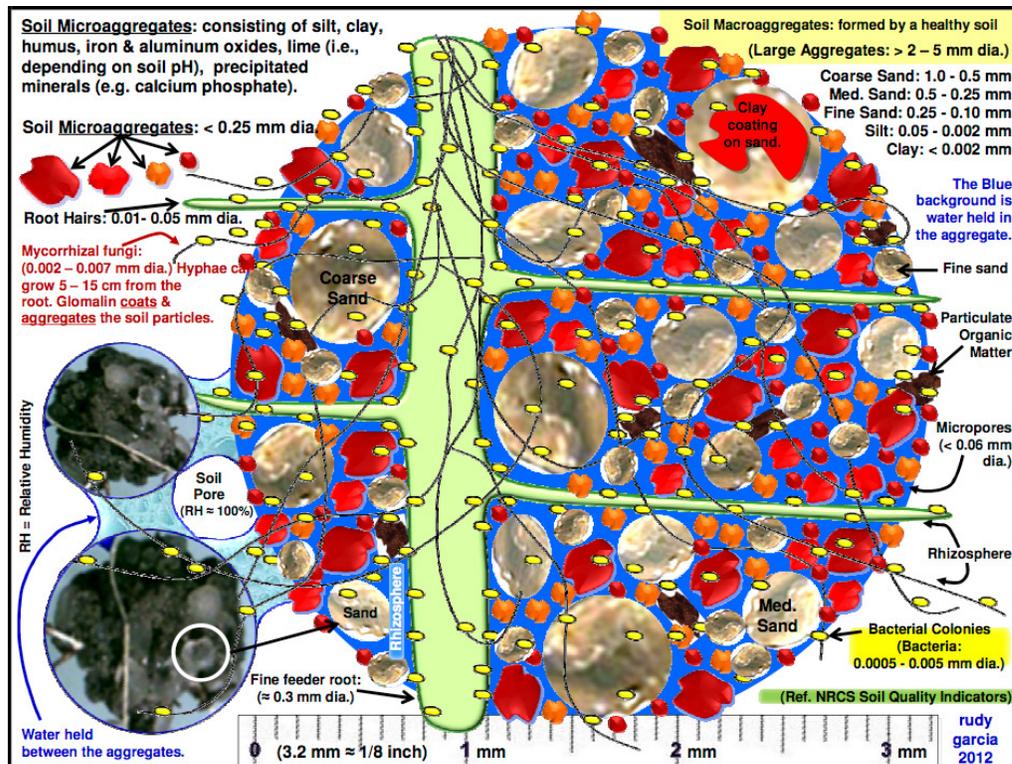


Fig 3. Representación esquemática de un macroagregado del suelo. La línea verde vertical es una raíz fina que nutre y las líneas verdes horizontales son pelos de la raíz. El surtido de partículas rojas y anaranjadas son microagregados mientras que las formas dispersas color café representan materia orgánica particulada. Las esferas más claras son granos de arena de varios tamaños, a menudo recubiertos con óxidos de hierro y aluminio, mientras que las pequeñas elipses amarillas son colonias bacterianas, incluyendo especies fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fósforo. Los finos hilos distribuidos en múltiples direcciones son las hifas de los hongos micorriza, esenciales para envolver las partículas del suelo y para el suministro de carbono a las comunidades microbianas dentro del agregado. Dependiendo del pH del suelo, también habrá minerales precipitados tales como fosfato de hierro o fosfato de calcio. El fondo azul es agua contenida dentro del agregado. Ilustración cortesía de Rudy Garcia, USDA-NRCS.

Una característica clave es que los niveles de humedad y de carbono líquido son *más altos* dentro de los agregados de la raíz que en el suelo circundante; mientras que la presión parcial de oxígeno es *inferior* dentro los agregados de la raíz que en el suelo circundante. Estas condiciones son esenciales para el funcionamiento de la enzima nitrogenasa utilizada para la fijación biológica del nitrógeno y también para la formación de humus.

Dentro de los agregados de la raíz, el carbono líquido se transfiere de los pelos finos de la raíz a las hifas de los hongos micorriza y de allí a las comunidades microbianas altamente complejas. Los microbios que reciben este carbono - y sus metabolitos - juegan un papel decisivo en la transformación de los azúcares simples a polímeros húmicos altamente estables, una parte de los cuales comprende nitrógeno fijado biológicamente y fósforo solubilizado de manera bacteriana. El hierro y el aluminio, que se producen en forma de óxidos en la matriz mineral, son catalizadores

importantes.

Actualmente se reconoce que los exudados de las raíces de plantas hacen una mayor contribución a formas estables de carbono en el suelo (es decir, a los complejos órgano-minerales que contienen carbono orgánico y nitrógeno orgánico) que la que hace la biomasa aérea (Schmidt *et al.* 2011).

Pero aquí está el problema. La colonización de micorrizas es baja cuando se aplican grandes cantidades de N inorgánico y las micorrizas están inactivas en ausencia de plantas. De ahí que la fijación biológica de nitrógeno y la humificación sean raras en los sistemas agrícolas donde los cultivos fuertemente fertilizados con N están en rotación con barbechos desnudos. Más aún, se ha demostrado que hasta 80kg N/ha pueden volatilizarse de los barbechos desnudos de verano debido a la desnitrificación. Si las plantas verdes están presentes, este N puede ser absorbido y reciclado, evitando la pérdida irrecuperable.

Cuando el suelo está desnudo no hay fotosíntesis y muy poca actividad biológica. Los suelos desnudos pierden carbono y nitrógeno, los ciclos de nutrientes se vuelven disfuncionales, los agregados se deterioran, la estructura empeora y la capacidad de retención de agua se reduce. Los barbechos desnudos, diseñados para almacenar humedad y retener nutrientes, resultan contraproducentes.

El mantenimiento de barbechos desnudos - o el uso de altas tasas de N inorgánico en cultivos o pastos - o peor, ambos - dan como resultado el desajuste de los ciclos del nitrógeno y del carbono que han funcionado de forma sinérgica durante miles de años. La fotosíntesis es el proceso más importante que sustenta la vida en la tierra. La fijación biológica de nitrógeno por parte de plantas no leguminosas es el segundo.

Es importante distinguir entre el nitrógeno fijado dentro de nódulos en las raíces de las leguminosas y el nitrógeno fijado dentro de los agregados formados en asociación con las raíces de las no leguminosas. En este último, el nitrógeno puede ser incorporado en aminoácidos y sustancias húmicas. Esto es mucho menos probable que ocurra en la leguminosa pura. Las legumbres son ricas en minerales y oligoelementos y forman una parte importante de los sistemas agrícolas. Sin embargo, a menos que las leguminosas se cultiven en mezclas con no leguminosas, pueden agotar el carbono del suelo a través del mismo mecanismo que se da con altas tasas de fertilizantes.

Mejorando la vía del carbono líquido

Hay un creciente reconocimiento de la importancia fundamental de las comunidades microbianas del suelo para la productividad de la planta. Por desgracia, muchas de las funciones biológicas se ven comprometidos por las prácticas agrícolas comunes.

El rediseño de la práctica agrícola no es difícil. El primer paso es el reconocimiento

de la importancia de la presencia de plantas verdes durante todo el año y las poblaciones microbianas que sustentan.

El rediseño tiene el potencial de reducir significativamente el impacto de muchos 'problemas' asociados con la agricultura química, incluyendo la pérdida de C del suelo, la reducción de N, la compactación del suelo, la disminución de pH, la baja disponibilidad de nutrientes, la resistencia a herbicidas y el deterioro de la capacidad de retención de agua.

Hay cuatro principios básicos para la agricultura regenerativa que han demostrado restaurar la salud del suelo y aumentar los niveles de carbono orgánico y nitrógeno orgánicos. A partir de esto, los propietarios de tierras pueden construir un sistema de manejo de la tierra integrado que se adapte a las necesidades individuales de sus propiedades y potreros.

1) El **primer principio** es el mantenimiento de la cobertura vegetal todo el año, vía pastos perennes en tierras pastoreadas y/ o cultivos de cobertura de diversas especies en tierras de cultivo. Casi todo lo que vive en y sobre el suelo depende de las plantas verdes (o lo que antes fue una planta verde) para su existencia. *A más plantas verdes, más vida.*

Es un hecho bien aceptado que las cobertura vegetal amortigua las temperaturas del suelo y reduce la erosión, pero tal vez es menos reconocido que la cobertura vegetal verde de crecimiento activo también alimenta la vía de carbono líquido que a su vez apoya, entre otras cosas, los hongos micorriza, las bacterias asociativas fijadoras de N y las bacterias solubilizadoras de fósforo - todo lo cual es esencial tanto para la nutrición del cultivo como para la formación de carbono humificado estable.

2) El **segundo principio** consiste en proporcionar soporte para el puente microbiano, para mejorar el flujo de carbono de las plantas a los suelos. Esto requiere la reducción del uso de fertilizantes de N y P que inhiben la comunicación bioquímica compleja entre las raíces de las plantas y los microbios.

3) El **tercer principio** es promover la diversidad vegetal y microbiana. Cuanto mayor sea la diversidad de plantas, mayor será el control y equilibrio de plagas y enfermedades y mayor será la gama de microhábitats para los organismos del suelo que participan en la adquisición de nutrientes, el ciclo de nutrientes y la formación de suelo.

4) El cuarto principio implica que la tierra responde de manera positiva a la presencia de animales si el manejo es apropiado. Además de los beneficios derivados de la adición de estiércol y orina en los suelos, el pastoreo de alta intensidad y corta duración aumenta la exudación de las raíces y estimula el número y la actividad de las bacterias asociativas fijadoras de nitrógeno en la rizosfera, que se disparan en respuesta a la defoliación y proporcionan el N extra requerido por la planta para la

producción de nuevo crecimiento.

La reducción gradual de los fertilizantes nitrogenados

Las actividades de las bacterias fijadoras de N, tanto simbióticas como asociativas, son inhibidas por los altos niveles de N inorgánico. En otras palabras, a más fertilizante de nitrógeno aplicado, menos N se fija por procesos naturales.

Por lo tanto es importante reducir el uso de N inorgánico - pero por favor, hágalo LENTAMENTE. Las comunidades microbianas necesitan tiempo para adaptarse. La funcionalidad del suelo no puede regresar de un día a otro. La transición requiere por lo general alrededor de tres años.

Los aportes de nitrógeno pueden reducirse un 20% en el primer año, otro 30% en el segundo año y un 30% más en el tercer año. En los siguientes años, la aplicación de una pequeña cantidad de N inorgánico (hasta 5kgN / ha) ayudará a que los procesos de fijación de nitrógeno naturales lleguen a un nivel óptimo.

Mientras eliminamos las altas tasas de N inorgánico también se debe tratar de mantener la mayor diversidad de cubierta vegetal posible durante todo el año en los cultivos y pastos.

Conclusión

La fijación biológica del nitrógeno es el factor clave de los ciclos del nitrógeno y de carbono en todos los ecosistemas naturales, tanto en tierra como en agua. Cuando se maneja adecuadamente, la fijación biológica de nitrógeno también puede ser el principal determinante de la productividad de las tierras agrícolas.

Muchos agricultores de todo el mundo están descubriendo de primera mano cómo el cambio de barbechos desnudos a cobertura vegetal diversa anual, junto con el manejo del pastoreo adecuado y la reducción de las aplicaciones de nitrógeno inorgánico, puede restaurar la fertilidad natural del suelo.

Mejorar el funcionamiento del suelo proporciona beneficios tanto en las explotaciones agrícolas como en el medio ambiente en general.

Para más información visite www.amazingcarbon.com

Literatura citada

- Ceres (2014). Water and climate risks facing U.S. corn production. 11 June 2014.
<http://www.ceres.org/issues/water/agriculture/the-cost-of-corn/the-cost-of-corn>
- Jones, C.E. (2008). Liquid carbon pathway unrecognized. Australian Farm Journal, July 2008, pp.15-17. www.amazingcarbon.com
- Khan, S.A, Mulvaney, R.L, Ellsworth, T.R. and Boast, C.W. (2007). The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. Journal of Environmental Quality 36:1821-1832. doi:10.2134/jeq2007.0099
- Krietsch, B (2014). Artificial fertilizer use levels-off as regions reach state of diminishing returns. <http://foodtank.com/news/2014/04/fertilizer-use-levels-off-as-regions-reach-state-of-diminishing-returns>
- Larson, D. L (2007). Study reveals that nitrogen fertilizers deplete soil organic carbon. University of Illinois news, October 29, 2007.
<http://www.aces.uiuc.edu/news/internal/preview.cfm?NID=4185>
- Leake, J.R., Johnson, D., Donnelly, D.P., Muckle, G.E., Boddy, L. and Read, D.J. (2004). Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning. Canadian Journal of Botany, 82: 1016-1045. doi:10.1139/B04-060
- Mulvaney, R.L, Khan S.A. and Ellsworth, T.R. (2009). Synthetic nitrogen fertilizers deplete soil nitrogen: a global dilemma for sustainable cereal production. Journal of Environmental Quality 38: 2295-2314. doi:10.2134/jeq2008.0527
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., gel- Knabner, I. K., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S. and Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature, 478: 49-56. doi:10.1038/nature10386
- Whiteside, M. D., Treseder, K. K. and Atsatt, P. R. (2009). The brighter side of soils: Quantum dots track organic nitrogen through fungi and plants. Ecology 90:100–108. doi:10.1890/07-2115.1