



BENEFICIOS AMBIENTALES GLOBALES DEL MANEJO DEL CARBONO DEL SUELO:

preocupación por la erosión causada por la labranza y por la soja

Donald C. Reicosky

Servicio de Investigación sobre Agricultura- USDA, Laboratorio de Investigación sobre la Conservación del Suelo de la Zona Norte Central

Resumen

El secuestro de carbono (C) agrícola puede ser una de las maneras más rentables de reducir los procesos del calentamiento global. Numerosos beneficios ambientales pueden resultar de las actividades agrícolas que secuestran C del suelo y contribuyen con la seguridad ambiental. Las prácticas que secuestran C del suelo ayudan a reducir la erosión del suelo y a mejorar la calidad del agua, y también implican una agricultura más sustentable y menos químico-dependiente. A medida que tenemos un mayor conocimiento sobre el almacenaje de C del suelo y su rol fundamental en los beneficios ambientales directos, más debemos comprender la erosión causada por la labranza y la contribución de la soja con los beneficios ambientales secundarios y lo que éstos significan para la agricultura de producción. El incremento del almacenaje de C en el suelo puede aumentar la infiltración, el ciclado de nutrientes y la fertilidad, disminuir la erosión del viento y del agua, minimizar la compactación, incrementar la calidad del agua, disminuir las emisiones de C, impedir la circulación de pesticidas y mejorar la calidad ambiental. Todos estos beneficios se unen para formar un resultado total que tiene una mayor importancia a nivel mundial. Incorporar el almacenaje de C a la planificación de conservación y, a la vez, conocer sobre la soja y la erosión causada por la labranza presenta algunos desafíos, pero a la vez, demuestra preocupación por nuestros recursos mundiales y presenta un rol positivo para el C del suelo que tendrá un impacto fundamental en nuestra calidad de vida futura.

Palabras Claves: materia orgánica del suelo, calidad del suelo, calidad ambiental, erosión causada por la labranza, labranza cero, siembra directa, secuestro de carbono.

Introducción

La agricultura de conservación propone conservar, mejorar, y utilizar más eficientemente los recursos naturales mediante el manejo integrado del suelo, del agua y de los recursos biológicos disponibles en combinación con insumos externos. La agricultura de conservación contribuye con la conservación ambiental mundial y con aumentar y sostener la producción agrícola, y puede tener un rol fundamental en la política agrícola mundial. La sustentabilidad y la seguridad alimenticia de la producción de soja son importantes para los ciudadanos. Se sabe que la agricultura, industria principal para la producción de alimentos y fibras, emite y almacena gases de efecto invernadero. La intensificación de la producción agrícola, principalmente la labranza, ha sido un factor importante en la emisión de gases de efecto invernadero. Las actividades agrícolas contribuyen con las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera a través de la quema de combustible fósil, de la descomposición de la materia orgánica del suelo (MOS), y de la quema de biomasa. Las prácticas agrícolas mejoradas de conservación tienen un gran potencial para aumentar el secuestro de carbono (C) del suelo y disminuir las emisiones en cadena de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero que contribuyen con la seguridad ambiental mundial (Lal et al., 1998).



La preparación del suelo y la labranza han sido una parte fundamental en la producción agrícola tradicional. La labranza también es un agente que tiene como consecuencia la alteración del suelo y la subsiguiente modificación de su estructura con la degradación del mismo. La labranza intensiva afloja y remueve el suelo, aumenta la liberación de nutrientes del suelo para el desarrollo del cultivo, mata las malezas que compiten con los cultivos por agua y nutrientes, y modifica la circulación de agua y aire dentro del suelo. La labranza intensiva puede afectar de modo adverso la estructura del suelo y causar así la ruptura excesiva de los agregados teniendo como resultado el desplazamiento potencial del suelo por medio de la erosión. La labranza intensiva causa la degradación del suelo a través de la pérdida de C y de las emisiones de gases de efecto invernadero inducidas por la labranza que influyen en la capacidad productiva y en la calidad ambiental. Esta reseña describirá principalmente el C del suelo y los beneficios ambientales relacionados, y, a la vez, planteará temas preocupantes sobre la erosión causada por la labranza y la producción de soja intensiva.

Beneficios ambientales del carbono del suelo

El beneficio directo más importante de la agricultura de conservación o siembra directa es el impacto inmediato en las interacciones del C del suelo y de la MOS. La materia orgánica del suelo es muy valiosa por lo que origina en el suelo; se la puede llamar "oro negro" debido al rol fundamental que tiene en los procesos y propiedades físicas, químicas y biológicas en el sistema del suelo. Las políticas agrícolas son necesarias para alentar a los agricultores a mejorar la calidad del suelo almacenando C que también tendrá como consecuencia una mejor calidad de aire y de agua, y una mayor productividad, y, a la vez, ayudará a mitigar el efecto invernadero. El C del suelo es uno de nuestros recursos más valiosos y puede servir como un "segundo cultivo" si los sistemas de comercialización global de C se vuelven realidad. Si bien los debates técnicos relacionados con la comercialización del C todavía continúan, existen otros beneficios secundarios del C del suelo que influyen en la calidad ambiental que deben tenerse en cuenta para mantener un equilibrio entre los factores ambientales y los económicos.

El C del suelo es tan importante que se puede comparar con el cubo central de la rueda de un carro que

representa un círculo, símbolo de fuerza, unidad y progreso. Los «rayos» de esta rueda representan los lazos con el C del suelo que conducen a una mejora ambiental que respalda la sustentabilidad total del recurso del suelo. La presencia de muchos rayos hace que la rueda sea más fuerte. Cada uno de los beneficios secundarios que emana del C del suelo contribuye con una mejora ambiental a través de un mejor manejo del C del suelo. Soane (1990) analizó varios aspectos prácticos de la importancia del C del suelo en el manejo del suelo. Algunos de los "rayos" de la rueda de sustentabilidad ambiental se describen en los párrafos siguientes.

El aumento de MOS tiene un efecto enorme en el manejo del agua del suelo debido a que incrementa la infiltración y la capacidad de retención de agua. El rol principal de la MOS en la reducción de la susceptibilidad del suelo ante la erosión es estabilizar los agregados superficiales mediante la reducción de formación de terrones y sellado superficial, lo que aumenta la infiltración (Le Bissonnais, 1990). El aumento de la capacidad de retención de agua se debe al aumento de MOS que absorbe más rápidamente el agua y la libera lentamente durante la temporada para minimizar los impactos de la sequía a corto plazo. De hecho, determinados tipos de MOS pueden retener hasta 20 veces su peso en agua. Hudson (1994) mostró que para cada incremento del uno % de MOS, la capacidad de retención de agua disponible en el suelo aumentó el 3.7% del volumen del suelo. La MOS extra evita la sequedad y mejora las propiedades de retención de agua de los suelos arenosos. En todos los grupos texturales, a medida que el contenido de MOS aumentó de 0.5 a 3%, la capacidad de agua disponible del suelo llegó a duplicarse o más. Con otros factores similares, los suelos que contienen más materia orgánica pueden retener más agua de lluvia y hacer que haya una mayor disponibilidad gran disponibilidad de la misma para las plantas. Todo esto sumado a una mayor infiltración con mayor contenido de materia orgánica, y una disminución de la evaporación con residuo sobre la superficie del suelo contribuye a lograr un eficiente uso del agua.

La absorción o intercambio de iones es una de las funciones del ciclado de nutrientes más importante del suelo. La capacidad de intercambio catiónica (CIC) es la cantidad de sitios de intercambios que pueden absorber y liberar cationes de los nutrientes. La materia orgánica del suelo puede aumentar la CIC del suelo de 20 a 70% por encima de la de los minerales de arcilla y

de los óxidos metales presentes. De hecho, Crovetto (1996) demostró que la contribución de la materia orgánica en la capacidad de intercambio catiónica excedió a la del mineral de arcilla caolinita en los 5 cm superficiales de sus suelos. Robert (1996) probó la existencia de una fuerte relación lineal entre el C orgánico y la CIC de su suelo experimental. La CIC aumentó cuatro veces logrando un incremento del C orgánico del 1 al 4%. La MOS puede inhibir la toxicidad de otros elementos, ya que tiene la capacidad de absorber los químicos solubles. La absorción que realizan los minerales de arcilla y la MOS es un medio fundamental por el que los nutrientes de las plantas son retenidos en la zona de la raíz del cultivo.

Los suelos con un contenido relativamente alto de C, especialmente con residuos sobre la superficie, son muy eficientes en el aumento de MOS y en la disminución de pérdida del suelo por erosión. La disminución o eliminación del escurrimiento de sedimento de los campos a los ríos o arroyos aumenta la calidad ambiental. Bajo tales circunstancias, el residuo actúa como pequeños diques que demoran el escurrimiento del agua de los campos haciendo que el agua tenga más tiempo para penetrar en el suelo. Los túneles de gusanos, los macro poros y los agujeros de las raíces de las plantas que permanecen intactos aumentan la infiltración (Edwards, Shipitalo & Norton, 1988). La infiltración de agua es de dos a diez veces más rápida en suelos con lombrices que en suelos sin lombrices (Lee, 1985). La materia orgánica del suelo contribuye con la agregación de partículas del suelo que facilitan la circulación del agua y permite que las plantas utilicen menos energía para establecer sistemas radiculares (Chaney & Swift, 1984). La labranza intensiva rompe los agregados del suelo y obtiene como resultado un suelo denso, haciendo que sea más difícil para las plantas obtener los nutrientes y el agua necesarios para su desarrollo y producción.

La reducción de la erosión del suelo aumenta la calidad del agua superficial y subterránea, otro beneficio secundario de un mayor contenido de MOS. El residuo sobre la superficie ayudan a retener las partículas del suelo en su lugar y mantener los nutrientes y pesticidas asociados en el campo. La capa superficial de materia orgánica minimiza el escurrimiento de herbicida, y con la labranza de conservación, la lixiviación de herbicida puede reducirse a la mitad (Braverman et al., 1990). Los incrementos de calidad del agua superficial y subterránea son cada vez mayor con la labranza de conser-

vación y con el aumento de MOS. El aumento de MOS y el mantenimiento del residuo sobre la superficie reducen la erosión del viento (Skidmore, Kumar & Larson, 1979). Según la cantidad de residuo sobre la superficie del suelo, la erosión del mismo puede reducirse a casi cero en comparación con el campo desprotegido bajo labranza intensiva.

Otro factor clave es la MOS que puede disminuir la compactación del suelo (Angers & Simard 1986; Avnimelech & Cohen, 1988). Soane (1990) presentó diferentes mecanismos con los que se puede disminuir la compactación del suelo mediante el aumento del contenido de MOS: 1) mejor unión interna y externa de los agregados del suelo; 2) mejor capacidad de recuperación y elasticidad del suelo; 3) efecto de dilución de la densidad aparente reducida debido a la mezcla de residuos orgánicos con la matriz del suelo; 4) existencia permanente o temporaria de redes radiculares; 5) cambio localizado de la carga eléctrica en las superficies de las partículas del suelo; 6) cambio en la fricción interna del suelo. Si bien la mayor parte de la compactación del suelo tiene lugar durante el primer tráfico vehicular sobre el campo labrado, los requerimientos de potencia y peso reducido asociados con las formas de labranza de conservación también pueden ayudar a minimizar la compactación. El tráfico de campo adicional requerido en la labranza intensiva agrava el problema ya que destruye la estructura del suelo. Los beneficios biológicos y físicos combinados de la MOS pueden minimizar el efecto de la compactación por tráfico y obtener como resultado una mejor tierra cultivable.

El mantenimiento de la MOS contribuye a la formación y estabilización de la estructura del suelo. Otro rayo de la rueda de la calidad ambiental es un mejor suelo de la tierra cultivable, una mejor estructura y estabilidad de agregados que aumenta las propiedades de intercambio de gases y la aireación requerida para el ciclado de nutrientes (Chaney & Swift, 1984). El manejo crítico del flujo de aire del suelo con un suelo y estructura mejorados son necesarios para el desempeño óptimo de la planta y el ciclado de nutrientes. Los beneficios ambientales absolutos del manejo de la MOS resultan de la combinación de muchos factores pequeños y no de uno solo. Estos atributos sugieren nuevos conceptos sobre cómo debemos manejar el suelo para lograr una sustentabilidad y una estabilidad de agregados a largo plazo.

Un beneficio secundario de una menor labranza y de la MOS en aumento es la disminución de la polución del aire. El CO_2 es el producto final de descomposición de MOS y se libera a la atmósfera. Se ha demostrado que la labranza intensiva, especialmente el arado de reja, libera grandes cantidades de CO_2 como consecuencia de la liberación física y de una mayor oxidación biológica (Reicosky et al., 1995). Con la labranza de conservación, el residuo se conserva de un modo más natural sobre la superficie para proteger el suelo y controlar la conversión del C de la planta a MOS y humus. La labranza intensiva libera C del suelo a la atmósfera como CO_2 donde puede combinarse con otros gases para contribuir con el efecto invernadero. Por lo tanto, una combinación de beneficios económicos de la labranza de conservación mediante una menor cantidad de requerimientos de laboreo, ahorro de tiempo, menor costos de maquinaria y combustible, combinados con los beneficios ambientales enumerados anteriormente tiene un atractivo a nivel mundial. Será difícil cuantificar las medidas indirectas de los beneficios sociales mientras la sociedad disfruta de una mayor calidad de vida debido al aumento de calidad ambiental. La agricultura de conservación, con el uso de técnicas de siembra directa, puede beneficiar a la sociedad y puede considerarse como "el modo de alimentar y hacer verde al mundo" para alcanzar la sustentabilidad mundial.

La agricultura de conservación y la erosión causada por la labranza

La labranza ha sido un componente esencial de la producción mundial de cultivos durante siglos. Se ha evaluado el impacto a corto plazo del arado de reja y de varios métodos de labranza en la pérdida de CO_2 del suelo utilizando una cámara dinámica portátil. Estudios recientes que midieron la pérdida de C a corto plazo de varios métodos de labranza indicaron que la principal pérdida de C tuvo lugar inmediatamente después de la labranza intensiva (Reicosky y Lindstrom, 1993). Descubrieron que el arado de reja obtuvo como resultado una superficie de suelo más dura, flujo de CO_2 inicial más elevado y mantuvo el flujo más elevado durante los 19 días de estudio. Los elevados flujos de CO_2 iniciales no tuvieron relación con la incorporación de residuos sino con la profundidad del disturbio del suelo que resultó en una superficie más dura y espacios vacíos más grandes. Los flujos de CO_2 más bajos resultaron de

los sistemas de labranza asociados con poco disturbio del suelo y la presencia de poros pequeños. La siembra directa obtuvo la menor pérdida de CO_2 durante los 19 días de estudio. Reicosky y Lindstrom (1993,1995) y Reicosky (1998) llegaron a la conclusión de que los métodos de labranza intensiva, especialmente el arado de reja a 0.25 m de profundidad, influyó en este flujo de suelo inicial de maneras diferentes y sugieren que se puede minimizar el impacto agrícola en el incremento de CO_2 mundial utilizando técnicas de manejo del suelo como la labranza en bandas o formas de labranza de conservación (Reicosky, 1997).

El estudio de la labranza ha evolucionado hasta convertirse en una ciencia basada en el entendimiento de las relaciones existentes entre la labranza y las propiedades físicas del suelo, el crecimiento del cultivo, las plagas, la erosión del suelo, y, más recientemente, el secuestro de C. El reconocimiento de dos procesos asociados con la labranza tiene el potencial para cambiar de manera drástica la investigación futura de la labranza (Lobb et al., 2000). Estos procesos son la translocación de la labranza y la erosión que la misma causa (Lindstrom et al., 1992; Govers et al., 1994; Lobb et al., 1995; Poesen et al., 1997). La translocación de la labranza es el desplazamiento del suelo, en forma de masa, hacia delante o hacia el costado en relación con la dirección de la labranza como consecuencia del uso de herramientas de labranza. La translocación del suelo por medio de la labranza varía según el relieve como resultado de varios factores entre los cuales se encuentra el diseño y la operación de los implementos de labranza, y la topografía y las propiedades del suelo. La consecuencia de esta variación en la translocación es la redistribución del suelo en cadena o la "nivelación" de los terrenos que obtienen como resultado la erosión causada por la labranza. En general, la labranza tiene como consecuencia el progresivo desplazamiento de suelo pendiente abajo, provocando una severa pérdida de suelo en las zonas que se encuentran pendiente arriba y una acumulación en las zonas pendiente abajo. La evidencia a simple vista de la erosión que causa la labranza incluye: la pérdida de la capa orgánica superior del suelo y la exposición del subsuelo de colores claros en la cima de las crestas y lomas, el socavado de los bordes de los lotes (alambrados, surcos de bordura, terrazas, etc.) en el costado que se encuentra pendiente abajo y enterrado en el costado pendiente arriba.

Primero se creyó que el arado de reja era el principal causante de la erosión causada por la labranza, sin embargo, todos los implementos de labranza contribuyen con dicho problema (Govers et al., 1994; Lobb y Kachanoski, 1999). La translocación del suelo causada por las prácticas de labranza con el arado de reja ha sido identificada como una causa de escurrimiento de suelo de posiciones específicas en el paisaje que pueden llegar a ser superiores a los niveles de tolerancia de pérdida de suelo (Lindstrom et al., 1992; Govers et al., 1994; Lobb et al., 1995; Poesen et al., 1997). El suelo no se pierde directamente de los campos por translocación de la labranza, sino que se escurre de las pendientes convexas y se deposita en las partes cóncavas de la misma. Lindstrom et al. (1992) demostraron que el escurrimiento del suelo hacia una pendiente convexa en el suroeste de Minnesota, EE.UU. resultó en un nivel sostenido de pérdida de suelo de aproximadamente $30 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ como consecuencia de la labranza anual con arado de reja. Lobb et al. (1995) calcularon que la pérdida de suelo en el suroeste de Ontario, Canadá, de un sitio con declive del terreno es $54 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ debido a una secuencia de labranza con arado de reja, disco doble, y un cultivador con dientes en C. En este caso, la erosión causada por la labranza, calculada mediante ¹³⁷Cesio residente, dio cuenta de al menos el 70% de la pérdida de suelo total. La velocidad de labranza aumenta el nivel de erosión causada por la labranza de manera no lineal.

La relación existente entre la productividad del suelo y la erosión causada por la labranza es compleja. El suelo no es el único factor que controla los rendimientos de los cultivos. El grado en que las pérdidas de los rendimientos del cultivo están relacionadas con los suelos se debe a varios factores que interactúan incluyendo las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la posición en el paisaje, el cultivo, las prácticas de manejo, y las condiciones climáticas antes y durante la temporada de cultivo. Schumacher et al. (1999) utilizaron procedimientos de modelado para probar la erosión causada por la labranza con pérdida de suelo de un terreno con pendiente mientras que la pérdida de suelo por la erosión del agua tuvo lugar principalmente en la parte media e inferior de la terraza. La disminución de la productividad general del suelo fue aún mayor cuando se combinó ambos procesos en comparación con los procesos por separado. La erosión del agua contribuyó con casi toda la disminución de la productivi-

dad del suelo en la terraza cuando se combinaron los procesos de erosión del agua y de la labranza. Si bien existen muchas otras razones para la labranza intensiva, la labranza hace que el suelo esté suelto, abierto y muy susceptible a lluvias de gran intensidad y a la posterior erosión. El efecto en cadena de la translocación del suelo de los efectos combinados de labranza y erosión del agua fue un incremento en la variabilidad espacial del rendimiento del cultivo y una posible disminución de la productividad general del suelo (Schumacher et al., 1999). Estos resultados indican que se debe obtener mejores técnicas de siembra directa para minimizar la variación espacial que requiere de un mejor manejo para mantener una producción uniforme de cultivo.

Preocupación Ambiental de la Producción de Soja

Los sistemas de agricultura de conservación con secuencias de cultivos intensivos pueden contribuir con el secuestro de C del suelo y con la calidad ambiental. Sin embargo, algunas propiedades químicas y físicas de la soja con frecuencia limitan la capacidad de la planta para proteger al suelo y mantener el recurso del mismo para lograr sustentabilidad a largo plazo. Las preocupaciones ambientales de la producción intensiva de soja necesitan tratar las cuestiones relacionadas con el secuestro de C del suelo y la calidad del agua. Durante mucho tiempo se ha creído que la soja acentúa la erosión del suelo. La erosión del suelo en los Estados Unidos ha aumentado en los últimos 40 años principalmente debido al aumento del área de cultivo en hilera y parcialmente debido a la cantidad de soja cultivada en las distintas rotaciones. Durante cinco años de investigación en Iowa, EE.UU., Moldenhauer y Wischmeier (1969) descubrieron que la pérdida de suelo después del cultivo de soja fue mayor que después del maíz. Con otras prácticas iguales, la erosión del suelo utilizando un simulador de lluvia fue con frecuencia mayor después de la soja que después del maíz (Siemens y Oswald, 1976; 1978; Oswald y Siemens, 1976). Este aumento en la pérdida de agua y suelo fue atribuido a una superficie del suelo menos estable y con menor cantidad de residuo. Laflen y Moldenhauer (1985) descubrieron que la pérdida de suelo fue mayor después de la soja que después del maíz tanto en la rotación maíz-soja como en maíz continuo. Lal (1985) informó descubrimientos similares en África.

E!

En América del Sur, Cogo (1985) sugirió varias prácticas eficientes para el control de la erosión. Los sistemas de labranza de conservación pueden reducir las pérdidas de suelo de manera sustancial para mantener la sustentabilidad del suelo a largo plazo. El uso de cubiertas protectoras del residuo y los cultivos de cobertura también ha sido beneficioso ya que redujo en gran medida la pérdida de suelo debido a la protección física del cultivo de cobertura y al insumo de carbono. Las rotaciones de cultivos diversos también muestran beneficios en la disminución de la erosión y en el mantenimiento de un sistema sustentable y productivo. Existe una necesidad permanente de investigar sobre el control de la erosión incluyendo un mejor entendimiento de las características de la lluvia, de la vulnerabilidad a la erosión del suelo después de la soja, los métodos utilizados de labranza, las prácticas de manejo y la pérdida de suelo que pueden ser aceptables.

La soja deja poco residuo para proteger al suelo, y el residuo de soja tiene una relación C: nitrógeno (N) baja que se descompone rápidamente y deja el suelo desnudo y vulnerable a que se erosione rápidamente después de la cosecha de la soja. Por eso, la cantidad de cobertura de residuo utilizado para proteger la superficie del suelo del impacto de la gota de lluvia es pequeña para la soja. Existe una gran necesidad de investigar para establecer una relación C:N más amplia a fin de que el residuo de soja pueda mantener la cobertura del suelo durante un período más largo. Durante la labranza, la superficie del suelo queda con frecuencia más dura y con más terrones después del maíz y de los cereales que después de la soja. En los suelos finos o de textura media, el suelo es generalmente más húmedo, contiene menos terrones y pequeños agregados después de la soja en comparación con el maíz. Los pequeños agregados pueden ser susceptibles a la dispersión y a provocar el sellado de la superficie del suelo. Fahad et al. (1982) descubrieron que el rango del diámetro geométrico medio de los agregados del suelo para varias secuencias de cultivo de soja fue soja continua < soja después del maíz < soja después del sorgo < soja después del barbecho. El sellado de la superficie aumenta el escurrimiento y el material de suelo disperso puede transportarse rápidamente en el escurrimiento del agua. Todos estos factores contribuyen con el gran escurrimiento y erosión que se observan con frecuencia después de la soja en comparación con el maíz o con los cereales.

Layese et al. (2002) resumieron un estudio exhaustivo utilizando ^{13}C de abundancia natural para estudiar el efecto que tiene el manejo de la labranza y del residuo, la fertilización con N y el cambio de cultivo en las dinámicas del C orgánico del suelo. Evaluaron tres sistemas de labranza: siembra directa, arado de reja, y arado de cincel, y dos opciones de residuos: devuelto o extraído y dos dosis de N. El maíz se cultivó durante 13 años seguidos por cuatro años de soja sin que se haya agregado fertilizante a la soja en la rotación. Notaron una reducción del 24% del C orgánico del suelo entre el año 13 y el año 17 después de haber sembrado soja durante cuatro años. Después de cuatro años de soja, el porcentaje de C orgánico del suelo derivado de la soja, es decir, el contenido actual de C varió de -5.8% a +26.6% del C actual con la mayoría de ese C a 0-5 cm. de profundidad del tratamiento de siembra directa y el tratamiento de arado de cincel, y a 25-30 cm. de profundidad bajo el tratamiento de arado de reja. Estos resultados indican que es conveniente alternar las estrategias para el cultivo de soja que pueden incluir rotaciones diversificadas y cultivos de cobertura que reemplazarían el C que se agota durante la producción de soja.

El efecto de la rizosfera de soja fue la primera identificada en el estudio comparando cuatro especies de plantas (Fu y Cheng, 2002). Cheng et al. (2003) estudiaron más a fondo los efectos principales de la rizosfera de soja (*Glycine max* L. merr.) y trigo de primavera (*Triticum aestivum* L.) en la distribución de la materia orgánica del suelo en cuatro estadios fenológicos bajo tres niveles de fertilización en experimentos en invernadero utilizando marcadores de ^{13}C natural. Llegaron a la conclusión de que el efecto principal de la rizosfera de soja puede intensificar la descomposición del residuo de manera sustancial. El efecto principal del residuo fue responsable de la mayor parte del efluvo total de C del suelo de dicho sistema. La pérdida acumulativa de C del suelo provocó efectos en la rizosfera durante toda la temporada de cultivo correspondiente a la cantidad de C de la biomasa radicular para el tratamiento de soja y 71% del C de biomasa radicular para el tratamiento de trigo. El efecto principal de la rizosfera de soja fue significativamente mayor que la del trigo y llegó a un pico de 380% por encima de las plantas que no fueron controladas durante el estadio vegetativo tardío y se mantuvieron con niveles altos. También notaron que la fertilización NPK no modificó el efecto prin-

cial de la rizosfera significativamente. El mayor efecto en la rizosfera de soja pudo haber sido causado por la mayor calidad de sustrato de la rizo deposición de la soja ya que la concentración de N en los tejidos es generalmente mayor que en los tejidos de las plantas que no son leguminosas. Los compuestos ricos en N generalmente producen efectos principales mayores que los compuestos que poseen bajo contenido de N o no poseen N. Esto demuestra claramente el rol de las plantas como un factor importante para el control de la descomposición de la materia orgánica del suelo a través de procesos de la rizosfera, y el rol fundamental de la soja en los pools y flujos de C de los ecosistemas agrícolas. Muchas de las preocupaciones pueden resolverse con el uso de diversas rotaciones de cultivo con soja.

Es necesario investigar sobre la alteración de la relación tallo: raíz de la soja para colocar más biomasa radicular bajo la superficie con el propósito de aumentar el secuestro de C del suelo. Una mayor capacidad para formar raíces aumentará la cantidad de bioporos disponibles para la transferencia de nutrientes y agua en el suelo. El carbono distribuido a mayor profundidad con sistemas radiculares de cultivos diversos ayudará a lograr un mayor secuestro de C y mejorará las propiedades del suelo, lo que tendrá como resultado un mayor reciclado de nutrientes y mejores rendimientos del cultivo. Todos estos factores pueden ayudar a que la soja mantenga el recurso del suelo, y, a la vez, son importantes para mantener la calidad ambiental.

Conclusiones

Los agricultores que emplean técnicas de conservación pueden beneficiarse del cuidado del medio ambiente ya que es una parte fundamental de su interés económico conservar los recursos naturales para el futuro. Es parte de todos nuestros intereses económicos tener ecosistemas sanos y sustentables para incrementar nuestra calidad de vida. Un mayor uso de técnicas de siembra directa y menos labranza intensiva ayuda a minimizar la erosión causada por la labranza y la subsiguiente degradación del suelo, y contribuye a obtener un sistema de producción sustentable. Los verdaderos beneficios económicos de la soja sólo pueden determinarse cuando asignamos valores monetarios a las externalidades de la calidad ambiental. La agricultura de conservación sin labranza intensiva en la producción de la soja puede tener un rol fundamental en el secuestro

de C del suelo y en brindar beneficios ambientales y económicos globales a largo plazo. La agricultura de conservación con un mayor manejo de C del suelo y con rotaciones diversas es una estrategia donde todos ganan. La agricultura gana con mejores sistemas de producción de alimentos y fibras, y sustentabilidad. La sociedad gana debido a que logra una mejor calidad ambiental. El medio ambiente gana a medida que se obtiene mejor calidad del suelo, del aire y del agua con menos erosión causada por la labranza y con mayor cantidad de C en el suelo. Dicho panorama aumentará la productividad, mejorará la calidad del suelo, y mitigará el efecto invernadero con un gran impacto en nuestra calidad de vida futura.

Referencias

- Angers D A, Simard R R. 1986. Relationships between organic matter content and soil bulk density. Relations entre la teneur en matière organique et la masse volumique apparente du sol. *Can. J. Soil Sci.* 66:743-746.
- Anvimelech Y, Cohen A. 1988. On the use of organic manures for amendment of compacted clay soils: effects of aerobic and anaerobic conditions. *Biol. Wastes* 29:331-339.
- Braverman MP, Dusky JA, Locascio S J, Hornsby A G. 1990. Sorption and degradation of thiobencarb in three Florida soils. *Weed Sci.* 38(6):583-588.
- Chaney K, Swift R S. 1984. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *J. Soil Sci.* 35:223-230.
- Cheng, Weixin, D.W. Johnson and Shenglei Fu. 2003. Rhizosphere effects on decomposition: Control of plant species, phenology and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1418-1427.
- Cogo, N.P. 1985. Soybean production and the soil erosion problems and solutions: South America. p. 1158-1165. *In* R. Shibles. (ed.) *World Soybean Research Conf. III*. Westview Press, Inc. Boulder, CO.
- Crovetto L.C. 1996. Stubble over the soil: The vital role of plant residue in soil management to improve soil quality. *ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI.*
- Edwards W M, Shipitalo M J, Norton L D. 1988. Contribution of macroporosity to infiltration into a continuous corn no-tilled watershed: Implications for contaminant movement. *J. Contam Hydrol.* 3:193-205.
- Fahad, A.A., L.N. Mielke, A.D. Flowerday and D. Swartzendruber. 1982. Soil physical properties as affected by soybean and other cropping sequences. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:377-381.
- Fu, S. and W. Cheng. 2002. Rhizosphere priming effects on the decomposition of soil organic matter in C4 and C3 grassland soils. *Plant Soil* 283:289-294.

Govers, G., K. Vandaele, P.J.J. Desmet, J. Poesen, and K. Bunte. The role of tillage in soil redistribution on hillslopes. *European Journal of Soil Science* 45:469-478. 1994.

Hudson B D. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *J. Soil Water Conserv.* 49(2):189-194.

Laflen, J.M. and W.C. Moldenhauer. 1985. Soybean production and soil erosion problems-North America. p. 1166-1174. In R. Shibles (ed.) World Soybean Research Conf. III. Westview Press, Inc., Boulder, CO.

Lal, R. 1985. Soybean production and soil erosion problems and solutions-Africa. p. 1151-1157. In R. Shibles. (ed.) World Soybean Research Conf. III. Westview Press, Inc. Boulder, CO.

Lal R, Kimble J M, Follet R F, Cole V. 1998. Potential of U.S. Cropland for Carbon Sequestration and Greenhouse Effect Mitigation. USDA-NRCS, Washington, D.C. Ann Arbor Press, Chelsea, MI.

Layese, M.F., C.E. Clapp, R.R. Allmaras, D.R. Linden, S.M. Copeland, J.A.E. Molina and R.H. Dowdy. 2002. Current and relic carbon using natural abundance ^{13}C . *Soil Sci. Soc. Am. J.* 167(5):315-326.

Le Bissonnais Y. 1990. Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. In *Soil erosion: Experiments and models*. p. 13-28. RB Bryan (ed.). Catena Verlag: Cremlingen-Destedt.

Lee KE. 1985. Earthworms: Their ecology and relationship with soils and land use. New York: Academic Press.

Lindstrom, M.J., W.W. Nelson, and T.E. Schumacher. 1992. Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing. *Soil Tillage Research* 24:243-255.

Lobb, D.A. and R.G. Kachanoski. 1999. Modelling tillage translocation using steppe, near plateau, and exponential functions. *Soil Tillage Research* 51:261-277.

Lobb, D.A., R.J. Kachanoski, and M.H. Miller. 1995. Tillage translocation and tillage erosion on shoulder slope landscape positions measured using $^{137}\text{Cesium}$ as a tracer. *Canadian Journal Soil Science* 75:211-218.

Lobb, D.A., M.J. Lindstrom, T.A. Quine, G. Govers. 2000. Tillage at the Threshold of the 21st Century: New Directions in Response to Tillage Translocation and Tillage Erosion. *Proceedings of 15th Conference of the International Soil Tillage Research Organization Forth Worth, Texas, July 2000.*

Moldenhauer, W.C. and W.H. Wischmeier. 1969. Soybeans in corn-soybean rotations permit erosion but put blame on corn. *Crops Soils.* 21(6):20.

Oschwald, W.R. and J.C. Siemens. 1976. Soil erosion after soybeans. p. 74-81. In L.D. Hill (ed.) World Soybean Research. Proc. World Soybean Research Conf. Interstate Printers and Publishers, Danville, IL.

Poesen, J., B. Wesenael, G. Govers, J. Martinez-Fernandez, B. Desmet, K. Vandaele, T. Quine, and G. Degraer. Patterns of rock fragment covered generated by tillage erosion. *Geomorphology* 18:193-197. 1997.

Reicosky D C. 1998. Strip tillage methods: Impact on soil and air quality. In *Environmental benefits of soil management*. p. 56-60. Ed P Mulvey. Proc. ASSSI National Soils Conf., Brisbane, Australia.

Reicosky D C. 1997. Tillage-induced CO_2 emission from soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* 49:273-285.

Reicosky D C, Kemper W D, Langdale G W, Douglas Jr C W, Rasmussen P E. 1995. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Conserv.* 50:253-261.

Reicosky D C, Lindstrom M J. 1993. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agron. J.* 85:1237-1243.

Reicosky DC, Lindstrom M J. 1995. Impact of fall tillage and short-term carbon dioxide flux. In *Soil and Global Change*. p. 177-187. R Lal (ed.) Chelsea, MI: Lewis Publishers.

Robert M. 1996. Aluminum toxicity a major stress for microbes in the environment. In *Environmental Impacts*. p. 227-242. P M Huang et al. (ed.) Vol. 2, Soil component interactions. CRC press.

Schumacher, T.E., M.J. Lindstrom, J.A. Schumacher, and G.D. Lemme. 1999. Modelling spatial variation and productivity due to tillage and water erosion. *Soil Tillage Research* 51:331-339.

Siemens, J.C. and W.R. Oschwald. 1976. Erosion for corn tillage systems. *Trans. ASAE.* 19:69-72.

Siemens, J.C. and W.R. Oschwald. 1978. Corn-soybean tillage systems: Erosion control, effects on crop production, and cost. *Trans. ASAE.* 21:293-302.

Skidmore E L, Kumar M, Larson W E. 1979. Crop residue management for wind erosion control in the Great Plains. *J. Soil Water Conserv.* 34:90-94.

Soane B D. 1990. The role of organic matter in the soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil Tillage Res.* 16:179-202.