

Capítulo 4

Aspectos biofísicos del secuestro de carbono en las tierras áridas

INTRODUCCIÓN

El proceso de secuestro o flujo de carbono en los suelos forma parte del ciclo global del carbono. El movimiento de carbono entre el suelo y la atmósfera es bidireccional. En consecuencia, el almacenamiento de carbono en los suelos refleja el balance entre los procesos opuestos de acumulación y pérdidas. Este depósito de carbono del suelo es claramente dinámico. El carbono no solo entra y sale continuamente del suelo, sino que el carbono del suelo es dividido en varias categorías cuyos tiempos de residencia alcanzan varias magnitudes. El carbono del suelo tampoco es un depósito inerte ya que la materia orgánica con la cual está asociado es vital para mantener la fertilidad del suelo y juega un papel importante en fenómenos tan variados como el reciclaje de nutrientes y las emisiones gaseosas. Una descripción y análisis detallados del carbono del suelo y la materia orgánica se pueden encontrar en varias referencias (Schnitzer, 1991; FAO, 2001c). Tomando en cuenta las características biofísicas de las regiones áridas, este capítulo describe diferentes aspectos biofísicos del secuestro de carbono en los suelos de las tierras áridas.

HALÓFITAS

Una característica especial de muchos suelos de las tierras áridas es la salinidad, ya sea a través de su ocurrencia natural o de su incremento como resultado del riego. Los suelos salinos afectan grandes regiones de las tierras áridas (Glenn *et al.*, 1993). Dichas tierras con frecuencia son abandonadas, pero las plantas halófitas están especialmente adaptadas a estas condiciones y muestran potencial para la retención de carbono en este ambiente inhóspito. Se ha estimado que 130 millones de hectáreas son adecuadas para cultivar especies halófitas que pueden utilizarse como forraje, alimento y para obtener granos oleaginosos. Glenn *et al.* estimaron que se podrían asimilar entre 0,6–1,2 gigatoneladas de carbono por año mediante el cultivo de halófitas. La experiencia obtenida a partir de experimentos de descomposición sugiere que entre 30 y 50 por ciento de este carbono podría almacenarse a largo plazo en el suelo. Si bien se requeriría el riego para alcanzar estas cifras, el almacenamiento completo de carbono sugiere una tasa actual de carbono de 22–30 por ciento.

PRADERAS

Las praderas son el bioma natural en muchas tierras áridas, en parte porque la lluvia es insuficiente para mantener los árboles y en parte porque prevalece la cría de ganado. Sin embargo, la productividad de las praderas y el secuestro de carbono han sido sujeto de controversias. Actualmente se sabe que la productividad de las praderas tropicales es más alta de lo que se pensaba anteriormente y, en consecuencia, fijan más carbono de lo esperado (Scurlock y Hall, 1998). Las estimaciones de carbono almacenado en las praderas son de alrededor de 70 toneladas/ha, comparable a los valores registrados por los suelos forestales. Aunque muchas de las praderas existentes en las tierras áridas son manejadas pobremente y se encuentran degradadas, ofrecen potencial para el secuestro de carbono.

El promedio anual de ingresos de materia orgánica en las praderas es alrededor del doble de 1-2 toneladas/ha que aportan los suelos cultivados (Jenkinson y Rayner, 1977).

Este hecho surge de resultados de estudios hechos en varias localidades. Los datos han mostrado que las praderas, aún cuando estén sujetas a pastoreo controlado, generalmente tienen niveles de carbono más altos que las tierras de cultivo. Chan y Bowman (1995) encontraron que 50 años de cultivo de los suelos de las regiones semiáridas de Nueva Gales del Sur, Australia, tenían como promedio una reducción del carbono del 32 por ciento con relación a las praderas. La reducción estuvo directamente relacionada con el número de años de cultivo. De igual manera, los suelos con pasturas altas sometidas a pastoreo controlado tenían mayor contenido de carbono en el suelo que las tierras cultivables sujetas a labores de conservación (Franzluebbers *et al.*, 2000).

El factor clave responsable del incremento del almacenamiento de carbono en las praderas es el alto ingreso de carbono derivado de las raíces de las plantas. Esta alta producción de las raíces es lo que suministra el potencial para el incremento de la materia orgánica del suelo en las pasturas y barbechos repoblados en comparación con los sistemas cultivados. Los residuos de las raíces tienden a ser menos fáciles de descomponer que los brotes, debido a su alto contenido de lignina (Woomer *et al.*, 1994). En consecuencia, la clave para mantener e incrementar el secuestro de carbono en los sistemas de praderas es maximizar la productividad de las pasturas y la generación de raíces (Trumbmore *et al.*, 1995). También se ha demostrado que las pasturas retienen más carbono que las leguminosas de cobertura (Lal, Hassan y Dumanski, 1999). También tienen el potencial de retener el carbono en tierras previamente degradadas. Garten y Wullschleger (2000) utilizaron un modelo que estimó que se podía obtener en 10 años un 12 por ciento de incremento en el carbono del suelo sembrando caguazo (*Panicum virgatum* L.) en tierras degradadas.

Muchas tierras están dedicadas al pastoreo, ya sea natural o controlado. Esto podría hacer que decrezca la disponibilidad de residuos para secuestrar el carbono, especialmente debido a que la cantidad de carbono que retorna como abono es menor que la que se consume. Sin embargo, suponiendo que haya un manejo cuidadoso del pastoreo, muchas investigaciones han revelado un efecto positivo del pastoreo sobre la cantidad de carbono del suelo. Este fue el caso que se observó para una pastura compuesta de alfalfa y gramíneas perennes en las pampas semiáridas (Díaz-Zorita, Duarte y Grove, 2002). Incluso bajo condiciones climáticas más difíciles, en la República Árabe Siria, se encontró que el pastoreo no ocasiona efectos perjudiciales sobre el carbono del suelo (Jenkinson *et al.*, 1999). Schuman, Janzen y Herrick (2002) han calculado que con un manejo adecuado del pastoreo, las praderas de los Estados Unidos de América pueden incrementar el almacenamiento de carbono del suelo entre 0,1-0,3 toneladas/ha/año. En praderas nuevas, esta cifra se puede elevar hasta 0,6 toneladas/ha/año.

El efecto positivo del pastoreo parece resultar de la repercusión que tiene este sobre la composición de especies y la acumulación de residuos. Willms *et al.* (2002) encontraron que cuando la pradera se protegía del pastoreo, existía poco efecto sobre la producción, pero había un incremento en la cantidad de los residuos. Reeder y Schuman (2002) también encontraron que había acumulación de residuos en un sistema semiárido sin pastoreo y que los niveles de carbono del suelo fueron más altos en las tierras con pastoreo. El residuo actuó como almacén del carbono inmovilizado. La pradera sin pastoreo también experimentó un incremento en las especies que carecían de sistema radicular fibroso que conduce a la formación de materia orgánica del suelo y su acumulación.

Por lo tanto, las praderas pueden jugar un papel vital en el secuestro de carbono. Sin embargo, resulta esencial que se haga un manejo cuidadoso del pastoreo. Los registros históricos muestran cuan susceptibles son las praderas semiáridas al sobrepastoreo, a la degradación del suelo y a la pérdida de carbono.

QUEMA

El fuego forma parte del ciclo natural en muchos biomas y ocurre sobre todo en los ecosistemas de praderas. Sin embargo, el ser humano también utiliza el fuego para

limpiar áreas para la agricultura y eliminar residuos de cultivos. La acción del fuego parecería estar en contra del secuestro de carbono, porque devuelve el carbono fijado por la vegetación a la atmósfera, impidiendo así su incorporación al suelo. El efecto del fuego es difícil de generalizar, porque depende de su intensidad y velocidad. Estos factores son influenciados por la tasa de vegetación, o sea sus componentes de madurez y presencia de madera, la acumulación de residuos y los factores climáticos tales como el nivel de humedad. El carbono presente en todo el material que está sobre la tierra al ser quemado se perderá del sistema. Sin embargo, en los ecosistemas de praderas, el carbono perdido por el fuego puede ser reemplazado rápidamente mediante el incremento de la fotosíntesis y el crecimiento vegetativo (Knapp, 1985; Svejcar y Browning, 1988). Incluso en sistemas de sabana que contienen especies maderables, se ha demostrado que la pérdida de carbono a través de la combustión puede ser reemplazada durante la siguiente estación de crecimiento (Ansley *et al.*, 2002). Con relación al suelo, la intensidad y la velocidad del fuego determinan la profundidad a la cual es afectado. En un estudio donde se utilizó la quema para despeje de los bosques, se perdieron 4 toneladas C/ha en los tres centímetros superficiales del suelo, pero este fue reemplazado en un año bajo un sistema de pasturas (Chone *et al.*, 1991).

No todo el material vegetal se quema totalmente por el fuego y se produce una cantidad variable de carbón vegetal. El carbón vegetal es extremadamente resistente a la descomposición; no es reciclado como la mayoría de la materia orgánica y tiene un tiempo medio de permanencia de 10 000 años (Swift, 2001). En consecuencia, en suelos severamente degradados que hayan sido afectados por varios fuegos, el carbón vegetal y el material carbonizado pueden formar una proporción sustancial del carbono orgánico restante. Sin embargo, no se conoce si el carbón vegetal y otros materiales carbonizados tienen algún efecto protector sobre la materia orgánica original. De esta manera, aunque los fuegos liberan CO₂ hacia la atmósfera, la producción simultánea de carbón vegetal puede ser considerada como un proceso de secuestro que genera una cantidad sustancial de carbono acumulada en el suelo durante un largo período.

REFORESTACIÓN

La silvicultura es reconocida como un sumidero principal para el carbono. Sin embargo, de la misma manera que acumula el carbono en la superficie de la tierra, la silvicultura puede hacer contribuciones significativas al carbono del suelo incluso en tierras áridas. Existe un gran número de especies que permiten una silvicultura viable en los ambientes de tierras áridas (Srivastava *et al.*, 1993; Silver, Ostertag y Lugo, 2000; Kumar *et al.*, 2001; Niles, *et al.*, 2002). En particular, los árboles fijadores de nitrógeno generalmente conducen a la acumulación creciente de carbono en el suelo. Por ejemplo, especies de los géneros *Prosopis* y *Acacia* están adaptadas a las tierras semiáridas subtropicales y se ha encontrado que incrementan el nivel de carbono del suelo en alrededor de 2 toneladas/ha (Geesing, Felker y Bingham, 2000).

Algunas especies forestales son particularmente adecuadas para cultivar en tierras degradadas y sus sistemas radiculares profundos aprovechan los recursos no disponibles para los cultivos de raíces poco profundas. *Prosopis juliflora* ha sido sembrada en suelos afectados por la salinidad en el nordeste de la India e incrementó la cantidad de carbono orgánico del suelo de 10 toneladas/ha a 45 toneladas/ha en un período de cinco años (Garg, 1998). Incluso en los casos en que no es apropiada la silvicultura a gran escala, con frecuencia existe la posibilidad de plantar árboles alrededor de los campos de los agricultores. Tal es el caso de las regiones semiáridas de la India donde *Prosopis cineraria* ha mejorado la fertilidad del suelo y ha capturado cantidades adicionales de carbono (Nagarajan y Sundaramoorthy, 2000). Sin embargo, los sistemas naturales son complejos y los árboles no garantizan un mejor secuestro de carbono. Jackson *et al.* (2002) encontraron que el carbono del suelo disminuyó cuando la vegetación maderable invadió las praderas. Aunque hubo un incremento en la biomasa, tanto encima como

debajo de la superficie del suelo, estas ganancias fueron superadas por las pérdidas del carbono del suelo.

RESIDUOS

Los residuos de las plantas proveen un recurso renovable de fácil incorporación como materia orgánica del suelo. La producción de residuos vegetales en un ecosistema estable será balanceada por el retorno de material vegetal muerto hacia el suelo. En una pradera natural, alrededor del 40 por ciento de la producción vegetal se acumula en la materia orgánica del suelo (Batjes y Sombroek, 1997). Sin embargo, en los sistemas agrícolas, debido a que las plantas son cosechadas, en promedio solamente alrededor del 20 por ciento de la producción se acumulará en la fracción orgánica del suelo. Además, en algunos sistemas agropecuarios, toda la producción superficial puede ser cosechada, dejando solamente la biomasa de las raíces. De los residuos vegetales retornados al suelo, alrededor de un 15 por ciento se convertirá en carbono orgánico pasivo del suelo (Lal, 1997). Schlesinger (1990) es más pesimista, sugiriendo que solamente el uno por ciento de la producción vegetal contribuirá al secuestro de carbono en el suelo. Las cantidades actuales de residuos devueltos al suelo dependerán del cultivo, las condiciones de crecimiento y las prácticas agrícolas. Por ejemplo, para un sistema soya – trigo en la región subtropical central de la India, la contribución anual de carbono a partir de la biomasa superficial fue de alrededor del 22 por ciento de la soya y 32 por ciento del trigo (Kundu *et al.*, 2001). Esto resultó en un ingreso anual neto de carbono del 18 por ciento incorporado en la materia orgánica del suelo. En las regiones semiáridas de Canadá, la conservación del carbono de los residuos en carbono orgánico del suelo fue del nueve por ciento en sistemas sometidos a barbecho frecuente y se incrementó al 29 por ciento en sistemas cultivados de forma continua (Campbell *et al.*, 2000).

Excepto cuando se cosechan las raíces de los cultivos, toda la producción de biomasa por debajo del suelo está disponible para su incorporación a la materia orgánica del suelo. Se cree que las raíces son el principal constituyente de las partículas de materia orgánica, aunque la labranza reduce la acumulación neta de carbono de las raíces en forma importante (Hussain, Olsson y Ebelhar, 1999). En climas templados, los ingresos de carbono por debajo del suelo a partir solamente de las raíces, pueden mantener generalmente los niveles de carbono del suelo. Sin embargo, este no es el caso en las regiones más cálidas y semiáridas, donde los residuos se descomponen mucho más fácilmente, siempre que exista suficiente humedad disponible (Rasmussen, Albrecht y Smiley, 1998). En consecuencia, cuando se cultivan continuamente las tierras áridas, el hecho de no retornar los residuos vegetales superficiales conducirá invariablemente a la reducción del carbono del suelo. Muchos suelos africanos demuestran este fenómeno. El cultivo continuo durante años sin los insumos recomendados, con frecuencia ha reducido el contenido de carbono a la mitad (Woomer *et al.*, 1997; Ringius, 2002).

Tanto la calidad como la cantidad de residuos vegetales son factores importantes para determinar la cantidad de carbono almacenado en el suelo. La cantidad es altamente dependiente de las condiciones ambientales y de las prácticas agrícolas. Las diferencias entre los cultivos pueden ser marcadas. Un cultivo de maíz devolverá casi el doble de residuos al suelo en comparación con la soya y en consecuencia producirá una tasa mayor de incremento de la materia orgánica del suelo (Reicosky, 1997). La ventaja que tienen los cereales sobre las leguminosas para lograr tasas máximas de secuestro de carbono también ha sido demostrada por Curtin *et al.* (2000). Mientras el barbecho de lenteja negra en las regiones semiáridas de Canadá, adicionó entre 1,4 y 1,8 toneladas C/ha, un cultivo de trigo añadiría anualmente de dos a tres veces esa cifra. Igualmente, en Argentina, la soya, que produjo 1,2 toneladas/ha de residuos, dio como resultado una pérdida neta del carbono del suelo, mientras que el maíz con 3,0 toneladas/ha de residuos disminuyó la pérdida de carbono del suelo del sistema de manera significativa (Studdert y Echeverría, 2000).

Incluso dentro de un grupo de cultivos, ocurren grandes diferencias en la producción de materia orgánica. Abdurahman *et al.* (1998) compararon la producción de hojas secas a partir del gandul y el caupí. Mientras que el primero produjo 3 toneladas/ha, el caupí produjo 0,14 toneladas/ha. Estos ejemplos ilustran como la selección del cultivo puede tener una gran influencia sobre la cantidad de carbono que puede fijar un sistema agrícola.

La importancia de las raíces con respecto a los tallos respecto a su suministro de carbono al suelo, es un factor que se ilustra en un experimento realizado para comparar el destino del carbono derivado de los tallos y las raíces (Puget y Drinkwater, 2001). En este estudio con abono verde de leguminosas (vicia peluda), casi la mitad del carbono derivado de las raíces aún estaba presente en el suelo después de una campaña de siembra, mientras que fue retenido solo el 13 por ciento del carbono derivado de los tallos. Esto implica que los residuos se descomponen rápidamente a causa de su alto contenido de nitrógeno (Woomer *et al.*, 1994) y pueden servir como una fuente de nitrógeno para el cultivo siguiente.

La composición química de los residuos vegetales afecta su tasa de descomposición. Como promedio, los residuos vegetales contienen alrededor del 40 – 50 por ciento de carbono, pero el nitrógeno es un componente más variable. Una alta concentración de lignina y otros carbohidratos estructurales, conjuntamente con una alta relación C:N disminuirán la tasa de descomposición. Por ejemplo, la medición de la evolución del CO₂ proveniente de las hojas árboles de especies de ramón africanas y del estiércol caprino, mostraron una correlación significativa con el contenido inicial de nitrógeno y una correlación negativa con el contenido de lignina (Mafongoya, Barak y Reed, 2000). Los residuos de leguminosas, tales como la soya, son generalmente de alta calidad (baja relación C:N) y, por lo tanto, se descomponen rápidamente (Woomer *et al.*, 1994). Aunque la composición química de los residuos vegetales afecta su tasa de descomposición, existe poco efecto sobre la materia orgánica del suelo resultante (Gregorich *et al.*, 1998). Cuando los residuos se acumulan en la superficie del suelo, su presencia física afecta al suelo. Las coberturas reducen la pérdida de agua y la temperatura del suelo (Duiker y Lal, 2000); ambos factores son importantes para las tierras áridas, especialmente donde la temperatura del suelo está por encima de la óptima para el crecimiento de las plantas. La habilidad del suelo para asimilar la materia orgánica no está bien definida. Una relación lineal entre la aplicación y la acumulación de la materia orgánica del suelo es citada con frecuencia. Sin embargo, la medición del flujo de CO₂ en el centro de Ohio, Estados Unidos de América, mostró que este flujo se incrementa con la aplicación adicional de paja de trigo (0,8 y 16 toneladas/ha). De cualquier modo, el carbono orgánico del suelo fue 19,6, 25,6 y 26,5 toneladas/ha después de cuatro años, sugiriendo que la captura de carbono estaba alcanzando la saturación (Jacinthe, Lal y Kimble, 2002).

La aplicación de residuos debe ser cuidadosa puesto que bajo ciertas condiciones pueden ocurrir grandes pérdidas de carbono. Por ejemplo, en el oeste de Kenya, se perdió entre 70-90 por ciento del carbono añadido en 40 días cuando se aplicó el abono verde de especies agroforestales durante la época lluviosa (Nyberg *et al.*, 2002). En Níger, la adición de residuo de mijo y fertilizante durante cinco años no tuvo efecto significativo sobre los niveles de carbono en los suelos arenosos (Geiger, Manu y Bationo, 1992); la actividad de las termitas puede haber contribuido a los bajos niveles de carbono del suelo, debido a que toda la cobertura superficial puede ser consumida en un año. La cantidad potencial de residuos disponibles para aplicar a los suelos puede ser grande. Gaur (1992) estimó que en la India, se producen anualmente alrededor de 235 millones de toneladas de paja a partir de cinco cereales principales (no sólo en tierras áridas). Incluso si la mitad de esta fuera utilizada para alimentar el ganado, habría más de un millón de toneladas disponibles para añadir a los suelos. Sin embargo, la disponibilidad de suficientes residuos vegetales es con frecuencia un problema, especialmente donde

estos se requieren para la alimentación del ganado. Este conflicto de intereses ocurre frecuentemente en muchos sistemas agrícolas de las tierras áridas. En África occidental, los residuos de cultivos son eliminados o quemados. En consecuencia, la cantidad de carbono del suelo declinó de forma sostenida. El cultivo continuo y la aplicación de abono puede elevar los niveles de carbono del suelo alrededor del 40 por ciento, pero esto frecuentemente involucra movilizar el carbono de las áreas vecinas para mantener el ganado (Ringius, 2002). Cuando los residuos de plantas y animales son escasos, pueden existir posibilidades de enmiendas orgánicas alternativas para el suelo. Por ejemplo, en la India los desechos pulverizados de una planta procesadora de fibra de coco se han incorporado exitosamente al suelo (Selvaraju *et al.*, 1999); otros experimentos con desechos industriales de adhesivos (Dahiya, Malik y Jhorar, 2001) han incrementado los niveles de carbono del suelo de forma exitosa.

Con relación al balance total de carbono, cuando los residuos vegetales se acumulan *in situ*, no existe costo adicional del carbono. En consecuencia, el carbono retenido por las plantas en la fotosíntesis está disponible como una ganancia neta para el suelo. La situación es más compleja cuando se requiere maquinaria para separar los residuos de los componentes de la cosecha. Cuando los residuos vegetales se transportan entre campos, en los cálculos se debería incluir el costo de energía.

Quizá el elemento más importante con relación a la aplicación de residuos y a la cuantificación del carbono es definir si el carbono está simplemente siendo transferido desde un lugar hacia otro o es verdaderamente secuestrado. Si la materia orgánica de los procesos industriales u otras fuentes fuera a ser utilizada para incorporarla al suelo, entonces cualquier cantidad de carbono utilizada en el transporte tendría que ser cuantificada. Sin embargo, cuando el material es verdaderamente un producto de desecho, no habría necesidad de considerar el carbono utilizado en su producción. En este caso, el carbono disponible para la captura deberá ser considerado sin diferencias con respecto al CO₂ emitido a partir de una fuente de combustible fósil que es posteriormente fijado por las plantas en la fotosíntesis y retornado al suelo por medio de los residuos de cultivos.

APLICACIÓN DE ABONOS ORGÁNICOS

La aplicación de abonos orgánicos ha sido tratada durante mucho tiempo como una fuente valiosa de materia orgánica para mejorar la fertilidad del suelo. Una de las características clave de la aplicación de estos abonos es que promueven la formación y estabilización de los microagregados del suelo (Whalen y Chang, 2002) y de las partículas de materia orgánica (Kapkiyai *et al.*, 1999). Estos abonos son más resistentes a la descomposición microbiana que los residuos vegetales. En consecuencia, para la misma cantidad de carbono aplicada, el almacenamiento de carbono es más alto con la aplicación de abonos orgánicos que con residuos vegetales (Jenkinson, 1990; Feng y Li, 2001). Después de cinco años de aplicación, los suelos que recibieron abonos orgánicos tenían 1,18 toneladas/ha más de carbono presente que los suelos que recibían residuos de plantas. Incluso después de 15 años, aún había una diferencia de 0,37 toneladas de C/ha según lo calculado mediante el modelo de carbono del suelo RothC. En el campo, Gregorich *et al.* (1998) encontraron que los suelos abonados tenían grandes cantidades de carbono soluble con una tasa de tiempo de residencia más lento que en el testigo o las parcelas fertilizadas.

La composición y, por lo tanto, la descomposición del abono orgánico varía según las especies de las cuales se origina y también dentro de las especies de acuerdo con la dieta de los animales (Somda y Powell, 1998). Muchos experimentos de campo han revelado que el abono orgánico es el mejor medio para incorporar materia orgánica a los suelos y promover el almacenamiento de carbono. Por ejemplo, Li *et al.* (1994) encontraron que el estiércol producía la mayor cantidad de carbono secuestrado en un conjunto de suelos y condiciones climáticas dadas, aunque la textura del suelo fue

importante y la tasa mayor de secuestro de este elemento ocurrió donde había un alto contenido de arcilla. Sin embargo, muchos agrosistemas tradicionales añaden estiércol en combinación con fertilizantes (Haynes y Naidu, 1998).

Dependiendo del sistema, la aplicación de cantidades incluso relativamente altas de abonos orgánicos no garantiza un incremento del carbono del suelo. Un estudio a largo plazo en Kenya ha demostrado que la materia orgánica del suelo disminuyó, incluso cuando se aplicó abono orgánico y se incorporaron residuos de maíz (Kapkiyai *et al.*, 1999). Se ha estimado que con el fin de mantener el carbono del suelo en este sistema, se requerirían anualmente 35 toneladas/ha de abono o 17 toneladas/ha de estiércol con 16 toneladas/ha de paja (Woomer *et al.*, 1997). En consecuencia, en este caso, hay un déficit de carbono, pero es difícil apreciar como este sistema podría solucionar el problema. Además, las altas dosis de aplicación de estiércol algunas veces pueden causar problemas en el suelo debido a la acumulación de K^+ , Na^+ y NH_4^+ y a la producción de sustancias repelentes al agua por los hongos descomponedores (Haynes y Naidu, 1998). Un problema adicional en las tierras áridas que restringe la cantidad de estiércol que puede aplicarse es que el cultivo puede «quemarse» cuando no hay humedad suficiente en el momento de su aplicación. Por consiguiente, los productores a menudo esperan hasta que lleguen las lluvias para hacer una aplicación, sobre todo porque las lluvias son erráticas en las regiones áridas.

La producción de suficiente estiércol para la aplicación a los campos es un problema real para muchos pequeños agricultores en los distintos sistemas de producción agropecuaria. En Nigeria el estiércol originado por los animales de pastoreo en época seca es de alrededor de 111 kg/ha de materia seca (Powell, 1986). Esta cantidad tendrá poco efecto sobre el suelo. Más útil es la práctica de acorralar el ganado durante la noche, puesto que la producción de estiércol es usualmente mayor durante el anochecer y el amanecer. Por ejemplo, cuando se acorralaron 50 cabezas de ganado en un área de 0,04 ha durante cinco noches, produjeron un equivalente de 6 875 toneladas/ha de estiércol (Harris, 2000). Normalmente, en el norte de Nigeria el ganado es ubicado en campos durante 2 – 3 noches y pueden suministrar estiércol a razón de 5,5 toneladas/ha. Alternativamente, en partes densamente pobladas, como la zona de cerrada al asentamiento cercana a Kano, la producción del ganado y los cultivos están completamente integrados. El ganado se mantiene permanentemente en corrales y se alimenta utilizando el forraje que crece en los campos colindantes. Su estiércol se colecta y se disemina en las tierras cultivables. Aunque constituye un sistema eficiente, parte del carbono se perderá como consecuencia de los requerimientos respiratorios y de crecimiento del ganado. Un problema adicional asociado con la cría de ganado es que los rumiantes producen cantidades significativas de CH_4 , el cual es un potente gas de invernadero.

Existen contradicciones con respecto a la utilidad del estiércol animal en el secuestro de carbono. Schlesinger (1999, 2000) calculó que para suministrar 13,4 toneladas/ha se requerirían tres hectáreas de tierras cultivables para producir suficiente alimento para el ganado. Esto significa que la producción de estiércol requiere extraer carbono de las tierras vecinas. Aunque esta es una generalización, se argumenta que una relación 3:1 hace poco probable que la producción de abono *per se* pueda ser utilizada como un medio para suministrar una fuente neta de carbono a los suelos. Sin embargo, en muchos sistemas de cultivos de los pequeños agricultores en las tierras áridas, las dosis de aplicación de estiércol son mucho más bajas y la producción de forraje también es menos eficiente. Smith y Powlson (2000) indican que mantener el ganado es parte de muchos sistemas agrícolas y, por lo tanto, que el estiércol debe considerarse como un subproducto que puede añadirse a las tierras cultivables sin que necesariamente se incluya el costo del carbono para su producción. Parte del desacuerdo con Schlesinger sobre la utilidad del estiércol, depende del punto donde se establece el límite del sistema para la cuantificación del carbono. Sin embargo, cuando se conduce un análisis

de carbono de este tipo, resulta esencial recordar que el propósito de la agricultura es alimentar a las personas: reducir la emisión de gases de efecto invernadero sólo puede considerarse como una actividad secundaria.

LOS FERTILIZANTES INORGÁNICOS Y EL RIEGO

Los fertilizantes y el riego son el medio primario para incrementar la producción de las plantas y el rendimiento de los cultivos. Cualquier incremento en la biomasa también ofrece un mayor secuestro de carbono. Como resultado, el riego y la fertilización se han recomendado y han probado ser métodos eficientes para incrementar el secuestro de carbono (Lal, Hassan y Dumanski, 1999). Rasmussen y Rohde (1988) han demostrado una relación directa entre la adición de nitrógeno a largo plazo y la acumulación de carbono orgánico en algunos suelos semiáridos en Oregon, Estados Unidos de América. Sin embargo, estas tecnologías no suministran materia orgánica adicional por sí mismas, pero tienen un costo de carbono. Schlesinger (1999, 2000) ha señalado que el bombeo de agua requiere energía y que el proceso de elaboración de fertilizantes, almacenamiento y transporte es consumidor de energía. Por consiguiente, Schlesinger (2000) estimó que las ganancias en el carbono almacenado utilizando ya sea la fertilización o el riego son compensadas por las pérdidas que ocurren en el sistema. El riego también puede conducir a la liberación de carbono inorgánico del suelo.

Izaurrealde, McGill y Rosenberg (2000) han argumentado que los cálculos utilizados por Schlesinger están basados en dosis muy altas de aplicación de fertilizantes. En muchos sistemas agrícolas de tierras áridas en países en vías de desarrollo, los productores no tienen fondos suficientes para aplicar grandes cantidades de fertilizantes, incluso cuando estos están disponibles. Con relación a los costos de energía en que se incurre para bombear el agua, se están desarrollando sistemas con suministro de energía solar (Sinha *et al.*, 2002) y los ambientes de tierras áridas que con frecuencia cuentan con cielos claros, podrían hacer un mejor uso de esta energía.

Estos ejemplos sirven para ilustrar cuán importante es considerar el sistema completo cuando se tiene en cuenta el secuestro de carbono para compensar las emisiones de CO₂. El costo exacto del carbono relacionado con el riego y la fertilización requiere el cálculo para cada sistema, pero el déficit de carbono asociado con ambas tecnologías, hace difícil su incorporación en los sistemas de secuestro neto de carbono. La conservación del agua, el cultivo de leguminosas y el reciclaje cuidadoso de nutrientes es más probable que produzcan un balance positivo de carbono.

LABRANZA

Pretty *et al.* (2002) consideran la labranza como uno de los factores responsables de la disminución de las cantidades de carbono en los suelos agrícolas. La investigación y la experimentación con prácticas de labranza reducida prevalecen más en las Américas. El arado y la grada de discos se cree que son las causas principales de las pérdidas del carbono del suelo causando la destrucción de los agregados del suelo y la aceleración de la descomposición, mediante la mezcla de residuos vegetales, oxígeno y biomasa microbiana. Los agregados del suelo son vitales para la captura de carbono (Six, Elliott y Paustian, 2000), un proceso que es óptimo cuando existe una cantidad intermedia de agregados (Plante y McGill, 2002). De la fracción de materia orgánica, la materia orgánica en forma de partículas es la más sensible al laboreo (Hussain, Olsson y Ebelhar, 1999).

Resulta difícil cuantificar los efectos de la labranza sobre el carbono del suelo, debido a que estos dependen en parte del lugar; por ejemplo, los suelos de textura gruesa tienen mayor probabilidad de ser afectados por las prácticas de cultivo que los de textura fina (Buschiazzo *et al.*, 2001). Sin embargo, reducir el laboreo podría ser más efectivo en ambientes cálidos y secos (Batjes y Sombroek, 1997).

Reicosky (1997) condujo un experimento en el que midió el flujo de CO₂ para investigar las pérdidas de carbono del suelo inducidas por la labranza. El flujo de CO₂

se controló durante 19 días siguiendo diferentes prácticas de labranza. El arado de vertedera enterró la mayor parte de los residuos de cultivo y produjo un flujo máximo de CO₂. La liberación de carbono por los diferentes tratamientos como porcentaje de carbono en los residuos de cultivo fue: 134 por ciento con el arado de vertedera, 70 por ciento con arado de vertedera y grada de discos, 58 por ciento con la grada de discos; 54 por ciento con el arado de cincel y 27 por ciento sin labranza. Esto demuestra la correlación entre la pérdida de CO₂ y la intensidad de la labranza y pone en evidencia que los sistemas de producción agropecuaria que usan arado de vertedera inevitablemente pierden carbono del suelo. Se requerirían cantidades muy grandes de materia orgánica para reemplazar las pérdidas ocasionadas por este tipo de labranza tan pesado. Reicosky *et al.* (1995) estiman que en América del Norte se necesitarían anualmente entre 15–25 toneladas/ha de estiércol, más los residuos de los cultivos para compensar estas pérdidas.

El flujo de CO₂ del suelo generado directamente por el proceso de labranza no siempre puede reflejar la liberación total de CO₂ y por consiguiente el total de carbono del sistema. Esto es ilustrado por una comparación de labranza convencional con discos y la labranza cero en el centro de Texas, Estados Unidos de América, por Franzluebbers, Hons y Zuberer (1995). La evolución estacional del CO₂ fue de hasta el 12 por ciento mayor en el sistema de labranza cero después de 10 años. Esto fue a pesar del hecho de que ocurrió un cambio en la dinámica del secuestro de carbono y la mineralización en el sistema sin labranza. Costantini, Cosentino y Segat (1996) también encontraron que se liberó más CO₂ en el área sin labranza o con labranza mínima en comparación con la labranza convencional, a pesar de haber niveles superiores de C en el suelo; ellos atribuyen esta diferencia a un incremento en la biomasa microbiana.

Las tasas de pérdida de carbono a través del cultivo dependen considerablemente del sitio y sistema de labranza. Ellert y Janzen (1999) midieron el flujo de CO₂ después del uso de un cultivador pesado en un suelo semiárido «Chernozem» en las praderas canadienses. Encontraron que aunque el cultivo incrementó las tasas de pérdidas de CO₂ de dos o cuatro veces, los valores retornaron a la normalidad después de 24 horas. Calcularon que incluso con diez pases del cultivador, solamente el cinco por ciento de la producción de residuos del cultivo serían liberados desde este sistema. En otra situación, la labranza de un sistema de cultivo trigo – barbecho, cerca de Sydney, Australia, después de 12 años redujo el carbono del suelo en alrededor del 32 por ciento. La eliminación de la labranza y la adopción de un enfoque de labranza cero fue incapaz de impedir una disminución en la cantidad total de carbono, aunque la pérdida se redujo a sólo el 12 por ciento (Doran, Elliott y Paustian, 1998). Los autores sugieren que se requeriría de un período de barbecho para detener la disminución del carbono del suelo en este sitio.

Existen muchos tipos diferentes de sistemas de cultivos. El cultivo de conservación cubre un conjunto de prácticas – labranza cero, cultivos en camellones, cultivos de cobertura (Unger, 1990). Los cultivos de cobertura mantienen niveles altos de cubierta de residuos. Con las coberturas, solo una pequeña fracción del residuo está en contacto con la superficie del suelo y los microorganismos que éste contiene. La descomposición es lenta, especialmente, debido a que la disponibilidad de oxígeno es limitada. La presencia física de residuos de cultivos en la superficie del suelo altera el microclima de la capa superficial del suelo, que tiende a ser más fresca y húmeda en comparación con el cultivo convencional (Doran, Elliott y Paustian, 1998).

La acumulación de residuos también reduce la pérdida de CO₂ de la superficie del suelo. Álvarez *et al.*, (1995) informaron respecto al incremento en las formas lábiles de la materia orgánica en áreas sin cultivo en la pampa Argentina, indicando una disminución en la mineralización de la fracción orgánica. Este estudio también informa que aunque el carbono orgánico se incrementó entre 42–50 por ciento bajo condiciones de labranza cero en comparación con la arada común y el arado de cincel, también hubo

una marcada estratificación en la distribución del carbono bajo un régimen de labranza cero que no era evidente en el sistema con arado.

La estratificación del carbono orgánico es común en áreas con labranza reducida o en ausencia de este. Zibilske, Bradford y Smart (2002) en las zonas semiáridas de Texas, Estados Unidos de América, demostraron que la concentración de carbono orgánico fue 50 por ciento mayor en la capa superficial de cuatro centímetros del suelo en un experimento de labranza cero, en comparación con otra área con labranza, pero la diferencia disminuyó hasta el 15 por ciento en la zona de 4–8 cm de profundidad. La estratificación en las ganancias de carbono orgánico es típica en los cultivos de conservación en los climas cálidos. Bayer *et al.* (2000), trabajando en un acrisol franco arcillo arenoso, también encontraron que el incremento en el carbono orgánico total estaba limitado a las capas superficiales del suelo sin labranza, pero que la cantidad real dependía del sistema de cultivo. Un sistema de labranza cero de avena/arveja-maíz/caupí produjo la mayor cantidad de residuos de cultivos y fijaron la mayor cantidad de C: 1,33 toneladas de C/ha/año en 9 años.

Reicosky (1997) comparó los resultados de numerosos ensayos de labranza cero. Los datos enfatizan el efecto que tienen sobre la acumulación de materia orgánica, la rotación y la cantidad de residuos de cultivos. En general, se espera que las tasas de acumulación de materia orgánica sean inferiores en los climas más cálidos. No obstante, incluso en los suelos muy arenosos del norte de la República Árabe Siria, ha sido posible realizar modestos incrementos en la materia orgánica del suelo mediante la erradicación de la labranza (Ryan, 1997). En Nigeria occidental, la labranza cero combinada con la aplicación de cobertura tuvo un impacto importante, incrementando el carbono del suelo de 15 a 32,3 toneladas/ha en cuatro años.

Si bien los sistemas de labranza cero son una herramienta excelente para combatir las pérdidas de carbono asociadas con la labranza convencional, también presentan problemas. En tierras templadas, la reducción de la temperatura del suelo, generalmente asociada a la acumulación de residuos vegetales sobre su superficie, puede retardar la germinación de las semillas. Sin embargo, en las tierras áridas donde las temperaturas con frecuencia están por encima de la óptima para la germinación y el establecimiento de las plantas, es probable que tal enfriamiento sea beneficioso (Phillips *et al.*, 1980). Los sistemas de labranza cero a menudo presentan una mayor incidencia de plagas y enfermedades; el arado de vertedera y la grada de discos controlan eficientemente las malezas (Reicosky *et al.*, 1995). En consecuencia, los sistemas de labranza cero, generalmente dependen de herbicidas y plaguicidas adicionales. Estos insumos tienen un precio monetario y también un costo de carbono. Sin embargo, en los sistemas agrícolas de tierras áridas del mundo en desarrollo, la compra de tales insumos no es factible y muchas veces existe abundante mano de obra disponible para el deshierbe manual. La aplicación de fertilizantes nitrogenados también puede ser problemática cuando se aplica en suelos no perturbados y no labrados. Cuando los suelos tienen un drenaje pobre, puede ocurrir la denitrificación y la baja tasa de evaporación incrementa el riesgo de percolación de nitratos. Además, el nitrógeno original del suelo tiene una tasa menor de mineralización en los suelos no perturbados.

No todos los suelos se ajustan al enfoque de labranza reducida. Algunos suelos en la pampa argentina, en realidad pueden perder más carbono bajo labranza cero (0,7-1,5 toneladas C/ha/año) comparados con la labranza convencional (Álvarez *et al.*, 1995) por lo que se requiere su labranza periódica para evitar la compactación del suelo (Taboada *et al.*, 1998). Cuando no se utiliza labranza cero en las pampas, el estado físico del suelo es un factor crítico del sistema (Diaz-Zorita, Duarte y Grove, 2002). Del mismo modo, en el Sahel del oeste de África, los rendimientos más altos de los cultivos se obtienen con la labranza profunda, la cual se requiere para prevenir el encostramiento y reducir la compactación. En general, el éxito de los sistemas de labranza reducida dependen frecuentemente de la textura del suelo (Needelman *et al.*, 1999).

Una ventaja particular del sistema de labranza cero es que favorece el cultivo múltiple; la cosecha puede ser seguida inmediatamente por la siembra (Phillips *et al.*, 1980). Cualquier sistema de cultivo que permita el crecimiento continuo o casi continuo de las plantas debe rendir la capacidad máxima de producción de biomasa y, consecuentemente, tener el potencial para suministrar la mayor cantidad de materia orgánica para su inclusión en el suelo.

Considerando la cantidad total de carbono del suelo, los sistemas de labranza cero tienen un requerimiento de energía más bajo, debido a que la labranza requiere gran cantidad de energía. Phillips *et al.* (1980) calcularon que los sistemas de labranza cero en América del Norte reducen la cantidad de energía invertida en la producción de maíz y soya entre siete y 18 por ciento, respectivamente. La mejor eficiencia en el uso de agua significa que el costo de energía para el riego y, por lo tanto, de carbono son reducidos. Sin embargo, el impacto del ahorro de energía, a menudo es superado por los requerimientos de herbicidas (Phillips *et al.*, 1980). Kern y Johnson (1993) estimaron que la elaboración y aplicación de herbicidas para los sistemas de labranza cero en los Grandes Llanos es equivalente a 0,02 toneladas C/ha.

Los sistemas de labranza reducida fueron adoptados originalmente para ayudar a combatir la degradación del suelo. No fueron proyectados como un medio de secuestro de carbono, que es un efecto colateral fortuito. Aunque la efectividad de la labranza cero para la retención de carbono depende del sistema agrícola específico en el cual se aplica, no existen dudas de que, a medida que disminuye la intensidad de la labranza, el balance entre la pérdida y ganancia de carbono se inclina hacia la última.

ROTACIONES

La importancia de la rotación en los sistemas agrícolas se conoce desde hace mucho tiempo y el procedimiento forma ahora parte de las prácticas de agricultura conservación. La inclusión de rotaciones ofrece muchos beneficios, tales como contrarrestar el incremento de plagas específicas y de esta forma disminuir la necesidad de plaguicidas y herbicidas con «alto costo de carbono». Las diferentes especies cultivadas tienen una gran variedad de profundidades de crecimiento de las raíces y esto ayuda a la distribución de la materia orgánica a lo largo del perfil del suelo. En particular, las plantas de enraizamiento profundo son especialmente útiles para incrementar el almacenamiento de carbono en las capas más profundas, donde estará más seguro. La inclusión de variedades fijadoras de nitrógeno en una rotación incrementa el nitrógeno del suelo sin necesidad de producción costosa de fertilizantes nitrogenados.

Los efectos benéficos de las rotaciones en el secuestro de carbono han sido probados en muchos experimentos de larga duración. Por ejemplo, Gregorich, Drury y Baldock (2001) hicieron una comparación del cultivo continuo de maíz con una rotación a base de leguminosas. La rotación tuvo un efecto mayor sobre el carbono del suelo que el fertilizante. La diferencia entre el monocultivo de maíz y la rotación fue de 20 toneladas de C/ha, mientras que el efecto de la fertilización fue de seis toneladas de C/ha luego de 35 años. Además, la materia orgánica del suelo presente por debajo de la capa arada en la rotación a base de leguminosas aparentemente mostró más resistencia desde el punto de vista biológico. Esto demuestra que los suelos con rotaciones a base de leguminosas tienden a preservar el carbono residual. En las regiones semiáridas de Argentina también se observó un efecto positivo sobre el carbono orgánico del suelo (un incremento de 2-4 toneladas/ha) utilizando rotaciones con leguminosas y pastoreo alternado de ganado vacuno (Miglierina *et al.*, 2000).

Las rotaciones, especialmente las que se realizan con leguminosas, son consideradas sumamente valiosas para mantener la fertilidad del suelo y tienen un alto potencial para secuestrar el carbono en los sistemas de tierras áridas. Drinkwater, Wagoner y Sarrantonio (1998) estimaron que su uso en la región donde se siembra maíz/soya en los Estados Unidos de América incrementaría el secuestro de carbono del suelo entre

0,01 – 0,03 Pg C/año. La efectividad de las rotaciones en el secuestro del carbono, es probable que sea mayor donde se combinan con las prácticas de agricultura de conservación.

BARBECHOS

La función de los barbechos en el secuestro de carbono es variable. Donde el suelo no esté cultivado, es muy importante preservar la cubierta vegetal. Esto es especialmente importante en las tierras áridas donde es más probable que el suelo expuesto experimente erosión y degradación. Además de proteger el suelo, los cultivos de cobertura utilizan la energía solar que de otra manera se perdería. El CO₂ fijado está disponible para ser retenido en el suelo a medida que las plantas entran en senescencia. La importancia de la cubierta vegetal puede ilustrarse con los resultados de un experimento conducido en una zona semiárida de la zona mediterránea de España (Albaladejo *et al.*, 1998). Cuatro años y medio después de la remoción de la cubierta vegetal el carbono orgánico del suelo había decrecido en alrededor del 35 por ciento, comparado con las parcelas testigo.

El tipo de barbecho es importante. En Nigeria, la eliminación de bosques causó una disminución en el carbono del suelo de 25 a 13,5 toneladas/ha en siete años, pero 12–13 años de barbecho con arbustos restauraron el contenido de carbono (Juo *et al.*, 1995). Por el contrario, el barbecho con gandul no pudo fijar suficiente carbono a causa de su baja producción de biomasa y rápida degradación.

Sin embargo, los barbechos pueden tener un efecto negativo sobre el almacenamiento de carbono en muchas situaciones. La frecuencia de los barbechos de verano en las regiones semiáridas ha sido sugerida como uno de los factores de mayor influencia sobre el nivel de carbono del suelo en los sistemas agrícolas (Rasmussen, Albrecht y Smiley, 1998). Se ha informado que la reducción del barbecho de verano en el noroeste semiárido de los Estados Unidos de América posee un efecto más positivo sobre el secuestro de carbono del suelo que el logrado mediante la disminución de la intensidad de la labranza. La pérdida de carbono en esta región se considera que refleja las altas tasas de oxidación biológica que ocurren en la misma y que solo pueden compensarse mediante grandes aplicaciones de estiércol (Rasmussen, Albrecht y Smiley, 1998). Por lo tanto, la siembra anual y la adición de compuestos orgánicos son la práctica recomendada. Miglierina *et al.* (2000) también encontraron que reducir el barbecho de verano incrementaba el carbono del suelo como consecuencia de la aplicación de residuos de cultivos adicional. Utilizando el modelo de agroecosistemas CENTURY, Smith *et al.* (2001) predijeron que reducir el barbecho de verano en sistemas de cultivo de trigo (trigo–barbecho a trigo–trigo–barbecho) en los «chernozem» semiáridos del oeste de Canadá reduciría las pérdidas de carbono en 0,03 toneladas/ha. La eliminación de los barbechos puede ser altamente beneficiosa para el carbono del suelo debido simplemente a que la mayoría de los barbechos están asociados con pequeños agregados de residuos de plantas. La contribución del barbecho al secuestro de carbono en un sistema dado, depende de si el ciclo de cultivo añade o no cantidades significativas de materia orgánica al suelo. Cuando esto ocurre, es poco probable que el barbecho mejore el almacenamiento de carbono en el sistema. Al contrario, cuando las prácticas de cultivo son inadecuadas y se añade poca o ninguna materia orgánica, los períodos de barbecho servirán para contrarrestar esta situación.

CARBONO INORGÁNICO DEL SUELO

No todo el carbono del suelo está asociado con el material orgánico sino que también hay un componente de carbono inorgánico. Este tipo de carbono es de particular importancia en las tierras áridas debido a que la calcificación y la formación secundaria de carbonatos es un proceso importante en los suelos de las regiones áridas y semiáridas, donde se registra la mayor acumulación de carbonatos (Batjes y Sombroek, 1997). La

dinámica de los depósitos de carbono inorgánico es poco conocida si bien normalmente estos depósitos son bastante estables. La fijación de carbono inorgánico ocurre a través del movimiento de HCO_3^- hacia el agua subterránea y los sistemas cerrados. Según Schlesinger (1997), la acumulación de carbonato de calcio es bastante baja (entre 0,0012–0,006 toneladas/ha). Sin embargo, Lal, Hassan y Dumanski (1999) creen que la fijación de carbonatos secundarios puede contribuir con 0,0069–0,2659 Pg C/año en las tierras áridas y semiáridas.

Aunque el carbono inorgánico del suelo es relativamente estable, se puede liberar CO_2 cuando los carbonatos están expuestos a la erosión (Lal, Hassan y Dumanski, 1999). Además, el riego puede ocasionar que el carbono inorgánico se vuelva inestable si tiene lugar la acidificación a través de aplicaciones de nitrógeno y azufre. La liberación de CO_2 a través de la precipitación del carbonato se considera como un problema principal si se utiliza el riego en cualquier sistema que esté tratando de almacenar carbono. Además, Schlesinger (2000) ha señalado que el agua subterránea en las regiones áridas, a menudo contiene hasta uno por ciento de calcio y CO_2 . Esta concentración es mucho más alta que la de la atmósfera. En consecuencia, cuando esta agua se aplica a las tierras áridas, se libera CO_2 hacia la atmósfera y precipita el carbonato de calcio. Los cálculos realizados por Schlesinger sugieren que el riego de algunos sistemas agrícolas produciría una transferencia neta de CO_2 desde el suelo hacia la atmósfera.

Gases traza

Un aspecto importante de los sistemas agrícolas en relación con el balance global de carbono es la producción de gases traza, particularmente CH_4 y N_2O . Cuando se considera el secuestro de carbono por los suelos como un mecanismo para compensar las emisiones de gases de efecto invernadero, es necesario considerar también todos los factores interactuantes que pueden influenciar el calentamiento global. Tanto el CH_4 como el N_2O son gases radiactivos, y al igual que el CO_2 , contribuyen al efecto invernadero. Aunque están presentes en la atmósfera en concentraciones mucho más bajas que el CO_2 son más potentes. El CH_4 y el N_2O son gases de efecto invernadero, respectivamente 21 y 300 veces más activos que el CO_2 .

Los rumiantes, la producción de composte, la quema de biomasa y las inundaciones producen CH_4 , mientras que el N_2O se libera desde los suelos cuando se aplican fertilizantes nitrogenados o estiércol (Vanamstel y Swart, 1994). En el sector agrícola, la aplicación de abonos orgánicos está considerada como la mayor fuente de emisiones de gases traza. Es un problema potencialmente serio debido a que la aplicación de abonos orgánicos es una herramienta esencial para incrementar el carbono del suelo en las tierras áridas. Smith *et al.* (2001) calcularon que en los suelos europeos, el efecto de los gases traza es suficiente para reducir a la mitad el potencial de mitigación de CO_2 de algunas prácticas de labranza cero y manejo de abonos orgánicos. Además, el cambio climático es probable que amplifique el problema, puesto que se predice que el incremento de la temperatura debería promover las emisiones de N_2O (Li, Narayanan y Harriss, 1996).

CAMBIO CLIMÁTICO

El clima es un factor fundamental involucrado en la formación del suelo. En consecuencia, el cambio climático ejercerá influencia sobre los suelos. La fotosíntesis y la descomposición serán directamente afectadas y, por lo tanto, tendrían impacto sobre los suelos. Si los niveles de carbono del suelo se incrementan o disminuyen dependerá del balance entre la producción primaria y la descomposición (Kirschbaum, 1995). En general, se prevé que la productividad se incremente como consecuencia de la elevación de la temperatura y la concentración de CO_2 , y esto conducirá a cantidades crecientes de residuos disponibles para su incorporación al suelo. Sin embargo, las temperaturas más altas pueden incrementar la mineralización de la materia orgánica del suelo debido a que este proceso es más sensible a los incrementos de la temperatura que la producción

primaria. Kirschbaum (1995) predice que los depósitos de carbono orgánico del suelo en general tenderán a disminuir con el calentamiento global. Sin embargo, Goldewijk *et al.* (1994) sugieren que los efectos de la temperatura y la disponibilidad de agua sobre la respiración del suelo, serán menores que los atribuibles al efecto del CO₂ de la fertilización. La dirección del cambio no es precisa aún, pero el balance del cambio probablemente será mayor a nivel regional.

Se ha argumentado que los sistemas agrícolas son hasta cierto punto amortiguados de los efectos ambientales, mientras la descomposición no está protegida (Cole *et al.*, 1993). Por lo tanto, tasas crecientes de mineralización podrían ser más significativas que cualquier mejoramiento de la producción. Sin embargo, la calidad de la materia orgánica vegetal podría disminuir bajo condiciones de altas concentraciones de CO₂ debido al incremento en la relación C:N. Esto reduciría la tasa de degradación (Batjes and Sombroek, 1997). A nivel global, las tierras áridas podrían volverse más húmedas (Glenn *et al.*, 1993), lo cual debería conducir a un incremento en la productividad y la descomposición. No obstante, los cambios en las zonas climáticas dependen de un complejo conjunto de variables. Las predicciones basadas en el modelo de agroecosistemas CENTURY sugieren que, en general, las praderas perderán el carbono del suelo, excepto en las sabanas tropicales, que deberán mostrar un pequeño incremento (Parton *et al.*, 1995). Los experimentos en condiciones de altas concentraciones de CO₂ también han mostrado que los cambios en el carbono del suelo en los agroecosistemas son particularmente dependientes de las especies cultivadas (Rice *et al.*, 1994).

La magnitud total de la elevación global de la temperatura asociada con el cambio climático puede no ser sentida en muchas de las tierras áridas debido a que se prevé que el calentamiento sea mayor en las latitudes más altas. Con relación a la vegetación, algunas de las plantas mejor adaptadas para las regiones áridas presentan el patrón fotosintético C₄. Debido a que estas especies ya tienen un mecanismo de concentración de CO₂, muestran poco o ningún incremento en la productividad a altas concentraciones de CO₂. Sin embargo, es aún probable que reciban algún beneficio del incremento de la eficiencia en el uso del agua que acompaña a una concentración creciente de CO₂.