

Secuestro de carbono en tierras áridas



Secuestro de carbono en tierras áridas

INFORMES
SOBRE
RECURSOS
MUNDIALES
DE SUELOS

102

Las opiniones expresadas en esta publicación son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

ISBN 978-92-5-305230-1

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión de material contenido en este producto informativo para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor, siempre que se especifique claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción del material contenido en este producto informativo para reventa u otros fines comerciales sin previa autorización escrita de los titulares de los derechos de autor. Las peticiones para obtener tal autorización deberán dirigirse al Jefe de la Subdirección de Políticas y Apoyo en Materia de Publicación Electrónica de la Dirección de Comunicación de la FAO
Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Roma, Italia
o por correo electrónico a:
copyright@fao.org

Índice

Prefacio	ix
Resumen	xi
Lista de siglas y símbolos	xiii
Agradecimientos	xiv
1. Introducción	1
Cambio Climático	1
El ciclo terrestre del carbono	2
Los suelos y el secuestro de carbono	3
Necesidad de modelos para simular cambios en el carbono del suelo	5
Degradación del suelo	6
2. Las tierras áridas del mundo	9
Definición de tierras áridas	9
Degradación de las tierras en las regiones áridas	10
Distribución de las tierras áridas	12
El suelo y la vegetación en las tierras áridas	15
Características de las tierras áridas que afectan el secuestro del carbono	17
La desertificación y el secuestro del carbono	18
3. Sistemas de producción agropecuaria en las tierras áridas	21
Introducción	21
Características de los sistemas de pequeños agricultores	22
Ejemplos de sistemas de producción agropecuaria de los pequeños agricultores	23
Intensificación agrícola	23
Uso extensivo de la tierra	25
Manejo de la fertilidad del suelo	26
Aplicación de nutrientes al suelo	26
Reducción de las pérdidas de nutrientes del suelo	28
Reciclaje de nutrientes	29
Maximización de la eficiencia de la absorción de nutrientes	30
Prácticas de manejo de la fertilidad del suelo en el Sahel	31
Empezar por el conocimiento local	31
Determinación del potencial biofísico para el secuestro del carbono en los sistemas agrícolas	34
4. Aspectos biofísicos del secuestro de carbono en las tierras áridas	37
Introducción	37
Halófitas	37
Praderas	37

Quema	38
Reforestación	39
Residuos	40
Aplicación de abonos orgánicos	42
Los fertilizantes inorgánicos y el riego	44
Labranza	44
Rotaciones	47
Barbechos	48
Carbono inorgánico del suelo	48
Cambio climático	49
5. Estudios de caso en tierras áridas	51
Modelos para analizar los sistemas agrícolas en tierras áridas de los trópicos	51
Enfoque adoptado para establecer los parámetros de los modelos RothC y CENTURY	51
Selección de los sistemas y fuentes de datos	52
Estudio de Caso 1 – Nigeria – región de Kano	54
Estudio de Caso 2 – India – estados de Andhra Pradesh y Karnataka	61
Estudio de caso 3 – Kenya – distrito Makueni	71
Estudio de caso 4 – Argentina – provincias de Catamarca, Córdoba y Tucumán	79
Estudio de caso 5 – Senegal – cuenca «Old Peanut»	85
Estudio de caso 6 – Sudán – provincia de Kordofán del Norte	87
Proyectos de secuestro de carbono	89
Beneficios del comercio de carbono	89
Costos y beneficios locales directos	91
Factores institucionales Y de políticas	93
Cuantificación y verificación del carbono	95
Riesgos e incertidumbres para los inversionistas y productores	96
Planificación, diseño y manejo de los proyectos de secuestro de carbono	98
Estructura de políticas y de financiamiento para el secuestro del carbono y la mitigación de la pobreza en las tierras áridas	102
El mecanismo de desarrollo limpio del Protocolo de Kyoto	103
Fondos para el carbono	104
Fondo de biocarbono	104
El fondo de carbono para el desarrollo comunitario	105
Fondo para el Medio Ambiente Mundial	105
Fondo para la adaptación	106
Fondo prototipo de carbono	107
Conclusiones	109
Referencias	111

Lista de figuras

1.	Principales depósitos y flujos del balance global del carbono	1
2.	Balance terrestre global del carbono (simplificado)	2
3.	Balance del carbono del suelo (simplificado)	4
4.	Distribución de las tierras áridas del mundo	13
5.	Principales tipos de suelo en las tierras áridas	14
6.	Principales sistemas de producción agropecuaria en las tierras áridas (áridas, semiáridas y áridas subhúmedas) según FAO, 2003	16
7.	Sistemas de producción de los pequeños productores en el Sahel y estrategias de manejo en relación con el carbono	24
8.	Cambios en el uso de la tierra y manejo de la fertilidad del suelo expresados en puntos ponderados de importancia/extensión (1-10) tal como son percibidos por los agricultores en un sistema intensificado de producción en Senegal.	28
9.	Total del carbono del suelo en la aldea de Futchimiram (CENTURY)	55
10.	Cambio medio anual en carbono total del suelo en la aldea de Futchimiram (CENTURY)	56
11.	Carbono total del suelo en la aldea de Kasha (CENTURY)	56
12.	Cambio medio anual en carbono total del suelo en la aldea de Kasha (CENTURY)	57
13.	Total del carbono del suelo en la aldea Dagaceri (CENTURY)	58
14.	Cambio medio anual en carbono total del suelo en la aldea Dagaceri (CENTURY)	58
15.	Total del carbono del suelo en la aldea Tumbau (CENTURY)	59
16.	Cambio medio anual en carbono total del suelo en la aldea Tumbau (CENTURY)	60
17.	Total del carbono del suelo en una finca grande (5 ha), aldea Lingampally (CENTURY)	63
18.	Cambio promedio anual (en más de 50 años) del carbono total del suelo en una finca con explotación mixta, aldea Lingampally (CENTURY)	64
19.	Carbono total del suelo en una finca pequeña de secano, aldea Lingampally (CENTURY)	65
20.	Cambio medio anual del carbono total del suelo en una finca pequeña de secano, aldea Lingampally	66
21.	Carbono total del suelo en una finca grande usando riego con tres cultivos per año, aldea Lingampally (CENTURY)	66
22.	Cambio promedio anual en el carbono total del suelo en una finca grande con riego, aldea Lingampally (CENTURY).	67
23.	Carbono total del suelo en una finca pequeña mixta de cultivos y ganadería, aldea Metalkunta (CENTURY)	68
24.	Cambio promedio anual del carbono total del suelo en una finca pequeña mixta de cultivos y ganadería, aldea Metalkunta (CENTURY)	68
25.	Cambio total del suelo en una finca pequeña, Malligere, Distrito Tumkur	69

26. Cambio promedio anual del carbono total del suelo en una finca pequeña, Malligere, Distrito Tumkur	70
27. Carbono total del suelo en el asentamiento Darjani (CENTURY)	72
28. Cambio promedio anual del carbono total del suelo en la aldea Darjani (CENTURY)	73
29. Carbono total del suelo en el asentamiento Kaiani (CENTURY)	74
30. Cambio promedio anual del carbono total del suelo en la aldea Kaiani	75
31. Carbono total del suelo en la aldea Kymausoi (CENTURY)	75
32. Cambio promedio anual en el carbono total del suelo en la aldea Kymausoi (CENTURY)	76
33. Carbono total del suelo en la aldea Athi Kamunyuni (CENTURY)	76
34. Cambio promedio anual en el carbono total del suelo en la aldea Athi Kamunyuni	77
35. Carbono total del suelo en Monte Redondo (CENTURY)	80
36. Cambio promedio anual del carbono total del suelo en Monte Redondo (CENTURY)	81
37. Carbono total del suelo en Santa María (CENTURY)	81
38. Cambio promedio anual del carbono total del suelo en Santa María (CENTURY)	82
39. Carbono total del suelo en parcelas con y sin rotación (CENTURY)	83
40. Cambio promedio anual del carbono total del suelo en parcelas con y sin rotación (CENTURY)	84
41. Simulación del modelo CENTURY con un escenario histórico basado en praderas de sabana sin disturbar hasta la situación actual y el impacto de prácticas seleccionadas de manejo sobre el carbono del suelo y de los árboles, 2002-2050	85
42. Carbono del suelo (t/ha) en los 20 cm superiores	87
43. Carbono orgánico del suelo en relación con la historia del barbecho y cultivo en campos del norte de la Provincia de Kordofan, Sudán	88
44. Principales beneficios del mejoramiento del manejo del carbono del suelo a varios niveles	89
45. Políticas que afectan la economía familiar y el manejo de la fertilidad del suelo	92
46. Probabilidades de detección de diferencias en distintos tamaños de muestras	96
47. Modelo conceptual de las etapas involucradas en la planificación de un programa de secuestro de carbono	98
48. Marco conceptual para enlaces entre los ambientes locales e internacionales	101

Lista de cuadros

1. Prácticas agrícolas para mejorar la productividad e incrementar la cantidad de carbono en los suelos	4
2. Categorías de tierras áridas según la FAO (1993), clasificación y extensión (PNUMA, 1992)	9
3. Tierras degradadas por continente	10
4. Estimación de desertificación de GLASOD (excluyendo las tierras hiperáridas)	11
5. Tasas de degradación del suelo en tierras áridas de latitud media	11
6. Área global de tierras áridas, por continente	12
7. Cultivos típicos en condiciones de tierras de secano	15
8. Porcentaje de usos de la tierra en las regiones áridas en 1980	15
9. Ejemplo de prácticas de manejo de la fertilidad del suelo empleadas en la Cuenca «Old Peanut», Senegal, 1999/2000	32
10. Efectos de las prácticas de manejo y uso de la tierra sobre el potencial del secuestro carbono en las tierras áridas	34
11. Resumen de los hallazgos sobre el contenido de carbono y tasas de acumulación y/o pérdidas en cuatro agrosistemas de tierras áridas	52
12. Contenido total de carbono del suelo en la aldea Futchimiram	55
13. Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Futchimiram	55
14. Contenido total de carbono en la aldea Kaska	57
15. Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Kaska	57
16. Contenido total de carbono en la aldea Dagaceri (modelos CENTURY y RothC)	58
17. Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Dagaceri	59
18. Carbono total del suelo en la aldea Tumbau (CENTURY y RothC)	59
19. Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Tumbau	60
20. Carbono total del suelo en una finca grande de la aldea Lingampally	63
21. Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra en una finca grande en la aldea de Lingampally	63
22. Carbono total del suelo en una pequeña finca de secano, aldea Lingampally	65
23. Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo en una pequeña finca de secano, aldea Lingampally	65
24. Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo en una finca grande de secano, aldea Lingampally	67
25. Contenido total de carbono del suelo en una pequeña finca mixta de cultivos y ganadería, aldea Metalkunta	68
26. Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, pequeña finca mixta de cultivos y ganadería, aldea Metalkunta	69

27. Carbono total del suelo en una finca pequeña, aldea Malligere, Distrito Tumkur	69
28. Escenarios para modelar practicas de manejo de la tierra en una finca pequeña, aldea Malligere	69
29. Carbono total del suelo en el asentamiento de Darjani	72
30. Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, asentamiento Darjani	72
31. Carbono total del suelo en la aldea de Kaiani	74
32. Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, aldea Kaiani	74
33. Carbono total del suelo en la aldea Kymausoi	75
34. Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, asentamiento Kymausoi	76
35. Carbono total del suelo en el asentamiento Athi Kamunyuni	77
36. Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo en la aldea Athi Kamunyuni	77
37. Carbono total del suelo en Monte Redondo	80
38. Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, Monte Redondo	80
39. Carbono total del suelo en Santa María	82
40. Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, Santa María	82
41. Carbono total del suelo en parcelas con y sin rotación modelados con CENTURY y RothC	83
42. Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, Santa Maria	83
43. Efectos de las prácticas de manejo o uso de la tierra sobre el potencial de secuestro de carbono en la Cuenca «Old Peanut», Senegal	86
44. Beneficios económicos esperados a partir del comercio de carbono	90
45. Ganancia económica anual derivada de la adopción de cambios en el manejo de la tierra para producir mijo, con respecto a diferentes niveles de precios de carbono	91
46. Datos de suelo medidos para los lugares experimentales en el estudio de caso de Sudán	96
47. Consumo promedio de leña como combustible en propiedades de un proyecto piloto en Sudán, antes y después de utilizar las hornallas mejoradas	101
48. Posibles fuentes de financiamiento para la aplicación de programas multifocales de secuestro del carbono en tierras áridas	107

Prefacio

Entre los principales desafíos del siglo XXI se encuentran el incremento de la población mundial, la degradación de los suelos agrícolas y la liberación de gases que producen el efecto invernadero en la atmósfera y contribuyen al cambio climático. Estos tres importantes elementos están estrechamente vinculados, puesto que las opciones de manejo y uso de la tierra que previenen la degradación del suelo también disminuyen la emisión de gases de invernadero, promueven el secuestro del carbono y mejoran la seguridad alimentaria. A pesar de que la creciente población mundial conduce a una mayor demanda de alimentos, la tierra agrícola *per capita* disminuye, particularmente en Asia, África y América del Sur que son regiones con la expansión demográfica más alta. Las actividades humanas, como el consumo de combustibles y los cambios de uso de la tierra son las causas principales del incremento de la concentración atmosférica de dióxido de carbono, el cual se reconoce generalmente como un factor de cambio climático y calentamiento global.

La FAO ha ejecutado varios programas para ayudar a los países en desarrollo en la adopción de prácticas de manejo de la tierra que reviertan su degradación actual, la desertificación y corrijan su uso inadecuado. En general, estos programas promueven prácticas de manejo de la tierra que suministren beneficios económicos y ambientales a los productores, teniendo en cuenta diferentes aspectos de tipo económico, social y ambiental.

Como parte de las actividades sobre el secuestro de carbono en el suelo en el marco del programa de ordenación integrada de tierras, el Servicio de Manejo de las Tierras y de la Nutrición de las Plantas de la FAO, Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, a principios del 2002 inició un proyecto de un año de duración. Su objetivo fue coleccionar, evaluar y elaborar sobre la situación actual respecto al empleo de la captura de carbono para mejorar el manejo y uso de la tierra en las regiones áridas del mundo. Este programa está estrechamente vinculado al proyecto FAO, «Evaluación de la Degradación de Tierras en Zonas Áridas» (LADA), dirigido a desarrollar y evaluar una metodología efectiva para evaluar la degradación de los suelos en las tierras áridas. El programa también está vinculado con la Convención de Lucha contra la Desertificación (CCD) y el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), cuyo objetivo final es proporcionar información actualizada para la formulación de opciones políticas y técnicas que fomenten el desarrollo de sistemas sostenibles en las tierras áridas. A la vez que incrementan el secuestro de carbono, los sistemas sostenibles de uso de la tierra pueden mejorar la subsistencia de los campesinos a través de la conservación, mejoramiento y protección de la agrobiodiversidad.

En el marco político e internacional actual, la ejecución de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el acuerdo del Protocolo de Kyoto ha creado nuevas posibilidades para implementar iniciativas específicas y proyectos que estimulen el secuestro de carbono. Por ejemplo, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) permite a los países desarrollados comprar créditos de carbono de los países en desarrollo, estableciendo proyectos específicos que mejoren el secuestro de carbono en estas áreas. Sin embargo, este mecanismo tiene poca probabilidad de aplicación en tierras áridas, por lo que se necesita explorar y desarrollar otros enfoques multilaterales donde se fortalezca el sinergismo entre las diferentes convenciones y fondos. Puesto que el secuestro de carbono puede no ser una prioridad en los países de menores recursos, las opciones de manejo de la tierra que incrementan el secuestro de carbono también pueden ser beneficiosas para la producción agrícola, la prevención de

la erosión y la desertificación, así como para la conservación de la biodiversidad, que constituyen aspectos de gran interés en estas regiones. Por tanto, las acciones para el mejoramiento del suelo a través del secuestro de carbono crean una solución en la que todos salgan ganando, donde los incrementos en la productividad agronómica pueden ayudar a mitigar el calentamiento global, al menos en las próximas décadas, hasta que se desarrollen otras fuentes de energía alternativa. En los últimos años ha habido avances importantes desde el punto de vista político, científico y de sensibilización pública y se están ejecutando numerosos proyectos.

Este informe está dirigido a revisar y resumir la información existente sobre el secuestro de carbono, con el fin de analizar como los recursos disponibles y los programas específicos se pueden implementar en las tierras áridas que constituyen las regiones con mayor degradación del suelo en el mundo. Otras publicaciones de la FAO generadas a través de este programa han considerado otros aspectos del secuestro de carbono; aspectos metodológicos relacionados con la supervisión y cuantificación del carbono, opciones de secuestro de carbono para manejar la degradación de la tierra bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio, aspectos generales del secuestro de carbono y proyectos específicos de secuestro de carbono. Por medio de este análisis, el documento busca remarcar los problemas e incertidumbres actuales y generar recomendaciones para el desarrollo de estrategias específicas y políticas que puedan implementarse en las tierras áridas para mejorar el manejo de la tierra, que a su vez mejora el secuestro de carbono.

Resumen

Como en muchas otras organizaciones internacionales, gobiernos y organismos intergubernamentales, los aspectos del cambio climático son de gran prioridad en la agenda de la FAO. La FAO es un socio activo en las convenciones internacionales sobre cambio climático, con lo cual el mandato de la FAO cubre la función de la agricultura en la mitigación del cambio climático.

La FAO se interesa por el efecto de la agricultura sobre el cambio climático, el impacto del cambio climático sobre la agricultura y por el papel que puede jugar la agricultura en la mitigación del cambio climático. Históricamente, el cambio en el uso de la tierra y el cultivo del suelo han sido una fuente importante de generación de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Se estima que estos son responsables de alrededor de un tercio de las emisiones. Sin embargo, las prácticas agrícolas mejoradas pueden ayudar a mitigar el cambio climático mediante la reducción de las emisiones por la agricultura y otras fuentes y por medio del almacenamiento del carbono en la biomasa de las plantas y los suelos. El trabajo de la FAO está dirigido a identificar, desarrollar y promover las prácticas culturales que reduzcan las emisiones agrícolas y retengan el carbono, a la vez que mejoran los medios de vida de los agricultores, especialmente en los países en desarrollo, en razón del incremento de la producción y los ingresos a partir de los créditos de carbono, sustentados como consecuencia de los mecanismos generados por el Protocolo de Kyoto.

Se han realizado pocos estudios sobre el potencial del secuestro de carbono bajo condiciones agrícolas locales en comunidades rurales de las tierras áridas de los países en desarrollo. Este informe está dirigido a llenar estas brechas del conocimiento. Evalúa opciones específicas para la aplicación de prácticas de manejo de la tierra analizando algunos estudios de caso llevados a cabo en distintas tierras secas del mundo. El objetivo final es facilitar la diseminación de dichas prácticas en programas de secuestro de carbono del suelo en ambientes agroecológicos similares de otros países, para mejorar la seguridad alimentaria y los medios de vida de la población rural.

Los estudios de caso que se presentan evalúan el efecto de diferentes prácticas de manejo sobre las reservas de carbono del suelo en varios ecosistemas áridos. El efecto del clima y/o el cambio en el uso de la tierra se pueden predecir solamente a través del empleo de modelos dinámicos precisos. Dada la dificultad para medir los cambios en las reservas de carbono del suelo, la modelación es un instrumento útil y ha sido empleado como metodología efectiva para analizar y predecir el efecto de las prácticas de manejo de la tierra sobre dichas reservas. Un conjunto de modelos de proceso fue desarrollado en las últimas dos décadas. El modelo CENTURY 4.0 se empleó para estos estudios de caso. Se utilizaron datos obtenidos a partir de investigaciones realizadas en sistemas áridos notoriamente diferentes en Argentina, India, Kenya, Nigeria, Senegal y Sudán; estas investigaciones fueron realizadas por la Universidad de Essex (Reino Unido) y la Universidad de Lund (Suecia).

Algunos de los resultados predicen que el carbono del suelo puede restaurarse a los niveles anteriores a la siembra y en algunas circunstancias por encima de estos. El verdadero «nivel original del carbono del suelo» con frecuencia es difícil de establecer en los sistemas donde la actividad agrícola ha estado presente por siglos o milenios, como en el caso de Kenya y Nigeria. Alcanzar cantidades de carbono del suelo superiores al nivel natural, implica que el sistema agrícola tiene una productividad mayor que el sistema original, asumiendo que el carbono no esté siendo incorporado por otras vías. Los escenarios que predicen las tasas más altas de secuestro de carbono, con frecuencia están asociados con la introducción de árboles. Las aportaciones de carbono de los árboles son

más resistentes a la descomposición que las de los cultivos herbáceos y en consecuencia pueden causar incrementos marcados en el nivel de carbono del suelo. Las tasas anuales más altas de secuestro (0,1-0,25 toneladas/ha) tienen lugar donde los sistemas de labranza cero también incluyen el cultivo de abonos verdes y adiciones de abonos de corral. El uso exclusivo de fertilizantes inorgánicos fue generalmente ineficiente en el suministro de los nutrientes necesarios para incrementar el secuestro de carbono pero su efecto sobre la captura de carbono mejora considerablemente incluyendo cultivos de cobertura en el ciclo de rotación.

Los cultivos de cobertura mejoran la diversidad biológica del suelo la cual, a su vez, incrementa el secuestro de carbono. Los resultados de los estudios de caso corroboran las tasas de secuestro de carbono obtenidas bajo varios regímenes de manejo de suelo en tierras áridas según se informa en varias fuentes bibliográficas.

Existen vastas áreas de ecosistemas de tierras áridas en el mundo, muchas en países en desarrollo, donde las mejoras en los sistemas agrícolas incrementan las reservas de carbono en los suelos, tal como se muestra en los estudios de caso que se presentan aquí.

A pesar de que el secuestro de carbono no es un tema prioritario en los países de menores recursos, las opciones de manejo de suelos que incrementan el secuestro de carbono, mejoran la producción agrícola y previenen la erosión y desertificación que son elementos de interés primordial en estas regiones.

Las inversiones en el secuestro de carbono en las tierras áridas, como áreas menos favorecidas, son necesarias debido a que en estas regiones residen un gran número de personas de escasos recursos y porque constituyen recursos ambientales globalmente importantes que se encuentran en riesgo de degradación o agotamiento.

Las inversiones en el mejor manejo de la tierra que conducen a un incremento de la fertilidad del suelo y al secuestro de carbono pueden justificarse también en muchos casos porque ofrecen una solución en la que todos salen ganando con una mayor productividad agronómica y contribuyen al crecimiento económico, seguridad alimentaria y conservación de la biodiversidad.

El mejoramiento del secuestro de carbono en tierras áridas degradadas podría tener beneficios ambientales, económicos y sociales directos para las personas que habitan en estas áreas. Esto incrementaría los beneficios de los agricultores y ayudaría a mitigar el calentamiento global, al menos en las décadas siguientes hasta que se desarrollen otras fuentes de energía alternativa. Por lo tanto, las iniciativas que secuestran el carbono están entre las prioridades principales de la FAO.

A pesar de que un enfoque limitado al mercado del carbono es poco probable que se pueda aplicar en sistemas de cultivo en pequeña escala en los países en desarrollo, se requiere un enfoque multilateral para movilizar los recursos a través de los mecanismos existentes. El Mecanismo Global de la Convención de Lucha contra la Desertificación (CCD) de las Naciones Unidas promueve tal vía multilateral para incrementar la efectividad y eficiencia de los recursos financieros y para explorar mecanismos nuevos y adicionales para la implementación de la Convención. Se le da un énfasis específico a los sistemas de cultivo en pequeña escala en las regiones de tierras áridas de los países en desarrollo. Los enfoques multilaterales incluyen fuentes para combatir el cambio climático con fondos disponibles para mitigar la desertificación, vínculos con modos de vida sostenibles, y la provisión de beneficios visibles para las personas que habitan en esas áreas, movilizando recursos del sector privado también. Varias convenciones de las Naciones Unidas (CCD, CMNUCC, CDB) y el Protocolo de Kyoto comparten un objetivo común: el manejo adecuado de los suelos para incrementar su contenido de carbono. Existen oportunidades para crear asociaciones bilaterales con instituciones industriales del país para iniciar proyectos de secuestro de carbono en el suelo, los cuales involucran comunidades que también están vinculadas con redes globales de secuestro de carbono. La FAO considera que se debe poner más énfasis en la exploración y explotación de estas oportunidades.

Lista de siglas y símbolos

ABIC	Análisis Biogeoquímico del Balance de Carbono
CC	Captura de Carbono
CCD	Convención de Lucha contra la Desertificación
CDB	Convenio sobre la Diversidad Biológica
CDP	Conferencia de las Partes
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COS	Carbono Orgánico del Suelo
CSE	Criterios de sostenibilidad y equidad
EPSC	Economía de una Propiedad para el Secuestro del Carbono
FCDC	Fondo de Carbono para el Desarrollo Comunitario
FMAM	Fondo para el Medio Ambiente Mundial
GEI	Gas de Efecto Invernadero
ICC	Instrumento para la Cuantificación del Carbono
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MG	Mecanismo Global
MOS	Materia Orgánica del Suelo
MPROICS	Manejo de Proyecto para Incrementar el Carbono del Suelo
OMAS	Opciones de Manejo de los Agricultores para el Secuestro (de Carbono)
ONG	Organización No Gubernamental
P	Precipitación
PCF	Fondo Prototipo de Carbono
PK	Protocolo de Kyoto
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PO	Programa Operacional
PPB	Productividad Primaria Bruta
UTS	Uso de la Tierra, el Cambio del Uso de la Tierra y la Silvicultura
ZCA	Zona Cerrada al Asentamiento
C	Carbono
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
N	Nitrógeno
N ₂ O	Óxido nitroso

Agradecimientos

Este informe es el resultado de la colaboración entre la Dirección de Tierras y Aguas, la Universidad de Essex (Reino Unido) y la Universidad de Lund (Suecia). Se basa en estudios de caso desarrollados por P. Farage, J. Pretty y A. Ball de la Universidad de Essex, L. Olson de la Universidad de Lund y P. Tschakert de la Universidad de Arizona (Estados Unidos de América) en colaboración con A. Warren de la Universidad de Londres (Reino Unido). La información para los estudios de caso de Kenya y Nigeria fue suministrada por M. Mortimore y M. Tiffen, Investigación de Tierras Áridas, Crewkerne, (Reino Unido); el estudio de caso de la India utilizó datos colectados por B. Adolph y J. Butterworth del Instituto de Recursos Naturales, Chatham (Reino Unido), en asociación con la Sociedad Deccan para el Desarrollo, Hyderabad y Pastapur (India) y el Instituto de Desarrollo Rural BAIF, en Tiptur y Lakhalli (India). Los detalles sobre los sistemas argentinos fueron suministrados por E. Rienzi de la Universidad de Buenos Aires (Argentina). El estudio de caso de Senegal está basado en el trabajo de P. Tschakert.

A. Rey de la Universidad de Edimburgo (Reino Unido), quien trabajó en la Dirección de Tierras y Aguas (NRL) como científica visitante dentro del marco del programa de intercambio académico, ayudó en la compilación de este informe bajo la dirección de P. Koohafkan y J. Antoine del Servicio de Tenencia de la Tierra (NRLA) de la FAO.

El informe ha recibido contribuciones del Grupo Interdepartamental de Trabajo sobre el Cambio Climático. Fue revisado y editado por R. Dudal y J. Plummer. Los autores también agradecen a Eliazar Blanco por la excelente traducción a Lynette Chalk por la formatación del documento.

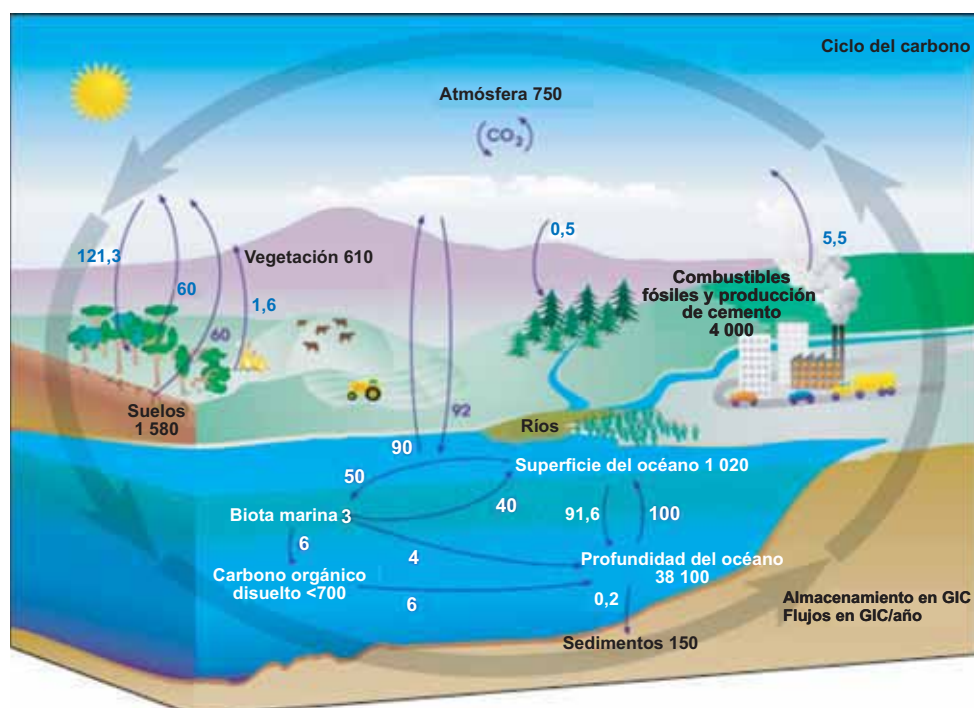
Capítulo 1

Introducción

CAMBIO CLIMÁTICO

La concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera se incrementó de 285 ppm al final del siglo XIX, antes de la revolución industrial, a alrededor de 366 ppm en 1998 (equivalente a un 28 por ciento de incremento) como consecuencia de las emisiones antropogénicas de alrededor de 405 ± 60 gigatoneladas de carbono (C) hacia la atmósfera (IPCC, 2001). Este incremento fue el resultado de la combustión de combustible fósil y la producción de cemento (67 por ciento) y el cambio en el uso de la tierra (33 por ciento). Actuando como sumideros de carbono, los ecosistemas marinos y terrestres han absorbido el 60 por ciento de estas emisiones, mientras que el 40 por ciento restante ha dado como resultado el incremento observado en la concentración atmosférica de CO_2 . La Figura 1 muestra las diferentes fuentes y flujos de carbono del balance global de este elemento. El incremento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera se reconoce ahora como un factor que contribuye al cambio climático (IPCC, 2001). Aunque aún existe incertidumbre con relación a las causas, consecuencias y magnitud del cambio climático, se cree que las actividades humanas están causando un serio impacto sobre el balance de energía de la tierra. Su influencia sobre el clima es de gran importancia desde el siglo XX. Esta importancia condujo en 1997 a un acuerdo internacional en Kyoto (el Protocolo de Kyoto), a través del cual la mayoría de los países fueron convocados a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera. En este contexto se han desarrollado nuevas estrategias y políticas en el

FIGURA 1
Principales depósitos y flujos del balance global del carbono



marco internacional para la implementación de prácticas de manejo de la agricultura y la silvicultura que mejoren la retención del carbono, tanto en la biomasa como en los suelos. Estas actividades se concluyen en los Artículos 3.3 y 3.4 del Protocolo de Kyoto y se conocen como «uso de la tierra, del cambio en el uso de la tierra y la silvicultura» (UTS) (IPCC, 2000).

La importancia de estas actividades es que cualquier acción tomada para secuestrar el C en la biomasa y los suelos, generalmente incrementaría el contenido de materia orgánica de estos últimos, lo cual en cambio tendría un impacto positivo sobre el medio ambiente, la agricultura y la biodiversidad de los ecosistemas. Las consecuencias de un incremento en el almacenamiento de carbono en el suelo pueden incluir incrementos en la fertilidad, productividad de la tierra para la obtención y seguridad de alimentos, así como prevención de la degradación del suelo. Por tanto, estas podrían constituir situaciones en las que todos salen ganando.

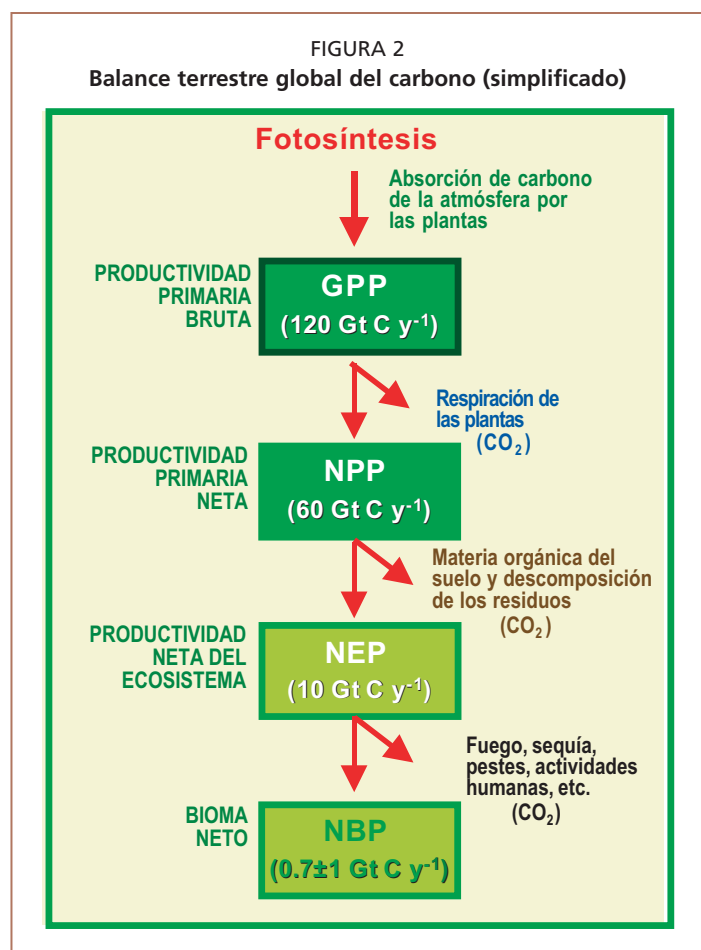
Un análisis adecuado del impacto del cambio climático debe considerar además otros aspectos globales, tales como la pérdida de biodiversidad, cambios en el uso de la tierra, la creciente demanda de alimentos y la degradación del suelo. Existen convenciones internacionales de las Naciones Unidas con relación a estos problemas: el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), la Convención de Lucha contra la Desertificación (CCD), la Convención Ramsar de Tierras Húmedas; también existen varios programas relacionados de las Naciones Unidas, p. ej. el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Otras iniciativas, como la Evaluación de Ecosistemas del Milenio, financiada internacionalmente por el Banco Mundial, el Fondo para el Medio

Ambiente Mundial (FMAM) y otras tienen el objetivo de determinar el estado de los ecosistemas de la tierra, tratando de tomar en consideración todos los problemas globales y las interacciones entre ellos.

EL CICLO TERRESTRE DEL CARBONO

Para entender el concepto de secuestro de carbono, la Figura 2 muestra un diagrama simplificado del balance de carbono en los ecosistemas terrestres. La entrada principal del C en la biosfera es a través del proceso de fotosíntesis o productividad neta primaria (PNP), o sea es la absorción de C de la atmósfera por las plantas. Parte de este C se pierde en varios procesos: a través de la respiración de las plantas (respiración autotrófica); como resultado de la descomposición de los desechos y la materia orgánica del suelo (respiración heterotrófica) y como consecuencia de pérdidas adicionales causadas por fuegos, sequía, actividades humanas, etc.

Actualmente, la biosfera constituye un sumidero de carbono que absorbe alrededor de 2,3 gigatoneladas de C



Fuente: adaptado de IPCC (2000).

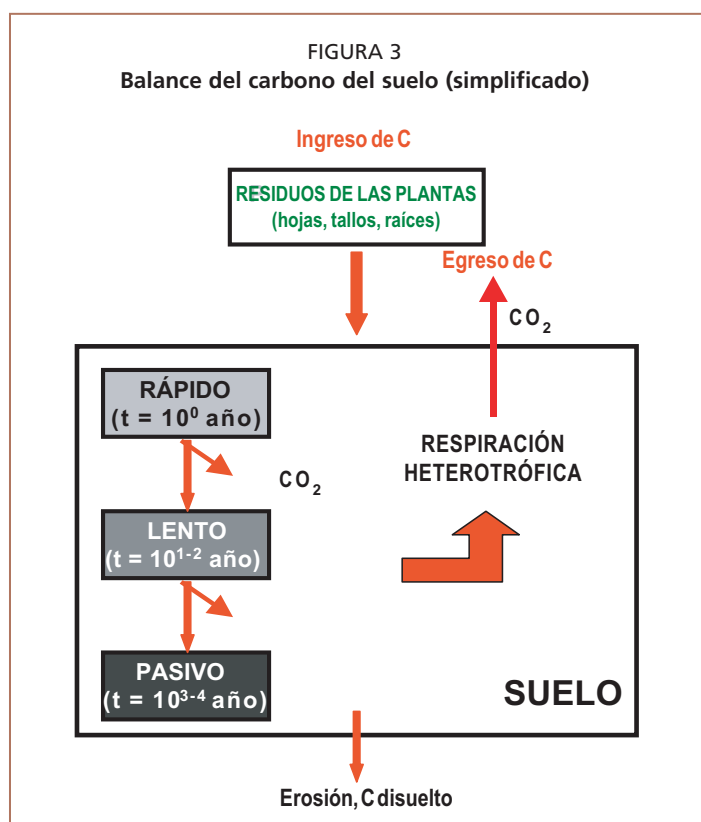
por año, lo cual representa alrededor del 30 por ciento de las emisiones de combustible fósil. El incremento de la concentración atmosférica de CO₂ estimula el proceso de fotosíntesis (actualmente limitada en sustrato) y consecuentemente el crecimiento de las plantas, como lo ha demostrado la investigación experimental (IPCC, 2000). El grado de esta estimulación varía de acuerdo con diferentes estimaciones, siendo mayor para los bosques (hasta 60 por ciento) y menor para los pastos y cultivos (alrededor del 14 por ciento). La evidencia científica actual sugiere que los bosques más antiguos actúan como sumideros de carbono activo, secuestrando el C a tasas de hasta 6 toneladas/ha/año (para bosques boreales o templados) (Valentín, Matteucci y Dolman, 2000).

Sin embargo, los bosques y ecosistemas en general pueden tener una capacidad limitada para acumular C. En primer lugar, debido a que la capacidad para secuestrar C está limitada por otros factores, tales como la disponibilidad de nutrientes (Oren, Ellsworth y Johnsen, 2001) y otros factores biofísicos. Segundo, la fotosíntesis puede tener un punto de saturación de CO₂, por encima del cual ésta no respondería a la concentración atmosférica de CO₂. Una tercera razón es que el cambio climático puede conducir a una degradación del ecosistema, limitando en cambio la capacidad de secuestrar el C. Aunque recientemente se ha logrado un gran progreso científico, estos procesos aún son escasamente entendidos. Por lo tanto, las predicciones de más de unas pocas décadas aún resultan altamente inciertas. Además, los bosques en ausencia de elementos perturbadores se espera que asimilen C durante 20-50 años después de su establecimiento y, por lo tanto, deberían considerarse como una opción temporal hasta que se desarrollen otras tecnologías para reducir las emisiones.

Muchos aspectos científicos relacionados con el ciclo global del carbono permanecen sin resolverse o son inciertos, tales como la contribuciones de los océanos al balance global de carbono (Del Giorgio y Duarte, 2002), la contribución de los ríos (Richey *et al.*, 2002), y la interacción con otros ciclos bioquímicos (Schimel, 1998). El cambio de la biosfera terrestre de su función actual como sumidero de carbono a fuente de carbono es altamente controversial, puesto que se basa en la sensibilidad a largo plazo de la respiración de los microbios del suelo al calentamiento global. Las predicciones a largo plazo empleando modelos bioclimáticos producen diferentes resultados en dependencia de la función de sensibilidad a la temperatura utilizada para la respiración heterotrófica. Una de estas simulaciones indicó que la capacidad de absorción de carbono de la biosfera estaba alcanzando su límite y que los bosques se convertirían en fuentes después de 50-150 años (Cox *et al.*, 2000). Otros hallazgos sugieren que, en base a los experimentos de calentamiento del suelo a largo plazo en la zona boreal, la respiración heterotrófica no es muy sensible a incrementos de la temperatura y que, por lo tanto, el futuro de los sumideros de carbono podría mantenerse (Falkowski, Acholes y Boyle, 2000). El calentamiento global podría conducir a un incremento de la respiración heterotrófica y a la descomposición de la materia orgánica y consecuentemente a un declive en la capacidad de los sumideros de los ecosistemas terrestres (Schimel, House y Hibbard, 2001). Se necesita investigar más antes de que se pueda llegar a alguna conclusión legítima. Aunque las estrategias para secuestrar el C podrían acogerse favorablemente, el uso de opciones de secuestro de carbono no debería desviarse del objetivo de reducir la dependencia que existe con respecto al combustible fósil, que en primera instancia constituye la causa principal del problema. El secuestro de carbono no debe verse como una vía para sustituir la necesidad y motivación de utilizar la energía de forma eficiente y de usar la energía renovable. En lugar de esto, el secuestro de carbono debe ser visto como algo positivo y además, como un proceso de transición hasta que se encuentren otras alternativas aceptables y compatibles con el medio ambiente.

LOS SUELOS Y EL SECUESTRO DE CARBONO

Los suelos son el mayor reservorio de carbono del ciclo terrestre de este elemento. La cantidad de C almacenada en los suelos es altamente significativa; los suelos contienen



alrededor de tres veces más C que la vegetación y dos veces más que el presente en la atmósfera (Batjes y Sombroek, 1997). Los suelos contienen mucho más C (1 500 Pg de C a 1 m de profundidad y 2 500 Pg de C a 2m; 1Pg = 1 gigatonelada) del que contiene la vegetación (650 Pg de C) y dos veces la cantidad que contiene la atmósfera (750 Pg de C) (Figura 1). El almacenamiento de carbono en los suelos es el balance entre la incorporación de material vegetal muerto (desecho de hojas y raíces) y las pérdidas de los procesos de descomposición y mineralización (respiración heterotrófica) (Figura 3). Bajo condiciones aeróbicas la mayor parte del C que se incorpora a los suelos es lábil y, por lo tanto, es devuelta a la atmósfera a través de los procesos conocidos como respiración del suelo o flujo de CO₂ (el resultado de la respiración de las raíces –la respiración autotrófica– y

la descomposición de la materia orgánica –respiración heterotrófica). Generalmente, solo el 1 por ciento de lo que ingresa al suelo (55 Pg/año) se acumula en fracciones más estables (0,4 Pg/año) con largo tiempo de residencia.

El proceso de secuestro o flujo de C en el suelo forma parte del balance global de carbono. Muchos de los factores que afectan el flujo de C dentro y fuera de los suelos son afectados por las prácticas de manejo que se implementan en ellos. Por lo tanto, las prácticas de manejo deben enfocarse en incrementar los ingresos y reducir las salidas de C en los suelos (Cuadro 1). El cambio en el contenido de carbono del suelo bajo diferentes prácticas de manejo se evidencia en los estudios de caso específicos que se muestran en el Capítulo 5.

El potencial a largo plazo del secuestro de carbono se determina no solamente mediante el incremento de los ingresos de C en el suelo, sino también mediante el tiempo medio de residencia en el depósito de carbono donde se encuentra almacenado.

CUADRO 1

Prácticas agrícolas para mejorar la productividad e incrementar la cantidad de carbono en los suelos

Prácticas tradicionales	Recomendadas
Cultivo con arado	Siembra directa o sin labranza
Eliminación de residuos o quema	Retorno de los residuos como cobertura
Barbecho de verano	Siembra de cultivo de cobertura
Pocos insumos no provenientes de la finca	Uso adecuado de fertilizantes y manejo integrado de nutrientes
Uso regular de fertilizantes	Manejo específico del suelo local
Falta de control de los recursos hídricos	Manejo/conservación de los recursos hídricos, irrigación, manejo de la capa freática
Cultivo cerco-a-cerco	Conversión de las tierras marginales en sitios de conservación natural
Monocultivo	Sistemas de cultivos mejorados con varias rotaciones de cultivos
Uso de la tierra a lo largo de las líneas de pobreza y fronteras políticas	Manejo integrado de las cuencas hidrogáficas
Drenaje de los humedales	Restauración de los humedales

Para el secuestro de carbono a largo plazo, el C tiene que ser liberado hacia grandes depósitos con tiempo de residencia media largo. La partición entre diferentes depósitos de carbono con diferente tiempo de residencia media es un controlador crítico del potencial de los ecosistemas terrestres para incrementar el almacenamiento de carbono a largo plazo. La asignación de C a depósitos con tiempo de residencia media corto, limita la cantidad de carbono almacenado a largo plazo, puesto que este es liberado rápidamente de vuelta a la atmósfera.

Un análisis adecuado del potencial de secuestro de carbono de una práctica de manejo debe considerar un balance total del carbono de la práctica si se va a emplear con el propósito de mitigación de este elemento. Otro problema es el costo de las prácticas agrícolas en términos de C. Las aplicaciones de fertilizantes, el riego y la aplicación de abonos, son todas prácticas que consumen C. Por tanto, una cuantificación total del carbono deberá tomar en cuenta todas las actividades asociadas con cada práctica en particular.

Además, otros gases de efecto invernadero, como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) son influenciados por el uso de la tierra. Aunque se emiten en cantidades pequeñas, tienen un potencial de invernadero mayor. Por lo tanto, deberán cuantificarse de manera explícita e incluirse en el balance total. Un kilogramo de CH_4 tiene un potencial de calentamiento mundial 23 veces mayor que un kilogramo de CO_2 , en un período de 100 años, mientras que el potencial de calentamiento mundial de un kilogramo de N_2O es casi 300 veces mayor (Ramaswamy, Boucher y Haigh, 2001). Alrededor de un tercio de las emisiones de CH_4 y dos tercios de las emisiones de N_2O a la atmósfera provienen de los suelos (Prather *et al.*, 1995) y están relacionadas con las prácticas agrícolas.

NECESIDAD DE MODELOS PARA SIMULAR CAMBIOS EN EL CARBONO DEL SUELO

La materia orgánica del suelo es un indicador clave de la calidad del suelo; económicamente ya que mejora la productividad de las plantas y desde el punto de vista ambiental a causa del secuestro de carbono y la biodiversidad. La materia orgánica del suelo es un factor determinante en la actividad biológica del suelo, la cual a su vez, tiene un impacto primordial sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos (Robert, 1996). El incremento de la materia orgánica del suelo puede mejorar la agregación y la estabilidad de la estructura del suelo; la tasa de infiltración y la retención del agua; y la resistencia a la erosión.

El carbono del suelo se controla primeramente mediante dos procesos: producción primaria (ingreso) y descomposición (egreso). Las mediciones del almacenamiento de C en un ecosistema por sí solas, revelan poco acerca de como el C ha cambiado en el pasado o como cambiará en el futuro. El efecto del clima y/o el uso de la tierra pueden predecirse solamente a través del uso de modelos dinámicos precisos. La modelación se ha empleado como una metodología efectiva para analizar y predecir el efecto de las prácticas de manejo de la tierra sobre los niveles de C del suelo.

En las últimas dos décadas se han desarrollado un gran número de modelos basados en procesos para completar las tareas específicas de investigación. Cada modelo varía en su ajuste para la aplicación a nuevos contextos. En este sentido, se han realizado un gran número de comparaciones entre modelos, en particular por Smith *et al.*, (1997). La Red Europea de Materia Orgánica del Suelo también provee una descripción detallada de los múltiples modelos disponibles actualmente. Han sido desarrollados varios modelos para simular la dinámica del C en los suelos. La materia orgánica del suelo es muy compleja, formada por varias sustancias heterogéneas y asociadas generalmente con los minerales presentes en los suelos. El tiempo de residencia media del C en los suelos, varía desde uno o varios años (fracción lábil) a décadas, e incluso hasta más de 1 000 años (fracción estable). El tiempo de residencia media se determina

no solo mediante la composición química de la materia orgánica del suelo, sino también mediante el tipo de protección o unión dentro del suelo. La fracción de carbono estable está protegida, ya sea físicamente o químicamente. La protección física consiste en el encapsulado de los fragmentos de materia orgánica del suelo mediante partículas de arcilla y microagregados (Balescent, Chenu y Baladene, 2000). La protección química se refiere a uniones químicas específicas entre la materia orgánica del suelo con otros constituyentes, tales como los coloides o arcillas. Diferentes factores influyen a los distintos depósitos. Dada la complejidad de la naturaleza de la materia orgánica del suelo, la mayoría de los modelos describen el carbono orgánico del suelo como dividido en múltiples compartimientos paralelos con diferentes tiempos de residencia media (Figura 3). Tales compartimientos son en principio conceptualmente simples y han sido ampliamente usados. Un buen ejemplo es el modelo de carbono orgánico del suelo de Rothamsted que tiene cinco compartimientos: material vegetal degradable, material vegetal resistente, biomasa microbiana, humus y materia orgánica del suelo (Jenkinson y Rayner, 1977; Jenkinson, 1990). Otro modelo popular es el modelo CENTURY (Parton *et al.*, 1987; Parton, Stewardt y Cole, 1988), el cual tiene también compartimientos de carbono con parámetros similares. Aunque simples conceptualmente, el problema de estos modelos es que requieren información sobre el tamaño y la tasa de producción de cada compartimiento, lo que resulta difícil de obtener a partir de estudios de campo. Sin embargo, han brindado información útil sobre el efecto de la temperatura, la humedad y la textura del suelo sobre las producciones de C en el suelo. La FAO ha desarrollado un modelo como base metodológica para la evaluación de las cantidades de carbono y la predicción de los escenarios de captura de carbono que vinculan los modelos de simulación de producción de carbono orgánico del suelo (particularmente el CENTURY y el Rothamsted) a sistemas de información geográfica y procedimientos de medición en campo (FAO, 1999). No obstante, el potencial real de secuestro de carbono del suelo no se conoce, debido a la carencia de una base de datos confiable y a una escasa comprensión de la dinámica del carbono orgánico del suelo a escala molecular, local, regional y global (Metting; Smith y Amthor, 1999). La falta de evidencia científica segura y la dificultad para realizar la cuantificación del carbono evitó probablemente la inclusión explícita de los suelos en el Protocolo de Kyoto.

Se ha especulado que el manejo mejorado de la tierra en los próximos 50-100 años podría fijar hasta 150 Pg de C, equivalente a la cantidad liberada hacia la atmósfera desde mediados del siglo XIX como resultado de la conversión de la agricultura de pastizales, humedales y bosques (Houghton 1995; Lal *et al.*, 1998). Si esta cifra fuera real, sería un «ahorro de tiempo» para el desarrollo e implementación de una solución a largo plazo para el problema del CO₂. La evidencia que existe con relación a los experimentos a largo plazo revela que las pérdidas del C del suelo, como resultado de la oxidación y la erosión, pueden revertirse a través del manejo mejorado del suelo, tales labranza mínima y fertilización reducida (Rasmussen, Albrecht y Smiley, 1998; Sa *et al.*, 2001). Por tanto, las prácticas mejoradas de manejo de la tierra para incrementar la captura de carbono en los suelos, se han propuesto como una forma viable para reducir significativamente el contenido de C (Cole *et al.*, 1996; Rosenberg, Izaurrealde y Malone, 1999).

DEGRADACIÓN DEL SUELO

La degradación del suelo es un problema global (UNEP, 1992), especialmente la desertificación de las tierras áridas. La mayor parte de las tierras áridas se encuentran sobre suelos degradados (Capítulo 2) que han perdido cantidades significativas de C. Por lo tanto, el potencial para secuestrar el C a través de la rehabilitación de las tierras áridas es sustancial (FAO, 2001b). Lal (2000) estimó la magnitud del potencial para secuestrar el C de suelos en ecosistemas terrestres con 50-75 por ciento de pérdidas de carbono histórico. Además, Lal propuso la hipótesis de que el incremento anual

en la concentración atmosférica de CO₂ podría equilibrarse mediante la restauración de 2 000 000 000 ha de tierras degradadas, para incrementar su contenido de carbono promedio mediante 15 toneladas/ha en los suelos y la vegetación. Los beneficios serían enormes. Mejorar el secuestro de carbono en las tierras agrícolas degradadas podría tener beneficios ambientales, económicos y sociales para sus habitantes. Por lo tanto, las iniciativas para secuestrar el C son bien recibidas en el mejoramiento en los suelos degradados, la productividad de las plantas y la consecuente seguridad alimentaria y mitigación de la pobreza en las regiones áridas.

Los efectos de la degradación del suelo y la desertificación afectan el ciclo global del C. El cambio en el uso de la tierra conduce a la pérdida de la cubierta vegetal y la pérdida subsecuentemente del C en los suelos, así como de la calidad de los mismos. Los procesos de productividad de las plantas, degradación del suelo y secuestro de carbono están estrechamente vinculados. Una disminución en la calidad del suelo conduce a la reducción en la reserva de C orgánico del suelo y a un incremento en la emisión de CO₂ hacia la atmósfera. La disminución de la calidad del suelo y su estructura conduce además a la pérdida en la capacidad de retención del agua y, por lo tanto, de la productividad de las plantas.

Las tierras áridas tienen características particulares que afectan su capacidad para fijar el C. El Capítulo 2 muestra las características principales y la distribución de las tierras áridas en el mundo. Los Capítulos 3 y 4 describen los sistemas agrícolas y los aspectos biofísicos de la captura de carbono en las tierras áridas. El Capítulo 5 resume varios estudios de caso en países donde se han ejecutado diferentes simulaciones para estimular el cambio en el C del suelo bajo diferentes opciones de manejo. El Capítulo 6 analiza los fondos existentes para proyectos de captura de carbono. Las conclusiones se presentan en el Capítulo 7.

Capítulo 2

Las tierras áridas del mundo

DEFINICIÓN DE TIERRAS ÁRIDAS

Según las definiciones, alrededor del 47 por ciento de la superficie de la tierra puede catalogarse como tierras áridas (UNEP, 1992). Aunque no existen límites claros, las tierras áridas se consideran como aquellas áreas donde el promedio de lluvias es menor que las pérdidas potenciales de humedad a través de la evaporación y la transpiración. De acuerdo con el Atlas Mundial de Desertificación (UNEP, 1992), las tierras áridas tienen una relación de precipitación anual promedio (P) respecto a la evapotranspiración potencial (ETP) menor de 0,65.

En las zonas en que prevalece el déficit de agua a lo largo de todo el año, las tierras áridas se clasifican como extremadamente áridas o hiperáridas, mientras que cuando ocurre durante la mayoría del año se catalogan como regiones áridas, o, semiáridas. La aridez se evalúa sobre la base de las variables del clima (conocida como índice de aridez), o de acuerdo con la FAO, sobre la base de cuantos días el balance de agua permite el crecimiento de las plantas (estación de crecimiento). El índice de aridez utiliza la relación P/ETP para clasificar las tierras áridas en hiperáridas, áridas, semiáridas y secas subhúmedas (Cuadro 2).

El balance negativo entre la precipitación y la evapotranspiración da como resultado un período corto de crecimiento de los cultivos (usualmente, menos de 120 días). Para los propósitos del secuestro de carbono, las tierras áridas también incluyen áreas áridas, semiáridas y áreas secas subhúmedas. Las regiones hiperáridas no se consideran, puesto que en ellas no son posibles los cultivos, salvo cuando se aplica riego.

Las sequías son características de las tierras áridas y pueden definirse como períodos (1-2 años) en los que las lluvias se encuentran por debajo del promedio. Las sequías que persisten durante una década o más se conocen como desecación, las cuales tienen consecuencias desastrosas sobre la productividad de las tierras y la pérdida de la vegetación. La preparación contra la sequía y la mitigación de sus riesgos son aspectos esenciales para un manejo adecuado de las tierras áridas. Las poblaciones que habitan en estas regiones han estado desarrollando estrategias para hacerle frente incluyendo: fortalecimiento de estrategias locales para enfrentar la sequía; mantener el desarrollo y adopción de prácticas de manejo de recursos que protejan y mejoren la productividad incrementando así la adaptabilidad de los sistemas agrícolas; reducir las fluctuaciones en los precios del ganado y los granos durante los períodos de sequía por medio de la expansión del mercado y la reducción de los costos de transacción; el desarrollo de un conjunto de indicadores de aviso y el acopio de reservas de pastoreo o de reservas estratégicas de agua (Øygaard, Vedeld y Aune, 1999).

CUADRO 2

Categorías de tierras áridas según la FAO (1993), clasificación y extensión (PNUMA, 1992)

Clasificación	P/ETP	Lluvia (mm)	Área (%)	Área (Bha)
Hiperáridas	< 0,05	< 200	7,50	1,00
Áridas	0,05 < P/ETP < 0,20	< 200 (invierno) o <400 (verano)	12,1	1,62
Semiáridas	0,20 < P/ETP < 0,50	200–500 (invierno) o 400–600 (verano)	17,7	2,37
Secas subhúmedas	0,50 < P/ETP < 0,65	500–700 (invierno) o 600–800 (verano)	9,90	1,32
Total			47,2	6,31

Bha = 10⁹ ha

DEGRADACIÓN DE LAS TIERRAS EN LAS REGIONES ÁRIDAS

La desertificación ocurre a partir de la degradación de los ecosistemas naturales en las tierras áridas y constituye un importante problema global (UNEP, 1992). La CCD lo define como «*Degradación de la tierra por su uso en regiones áridas, semiáridas y secas-húmedas que se origina a partir de varios factores que incluyen la variación climática y las actividades humanas*».

La degradación puede ser:

- física principalmente originada por factores climáticos, tales como las inundaciones y sequías que causan erosión del suelo (eólica e hídrica),
- química generalmente en forma de salinización (en tierras con riego),
- biológica principalmente como resultado de la oxidación de la materia orgánica de la capa superficial del suelo en las tierras áridas.

Las consecuencias principales de la degradación de la tierra son: degradación química del suelo, pérdida de la cubierta vegetativa, pérdida de la capacidad de infiltración de la capa superficial del suelo, reducción del almacenamiento de agua en el suelo, pérdida de materia orgánica del suelo, fertilidad y estructura, pérdida de la elasticidad del suelo, pérdida de la regeneración natural y disminución de la capa freática. La degradación afecta alrededor de un quinto de las zonas áridas, mayormente en los márgenes semiáridos de zonas de cultivo. La degradación de la tierra puede tener un impacto significativo sobre el clima. La pérdida de cubierta vegetal puede alterar el balance de energía superficial. El polvo proveniente de los desiertos modifica la dispersión y absorción de la radiación solar (Kassas, 1999). Aunque hay incertidumbre con relación a las causas del cambio climático y el calentamiento global y sus posibles consecuencias, existe consenso acerca de la probabilidad de ocurrencia de algunos impactos. Por ejemplo, los incrementos de la temperatura afectan la evapotranspiración, lo cual sería más significativo en lugares donde el clima es cálido. Las predicciones sobre la cantidad y los patrones de distribución de lluvia en estas regiones resultan inciertos, pero el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático indicó que las regiones semiáridas están entre las de mayor probabilidad de experimentar un incremento en el estrés del clima (IPCC, 1990). Además, el cambio climático puede tener consecuencias impredecibles y quizás extremas con respecto a la frecuencia e intensidad de la precipitación y la variabilidad de la temperatura en las regiones semiáridas.

El Cuadro 3 indica la extensión de tierras degradadas según la causa. Uno de los problemas para evaluar la magnitud de la desertificación y las medidas para prevenirla, es la falta de indicadores confiables que permitan determinar la calidad de la tierra y

CUADRO 3
Tierras degradadas por continente

Clasificación	África	Asia	Oceanía	Europa	América del Norte	América del Sur
	(millones de ha)					
Deforestación	18,60	115,5	4,20	38,90	4,30	32,20
Sobrepastoreo	184,60	118,8	78,50	41,30	27,70	26,20
Agrícultura	62,20	96,70	4,80	18,30	41,40	11,60
Sobreexplotación	54,00	42,30	2,00	2,00	6,10	9,10
Bioindustrial	0,00	1,00	0,00	0,90	0,00	0,00
Total degradada	319,40	370,30	87,50	99,40	79,50	79,10
Total	1 286,00	1 671,80	663,30	299,60	732,40	513,00

Fuente: UNEP (1997)

sean de fácil medición. El proyecto de la FAO sobre Evaluación de la Degradación de la Tierra se centra en el desarrollo de una metodología detallada para la evaluación de la degradación de la tierra en un área que cubre cerca de la mitad de la superficie terrestre (FAO, 2002a, 2003).

Existen varias estimaciones de la magnitud de la desertificación. Según la metodología para la Evaluación de la Degradación Inducida del Suelo y por los Efectos Humanos, el área afectada por la desertificación es de 1 140 000 000 ha, similar a las estimaciones del PNUMA (Cuadro 4).

De acuerdo con el PNUMA (1991a), cuando se incluyen las tierras de pastoreo con vegetación degradada (2 576 000 000 ha), el porcentaje de tierras degradadas de las tierras áridas es 69,5 por ciento (5 172 000 000 ha).

De acuerdo con Oldeman y Van Lynden (1998), las áreas degradadas en grado ligero, moderado y severo son 489 000 000, 509 000 000 y 139 000 000 ha, respectivamente.

Las estimaciones de las tasas actuales de desertificación varían de forma considerable, debido principalmente a la falta de criterios cuantitativos para la definición de degradación. El PNUMA (1991a) distinguió entre degradación de la tierra y degradación de la vegetación. La degradación de la vegetación en las tierras de pastoreo puede tener lugar con o sin degradación del suelo. El PNUMA (1991) estimó que la tasa anual de desertificación era de 5 800 000 ha o 0,13 por ciento de tierras áridas en las latitudes medias (Cuadro 5). Sin embargo, aunque la desertificación es un problema en las tierras áridas, estas tienen un alto grado de capacidad de recuperación a las intervenciones humanas. Las poblaciones de las tierras áridas han desarrollado prácticas bien adaptadas y eficientes para el manejo de recursos. Por lo tanto, la participación de las comunidades de las tierras áridas es fundamental para mejorar su manejo. Si se desea que las políticas y prácticas de los donantes tengan éxito, deben estar basadas en el conocimiento, experiencias, aspiraciones, prioridades y decisiones de las personas que habitan en las tierras áridas.

La desertificación puede prevenirse a través de un manejo adecuado de la tierra para asegurar el desarrollo sostenible de sus recursos. En 1994, las Naciones Unidas acordaron la formación de la CCD desarrollando planes de acción específicos para cada país. Las estrategias para el control de la desertificación incluyen: establecimiento y protección de la cubierta vegetal para proteger los suelos de la erosión, pastoreo controlado, mejor conservación del agua mediante el manejo de los residuos y la aplicación de cobertura para ayudar a disminuir las pérdidas por escorrentía y evaporación, riego suplementario, manejo de la fertilidad del suelo para mejorar la productividad de la biomasa, incremento de la eficiencia del uso del agua y mejora en la calidad del suelo, sistemas agrícolas mejorados que incluyen la rotación de cultivos, barbecho, agrosilvicultura y manejo del pastoreo (Lal, 2001b). Todas estas estrategias incrementan la captura de carbono en los suelos.

CUADRO 4
Estimación de desertificación de GLASOD (excluyendo las tierras hiperáridas)

Tipo de suelo	1. Área (Bha)	Tipo de degradación del suelo	2. Área (Bha)
Tierras degradadas con riego	0,043	Erosión hídrica	0,478
Tierras de cultivo de secano	0,216	Erosión eólica	0,513
Pastizales degradados	0,757	Degradación química	0,035
Área total de tierra	1,016	Área total de tierra	1,137

Bha = 10⁹ ha.

Fuentes: 1. UNEP (1991b). 2. Oldeman y Van Lynden (1998).

CUADRO 5
Tasas de degradación del suelo en tierras áridas de latitud media

Uso de la tierra	Tasa de desertificación		
	Área total de tierra	Mha/año	% del total/año
Tierra irrigada	131	0,125	0,095
Pastizales	3 700	3,200	0,086
Tierras de cultivos de secano	570	2,500	0,439
Total	4 401	5,825	0,132

Mha = 10⁶ ha.

Fuente: (UNEP, 1991a).

Dependiendo del uso de la tierra, la desertificación se manifiesta en diferentes formas:

Tierras agrícolas con riego: el riego excesivo y el drenaje ineficiente conducen al anegamiento y a la salinización

Tierras agrícolas de secano: erosión del suelo, pérdida de materia orgánica y nutrientes.

Pastizales: reducción de la productividad de las plantas, invasión de especies no palatables

La desertificación afecta a más de 100 países desarrollados y en desarrollo en todos los continentes (PNUMA, 1997). Se considera que alrededor de 200 millones de personas son afectadas directamente por la desertificación y más de 1 000 000 000 se encuentran en riesgo. La sostenibilidad futura de los ecosistemas de tierras áridas y los sustentos de las personas que habitan en ellas dependen directamente de las acciones que se tomen para el manejo del uso de la tierra. Estas actividades deben incluir la conservación del suelo y el agua para la aplicación de prácticas mejoradas de manejo de la tierra y los sistemas agrícolas, teniendo en cuenta la salud, así como el aspecto social y económico cuando se desarrollan estrategias y principios para mejorar el manejo de la tierra.

DISTRIBUCIÓN DE LAS TIERRAS ÁRIDAS

La gran parte de las zonas áridas del mundo se encuentran entre los 20° y 35° de latitud. Las principales áreas semiáridas se encuentran a cada lado de la zona árida e incluyen los climas de tipo mediterráneo y del tipo monzónico. Los climas mediterráneos se caracterizan por un invierno frío y húmedo y veranos secos y cálidos, mientras que los climas monzónicos tienen veranos muy cálidos y húmedos e inviernos cálidos y secos. Otro tipo de tierra árida es el desierto frío, que generalmente se presenta en áreas continentales a gran altura.

Las tierras áridas ocupan 47,2 por ciento de la superficie de tierra del mundo, o 6 310 000 000 ha en todos los continentes: África (2 000 000 000 ha), Asia (2 000 000 000 ha), Oceanía (680 000 000 ha), América del Norte (760 000 000), América del Sur (56 000 000 ha) y Europa (300 000 000 ha) (PNUMA, 1992) en más de 110 países (Figura 4). Alrededor de 2 000 000 000 de personas viven en tierras áridas (PNUMA, 1997), en muchos casos en condiciones pobres. Las zonas hiperáridas se extienden mayormente a lo largo de los desiertos del Sahara, de Arabia y de Gobi y solamente tienen poblaciones localizadas alrededor de los valles como el Valle y el Delta del Nilo. Las zonas áridas cubren alrededor del 15 por ciento de la superficie de tierra. La precipitación anual en estas áreas es de hasta 200 mm en las áreas de lluvia de invierno y 300 mm en las áreas de lluvia de verano. La variabilidad interanual es del 50-100 por ciento. África y Asia tienen la mayor extensión de las zonas áridas que suman en total casi cuatro quintos de las zonas áridas e hiperáridas en el mundo (Cuadro 6).

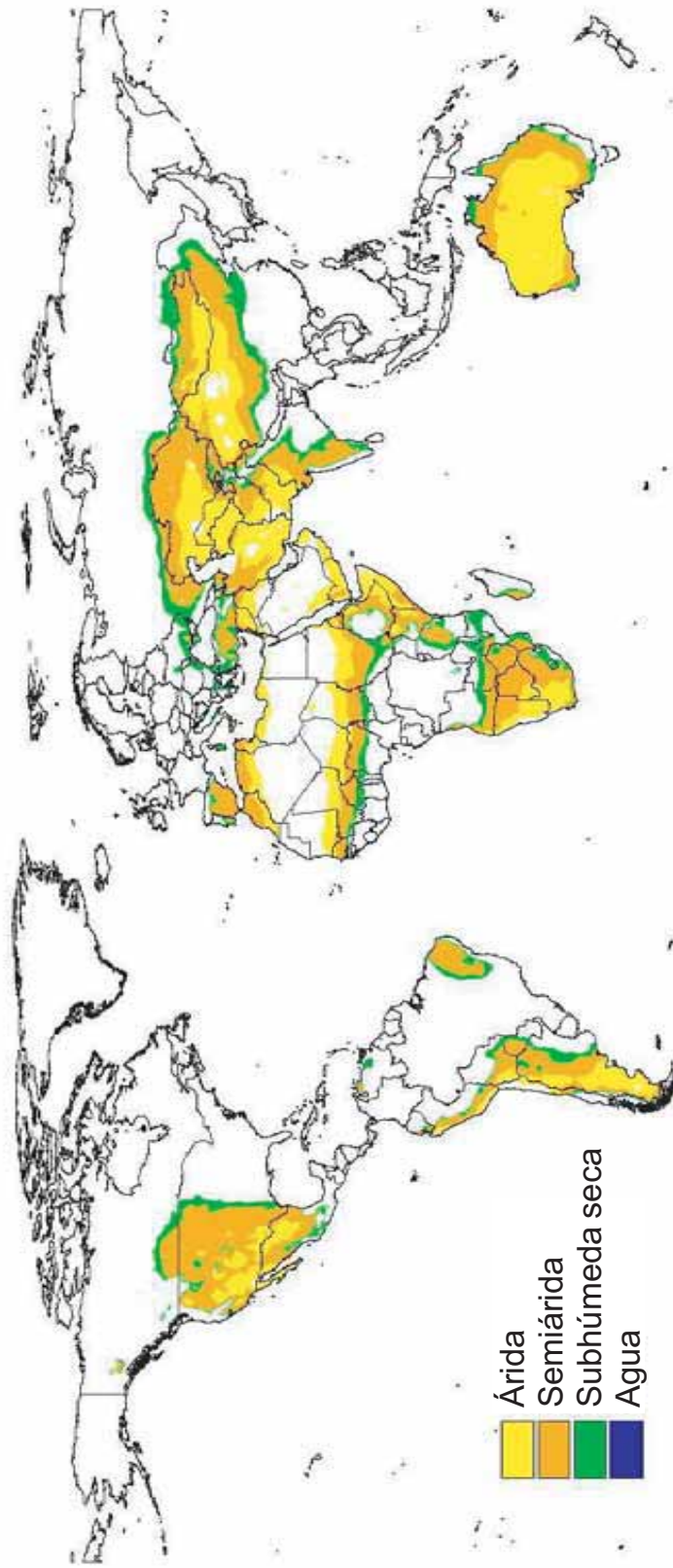
CUADRO 6
Área global de tierras áridas, por continente

Continente	Extensión			Porcentaje		
	Áridas	Semiáridas	Secas subhúmedas	Áridas	Semiáridas	Secas subhúmedas
(millones de ha)						
África	467,60	611,35	219,16	16,21	21,20	7,60
Asia	704,30	727,97	225,51	25,48	26,34	8,16
Oceanía	456,50	211,02	38,24	59,72	27,42	4,97
Europa	0,30	94,26	123,47	0,01	1,74	2,27
América Norte/Central	4,27	130,71	382,09	6,09	17,82	4,27
América del Sur	5,97	122,43	250,21	7,11	14,54	5,97
Total	1 641,95	1 897,74	1 238,68			

Mha = 10⁶ ha

Fuente: FAO (2002a).

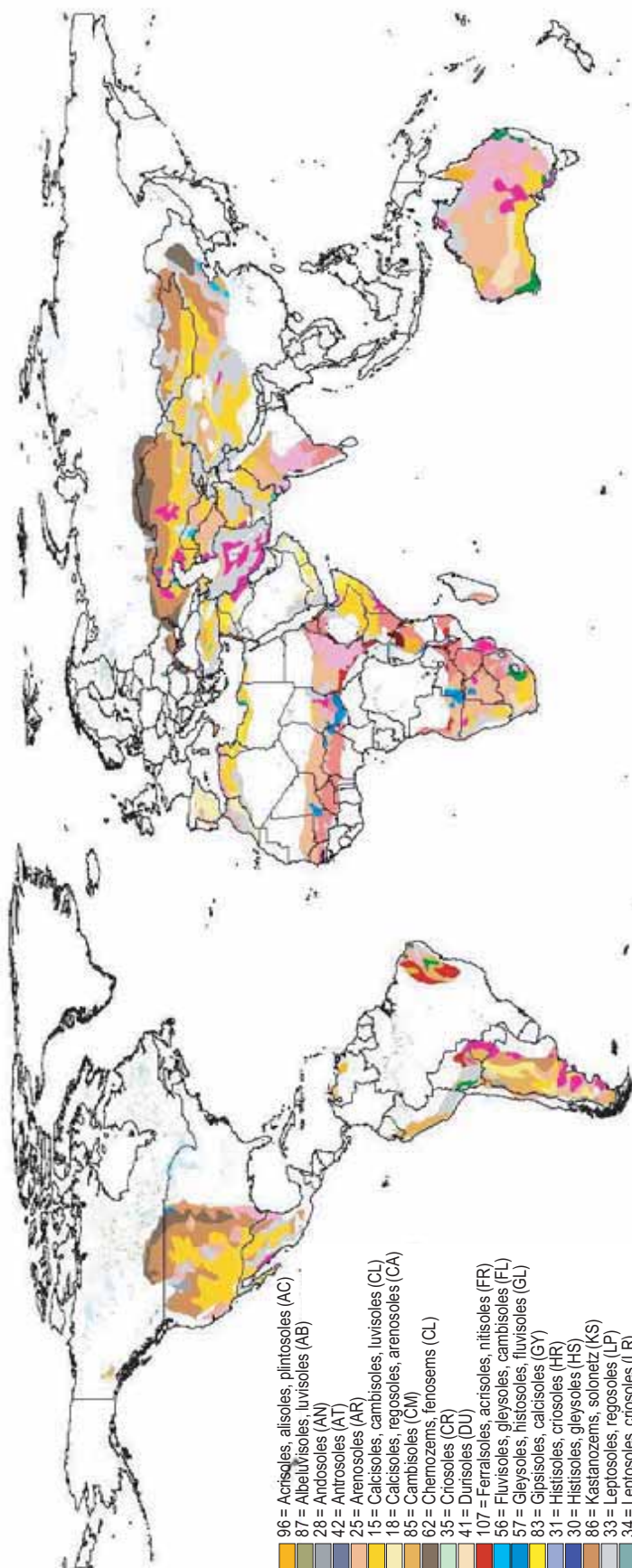
FIGURA 4
Distribución de las tierras áridas del mundo



Resolución de la rejilla 5x5 minutos
Proyección geográfica (lat/long)

Fuente: FAO (2002a).

FIGURA 5
Principales tipos de suelo en las tierras áridas



- 96 = Acrisoles, alisoles, plintisoles (AC)
- 87 = Albelúvisoles, luvisoles (AB)
- 28 = Andosoles (AN)
- 42 = Antrosoles (AT)
- 25 = Arenosoles (AR)
- 15 = Calcisoles, cambisoles, luvisoles (CL)
- 18 = Calcisoles, regosoles, arenosoles (CA)
- 85 = Cambisoles (CM)
- 62 = Chernozems, ferozems (CL)
- 35 = Criosoles (CR)
- 41 = Durisoles (DU)
- 107 = Ferralsoles, acrisoles, nitisoles (FR)
- 56 = Fluvisoles, gleysoles, cambisoles (FL)
- 57 = Gleysoles, histosoles, fluvisoles (GL)
- 83 = Gipsisoles, calcisoles (GY)
- 31 = Histisoles, criosoles (HR)
- 30 = Histisoles, gleysoles (HS)
- 86 = Kastanozems, solonetz (KS)
- 33 = Leptosoles, regosoles (LP)
- 34 = Leptosoles, criosoles (LR)
- 10 = Lixisoles (L)
- 98 = Luvisoles, cambisoles (LV)
- 110 = Nitisoles (NT)
- 40 = Ferozems (PH)
- 67 = Planosoles (PL)
- 70 = Plintisoles (PT)
- 95 = Podzoles, histosoles (PZ)
- 79 = Regosoles (RG)
- 125 = Solonchaks, solonetz (SC)
- 76 = Umbrisoles (UM)
- 128 = Vertisoles (VR)
- 52 = Glaciares (gl)
- 0 = Cuerpos de agua

Proyección geográfica (lat/long)

Fuente: Mapa Mundial de Recursos de Suelo. FAO/CI/ISRIC, 2003.

Las zonas semiáridas son más extensas, ocurren en todos los continentes y cubren hasta un 18 por ciento de la superficie de la tierra. Éstas tienen regímenes de lluvia altamente estacionales, una lluvia promedio de hasta 500 mm en las áreas con lluvias de invierno y de hasta 800 mm en las áreas con lluvias de verano. Con una variabilidad interanual del 25 al 50 por ciento, el pastoreo y el cultivo son vulnerables, y la distribución de la población depende principalmente en la disponibilidad de agua.

EL SUELO Y LA VEGETACIÓN EN LAS TIERRAS ÁRIDAS

Tal como se mencionó anteriormente, las tierras áridas se caracterizan por un estrés hídrico frecuente, un bajo contenido de materia orgánica y un bajo nivel nutritivo, particularmente de nitrógeno (Skujins, 1991). A pesar de que las tierras áridas varían considerablemente, están constituidas principalmente por Aridisoles (2 120 000 000 ha) y Entisoles (2 330 000 000 ha). Otros suelos incluyen: los Alfisoles (380 000 000 ha), Mollisoles (800 000 000 ha), Vertisoles (210 000 000 ha) y otros (470 000 000 ha) (Dregne, 1976) (Figura 5). Cualquiera que sea el tipo de suelos, estos son el recurso básico de las tierras áridas, puesto que proveen el medio en el cual crecen las plantas; sus propiedades, tales como la textura y la capacidad de retención del agua, determinan la proporción de agua de lluvia disponible para el crecimiento de las plantas. El bajo contenido de materia orgánica, la baja germinación y la alta mortalidad de plántulas son las principales causas de la productividad extremadamente baja en estos suelos.

La vegetación sustentada por estos suelos varía desde, desiertos yermos o con vegetación esparcida, hasta pastizales, tierras con arbustos y sabanas, tierras de cultivos y bosques secos. La vegetación de los bosques usualmente es pobre, tiene baja densidad, con especies adaptadas a los suelos áridos y con una alta eficiencia en el uso del agua. La vegetación perenne varía considerablemente y tiende a ser escasa y distribuida en manchones. Las plantas que se han adaptado a las tierras áridas sobreviven a las lluvias irregulares, la alta radiación solar y los períodos de sequía y protegen la superficie del suelo de la erosión del viento y el agua. La eliminación o pérdida de la capa de vegetación da como resultado un incremento en el riesgo de erosión y degradación del suelo.

Los usos predominantes del suelo en las tierras áridas son el pastoreo y la producción de alimentos de subsistencia (Figura 6). Los cereales que se producen en las tierras áridas incluyen trigo, cebada, sorgo y mijo y leguminosas, tales como garbanzo, lentejas, guisantes y maní (Cuadro 7). Menos importantes son los cultivos oleaginosos (colza y lino) y una amplia variedad de frutos, vegetales, hierbas y especias. El pastoreo está muy difundido y es muy móvil (Cuadro 8).

La producción de alimentos proviene principalmente de los sistemas agrícolas pequeños, dependientes de las lluvias para la subsistencia o consumo local y para los mercados. Los bosques naturales se utilizan para obtener leña combustible y actualmente se realizan grandes esfuerzos para

CUADRO 7
Cultivos típicos en condiciones de tierras de secano

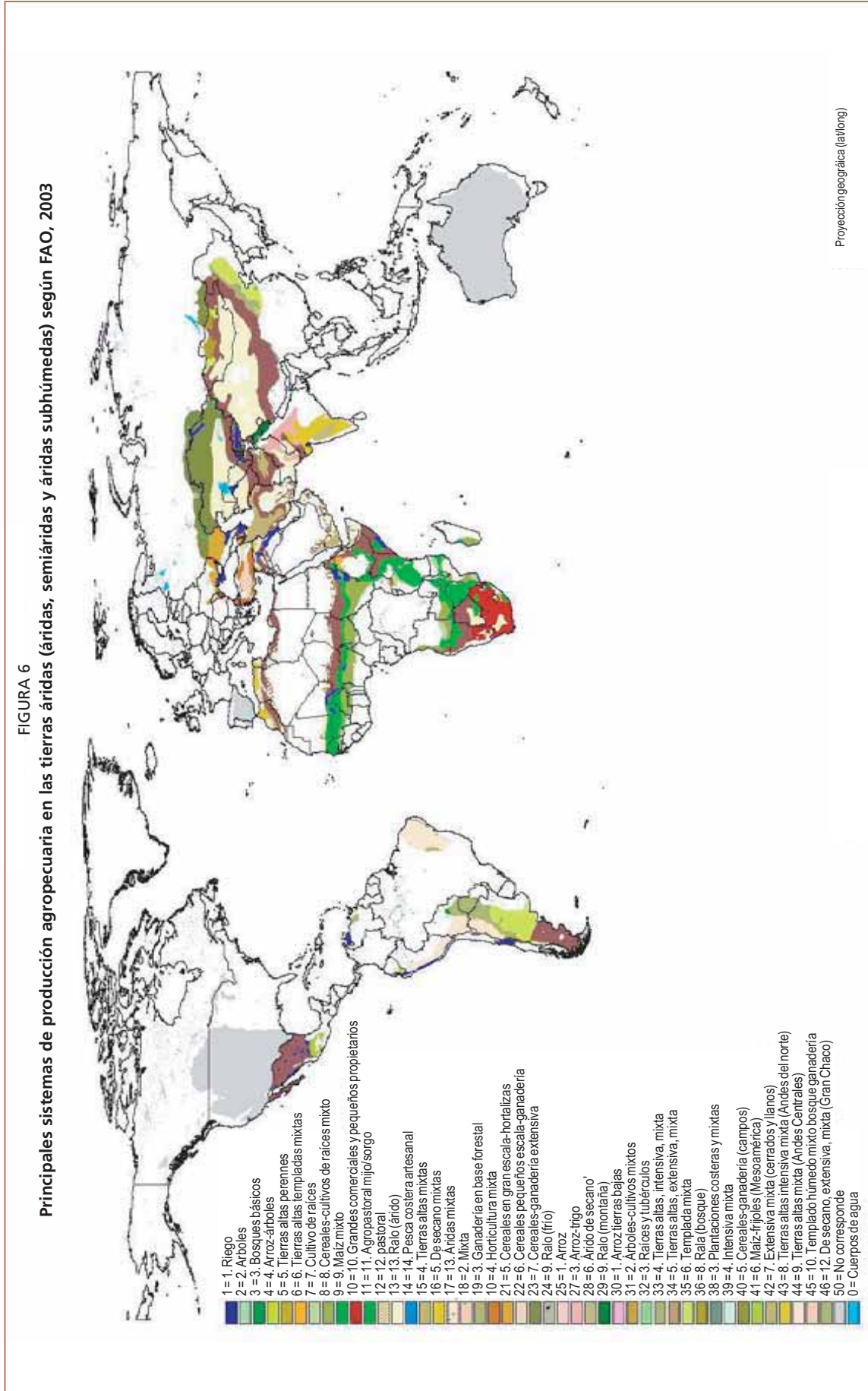
Clasificación	Duración de la estación de crecimiento	Cultivos típicos
Tierras hiperáridas	0	Sin cultivos ni pastos
Tierras áridas	1 - 59	Sin cultivos, pastos en las márgenes
Tierras semiáridas	60 - 119	Mijo, sorgo, ajonjolí
Tierras secas subhúmedas	120 - 179	Maíz, frijol, maní, guisante, cebada, trigo, tef (adecuado para la agricultura de secano)

FAO, 1993.

CUADRO 8
Porcentaje de usos de la tierra en las regiones áridas en 1980

Pastoreo «nómada»	41
Granjas	25
Agricultura de secano	12
Caza, pesca, recolección	3
Agricultura con riego	2
Mayormente sin uso	16

Fuente: Heathcote (1983)



Fuente: Sistemas de producción agropecuaria y pobreza, FAO/Banco Mundial, 2004.

ampliar las áreas forestales con este objetivo y para el secuestro de carbono. El Capítulo 3 describe los sistemas agropecuarios en detalle.

El impedimento principal para el desarrollo de la agricultura es la lluvia escasa y variable, con consecuencias de alto riesgo para la agricultura y la ganadería. Los sistemas de cultivo tradicionales de secano han evolucionado durante miles de años. Se han desarrollado varias estrategias generales para enfrentar las lluvias escasas y erráticas. La agricultura de secano generalmente se practica en áreas con una cantidad razonable precipitación y donde los suelos son relativamente profundos. Las regiones más secas generalmente se usan para el pastoreo del ganado, con movimientos estacionales regulares. Normalmente, se siembran varios cultivos para reducir el riesgo de fracasos totales y se utilizan variedades resistentes o adaptadas a la sequía. Además, se realizan largos períodos de barbecho para prevenir el estrés de la tierra. Durante estos períodos, los suelos se protegen mediante una cubierta vegetal que suministra nutrientes y materia orgánica al suelo. Muchos ganaderos y agricultores trabajan en forma coordinada intercambiando cultivos y carne.

CARACTERÍSTICAS DE LAS TIERRAS ÁRIDAS QUE AFECTAN EL SECUESTRO DEL CARBONO

El ambiente de las tierras áridas se caracteriza por un conjunto de elementos que afectan su capacidad para fijar el carbono. La característica principal de las tierras áridas es la falta de agua. Esto limita la productividad de las plantas de forma severa y, por lo tanto, afecta la acumulación de carbono en los suelos.

El problema se agrava, debido a que la lluvia no sólo es escasa, sino que generalmente es errática. Por lo tanto, un buen manejo de la poca agua existente es esencial. Además, el contenido de carbono orgánico del suelo tiende a decrecer exponencialmente con la temperatura (Lal, 2002a). En consecuencia, los suelos de las tierras áridas contienen pequeñas cantidades de carbono (entre uno y menos de 0,5 por ciento) (Lal, 2002b). Cuando la reserva de carbono orgánico del suelo se ha agotado como consecuencia del uso de la tierra generalmente se incrementa con la adición de biomasa a los suelos (Rasmussen y Collins, 1991; Paustian, Collins y Paul, 1997; Powlson, Smith y Coleman, 1998; Lal, 2001a). Los suelos de las tierras áridas son proclives a la degradación y la desertificación, lo cual conduce a reducciones importantes en el contenido de carbono orgánico del suelo. Una apreciación general del grado de degradación en las diferentes regiones de tierras áridas del mundo se encuentra en Dregne (2002). Sin embargo, también existen algunos aspectos de los suelos de las tierras áridas que actúan en favor del secuestro de carbono en las regiones áridas. Los suelos secos tienen menor probabilidad de perder carbono que los suelos húmedos (Glenn *et al.*, 1992), debido a que la falta de agua limita la mineralización del suelo y por tanto el flujo de carbono hacia la atmósfera. En consecuencia, el tiempo de residencia medio del carbono en las tierras áridas es largo, algunas veces más largo que en los suelos de los bosques. El problema de la permanencia del carbono secuestrado es un aspecto importante en la formulación de los proyectos de secuestro de carbono. Aunque la proporción de carbono que puede secuestrarse en estas regiones es baja, puede tener una buena relación costo-efecto, particularmente si se toman en consideración todos los beneficios colaterales resultantes del mejoramiento del suelo y su restauración. El mejoramiento de la calidad del suelo como consecuencia del incremento del carbono en el suelo, tendrá un impacto social y económico importante en los medios de vida de las personas que viven en estas áreas. Además, dada la gran cantidad de tierras áridas, existe un alto potencial de secuestro de carbono. El potencial de las tierras áridas para secuestrar carbono es alto, no solo debido a su gran magnitud, sino también porque históricamente, los suelos de las tierras áridas han perdido cantidades significativas de carbono y falta una cantidad importante para su saturación. Debido a todas estas características, cualquier estrategia para restablecer la materia orgánica del suelo en estas regiones resulta particularmente interesante (Recuadro 1).

RECUADRO 1

Características de las tierras áridas que afectan la captura de carbono**□ Desfavorables**

- Falta de agua
- Lluvia escasa y errática
- Temperatura generalmente alta
- Baja productividad
- Bajo contenido de materia orgánica del suelo (0,5-1 por ciento) y de nutrientes del suelo
- Tendencia a la degradación del suelo y la desertificación

□ Favorables

- El tiempo de residencia medio de la materia orgánica del suelo es largo
- Ocupan más del 43 por ciento de la superficie de la tierra
- Como consecuencia de la pérdida histórica del carbono distan mucho de la saturación
- El mejoramiento de la calidad del suelo a través del secuestro de carbono tendrá un gran impacto económico y social

LA DESERTIFICACIÓN Y EL SECUESTRO DEL CARBONO

Los efectos de la desertificación sobre la calidad del suelo incluyen:

- pérdida en la agregación del suelo
- disminución de la capacidad de infiltración de agua
- reducción en la capacidad de almacenamiento de agua
- incremento del potencial de erosión
- agotamiento de la materia orgánica del suelo, dificultades para la germinación de las semillas
- ruptura de los ciclos bioquímicos del carbono, nitrógeno, fósforo y azufre, alteraciones en el agua y en el balance de energía
- pérdida de la capacidad de recuperación del suelo

Todos estos efectos acentúan la emisión de CO₂ hacia la atmósfera. Lal (2001c) estimó la pérdida de carbono como resultado de la desertificación. Asumiendo una pérdida de carbono de 8-12 Mg de C/ha (Swift *et al.*, 1994) en un área de 1 020 000 000 ha (PNUMA, 1991a), la pérdida histórica total de carbono sería de 8-12 Pg de carbono. Del mismo modo, la degradación de la vegetación ha conducido a una pérdida de carbono de 4-6 Mg de C/ha en 2 600 000 000 ha, añadiendo hasta 10-16 Pg de carbono. La pérdida total de carbono como consecuencia de la desertificación puede ser de 18-28 Pg de carbono. Asumiendo que dos tercios del carbono perdido (18-28 Pg) pueden ser fijados nuevamente (IPCC, 1996) a través de la restauración del suelo y la vegetación, el potencial de fijación del carbono a través del control de la desertificación es 12-18 Pg de carbono (Lal, 2001c). Estas estimaciones dan una idea acerca de la pérdida de carbono como resultado de la desertificación y el potencial para el secuestro de carbono por medio de la recuperación de los suelos en las tierras áridas.

Las oportunidades para un mejor manejo de la tierra, así como el incremento del secuestro de carbono deben desarrollarse en estas áreas. Los sistemas agrícolas contribuyen a las emisiones de carbono con el uso de combustibles fósiles en las operaciones agrícolas y por medio de las prácticas que ocasionan pérdidas de la materia orgánica en los suelos. Por otra parte, los sistemas agrícolas pueden contrarrestar

las pérdidas de carbono cuando acumulan materia orgánica en el suelo, o cuando se incrementa la biomasa de madera encima del suelo que actúa luego, ya sea como un sumidero permanente o es empleado como una fuente de energía que sustituye el combustible fósil. El potencial de beneficios globales, así como locales a obtener a partir de la captura de carbono en las tierras áridas debe ser un incentivo adicional para un apoyo mayor a la reforestación y la agricultura en las tierras áridas.

Si bien las tierras áridas han sido estudiadas (Heathcote, 1983; Thomas, 1997a; 1997b), el impacto de la desertificación sobre el ciclo del carbono global y el impacto potencial del control de la desertificación sobre la captura de carbono en los ecosistemas de tierras áridas no han sido ampliamente investigados. Existen pocos estudios de caso e información. En consecuencia, existe escasa evidencia científica acerca del impacto de la desertificación sobre las emisiones de carbono hacia la atmósfera. El objetivo de este trabajo es evaluar el estado de conocimiento y el potencial de diferentes medidas para incrementar la captura de carbono.

Capítulo 3

Sistemas de producción agropecuaria en las tierras áridas

INTRODUCCIÓN

Según FAO (2001a), un sistema de producción agropecuaria se define como «conglomerado de sistemas de fincas individuales, que en su conjunto presentan una base de recursos, patrones empresariales, sistemas de subsistencia y limitaciones familiares similares; y para las cuales serán apropiadas estrategias de desarrollo e intervenciones también similares». Dependiendo de la escala de análisis, un sistema de producción agropecuaria puede abarcar desde unas pocas docenas, hasta muchos millones de núcleos familiares. El conocimiento de los sistemas de producción agropecuaria más importantes en las tierras áridas provee el marco necesario para el desarrollo de estrategias agrícolas y cambios. En base a la clasificación de los sistemas de producción agropecuaria de las regiones en desarrollo especificadas por FAO (2001a), la mayoría de los sistemas agrícolas de las tierras áridas caen en la categoría de sistemas de producción en secano en áreas de bajo potencial. Estos sistemas se caracterizan por ser sistemas de cultivo mixto con ganadería y sistemas pastorales, los cuales se unen formando pocas unidades, con frecuencia dispersas, con una productividad o un potencial de producción muy bajos debido a la aridez extrema o al frío.

Entender el mundo de los pequeños propietarios en los ambientes de tierras áridas es la clave para diseñar actividades adecuadas y exitosas de captura de carbono. Es importante comprender que el secuestro de carbono para el alivio de la pobreza debe ser más amplia, tanto como rango de prácticas, como de beneficios (no sólo en términos monetarios) que los esquemas similares en la agricultura comercial y la silvicultura.

Existen varios socios potenciales o grupos adecuados para la ejecución de programas de secuestro de carbono en las tierras áridas. Desde una perspectiva de escala, la agricultura a grande escala con aportes importantes de capital podría ser la más atractiva. Sin embargo, desde el punto de vista biofísico, como se discute en el Capítulo 4, los sistemas que emplean cantidades significativas de fertilizantes o que dependen fuertemente del combustible fósil para suministrar agua de riego, no deberían ser considerados, ya que por lo general son emisores netos de carbono. Solamente si ocurre un cambio de la amplia dependencia de los fertilizantes, los combustibles fósiles, las tecnologías o el uso de la tierra hacia prácticas más amigables respecto al carbono, podrían ser considerados a corto plazo en la agricultura actual a gran escala. Existen algunos sistemas de uso de la tierra de alto coeficiente de capital, tales como los esquemas agrícolas mecanizados en el este del Sudán (donde grandes extensiones de tierra se han degradado severamente) que ofrecen gran potencial de secuestro de carbono si son rehabilitadas por medio de prácticos de uso poco intensivo de la tierra.

Aparte de estas razones técnicas, los sistemas agrícolas en gran escala, con uso intensivo del capital, probablemente no son potencialmente compatibles con el secuestro de carbono debido a que las pequeñas cantidades adicionales de carbono que pudieran incorporarse no serían atractivas en comparación con los beneficios de otras fuentes, muchas de las cuales dependen de las técnicas emisoras de carbono.

Los principales grupos objetivo de la captura de carbono en los agrosistemas degradados son primeramente los agricultores en pequeña escala, de pocos recursos, en ambientes inciertos o proclives a riesgos, para los cuales los beneficios anticipados

podrían constituir un mejoramiento de sus medios de vida. Estos agricultores son conocidos como pequeños productores. Dependen de la agricultura basada en bajos ingresos y de subsistencia y generalmente se caracterizan por la diversidad, variabilidad y flexibilidad (Mortimore y Adams, 1999).

CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE PEQUEÑOS AGRICULTORES

Las características principales de los sistemas de los pequeños agricultores en los países semiáridos en desarrollo son: su diversidad en extensión, variabilidad temporal y multidimensionalidad en términos de las formas que funciona y sobrevive (Mortimore y Adams, 1999). Esto es principalmente, debido a que los pequeños propietarios de las tierras áridas deben responder constantemente a un ambiente variado, cambiante y riesgoso. Sus operaciones son muy diferentes de las que se realizan en fincas grandes con propósitos comerciales, con acceso al crédito y a tecnologías orientadas a la eficiencia y respaldadas por sistemas de seguros contra riesgos y pérdidas. Esta diversidad, variabilidad y multidimensionalidad significa que cada sistema debe ser considerado de acuerdo a su mezcla única de características.

Otra característica importante de los pequeños agricultores que también los diferencia de los productores comerciales es que pocos de ellos están motivados por el único objetivo de los beneficios agrícolas. En cambio, los pequeños agricultores persiguen objetivos de subsistencia básica y sobrevivencia, balanceando diariamente los riesgos y oportunidades directamente a través de sus opciones de sustento y las prácticas de manejo en lugar de hacerlo por medio de instituciones externas (Collinson, 2000). Muchos agricultores pequeños tienen un fuerte vínculo con su tierra, la cual continúan laborando aún cuando los beneficios sean bajos, por razones tales como mantener la propiedad y preservar los lazos familiares. Al mismo tiempo, muchos tienen ingresos adicionales y con frecuencia más altos a partir de fuentes no agrícolas. Estas incluyen pequeños negocios, acopio de productos silvestres incluyendo la leña, mano de obra y remesas de miembros de la familia. El resultado es la existencia de «unidades de producción multiempresariales» (Hunt, 1991).

Los pequeños agricultores se diferencian claramente de los productores agrícolas de altos insumos por su necesidad de manejar múltiples riesgos. Casi todas sus inversiones y producciones están sujetas a grandes variaciones e incertidumbres, tales como la mano de obra, que con frecuencia es la variable más crítica. Otro riesgo crítico surge de la gran variabilidad de las precipitaciones, que arrojan dos consecuencias principales en lo que concierne a la captura del carbono. Una es la variación en el tiempo de la bioproductividad, lo que significa que la plantación y la cosecha (y la mayoría de las demás actividades agrícolas y no agrícolas) deben ser reajustadas rápidamente, algunas veces dentro de una misma temporada y con frecuencia entre temporadas. Por ejemplo, los barbechos que resultaron seguros durante años, tienen que eliminarse después de una estación poco productiva. La otra consecuencia es la variabilidad entre campos, algunos de los cuales pueden recibir suficiente lluvia y otros no. Existen otros riesgos que tienen consecuencias similares, incluyendo el ataque de plagas (contra las cuales los plaguicidas resultan muy costosos), las enfermedades del agricultor que provocan la indisponibilidad de mano de obra en algún momento crítico de la estación y la variabilidad de los precios de las inversiones tales como las semillas, la mano de obra, la alimentación y de los resultados, especialmente de las cosechas.

Según Mortimore y Adams (1999), las respuestas de los pequeños agricultores a estas múltiples limitaciones siguen tres vías principales: (i) diversificación de los recursos naturales, económicos, técnicos y sociales con la debida racionalidad para distribuir los riesgos tan eficientemente como sea posible; (ii) flexibilidad en el manejo diario de estos recursos en forma de decisiones activas para enfrentar y adaptarse a la variabilidad a corto plazo y, (iii) la adaptabilidad a más largo plazo, percibida como una toma de decisiones acumulativa y determinada que promoverá la generación de sistemas nuevos

o alterados o nuevas vías para sus medios de vida. Cuando se distribuyen los riesgos, es importante para los productores, tener una mezcla de productos donde, tanto el tipo, como el precio de estos sea independiente, un criterio que potencialmente se ajusta muy bien al secuestro de carbono.

Una característica adicional de los sistemas de pequeños agricultores es el acceso variable a los recursos de todo tipo. Dentro de una aldea, algunos tienen fácil acceso, y otros tienen menos acceso, para asegurar la propiedad de la tierra, la producción silvestre como la leña, los créditos, la contratación de mano de obra, el ganado y los mercados. El acceso también varía entre aldeas y entre países. Las implicancias de este acceso desuniforme a los recursos para los esquemas de secuestro del carbono se discuten más adelante.

Finalmente, estos sistemas agrícolas han sufrido y sufren cambios continuos en respuesta a los cambios ambientales y sociales. Ahora se reconoce ampliamente que los ambientes secos poseen una compleja historia de cambios, basada en dinámicas no equilibradas, en lugar de cambios predecibles, graduales y lineales (Leach y Mearns, 1999; Scoones, 1999; Scoones, 2001), algunas veces conocidos como sistemas condicionados por eventos (Reenberg, 2001; Sorbo, 2003). Así, los sistemas agrícolas han tenido que adaptarse continuamente a las condiciones ambientales y a procesos políticos y económicos cambiantes. En el tiempo de duración de un esquema de secuestro del carbono de un suelo se podrían esperar muchos cambios en la configuración del paisaje agrícola, además de los cambios que podría traer el proyecto por sí mismo. La planificación en un ambiente tal será un desafío. En lugar de enfoques simplificados y estandarizados, así como de soluciones técnicas predefinidas, los esquemas de secuestro del carbono en estos sistemas necesitarán ofrecer un grupo de opciones tecnológicas y de manejo, a partir de las cuales los campesinos puedan elegir de acuerdo con sus necesidades.

EJEMPLOS DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA DE LOS PEQUEÑOS AGRICULTORES

Dentro de esta amplia descripción de las características de la agricultura de pequeños agricultores en tierras áridas existen varios sistemas de producción agropecuaria. Comprenden sistemas como los cultivos anuales, plantaciones, bosques, sabanas, pasturas naturales, tierras en barbecho y cultivos de hortalizas. Dentro de cada uno de ellos, existe una interacción entre cultivos, ganado y árboles, así como entre tierras cultivadas y no cultivadas (FAO, 2000a).

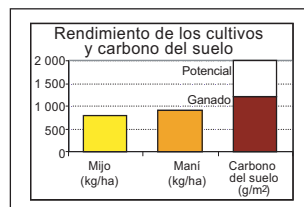
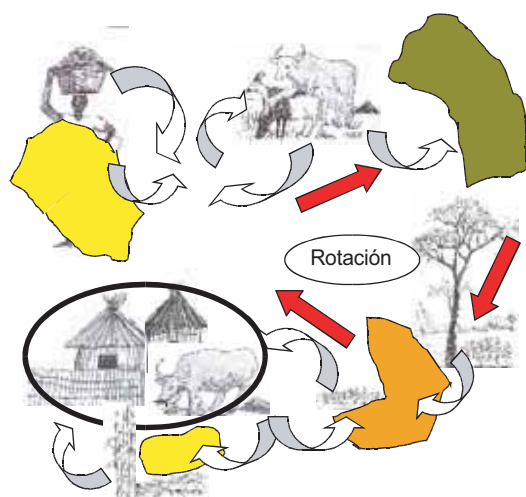
Los sistemas de producción agropecuaria en las tierras áridas van desde de cultivos migratorios plantados en las extensas praderas con árboles, hasta los cultivos intensivos de pequeños agricultores, donde toda la tierra está cultivada y se maximiza la integración entre los cultivos y la cría de animales. Sin embargo, estos dos extremos no deben entenderse como puntos fijos a lo largo de un eje de desarrollo agrícola, sino como ejemplos de «vías» de cambio agrícola y ambiental (Scoones, 2001) que son posibles, tanto entre como dentro de los sitios. Tales vías de cambio reflejan los medios de vida, limitaciones y oportunidades de los agricultores dentro de un contexto agrícola. La Figura 7 muestra una ilustración esquemática de los sistemas agrícolas de pequeños agricultores en las tierras áridas.

Intensificación agrícola

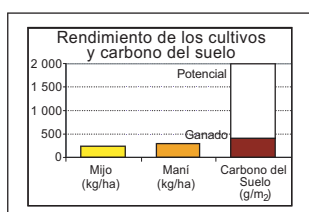
La intensificación, definida por Liften y Mortimore (1993), implica «el incremento de las inversiones promedio en la mano de obra o capital en las pequeñas propiedades, ya sea sobre tierras cultivadas solamente, o sobre tierras cultivadas y de pastoreo, con el propósito de incrementar el valor de la producción por unidad de superficie». La intensificación toma múltiples formas que pueden clasificarse de muchas maneras. En el caso de los sistemas agrícolas de pequeñas extensiones en tierras áridas, la intensificación

FIGURA 7
Sistemas de producción de los pequeños productores en el Sahel y estrategias de manejo en relación con el carbono

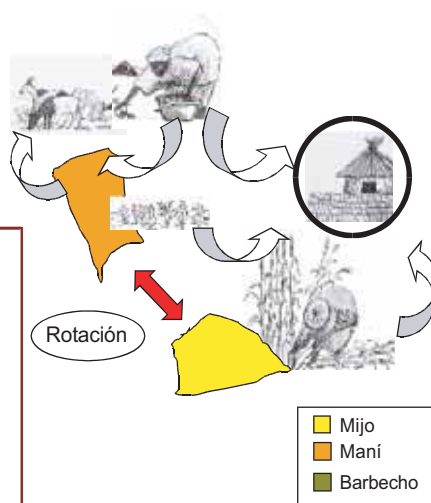
Dos ejemplos de manejo de la fertilidad del suelo en pequeñas fincas del Sahel



Los pequeños agricultores con gran cantidad de recursos (mano de obra, tierra, animales, equipo agrícolas, etc.) tienen más opciones para manejar la eficiencia de sus suelos. Estas opciones incluyen la rotación de cultivos con períodos de barbecho, el pastoreo de los residuos de las cosechas, la aplicación de estiércol y composte, el uso de residuos de los cultivos y la protección de ciertos árboles como la especie fijadora de nitrógeno *Faidherbia albida*. La remoción de la biomasa se hace por medio del pastoreo y el uso de los residuos agrícolas como forraje y material de construcción. Bajo un buen manejo de los recursos, los rendimientos de los cultivos y el carbono del suelo son relativamente altos.



En contraste, los pequeños agricultores con escasos recursos tienen menos opciones para manejar correctamente la fertilidad del suelo. Muy a menudo, la falta de tierra no permite hacer barbechos dando lugar al cultivo continuo del mismo campo con una rotación simple. Todos los residuos de los cultivos se remueven después de la cosecha y son usados para los animales, construir techos y empalizadas. Dada la falta de medios alternativos para el combustible, las mujeres y los niños a menudo recogen la materia orgánica de los pocos animales que pastorean la tierra y la usan cotidianamente como fuente de energía para cocinar. No hay otros insumos orgánicos disponibles para el grupo familiar. Como consecuencia los rendimientos de los cultivos y el carbono de suelo son pobres.



Fuente: Tschakert, trabajo de campo, 2001.

tiende a estar relacionada con incrementos de las inversiones en mano de obra local por unidad de superficie y tecnologías de bajo costo, en lugar de innovaciones que requieran más capital. Mortimore y Adams (1999) describen esta intensificación como un «proceso tradicional y adaptable», cuya vía puede reconstruirse a través de los análisis históricos.

Existen muchos ejemplos de esta intensificación tradicional. En los sistemas agrícolas la intensificación ocurre a menudo como consecuencia de la presión que genera el crecimiento de la población. En muchos lugares, los períodos de barbecho se han hecho más breves y eventualmente incluso han sido abandonados. De esta manera, todos los campos pueden estar cultivados y la fertilidad del suelo se mantiene mediante una mayor intensidad de trabajo con técnicas que pueden incluir cultivos intercalados

con legumbres fijadoras de N, deshierbe oportuno e intensivo y uso de las malezas, la utilización de estiércol y cobertura vegetal y la protección de ciertas especies de árboles. La rotación de cultivos se practica donde es posible para asegurar el uso diferenciado de nutrientes y la asimilación entre cultivos, tales como el mijo y el sorgo, así como cultivos fijadores de N, como maní y caupí. Se protegen los árboles, especialmente los conocidos por su capacidad de fijar el N y restaurar el suelo. La aplicación de estiércol, ya sea de ganado vacuno o de pequeños rumiantes, constituye un elemento clave. Los rebaños se deben manejar con mayor intensidad con el fin de mantener un suministro estable de estiércol en vista del incremento de escasez de la tierra, por ejemplo, alimentarlos con residuos agrícolas y malezas.

En las áreas áridas donde exista disponibilidad suficiente de agua, el riego ha sido un método clave para intensificar los sistemas de uso de la tierra desde tiempos antiguos. Esto requiere suministros de agua y energía para llevarla hacia los campos y huertos. El agua puede provenir de manantiales, ríos, surgentes y pozos. Los ríos y arroyos pueden ser pequeñas o efímeras corrientes de agua como en muchas partes de Asia Central, o grandes ríos, tales como Nilo, Níger, Amu-Darya, Hwang He e Indo.

Donde exista una buena fuente de agua, como terrenos montañosos (p. ej. parte de las tierras altas de Yemen y Omán), o en grandes sistemas ubicados cerca de grandes flujos de agua como el de los ríos Indo y Nilo, el agua puede tomarse por gravedad en pequeños canales hacia los campos o huertos. Donde el río fluya en una corriente suave, los métodos para llevarlo hacia los campos de pequeños esquemas son casi los mismos que los utilizados en los pozos: instrumentos movidos por animales o por el hombre, tales como las «saqqias», los tornillos de Arquímedes y los «shadufs». Los sistemas «qanat», que están especialmente bien desarrollados en Irán y en las áreas vecinas, pero también pueden encontrarse en otras partes de Asia y el norte de África, son más elaborados e incluyen pozos desde los cuales por canales subterráneos el agua es suministrada a los campos por gravedad. Otro sistema antiguo, que ha visto mayor expansión y desarrollo en los últimos años, es la captura de agua (o agricultura de escorrentía). En este sistema, la escorrentía altamente intermitente es concentrada y luego retenida en zanjas poco profundas, donde usualmente se emplea para los cultivos arbóreos.

Uso extensivo de la tierra

En áreas donde la densidad de población y las lluvias son bajas, predominan los sistemas de uso extensivo de la tierra, ya sea como sistemas a largo plazo o como una vía de cambio más reciente (Mortimore y Adams, 1999). Esto último ocurre en algunas áreas en el centro de Senegal, donde comunidades enteras han emigrado recientemente hacia la ciudad de Touba, dejando a familiares y vecinos con más tierra disponible que en las décadas pasadas (Tschakert y Tappan, 2004). Puesto que la disponibilidad de tierra no representa en este caso una limitación, las tierras en barbecho constituyen un elemento importante del sistema agrícola, permitiendo la regeneración del suelo a corto y mediano plazo. En general, los campos son significativamente más grandes que en áreas bajo intensificación. Dada la cantidad de tierra disponible para las propiedades individuales, el estiércol generalmente solo se emplea para los campos que están bajo cultivo continuo, principalmente aquellos adyacentes a los asentamientos y otros ubicados en las proximidades. Los campos distantes y aquellos que se dejan en barbecho son accesibles para el pastoreo de animales durante todo el año. Los rebaños no son forzados a abandonar el lugar para la trashumancia y de esta manera contribuyen a un flujo continuo de ingreso de materia orgánica, a diferencia de lo que ocurre con los animales en los sistemas intensificados. Las actividades de deshierbe y cosecha pueden realizarse con menor intensidad, mientras que se dejan más residuos agrícolas en el campo.

La agrosilvicultura puede jugar un papel importante en estos sistemas extensivos. Un ejemplo es el sistema sudanés de producción de goma arábiga, donde un árbol que vuelve

a crecer en las tierras de barbecho es una fuente principal de ingresos para los pequeños propietarios (Elmqvist y Olson, 2003). En otros barbechos de larga duración, se plantan árboles que generan otros productos útiles, como frutos, nueces, fibras y medicinas.

Los ejemplos anteriores de sistemas agrícolas intensivos y extensivos ilustran que un enfoque específico al contexto, basado en múltiples vías de cambio, ofrece directrices útiles para los esquemas potenciales de secuestro de carbono. El diseño y ejecución de proyectos debe comenzar con un entendimiento local del cambio ambiental y sus procesos subyacentes. El próximo paso es identificar vías positivas de cambio a nivel local y finalmente evaluar las oportunidades para promover tales vías a mayor escala.

Manejo de la fertilidad del suelo

El concepto de secuestro de carbono en ecosistemas degradados se basa típicamente en dos hipótesis. La primera es que cualquier mejoramiento en el manejo de la fertilidad del suelo y en el uso de la tierra tendría automáticamente, como resultado, cantidades mayores de carbono fijadas desde la atmósfera y almacenadas en el suelo. La segunda, es que los pequeños agricultores y pastores, que se anticipan como los principales beneficiarios de las intervenciones planificadas, necesitan ser sensibilizados y entrenados en tales prácticas de manejo mejorado.

Dado el complejo, diverso y dinámico mundo de la agricultura de los pequeños propietarios en los ambientes áridos, estas dos hipótesis parecen ser simplistas. En general, las prácticas de manejo propuestas y las opciones de uso de la tierra reflejan meramente las opciones técnicas más eficientes, enfocándose en el logro de una situación agronómica óptima. Sin embargo, como se ilustró anteriormente, los pequeños propietarios están más preocupados por el manejo diario y las estrategias de adaptación a más largo plazo, que el logro de un nuevo equilibrio. La agricultura oportunista es riesgosa en todos los sentidos, es un proceso de adaptación durante el cual ocurren, tanto las pérdidas, como ganancias, con frecuencia intencionalmente. La «eficiencia pura no dejaría espacio para maniobras flexibles» (Mortimore y Adams, 1999).

Lo que constituye de hecho un manejo «mejorado» de la fertilidad del suelo u opciones de uso de la tierra, podría entenderse solamente desde un enfoque de investigación global del sistema agrícola. Los productores que han desarrollado prácticas de manejo de la fertilidad del suelo, altamente dinámicas y flexibles, para enfrentar la variabilidad y la incertidumbre, muchas veces están en la mejor posición para llevar esta generalización a un proyecto de desarrollo. Aunque los agricultores con frecuencia tienen más experiencia en seleccionar las tecnologías en un marco más amplio de la «vida real», usualmente se consideran destinatarios pasivos de la ayuda externa, en lugar de recursos claves en el proceso en sí.

Un primer paso hacia la vinculación de los suelos y el carbono para las personas es investigar las prácticas que conocen y emplean los pequeños agricultores en los entornos de tierras áridas, entender los elementos subyacentes, así como los factores que conducen al cambio e identificar los ejemplos de vías positivas de cambio que podrían replicarse a mayor escala (Tschakert y Tappan, 2004).

Las prácticas de manejo de la fertilidad del suelo pueden agruparse de acuerdo al movimiento de nutrientes en, hacia y fuera de un sistema. Las prácticas se clasifican en cuatro grupos (Hilhorst y Muchena, 2000): (i) añadir nutrientes al suelo, (ii) reducir las pérdidas de nutrientes del suelo, (iii) reciclar los nutrientes y, (iv) maximizar la eficiencia de la asimilación de nutrientes. Los ejemplos que se presentan más adelante, se basan principalmente en los estudios de caso de Senegal y Sudán.

Aplicación de nutrientes al suelo

Barbecho

El barbecho es una práctica bien conocida para restablecer los nutrientes en el suelo. En forma ideal, los períodos de barbecho se rotan con períodos de cultivo permitiendo

que la tierra se recupere de años de explotación. Sin embargo, en muchas partes de las regiones áridas del mundo, tanto el área de barbecho como la duración de esta práctica han disminuido con el tiempo. Con mayor frecuencia, esta disminución es causada por la creciente presión de población, la introducción de maquinaria agrícola moderna como el arado y los períodos de sequía, o una combinación de éstas. Algunos investigadores consideran que este proceso está alcanzando proporciones críticas. Hoy día, en muchas tierras áridas, la duración del barbecho se reduce a sólo un año. En áreas con una escasez severa de tierras el uso del barbecho ha desaparecido totalmente. Como consecuencia, los productores han cambiado hacia otras prácticas de manejo de la fertilidad del suelo, tales como la aplicación de abono y composte o continúan cultivando obteniendo rendimientos excepcionalmente bajos o en descenso. Al mismo tiempo, el hecho de tener menos tierras en barbecho también significa una reducción de las posibilidades de pastoreo o menos forraje para los animales disminuyendo también la cantidad de estiércol que se puede producir (Breman, Groot y van Keulen, 2000). No obstante, en áreas con menos presión de población, el barbecho aún constituye una opción importante para el manejo de la fertilidad del suelo. Esto ocurre particularmente en países donde se han implementado programas de ajuste estructural y se han eliminado los subsidios para los fertilizantes.

Pastoreo de rastrojos

Muchos sistemas agrícolas incluyen el pastoreo de los animales en los campos inmediatamente después de la cosecha de los cultivos. Los animales pastorean las hojas y tallos que quedan en el campo, mientras que los suelos durante ese período se benefician con el estiércol. Dependiendo de la cantidad y situación del forraje en el campo y del número total de animales, el ganado usualmente se mantiene de uno a siete meses en un mismo predio, rotando entre diferentes partes durante cortos intervalos.

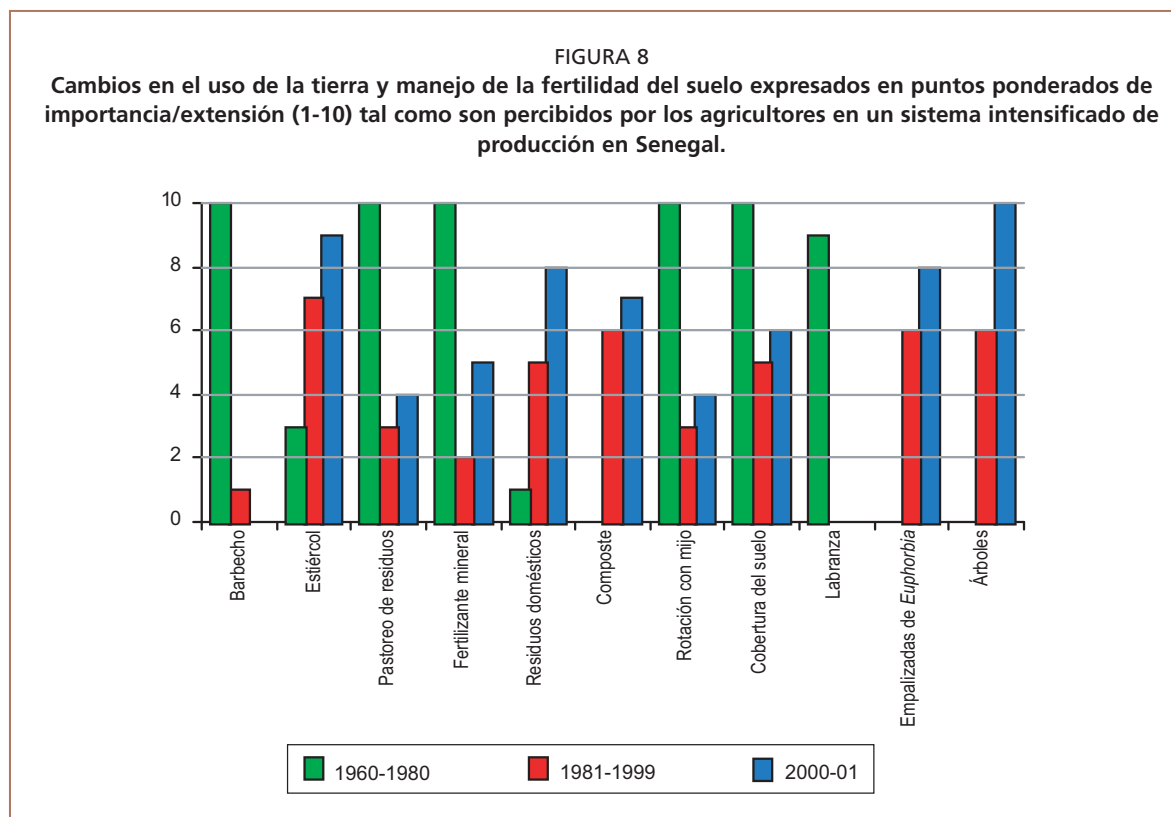
En general, la ganancia en materia orgánica a partir del pastoreo de rastrojos puede ser importante. En el Sahel, la cantidad de estiércol promedia entre una y 50 toneladas/ha, dependiendo del tiempo que los animales se mantienen en el mismo campo (Sagna-Cabral, 1989; Garin y Faye, 1990; Hoffmann y Gerling, 2001). Sin embargo, la exposición directa a los factores externos puede reducir considerablemente el valor nutritivo del estiércol. Aunque el pastoreo de rastrojos ha sido una tradición en las tierras áridas, el incremento de la escasez de tierra, la limitada capacidad de compras de muchos de los pequeños agricultores y el incremento de los riesgos de robos de animales en muchas áreas han contribuido a un declive general en el tamaño de los rebaños y, en algunos casos, han conducido al abandono total del pastoreo de rastrojos.

Fertilizantes inorgánicos

El uso de fertilizantes inorgánicos ha sido uno de los medios más ampliamente promovidos para incrementar la producción desde inicios del siglo XX. En muchas de las tierras áridas de los países en desarrollo, este tipo de fertilizantes fue subsidiado y puesto a disponibilidad de los agricultores con la ayuda del gobierno y el apoyo de las organizaciones no gubernamentales. Bajo programas de ajuste estructural, con frecuencia se eliminaron los subsidios y por consiguiente, los fertilizantes se hicieron cada vez más caros. Como se muestra en el ejemplo de Senegal (Figura 8), el uso de los fertilizantes decreció en la década de 1990. Desde el punto de vista del secuestro de carbono, el empleo de fertilizantes sintéticos no genera ninguna ganancia neta en la fijación del carbono (Schlesinger, 1999). La emisión de CO₂ durante la elaboración, transporte y aplicación de los fertilizantes, compensa cualquier ganancia de la producción biológica.

Rotación y asociación de cultivos

La práctica de la rotación y asociación de cultivos, especialmente cuando incluye cereales y leguminosas, es bien conocida entre los agricultores como una práctica



Fuente: Tscharket, trabajo de campo, 2001.

de manejo de la fertilidad del suelo. En muchos lugares, los cultivos fijadores de N incluyen el frijol y el maní. Sin embargo, en los sistemas agrícolas donde la escasez de la tierra se ha convertido en un factor limitante, con frecuencia se da prioridad a los cereales. Además, la disponibilidad de semillas de leguminosas podría depender de los subsidios del estado o los créditos, como en el caso del maní en el Sahel.

Reducción de las pérdidas de nutrientes del suelo

Vegetación maderable

Los árboles pueden ser un componente importante en muchos agroecosistemas. Con su profundo y extenso sistema radicular pueden capturar nutrientes no accesibles para los cultivos y ponerlos a disposición de la producción de cultivos sembrados a través de la hojarasca. Desde el punto de vista del secuestro de carbono, los árboles no solo almacenan carbono en su biomasa foliar, sino que contribuyen a la biomasa existente bajo el suelo por medio de sus sistemas radiculares y el aporte de residuos al suelo (ramas y hojas). Son particularmente importantes los árboles de la familia de las leguminosas (fijadores de N), entre los cuales, *Faidherbia albida* y *Acacia senegal* son dos de los más apreciados. Los árboles también pueden jugar un papel importante en la reducción de las pérdidas de nutrientes por la erosión eólica y también se debe prestar una consideración especial al uso de combustible biológico, en lugar de combustibles fósiles.

Los setos y las cercas vivas pueden capturar sedimentos y partículas de arcilla suspendidas en el aire y, por lo tanto, pueden incrementar localmente el contenido de arcilla del suelo, un factor beneficioso para el secuestro de carbono (El Tahir y Madibo, en prensa). Los desechos producidos por las plantas maderables son beneficiosos debido a su mayor contenido de polifenoles (ligninas y taninos) los cuales disminuyen la tasa de descomposición (Abril y Bucher, 2001) cuando se comparan con los pastos y otras especies herbáceas anuales.

Control de la erosión

La erosión y el subsecuente transporte y deposición de los materiales tienen una relación compleja con el almacenamiento de carbono en el suelo. Donde ocurre fundamentalmente la erosión hídrica, una alta proporción del carbono del suelo puede ser lavada hacia los depósitos aluviales cercanos al lugar de la erosión y luego almacenarse allí en formas que se descomponen más lentamente que en los suelos de origen. Por lo tanto, este tipo de erosión puede tener un efecto positivo sobre el secuestro de carbono. La erosión no siempre disminuye la productividad, pero si se pudiera demostrar que esto ocurre, sería absurdo favorecer una disminución de la productividad durante un período medio y tener, quizás, una ganancia extra en el carbono secuestrado. Los mismos argumentos probablemente no se aplican donde la erosión eólica es el principal elemento erosivo, puesto que la materia orgánica usualmente es trasladada a grandes distancias y luego dispersada hacia lugares donde se pueda descomponer rápidamente y liberar su carbono. Las opciones de manejo que incrementan la cantidad de biomasa viva y muerta que queda en las áreas agrícolas, en general disminuyen la erosión y a la vez incrementan en forma simultánea el ingreso de carbono al suelo (Tiessen y Cuevas, 1994).

Limpieza de campos y deshierbe

La limpieza de los campos para eliminar las malezas antes de la plantación así como las labores de deshierbe durante el ciclo del cultivo son prácticas importantes para reducir la competencia entre el cultivo y las malezas. Sin embargo, desde el punto de vista de la fertilidad y la captura de carbono, es importante reciclar hacia el suelo tantas malezas como sea posible. La limpieza y el deshierbe selectivos implican que solo se eliminan las malezas que compiten directamente con el cultivo mientras que otras permanecen en el campo.

Reciclaje de nutrientes

Estiércol

La dispersión del estiércol del ganado que se mantiene dentro o cerca de las fincas es una de las prácticas más difundidas para el manejo de la fertilidad del suelo. Los agricultores son conscientes de los efectos fertilizantes del estiércol, pero además lo aprecian por el hecho de que estabiliza la superficie arenosa de los suelos y reduce la erosión eólica. El estiércol de corral y el estiércol producido por animales en jaulas es usualmente de mayor calidad que el estiércol que se recoge en el campo procedente de los animales en pastoreo. Este se puede mezclar con residuos agrícolas, desechos del hogar y cenizas que se acumulan en la casa. El factor más limitante del uso del estiércol, además de la carencia de animales, es la falta de medios de transporte, lo que da lugar a que hayan campos bien abonados en la cercanía de las casas y no en las zonas más alejadas.

Manejo de los residuos de cultivos

Los residuos de cultivos, como los tallos y el heno pueden dejarse o devolverse al campo en forma de cobertura o incorporarlos al suelo al final del ciclo del cultivo. Sin embargo, en la mayoría de los sistemas agrícolas de las tierras áridas, los residuos de cultivos tienen alta demanda y se extraen del campo después de la cosecha, ya sea como forraje, material de construcción, combustible o desechos para el hacer composte. Lo que queda en los campos con frecuencia se quema antes de la próxima campaña. En algunos casos, los residuos de cultivos también se venden en el mercado local, generando ingresos adicionales.

Manejo de otras materias orgánicas

Los desechos del hogar, escamas de pescado, cenizas, hojarasca, ramas cortadas y residuos de cultivos también se emplean para incrementar la fertilidad del suelo. Con

frecuencia, estos ingresos adicionales se acumulan dentro del hogar, algunas veces se añaden a las pilas de abono y luego se transportan al campo donde se distribuyen de acuerdo a las necesidades de nutrientes. En varios lugares, la preparación de composte ha dado como resultado mejores tasas de descomposición. Aunque el uso de esta materia orgánica alternativa, principalmente desechos de hogar, ha ido en incremento, su cantidad raramente es suficiente para fertilizar grandes áreas en forma sostenible.

Maximización de la eficiencia de la absorción de nutrientes

Cultivo reducido de la tierra

Aunque algunos productores aprecian la labranza para el control de malezas y la aereación del suelo, parece haber un reconocimiento creciente de que la labranza también destruye la cubierta vegetal protectora y como resultado, expone los nutrientes del suelo a la degradación. En áreas donde los pequeños agricultores tienen arados y animales de carga, la labranza aún se practica ampliamente. En otras áreas, tales como la Cuenca «Peanut» de Senegal, los agricultores han remplazado la labranza profunda por la superficial, sobre todo debido a la falta de maquinaria (Tschakert y Tappan, 2004). Para el propósito del secuestro de carbono, se prefiere la labranza reducida o su ausencia total, simplemente debido a que mejoran el almacenamiento de carbono en el suelo.

Agricultura de precisión

Los agricultores y extensionistas que están tratando de maximizar las ganancias invirtiendo dinero sólo en las áreas que necesitan fertilizantes pueden recurrir a la agricultura de precisión. Esta les permite variar las dosis de fertilizantes en el predio de acuerdo a las necesidades identificadas por medio de las rejillas obtenidas por medio de GPS. De este modo, los fertilizantes que hubieran sido distribuidos en áreas que no lo necesitan podrán ser utilizados en otras áreas y así optimizar esa inversión.

La agricultura de precisión puede ser usada para mejorar el manejo de un campo desde varios puntos de vista:

- agronómico: ajuste de las prácticas culturales para tomar en consideración las necesidades reales del cultivo (p. ej., mejor manejo de la fertilización)
- técnico: mejor manejo de la finca en términos de tiempo (p. ej., planificación de las actividades)
- ambiental: reducción del impacto ambiental (mejor estimación de las necesidades de nitrógeno lo que implica una menor escorrentía del mismo)
- económico: aumento de la producción y/o reducción de los insumos, aumento de la eficiencia (p. ej., menor costo de las prácticas de fertilización nitrogenada)

Otros beneficios para el agricultor pueden ser la ayuda a establecer una historia de las prácticas aplicadas y los resultados obtenidos en su finca a fin de darle apoyo para la toma de decisiones y los requerimientos de trazabilidad (como ocurre cada vez más en los países desarrollados)

Manejo del fuego

El fuego es un instrumento muy comúnmente usado por los agricultores en las regiones áridas. Con frecuencia el fuego se emplea para limpiar los campos de malezas antes de la siembra. Otra razón importante para utilizar el fuego en ese momento es la eliminación de un amplio grupo de plagas agrícolas. El papel del fuego en el balance de carbono del suelo se investigó mediante modelación y se encontró que tenía un efecto significativo sobre el carbono orgánico del suelo. Cuando el período de retorno del fuego se incrementó de tres a 15 años, el nivel de carbono orgánico del suelo se incrementó alrededor del 30 por ciento (Poussart y Ardö, 2002).

Estas descripciones de métodos individuales de manejo de la fertilidad del suelo no captan toda la complejidad de las formas en que se combinan. Algunas de estas complejidades se describen en detalle más adelante.

Prácticas de manejo de la fertilidad del suelo en el Sahel

En las tierras áridas, los agricultores conocen y utilizan un conjunto completo de prácticas de manejo de la fertilidad del suelo. Sin embargo, estas prácticas pueden variar de un sistema agrícola a otro, de un agricultor a otro, de un campo a campo, e incluso dentro de un mismo campo, dependiendo del acceso diferenciado a los recursos y su utilización. Para ilustrar la complejidad de las prácticas de manejo de la fertilidad del suelo, la Cuadro 9 presenta un ejemplo detallado en Senegal.

Además de la variabilidad espacial, las prácticas de manejo de la fertilidad del suelo tienden a variar con el tiempo. En la medida que los agricultores se adaptan a los riesgos, impactos e incertidumbres, con el tiempo emergen sistemas nuevos o alterados y los medios de vida y los planes de los productores con respecto a sus prácticas de manejo, también cambian. La Figura 8 ilustra los cambios realizados en las prácticas de manejo en un poblado que ha seguido una vía de intensificación «tradicional y de adaptación» (Tschakert y Tappan, 2004). Con el crecimiento de la presión de población y la escasez de tierra, ha ocurrido un cambio general desde las prácticas de manejo extensivo (barbecho y pastoreo de rastrojos) hacia estrategias más intensivas (aplicación de estiércol, desechos domésticos, composte, plantación de árboles y cercas vivas). Esta transición está respaldada por un cambio en las políticas gubernamentales reflejado, después de 1980, por la disminución de los compromisos del estado, primeramente siguiendo un ajuste estructural que implicaba la reducción o ausencia total de subsidios o créditos para fertilizantes minerales, semillas de maní y equipos agrícolas.

Empezar por el conocimiento local

Además de las prácticas es importante entender las teorías de los agricultores acerca la fertilidad del suelo, su formación y los procesos que causan las pérdidas y ganancias de la fertilidad con el paso del tiempo.

Por ejemplo, los pequeños propietarios en la Cuenca «Old Peanut» de Senegal perciben la fertilidad del suelo como «saletés» (suciedad), un término genérico para las aplicaciones de materia orgánica (abono, material vegetal en descomposición, desechos domésticos, etc.). Para los agricultores, esta «suciedad» contiene elementos nutritivos que llaman «vitaminas» o «ingredientes ricos» que determinan la fuerza y salud de un suelo. Aunque la mayoría de los productores carecen de conocimientos detallados con respecto al origen de tales «vitaminas», son concientes de los distintos procesos que se originan como resultado de la degradación del suelo y las pérdidas de fertilidad. Las causas que ocasionan el declive de la fertilidad y que se citan con mayor frecuencia, incluyen: la explotación continua sin enmiendas externas o rotación de cultivos, la reducción de la capa de vegetación protectora y la exposición de la materia orgánica del suelo a los elementos externos, como consecuencia de la eliminación de los árboles, el cultivo profundo y los períodos de barbecho muy cortos, la quema de arbustos y los insectos plaga.

De acuerdo con esto, las opciones preferidas por los productores para restaurar la fertilidad del suelo se enfocan en la rotación de cultivos, enmiendas crecientes de materia orgánica, y acumulación de cubierta vegetativa, principalmente a través de períodos de barbecho largos e incremento de la densidad forestal.

En algunas partes de Níger, la fertilidad del suelo se considera con un enfoque mucho más general por parte de los agricultores que por los agrónomos, quienes desagregan las influencias sobre la productividad de los cultivos en factores tales como el suministro y asimilación de agua, nutrientes individuales y la estructura del suelo (Osbaahr y Allen, 2002). Los productores saben que la productividad de diferentes suelos es determinada por una combinación de factores. En un año húmedo, los suelos ricos en arcillas ubicados en depresiones, pueden inundarse y hacerse improductivos, mientras que los suelos arenosos, cuando se manejan de forma adecuada producen rendimientos aceptables. Los suelos ricos en arcillas en sitios con mejor drenaje pueden ser muy productivos y responder muy bien a las aplicaciones de abono o

CUADRO 9
Ejemplo de prácticas de manejo de la fertilidad del suelo empleadas en la Cuenca «Old Peanut», Senegal, 1999/2000

Prácticas conocidas	Cultivos preferidos	Suelos preferidos	Campos preferidos	Uso en el 1999/2000 ¹	Rango de aplicación en las aldeas
1. Adición de nutrientes al suelo²					
Barbecho	Después del mijo y antes del maní	Suelos más pobres, <i>dior</i> ³	Campos abiertos, nunca en los campos labrados, nunca en las cuencas; en caso de falta de semilla y/o estiércol	85 %	Menos común
Pastoreo de rastrojos con ganado	Antes de mijo o sandías	<i>Dior</i>	Campos más pobres; campos más cercanos, en campos distantes solamente bajo supervisión	69 %	Menos común
Aplicación de fertilizantes minerales (NPK)	Mijo en lugar de maní; hortalizas	Todo tipo de suelos	Campos abiertos, nunca en los campos labrados; raros en los campos de mujeres	77 %	Común
Aplicación de urea	En mijo u hortalizas	Todo tipo de suelos	Campos abiertos, huertos horticolas, nunca en campos labrados	<10 %	Muy raro
Aplicación de rocas fosfatadas	Todos los cultivos	Todo tipo de suelos, excepto suelos endurecidos	Campos abiertos	54 %	Raro
Rotación de cereales con caupí	-	<i>Dior</i> , campos muy pobres	En campos para los cuales no existe disponibilidad de semilla de maní	46 %	Común
Rotación de mijo con maní	-	Todo tipo de suelos, suelos con maní	Campos abiertos	100 %	Muy difundido
Rotación con sandía	-	Todo tipo de suelos	Campos labrados	<10 %	Raro
2. Reducción de las pérdidas de nutrientes del suelo					
Protección de los árboles	-	<i>Dior</i>	Campos más cercanos	85 %	Común
Plantación de árboles	-	<i>Dior</i>	Campos abiertos o cuencas	23 %	Raro
Setos/cercas vivas	Mijo, yuca, árboles de mango, henna	<i>Dior</i> , <i>ban</i> ³	Campos labrados y cuencas	46 %	Raro
Limpieza y/o deshierbe selectivos	Mijo	Todo tipo de suelos	Campos labrados y campos abiertos	>70 %	Común
3. Reciclaje de nutrientes					
Aplicación de estiércol vacuno	Antes de mijo y hortalizas	<i>Dior</i> , campos más pobres	Campos labrados y campos abiertos	77 %	Común
Aplicación de estiércol de rumiantes pequeños	Todos los cultivos	<i>Dior</i>	Campos pobres, cercanos y distantes	92 %	Muy difundido
Aplicación de estiércol equino	Antes del mijo, hortalizas	<i>Dior</i> , campos pobres	Campos labrados, huertos; campos abiertos si existe disponibilidad de carretas	92 %	Muy difundido
Aplicación de gallinaza	Antes de mijo, hortalizas, caupí	<i>Dior</i>	Todos los campos	77 %	Menos común
Dejar tallos vivos de mijo en los campos	-	<i>Dior</i>	Campos labrados y abiertos dependiendo de la disponibilidad de carretas	77 %	Común
Incorporación de desechos domésticos	Antes de mijo, sandía	<i>Dior</i>	Campos menos fértiles, campos de proyectos	100 %	Muy difundido

Prácticas conocidas	Cultivos preferidos	Suelos preferidos	Campos preferidos	Uso en el 1999/2000 ¹	Rango de aplicación en las aldeas
Composte	Antes de mijo y hortalizas	<i>Dior</i>	Campos labrados, abiertos, solamente si se mezcla con abono y se sacan con carretas	69 %	Menos común
Uso de cenizas	En mijo, sorgo, caupí	Cualquier tipo de suelo	Campos labrados, campos cercanos, campos en barbecho	85 %	Difundido
Uso de cáscara de maní	Antes de mijo	Cualquier tipo de suelo	Campos labrados y abiertos	69 %	Común
Uso de glumas de mijo (descompuestas)	Antes de mijo, maní	Cualquier tipo de suelo	Todos los campos, campos en barbecho	92 %	Difundido
Espaciamiento de los montones de maní	-	<i>Dior</i>	Campos labrados y abiertos (si hay carretas disponibles)	61 %	Raro
Uso de hojarasca	Antes del mijo	Todo tipo de suelos	Campos labrados	69 %	Raro
Uso de escamas de pescado	En mijo	<i>Dior</i>	Todos los campos	31 %	Raro
Uso de las partes descompuestas de los baobab	Antes de mijo y chile			46 %	Raro
Uso de residuos de cultivos	Todos los cultivos	<i>Dior</i>	Todos los campos	77 %	Común
4. Maximizar la eficiencia en la asimilación de nutrientes					
Cultivo profundo	-			<10 %	Muy raro
Cultivo superficial	Antes de mijo, maní	<i>Dior</i> y <i>deck</i> ³	Campos abiertos, campos en barbecho	46 %	Muy difundidos
Adecuar los cultivos a la calidad y fertilidad del suelo	Todos los cultivos	-	Campos labrados y abiertos, cuencas	100 %	Muy difundidos
Aplicar esquemas en parches para las aplicaciones de nutrientes	Todos los cultivos	<i>Dior</i>	Campos abiertos	100 %	Muy difundidos

1 Entre diciembre 2000 y diciembre 2001, 14 asentamientos en los Departamentos de Thiès, Fatick, Bambey y Diourbel participaron en un estudio sobre manejo de la fertilidad del suelo y retención de carbono.

2 Clasificación de las prácticas de fertilidad del suelo según Hilhorst y Muchena (2000).

3 «dior», «deck» y «ban» son nombres en lengua wolof para los tipos de suelos dominantes de la Cuenca «Old Peanut». Según Badiane, Khouma y Senè (2000), las «Dior» son declives de las dunas comunes y usualmente contienen >95 por ciento de arena y <0,2 por ciento de carbono orgánico. Los «deck» son suelos hidromórficos con 85–90 por ciento de arena y contenidos de carbono entre 0,5 y 0,8 por ciento. Los «ban» son similares a los «deck», usualmente se encuentran a lo largo de las riveras y cuencas («bas-fonds»).

Fuente: Tschakert, trabajo de campo 2000-01.

fertilizante. En un año seco, los suelos arenosos son yermos, mientras que los suelos ricos en arcillas bien drenados se endurecen mucho para ser cultivados y solo los suelos arcillosos de las depresiones producen algo. La experiencia que se obtiene a partir del trabajo en ambientes de aldeas con diferencias mínimas, produce una enorme variedad de «conocimientos» y prácticas diferentes y un proyecto de secuestro de carbono del suelo solamente tendría éxito si toda esta experiencia fuera utilizada.

La utilización del conocimiento y de las prácticas de los agricultores como punto de entrada para las actividades de la captura de carbono, ofrece varias ventajas: (i) estimula la participación de los productores en la investigación y el diseño del proyecto desde su inicio; (ii) facilita la introducción de carbono, nitrógeno y otros minerales desconocidos para la mayoría de los pequeños agricultores, de forma que

esto se hace más comprensible y fácil de integrar en sus propios diseños teóricos sobre el suelo y, (iii) abre nuevas puertas a los servicios de extensión para comprometerse con los agricultores, con un enfoque más participativo y global para la solución de los problemas en lugar de entregar paquetes agronómicos predefinidos.

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL BIOFÍSICO PARA EL SECUESTRO DEL CARBONO EN LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

En los ambientes de tierras áridas, el carbono orgánico del suelo en los primeros 100 cm de suelo es de alrededor de 4 toneladas/ha (Batjes, 1999). Esto es considerablemente más bajo que en otros ambientes. Las estimaciones de Batjes del carbono orgánico del suelo actual son: 7-10 toneladas/ha en los trópicos; 7-13 toneladas/ha en los subtrópicos; 11-13 toneladas/ha en las regiones templadas y 21-24 toneladas/ha en las áreas boreales, polares y alpinas. Existen pocas cifras confiables para todo el Sahel, con la excepción de las estimaciones para las sabanas semiáridas y los bosques secos en Senegal (la región agrícola centro-oriental) según informan Tiessen y Feller, 1998, Ringius, 2002 y Tschakert, Khouma y Senè, 2004. Esto promedia de 4,5 toneladas C/ha en las áreas cultivadas de forma continua sin aplicaciones de abono, hasta 18 toneladas C/ha en las sabanas no degradadas (capa superficial del suelo de 20 cm).

Existe un grupo de prácticas recomendadas y de tipos de uso de la tierra que se aconsejan para incrementar tanto la asimilación de carbono a partir de la atmósfera como la duración de su almacenamiento en los suelos. Con relación a las tierras cultivables, FAO (2001b) establece diferencias entre las prácticas que disminuyen las pérdidas de carbono del suelo de aquellas que incrementan las aplicaciones de materia orgánica al suelo y considera una combinación de ambas. La primera categoría incluye labranza reducida/conservación/labranza cero, manejo de residuos de cultivos, incorporación de abonos verdes, cultivos de cobertura y control integrado de malezas. La segunda categoría se basa en incrementos de la biomasa resultante del abono, composte, aplicaciones de cobertura, fertilización mineral y riego, así como un mejoramiento en el manejo de los residuos de cultivo y establecimiento de abonos verdes mediante el cultivo de leguminosas. Todas estas prácticas incrementan de manera simultánea la captura de carbono, mejoran la fertilidad del suelo y disminuyen la erosión, mediante la restauración del suelo en las tierras áridas. De esta manera, ofrecen un potencial real para una situación de ganancias para los pequeños agricultores locales.

Sin embargo, las estimaciones confiables para tierras áridas, sobre como el carbono pudiera retenerse mediante varias prácticas de manejo y patrones agrícolas, aún son escasas. Las estimaciones más exactas (Cuadro 10) promedian desde 0,05 a 0,3

CUADRO 10
Efectos de las prácticas de manejo y uso de la tierra sobre el potencial del secuestro carbono en las tierras áridas

Opciones tecnológicas	Potencial de retención (t de C/ha/año)
Tierras arables	
Labranza de conservación	0,10 – 0,20
Laboreo con cobertura (4–6 Mg/ha/año)	0,05 – 0,10
Composte (20 Mg/ha/año)	0,10 – 0,20
Eliminación de barbecho desnudo	0,05 – 0,10
Manejo integrado de nutrientes	0,10 – 0,20
Recuperación de suelos erosionados	0,10 – 0,20
Recuperación de suelos salinizados	0,05 – 0,10
Intensificación agrícola	0,10 – 0,20
Manejo y conservación del agua	0,10 – 0,30
Reforestación	0,05 – 0,10
Tierras de pastoreo	0,05 – 0,10

Fuente: Lal *et al.* (1998)

toneladas de C/ha/año para las tierras cultivables y de 0,05 a 0,1 toneladas de C/ha/año para prados y pasturas (Lal *et al.*, 1998). Las estimaciones realizados por Lal *et al.* para las áreas tropicales son alrededor de dos veces más altas que las de las tierras áridas. En el caso de la Cuenca «Old Peanut» en Senegal, Tschakert, Khouma y Senè (2004) informan acerca un rango posible de 0,02-0,43 toneladas de C/ha/año para los sistemas mejorados de cultivo-barbecho.

Los sistemas agrícolas de las tierras áridas con acceso a adecuados recursos de agua pueden beneficiarse

mediante el desarrollo de su potencial de riego. En sistemas de riego a pequeña escala, surge un alto potencial de captura de carbono a partir de cuatro características:

- El suministro de agua permite una alta productividad primaria, mucho más en algunos casos (riego «qanat»), que en otros (agricultura de esorrentía).
- En la mayoría de los sistemas, los suelos tienen una textura fina, lo que permite la presencia de grandes cantidades y una descomposición lenta del carbono del suelo, gran parte del cual se adhiere fuertemente a las partículas de arcilla.
- El uso extensivo de abono orgánico, tanto de desechos animales, como de cultivos.
- Las fuentes de energía de carbono neutral, tales como la energía animal y humana. En los «qanats», la alta inversión de energía humana en los primeros años puede durar siglos, o incluso milenios.

Los esquemas de riego en gran escala no deben ser completamente descartados como sistemas para la captura de carbono del suelo. Algunos se remontan a épocas en las que no existían insumos basados en energía de origen fósil. Por lo tanto, su construcción podría referirse como carbono-neutral. Incluso los sistemas más recientes, como los que hay en las vastas extensiones de Pakistán e India, se construyeron básicamente con energía animal o humana. Con su gran productividad, el uso de muchos suelos de textura fina y algunas veces en grandes extensiones, se pueden considerar como sumideros potenciales del carbono del suelo. Sin embargo, el monto total de carbono de cada uno, desde el momento de su construcción hasta las intervenciones recientes, como es el caso de los drenajes profundos o la construcción de pozos, tendría que evaluarse de forma separada antes de considerarlo apropiado como un sumidero de carbono del suelo y algunos, seguramente, no llegarían a ser calificados como tales. Estos serían en los que se han empleado grandes cantidades de combustible fósil para su construcción o en los que se emplearon grandes cantidades de fertilizantes.

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 cuan 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.

Capítulo 5

Estudios de caso en tierras áridas

La mayoría de las investigaciones y estudios de caso sobre la captura de carbono en el suelo han sido conducidos en zonas templadas; menos trabajos se han realizado en las regiones en desarrollo, incluyendo las zonas áridas (Lal, 2002b). Con el fin de comprender el gran potencial que ofrecen las tierras áridas para el secuestro de carbono, es necesario identificar las prácticas específicas del suelo que restablecen el carbono orgánico del suelo en los suelos degradados. Este capítulo revisa estudios de caso específicos realizados en diferentes agroecosistemas representativos en tierras áridas, donde el potencial de almacenamiento de carbono es evaluado mediante diferentes usos y prácticas de manejo de la tierra, incluyendo el riego y los biofertilizantes.

MODELOS PARA ANALIZAR LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS EN TIERRAS ÁRIDAS DE LOS TRÓPICOS

El RothC (RothC-26 3) (Coleman y Jenkinson, 1995; Jenkinson y Rayner, 1977) y el CENTURY 4.0 (Parton *et al.*, 1987; Parton, Stewart y Cole, 1988) son los modelos de simulación de carbono orgánico del suelo más extensamente utilizados. Han sido probados en una gran variedad de ensayos de campo a largo plazo y también han sido usados en una gran variedad de zonas climáticas, incluyendo las regiones de tierras áridas. También ambos han sido adoptados para el uso en los principales proyectos para la evaluación del carbono. Los dos modelos varían en su complejidad. El RothC requiere menos entradas de datos y, por consiguiente, es más fácil establecer parámetros. Sin embargo, trabaja solamente con procesos del suelo y, por lo tanto, el carbono de los residuos de las plantas es un insumo requerido. El modelo para agroecosistemas CENTURY tiene fuentes de carbono orgánico del suelo similares a las del RothC, pero tiene la ventaja de submodelos adicionales. Si bien es capaz de manejar una cantidad mayor de opciones que el RothC, requiere una serie de variables de insumos a los que se les deben establecer los parámetros. Esto es importante porque la capacidad de cualquier modelo para predecir con exactitud depende de la precisión y confiabilidad de los datos usados para establecer los parámetros.

ENFOQUE ADOPTADO PARA ESTABLECER LOS PARÁMETROS DE LOS MODELOS ROTH C Y CENTURY

Los datos para establecer los parámetros de los modelos pueden dividirse en tres grupos: climáticos, manejo del suelo y manejo de la tierra. Los estudios que contienen datos suficientemente detallados para modelar son escasos, particularmente en las regiones áridas. Donde se han desarrollado investigaciones y se ha recolectado información, los datos primarios que son vitales para el modelo a menudo no están disponibles.

Los parámetros del clima pueden ser citados por los investigadores que reportan sobre los efectos del manejo de la tierra en los suelos, pero raramente se proporcionan grupos completos de datos. Sin embargo, los datos climáticos están disponibles de manera independiente, como p. ej. en FAOCLIM 2 (2000) que contiene una base de datos de más de 28 000 estaciones climáticas en todo el mundo.

La literatura contiene los resultados de muchas investigaciones que analizan las propiedades del suelo y el efecto de varios tratamientos y prácticas sobre estos. Sin embargo, existen menos estudios que combinan el análisis del suelo con el del manejo de la tierra, especialmente en períodos más largos. Específicamente, ha habido poca investigación sobre los sistemas de tierras áridas.

Para los estudios de caso examinados aquí, se establecieron los parámetros para CENTURY y se ejecutó el programa para establecer un equilibrio entre 2 000 y 5 000 años. Luego se aplicaron los escenarios que reflejan el pasado reciente y el actual. Aunque CENTURY puede utilizar muchas prácticas de cultivo, solo puede manejar un cultivo a la vez. Por lo tanto, los cultivos intercalados que se encuentran comúnmente en los sistemas agrícolas de tierras áridas, no podrían incorporarse en los escenarios.

El modelo RothC se ejecutó para establecer su equilibrio utilizando el estado actual del carbono del suelo después que inicialmente se utilizó en modo inverso para calcular las necesidades de aplicaciones de carbono de las plantas. Con el fin de modelar algunos de los escenarios futuros para analizar los efectos del manejo de la tierra sobre el carbono del suelo, se obtuvieron las aplicaciones de residuos de plantas a partir del submodelo de plantas del CENTURY y luego se utilizaron para establecer los parámetros de los ficheros de manejo de la tierra del RothC. Los resultados en el RothC frecuentemente predijeron niveles más altos de carbono del suelo que el CENTURY. Esto se ha notado anteriormente y se ha atribuido al hecho de que el carbono del suelo tiende a recuperarse más rápido en el modelo CENTURY que en el RothC y, consecuentemente, que RothC requiere menores cantidades de carbono para mantener el mismo contenido de carbono orgánico (Falloon y Smith, 2002). El submodelo de plantas del modelo CENTURY es bastante básico. Por lo tanto, donde se requieran estimaciones precisas de la producción de las plantas y del rendimiento de los cultivos, se deben utilizar modelos alternativos como el modelo completamente mecánico de productividad de las plantas WIMOVAC (Humphries y Long, 1995).

SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS Y FUENTES DE DATOS

Los datos de cuatro sistemas diferentes de tierras áridas en Argentina, India, Kenya y Nigeria se utilizaron para modelar los cambios del carbono del suelo con diferentes prácticas y tecnologías agrícolas. Estos sistemas tenían diferentes contenidos de carbono en el suelo y habían perdido diferentes cantidades durante su explotación en el cultivo (Cuadro 11). Las aplicaciones de materia orgánica al suelo, por medio de abono de corral, abonos verdes, leguminosas en las rotaciones, composte de lombrices o el empleo de barbechos en las rotaciones, todas incrementaron el carbono del suelo

CUADRO 11

Resumen de los hallazgos sobre el contenido de carbono y tasas de acumulación y/o pérdidas en cuatro agrosistemas de tierras áridas

	Nigeria	India	Kenya	Argentina
Contenido de C del suelo antes de la labranza (toneladas/ha)	8-23	15-20	33-41	50-70
Contenido del C del suelo después de la labranza (toneladas/ha)	6-12	13-22	18-28	37-41
Efecto de las prácticas de labranza convencional sobre el C del suelo (toneladas/ha/año)	- 0,05 a - 0,01	- 0,07 a +0,06	- 0,3 a - 0,1	- 0,17 a - 0,19
Efecto del abono de corral, aplicaciones orgánicas, retención de residuos vegetales y barbechos en las rotaciones (toneladas/ha/año)	+ 0,1 a + 0,3	+ 0,2 a + 0,4	+ 0,4 a + 0,9	-
Efecto de los árboles (toneladas/ha/año)	+ adicional 0,05 a 0,15	+ adicional 0,5 a 0,7	-	-
Efecto de la utilización de fertilizantes inorgánicos como única fuente de nutrientes para el C del suelo (toneladas/ha/año)	- 0,12 a + 0,08	- 0,01	- 0,3	-
Efectos de la labranza cero (LC)				
LC sola				+ 0,02
LC + abonos verdes o abono de corral				+0,1 a 0,25 +0,04
LC + fertilizantes inorgánicos				

¹ Los efectos del cultivo convencional son promedios de los últimos 100 años para cada sitio, excepto Kenya, donde las tasas se calcularon a partir del asentamiento (30 - 50 años).

y los rendimientos agrícolas. Los árboles como parte de los sistemas agroforestales favorecieron el incremento del contenido de carbono en el suelo. El fertilizante inorgánico utilizado por sí sólo para incrementar el suministro de nutrientes a los cultivos, produjo una disminución en el carbono del suelo en todos los sistemas o sólo pequeños incrementos si se utilizaron con labranza cero. La labranza cero incrementa el carbono del suelo, si bien la acumulación es mayor donde se añade materia orgánica al suelo.

Los distintos escenarios muestran que el secuestro de carbono en las tierras áridas tropicales puede ser efectiva en diferentes sitios. Las prácticas de manejo de la tierra fueron seleccionadas por estar en concordancia con los sistemas agrícolas actuales. Así, por ejemplo, las dosis de aplicación de materia orgánica están de acuerdo con las cantidades que podrían estar disponibles para los agricultores. Sin embargo, a nivel de campo, diferentes factores pueden impedir la adopción de mejores estrategias para el secuestro de carbono. Los residuos de cultivos pueden ser necesarios para la alimentación del ganado o como combustible en lugar de devolverse a los campos, o pueden venderse en tiempos difíciles. El estiércol puede utilizarse como combustible. Muchos factores socioeconómicos interactuarán para determinar que escenario o combinación de escenarios se implementa en cada ciclo de cultivo.

Algunos de los resultados predicen que el carbono del suelo puede restaurarse a los niveles previos al cultivo o, en ciertas circunstancias, aún más altos. El verdadero nivel de carbono del suelo con frecuencia es difícil de establecer en aquellos sistemas donde la actividad agrícola ha estado presente durante varios siglos o milenios, tales como los casos de Nigeria y Kenya. Para lograr cantidades de carbono del suelo por encima de los «niveles naturales», implica que el sistema agrícola tiene una mayor productividad que el sistema nativo, asumiendo que el carbono no está siendo introducido al sistema desde otro lugar. Los escenarios que predicen las mayores tasas de secuestro de carbono, a menudo están asociados con la introducción de árboles al sistema. Las aplicaciones de carbono a partir de los árboles son más resistentes a la descomposición que las de los cultivos herbáceos y, en consecuencia, pueden causar incrementos marcados en el nivel del carbono del suelo (Falloon y Smith, 2002).

Estudio de Caso 1

Nigeria – región de Kano

Nigeria incluye algunas de las áreas más densamente habitadas del oeste semi-árido de África. Este no es un fenómeno reciente, puesto que hay indicaciones de actividad humana que remontan a más de mil años. Como consecuencia, los suelos de esta región han sido sometidos a largos períodos de cultivo. Sin embargo, en los últimos 40 años el área cultivada del norte de Nigeria ha aumentado del 11 por ciento al 34 por ciento del territorio (Harris, 2000). En particular, el nivel de intensidad agrícola en la zona de asentamiento cerrada (ZAC) está entre las más altas en las regiones semiáridas del oeste de África.

Las investigaciones en los sistemas agrícolas de esta región y su efecto sobre la fertilidad del suelo han sido conducidas por la organización *Drylands Research*, en el Reino Unido. Sus estudios han encontrado una estrecha correlación entre la intensidad del cultivo y la adopción de las técnicas de manejo de la fertilidad del suelo. La producción vegetal en el Sahel generalmente está limitada por la lluvia o los nutrientes (Breman y De Wit, 1983). Sin embargo, la economía e infraestructura del norte de Nigeria no es apta para la aplicación de insumos externos, tales como fertilizantes. Por consiguiente, las unidades agrícolas de los pequeños agricultores operan como sistemas de bajos insumos, siendo el estiércol vacuno la forma más común de abono orgánico.

ASPECTOS FÍSICOS

La región semiárida tiene una estación lluviosa desde mayo-julio hasta septiembre. Sin embargo, la lluvia es errática (Mortimore, 2000) y hace particularmente difícil la agricultura. Los suelos son principalmente ferralíticos tropicales, arenosos, con poca capacidad de retención de agua y bajos niveles de nutrientes y materia orgánica (Harris, 2000). Los balances de nutrientes pueden variar entre los distintos años puesto que el crecimiento del cultivo fluctúa con la lluvia. La vegetación natural es sabana forestal abierta con tendencia al incremento de la pradera abierta donde la lluvia es más escasa.

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

El norte de Nigeria ha sido clasificado en tres categorías de sistemas agrícolas: intensivo, menos intensivo y extensivo (Mortimore, 1989). Los sistemas intensivos tienen cultivos permanentes anuales o bianuales con una intensidad de cultivo de más del 60 por ciento. Los sistemas menos intensivos operan un régimen de arbustos/arbustos pequeños-barbecho y la intensidad de cultivo es de 30-60 por ciento. El sistema extensivo puede ser con arbustos grandes – barbecho y áreas no cultivadas, donde la intensidad de cultivo es típicamente menos del 30 por ciento.

Los cultivos principales son mijo, sorgo, maní, ajonjolí y caupí. Puesto que los sistemas son de bajos insumos, los rendimientos de los cultivos son de alrededor de una tonelada/ha. Principalmente se emplean las aradas en surcos y el cultivo con azada es muy común. Las aplicaciones de estiércol tienen que ser realizadas con sumo cuidado para evitar «quemar» los cultivos y las aplicaciones son de 1 a 7 toneladas/ha. Los residuos de cultivo se colectan para forraje o se dejan para ser pastoreados en el campo.

El barbecho se practica en los sistemas menos intensivos, aunque la tierra se explota por medio del pastoreo, la cosecha de madera y otros productos. La agrupación nocturna del ganado es el método más efectivo de recolectar el estiércol. Las leguminosas como

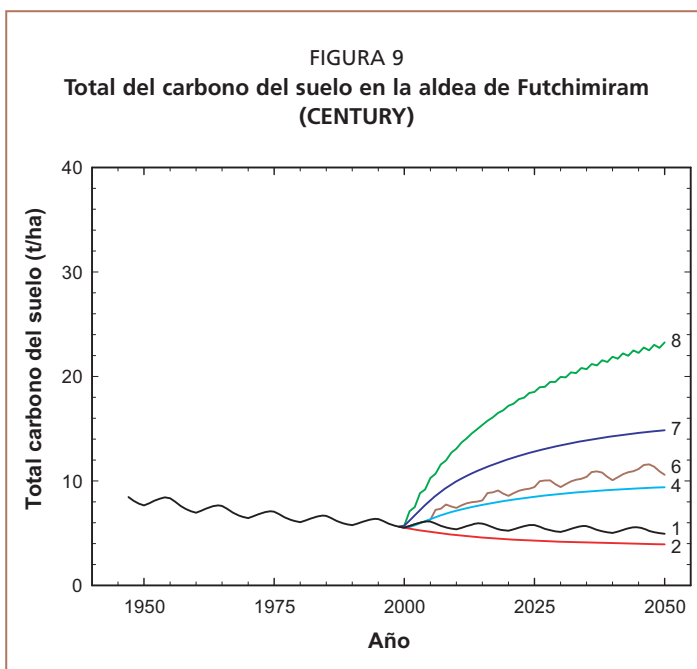
el caupí se siembran principalmente en sistemas altamente intensivos para facilitar el ingreso de nitrógeno. Los fertilizantes inorgánicos son escasos y rara vez están disponibles en el momento óptimo.

SITIOS DE ESTUDIO

Los sitios de estudio cubren un amplio rango de densidad poblacional e incluyen las tres categorías de intensidad agrícola. Los suelos y cultivos sembrados son similares en todas las categorías (Harris, 2000). Inicialmente, al modelo CENTURY se le establecieron los parámetros con un sistema natural de pastos, bosque y pastoreo. Se programó un fuego de intensidad media durante 10 días y ocurría un evento relacionado con un fuego de alta intensidad cada 30 días. Hace mil años, comenzaron los episodios de tala y quema y se incorporaban dos campañas de cultivo de mijo, de forma repetida cada 60 años. En el siglo XIX, la frecuencia de eventos de cultivo se incrementó a un ciclo de 30 años y luego a una vez cada 15 años a comienzos del siglo XX.

i. Futchimiram, estado de Borno

Es un sistema agropastoral de baja intensidad o extensivo, variable en las prácticas de cultivo. Algunas tierras han quedado degradadas en la actualidad. El modelo CENTURY se ejecutó para los últimos 60 años con ciclos alternos de cinco años de pastoreo y cultivo de mijo. Los residuos de cultivo son pastoreados y no existen otras aplicaciones. Esta práctica actual produce un declive gradual y persistente en el carbono del suelo (Figura 9). El nivel estimado está ligeramente por encima del valor del carbono medido para los suelos cultivados que promedian entre 3,5 y 4,4 toneladas/ha. El modelo RothC también predice que la práctica actual disminuirá ligeramente el carbono del suelo en los próximos 50 años (Cuadro 12). Los escenarios que se muestran en la Figura 9 y que se detallan en el Cuadro 13, comparan las prácticas actuales



Escenarios descritos en el Cuadro 13.

CUADRO 12

Contenido total de carbono del suelo en la aldea Futchimiram

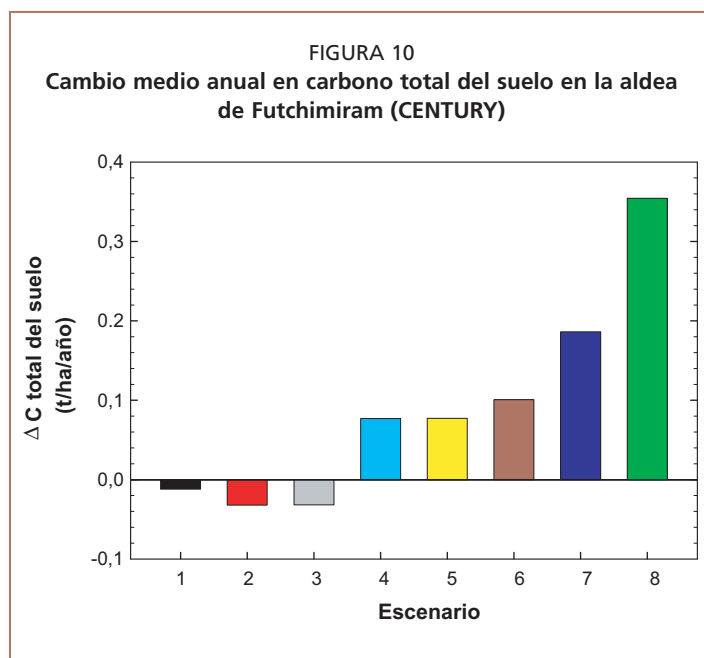
Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	5,54	4,94	-10,8	5,38	5,18	-3,7
2		3,93	-29,1		3,72	-30,9
5		9,40	69,7		9,70	80,3
6		10,57	90,8		12,45	131,4

¹Escenarios descritos en el Cuadro 13.
Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 13

Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Futchimiram

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Cultivo continuo
3	Cultivo continuo, sin pastoreo de residuos, cosecha de los granos solamente
4	Fertilizante inorgánico solamente (100 kg/ha de urea), no pastoreo
5	Promedio de residuos vegetales 0,5 toneladas/ha/año, no pastoreo de residuos
6	5-años de barbecho, 5-años de cultivo, 2 aplicaciones de abonos orgánicos 3 toneladas/ha, pastoreo de residuos
7	Cultivo continuo, abonos orgánicos corral 1,5 toneladas/ha/año, pastoreo de residuos
8	Cultivo continuo, abonos orgánicos 1,5 toneladas/ha/año Residuos vegetales 0,5 toneladas/ha/año, sin pastoreo

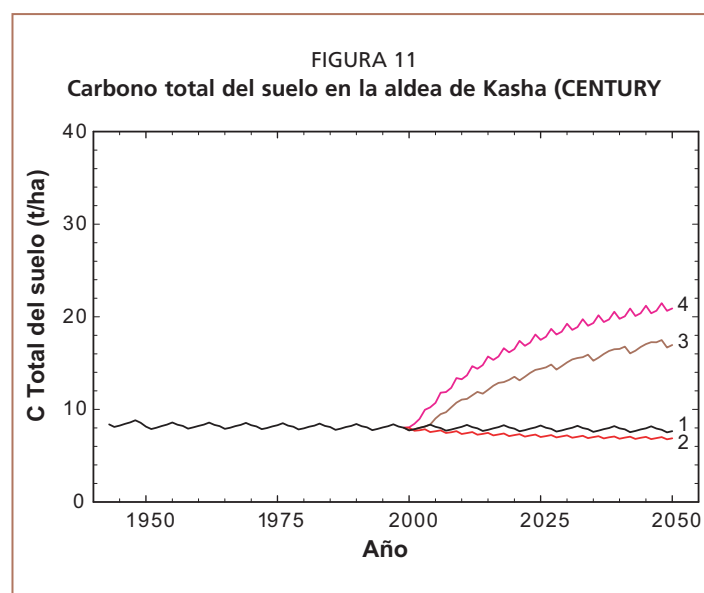


Escenarios descritos en el Cuadro 13.
Fuente: Modelos CENTURY y RothC

(dos aplicaciones de 3 toneladas/ha en el ciclo de cultivo cada cinco años, promedio de 0,6 toneladas/ha/año) tiene un efecto positivo sobre el C del suelo, indicando un incremento de 5 – 7 toneladas de C/ha en los próximos 50 años (0,08 toneladas de C/ha/año). Las Figuras 9 y 10 muestran los resultados de escenarios futuros utilizando diferentes combinaciones de barbecho y aplicaciones orgánicas. El incremento gradual en el carbono del suelo ocurre con los abonos orgánicos, retención de los residuos vegetales y evitando el pastoreo después de la cosecha. En este caso, el contenido de C del suelo se eleva de seis a 24 toneladas de C/ha en 50 años.

Efecto de los fertilizantes inorgánicos

El uso de fertilizantes inorgánicos sin ninguna otra aplicación orgánica, y sin pastoreo o barbecho (Escenario 4), conduce a un incremento modesto de la captura de carbono (0,08 toneladas de C/ha/año).



con aplicaciones de fertilizante inorgánico, abono de corral, residuos de plantas y pastoreo. La Figura 10 ilustra el cambio promedio anual esperado en el carbono del suelo en un período de 50 años.

Efectos de la pérdida del barbecho

Eliminar el período de barbecho (Escenario 2) produce como resultado un declive mayor del carbono del suelo en la medida que transcurren los años. Ambos modelos pronosticaron reducciones similares (Figura 9 y Cuadro 12). Prevenir el pastoreo de los residuos de cultivo bajo estas condiciones (Escenario 3) tiene muy poco efecto sobre el carbono del suelo (Figura 10).

Efecto de las aplicaciones orgánicas

La aplicación de abonos de corral

Resumen

Este sistema no produciría un balance positivo en el carbono del suelo sin aplicaciones orgánicas. Aunque los fertilizantes inorgánicos pueden conducir a la captura de carbono, estos acarrear un costo que dará como resultado un balance total negativo del contenido de carbono.

ii. Kasha, estado de Yobe

Es un sistema agropastoral de baja intensidad que cubre las tierras bajas, las tierras altas y algunas áreas de tierras húmedas. Aquí solo se modelan los suelos de las tierras bajas. Existen cultivos intercalados de

leguminosas y granos, y los residuos de cultivos se usan como alimento para el ganado. La aplicación de abono a los campos es baja y se realizan barbechos prolongados con presencia de arbustos.

Los parámetros se establecieron para los últimos 50 años, con un ciclo de siete años, que comprendió cuatro años de pastoreo y tres años de cultivo de mijo-caupí-mijo. Se aplicó abono de corral (0,75 toneladas/ha) en el primer año de cada ciclo de cultivos. Los suelos cultivados poseen contenidos de carbono de 4,5-7,0 toneladas/ha. El modelo CENTURY calculó un contenido actual de carbono de 7,7 toneladas/ha (Figura 11) y el RothC provee un resultado similar (Cuadro 14). Ambos modelos sugieren que con la práctica actual el sistema está próximo a un estado de equilibrio.

Efecto de los barbechos y las aplicaciones orgánicas

Eliminar el barbecho de la práctica actual (Escenario 2) conduce a un ligero declive del carbono del suelo en los años subsiguientes (Figuras 11 y 12). Aplicar 3 toneladas/ha de abono de corral a cada cultivo de mijo (promedio 1,3 toneladas/ha/año durante un ciclo de siete años) produciría un incremento marcado en el carbono del suelo (Cuadros 14 y 15) representando una tasa de secuestro de carbono de 0,18 toneladas/ha/año (Figura 12). Este incremento podría mejorar más si se eliminara el barbecho debido a que la dosis de aplicación de abono promediaría entonces dos toneladas/ha/año (Figuras 11 y 12).

Resumen

Los escenarios establecidos para Kaska ilustran el efecto de los períodos de barbecho sobre el contenido de carbono del suelo. Cuando el régimen de cultivo añade poca materia orgánica al suelo, los barbechos a menudo tendrán un efecto positivo siempre que se manejen correctamente. Sin embargo, si la práctica de cultivo está acumulando cantidades significativas de materia orgánica en el suelo, cualquier interrupción, como es el caso del barbecho, disminuiría el potencial total de secuestro de carbono.

iii. Dagaceri, estado de Jigawa

Es una región que experimenta una rápida intensificación. Es un sistema agropastoral con barbechos

CUADRO 14
Contenido total de carbono en la aldea Kaska

Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	7,73	7,64	-1,2	7,33	7,87	7,4
3		16,94	119,1		15,57	112,4

¹Escenarios descritos en el Cuadro 15.

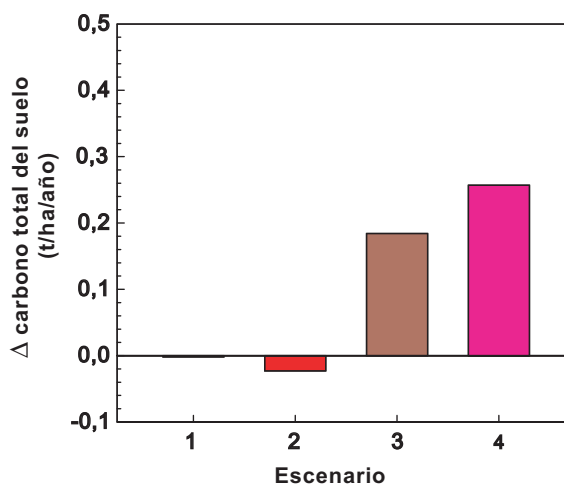
Fuente: Modelos CENTURY y RothC.

CUADRO 15
Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Kaska

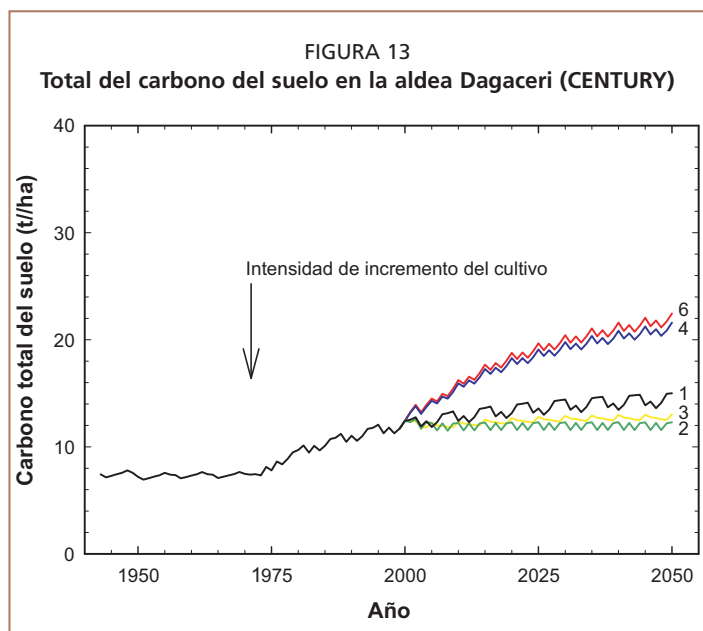
Escenario	Land management
1	Práctica actual
2	Cultivo continuo, mijo - caupí
3	Cultivo- barbecho, AC 3 toneladas/ha a mijoo
4	Cultivo continuo, AC 3 toneladas/ha a mijo

AC - Abono de corral.

FIGURA 12
Cambio medio anual en carbono total del suelo en la aldea de Kaska (CENTURY)



Escenarios descritos en el Cuadro 15

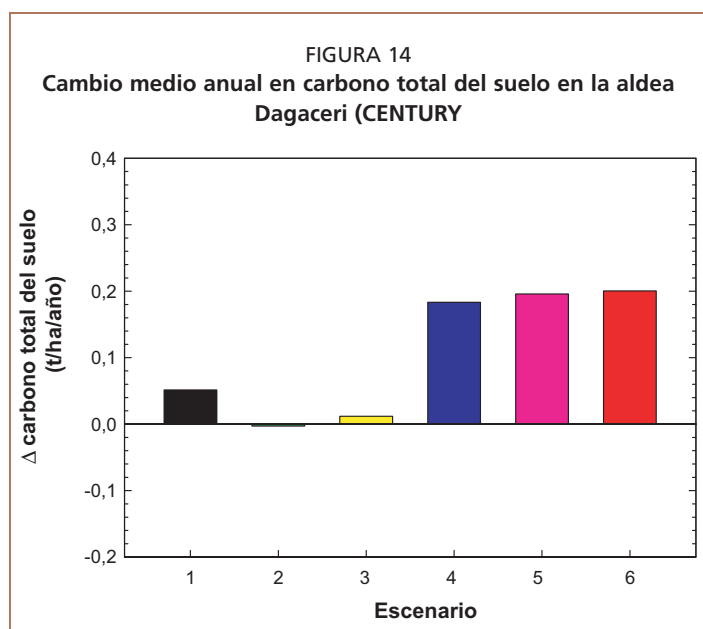


¹Escenarios descritos en el Cuadro 17.

CUADRO 16
Contenido total de carbono en la aldea Dagaceri (modelos CENTURY y RothC)

Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	12,43	15	20,7	14,69	20,43	39,1
5		22,22	78,8		29,55	101,2

¹Escenarios descritos en el Cuadro 17.



Escenarios descritos en el Cuadro 17.

de arbustos o arbustos pequeños. El período de duración del barbecho ha disminuido en la medida que se ha expandido la tierra arable. Se siembran, tanto leguminosas como granos pero la degradación de la tierra constituye un problema. En la medida en que se acortan los períodos de barbecho, los campesinos dependen cada vez más de los abonos para mantener la fertilidad del suelo.

El establecimiento de los parámetros para el modelo CENTURY inicialmente fue el mismo que para la región Kaska, pero luego, alrededor de 30 años atrás, en el modelo el cultivo se incrementó a cinco años de cada siete. El mijo y el caupí se sembraron de forma alterna con 1,5 toneladas/ha de abono añadidos a cada cultivo de mijo (promedio 0,64 toneladas/ha en un ciclo de siete años).

La aplicación de abono adicional está asociada con el incremento de los resultados en la intensidad de cultivo y el incremento correspondiente del carbono del suelo, pronosticado por ambos modelos, continúa en los años subsiguientes (Figura 13 y Cuadro 16). Las mediciones de campo varían según la intensidad de cultivos previa y promedian entre tres y siete toneladas de C/ha.

Efectos de los barbechos y las aplicaciones orgánicas

La aplicación de abono a cada cultivo de mijo se incrementó a tres toneladas/ha en todos los escenarios (2-6). Las tasas de fijación de carbono de 0,18-0,20 toneladas/ha pueden lograrse con pequeñas diferencias, dependiendo de si el barbecho es retenido y los residuos de cultivos son pastados o no (Escenario 4 - 6, Figura 13 y 14, Cuadro 17). Sin embargo, si la eliminación del barbecho está acompañada de la cosecha de todo el material que está sobre el suelo

(Escenario 3), el secuestro de carbono es virtualmente detenida, incluso si se mantienen las aplicaciones de estiércol.

La eliminación total de los árboles del sistema, produce como resultado una pérdida neta del carbono del suelo, a pesar de la aplicación adicional de abono orgánico.

Resumen

Este sistema muestra que la materia orgánica del suelo puede mantenerse e incrementarse, incluso con la intensificación del cultivo, siempre que existan leguminosas en la rotación. Sin embargo, el manejo cuidadoso de los residuos de cultivo es vital, de la misma forma que lo es la preservación de los árboles.

iv. Tumbau, aldea cercana a Kano

Es un área agrícola sumamente intensiva. Toda la tierra está cultivada, aunque la degradación afecta, según se informa, menos del 10 por ciento del área. Hay un sistema altamente integrado de producción de cultivos y ganado, con cultivos intercalados de leguminosas, uso intensivo de abonos y fertilizantes inorgánicos. Virtualmente no existen tierras de pastoreo, por lo que los animales tienen que alimentarse de residuos de cultivos y del forraje de los campos adyacentes.

Se ejecutó el modelo CENTURY durante los últimos 50 años con una rotación de mijo-caupí, seis toneladas/ha de abono aplicadas al mijo (promedio tres toneladas/ha/año) y cosecha de todo el material vegetal sobre el suelo. Este sistema se encuentra ahora cercano al punto de equilibrio en cuanto a su contenido de carbono en el suelo con 9,8 toneladas de C/ha (Figura 15).

Esto es comparable a un promedio de $10,5 \pm 1,7$ toneladas de C/ha medidas en sitios cultivados. El modelo RothC calcula un valor de 11,4 toneladas/ha para el 2000, pero predice que se alcanzará un mayor contenido total de carbono en el suelo para el 2050 (Cuadro 18).

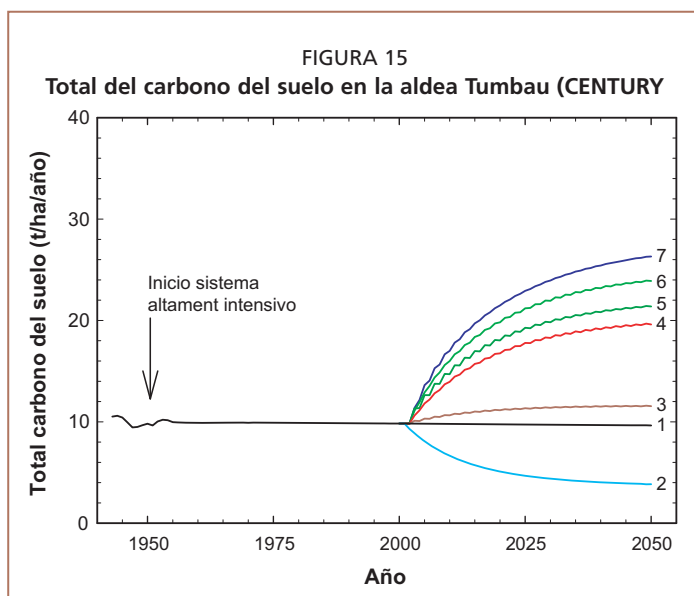
Efectos de las aplicaciones orgánicas

La aplicación adicional de abono de corral tiene un impacto marcado sobre el carbono del suelo, especialmente cuando alcanzan el máximo (7 toneladas/ha) normalmente aplicado en esta región, o sea, una aplicación anual de 6,75 toneladas/ha (Cuadro 19) daría como resultado una retención de 0,20 toneladas de C/ha/año en los próximos 50

CUADRO 17
Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Dagaceri

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Eliminación de los árboles
3	No pastoreo de los residuos, cosecha de todo el material vegetal que existe en la superficie
4	Cultivo continuo, mijo-caupí
5	AC promedio 1,29 toneladas/ha/año, barbecho, pastoreo de residuos, cosecha de los granos solamente
6	No pastoreo de residuos, cosecha de los granos solamente

AC - Abono de corral.



Escenarios descritos en el Cuadro 19.

CUADRO 18
Carbono total del suelo en la aldea Tumbau (CENTURY y RothC)

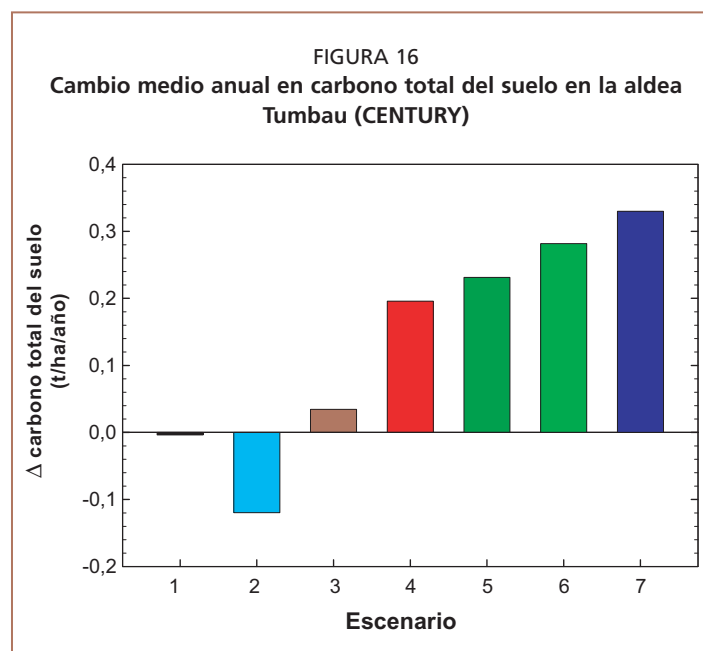
Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	9,82	9,64	-1,8	11,3	13,39	18,5
3		11,54	17,5		14,96	32,4
6		23,9	143,4		31,7	180,5

¹Escenarios descritos en el Cuadro 19.

CUADRO 19
Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, aldea Tumbau

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Fertilizante inorgánico (110 kg/ha urea)
3	AC 3,75 t/ha/año
4	AC 6,75 t/ha/año
5	AC 3,75 t/ha/año, agregar árboles fijadores de nitrógeno
6	AC 6,75 t/ha/año, residuos de plantas 2t/ha/año
7	AC 6,75 t/ha/año, las cosechas de granos

AC - Abono de corral.



Escenarios descritos en el Cuadro 19.

años (Figura 16). Aunque adicionar árboles fijadores de nitrógeno y residuos de plantas a los campos incrementaría el carbono del suelo, los requerimientos de los primeros para la alimentación del ganado, pueden exceder la capacidad del sistema agrícola actual.

Efecto del fertilizante inorgánico

Reemplazar la aplicación de abono en este sistema con fertilizante inorgánico (urea 100 kg/ha, Escenario 2) produce una gran reducción del carbono del suelo, disminuyendo el contenido en más de 0,1 toneladas de C/ha/año.

Resumen

Siempre que retorne una cantidad adecuada de materia orgánica al suelo, estos sistemas de agricultura intensiva deberán mantener el carbono del suelo y también existen posibilidades de secuestro de carbono. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el campo, que no muestran evidencia de disminución en la materia orgánica del suelo, a pesar del incremento en la presión de cultivo. Sin embargo, la habilidad para descifrar el secuestro de carbono futuro dependerá de

un balance cuidadoso entre el cultivo y la cría de ganado y la capacidad total del sistema. Mantener los rendimientos del cultivo mediante la aplicación de fertilizantes inorgánicos como única opción, probablemente producirá pérdidas sustanciales de materia orgánica del suelo.

Conclusiones sobre los casos del norte de Nigeria

La modelación de los datos de las fincas ubicadas en las tierras áridas del norte de Nigeria muestra que el contenido de carbono del suelo puede incrementarse a partir de las cantidades básicas con las diversas tecnologías y prácticas disponibles para los agricultores.

La cantidad total de carbono que puede fijarse utilizando leguminosas, períodos de barbecho, abonos de corral y retención de residuos vegetales, varía entre 0,1 y 0,3 toneladas C/ha/año. Esta cantidad se eleva cuando también se cultivan árboles.

El carbono del suelo se pierde cuando se utilizan solamente fertilizantes inorgánicos para mantener la fertilidad del suelo – alrededor de 0,1 toneladas C/ha/año en los sistemas intensos de la zona Kano. El cultivo continuo produce pérdidas pequeñas de carbono año tras año, donde no se realizan aplicaciones adicionales de materia orgánica. A pesar de la intensificación considerable de los sistemas actuales (acortamiento de los períodos de barbecho), los productores mantienen el contenido de carbono de sus suelos. Los beneficios de mantener árboles en el entorno se muestran en los escenarios modelados.

Estudio de Caso 2

India – estados de Andhra Pradesh y Karnataka

Más de la mitad de los agricultores de la India viven en regiones climáticas que pueden describirse como semiáridas. En las décadas recientes se han encontrado incrementos en los rendimientos de los cultivos que se han atribuido a la revolución verde. Sin embargo, las tecnologías asociadas, por ejemplo el riego y los fertilizantes inorgánicos son caros y no están fácilmente disponibles para los agricultores de menores recursos que habitan las áreas rurales. Estas prácticas pueden conducir a una disminución en la fertilidad del suelo y además dependen de la energía de combustibles fósiles (Butterworth, Adolph y Satheesh, 2002). De hecho, casi dos tercios de la tierra arable en la India dependen únicamente de la lluvia para la producción agrícola. El Instituto de Recursos Naturales (Reino Unido), la Sociedad Deccan para el Desarrollo y el Instituto BAIF para el Desarrollo Rural (India) han estudiado el manejo de la fertilidad del suelo en el distrito Medak en Andhra Pradesh y en el distrito Tumkur en Karnataka. Los trabajos de estas instituciones han demostrado que existe una sensibilización creciente respecto a las tecnologías para mantener y mejorar la fertilidad del suelo e identificaron al menos 14 prácticas diferentes, que van desde el cultivo de leguminosas hasta la producción de composte de lombrices. La mayoría de ellas están relacionadas con el mantenimiento y mejoramiento del contenido de materia orgánica del suelo. Estos estudios proveen una oportunidad para investigar el efecto que pueden tener estas técnicas de mejoramiento de la fertilidad del suelo sobre el secuestro de carbono.

ASPECTOS FÍSICOS

El distrito Medak forma parte del altiplano de la Meseta Deccan que se extiende desde Andhra Pradesh hasta Karnataka. El clima consiste en un período de invierno suave («rabi», noviembre-febrero), un verano cálido y seco (marzo-mayo) y el monzón del suroeste, que es el momento en que se produce más del 80 por ciento de la lluvia («kharif», junio-octubre). El promedio de lluvia es de menos de 900 mm. El mes más caluroso es mayo, justo antes del comienzo de las lluvias, cuando la temperatura máxima diurna puede alcanzar 40 °C. Por el contrario, las temperaturas de la noche pueden disminuir hasta 6 °C en diciembre. La disponibilidad de humedad para el crecimiento de los cultivos está entre 120 y 150 días.

Los principales tipos de suelo son los alfisoles y los vertisoles. Los primeros incluyen suelos rojos lateríticos que comprenden suelos areno francos, franco arenosos y franco arcillo arenosos y generalmente no son salinos. Los vertisoles, o suelos negros, son potencialmente más productivos y con una mayor capacidad de retención de agua, moderadamente alcalinos y con un contenido de sales altamente solubles. Estos comprenden los franco arcillosos, las arcillas y los arcillo limosos. El contenido de materia orgánica de los suelos en el área usualmente es 0,5-1 por ciento. La tierra yace entre los 500-600 m sobre el nivel del mar y queda muy poca vegetación natural. El bosque tropical seco caducifolio ha sido talado casi en su totalidad, excepto en las tierras protegidas por el gobierno.

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Los sistemas agrícolas en esta región tienen un alto grado de integración entre el ganado, los cultivos y los árboles (Pound, 2000). Existe una gran diversidad agrobiológica que

es combinada con las actividades no relacionadas con la agricultura, particularmente en el distrito de Medak. Esta situación genera un uso eficiente de los recursos limitados de la tierra y actúa como un seguro contra las impredecibles condiciones meteorológicas, un problema frecuente en las tierras áridas. El tamaño promedio de las fincas es 2,6 ha (Butterworth, Adolph y Satheesh, 2002). Los pequeños productores marginales cultivan al menos ocho variedades de cultivos en media hectárea. La pequeña población ganadera ha ido en descenso de manera continua desde la década de 1980. Esto tiene implicaciones importantes para la agricultura, no sólo porque los desechos animales son una fuente importante de materia orgánica para los suelos, sino también debido a que los bueyes hacen una contribución vital como animales de tiro, no sólo en el transporte del estiércol de los corrales. La labranza comúnmente se lleva a cabo con implementos muy rudimentarios. El mayor cambio hacia la mecanización de los cultivos se ha observado en Karnataka.

Los cultivos predominantes que se siembran en el distrito Medak son arroz, sorgo y maíz, mientras que la caña de azúcar con riego es un cultivo comercial importante. Los cultivos principales que se siembran en Karnataka son arroz, sorgo, mijo africano, mijo perla, frijol gandul, frijol mungo y maní (Reddy, 2001).

Los agricultores dan alta prioridad al mantenimiento de la fertilidad del suelo, mientras que los fertilizantes inorgánicos se clasifican como pobres para ello. Sin embargo, muchos agricultores los usan debido a que las alternativas orgánicas a menudo no están disponibles y a que los fertilizantes inorgánicos son subsidiados. La importancia relacionada con la fertilidad del suelo puede tener consecuencias imprevistas, tales como la venta de abono de corral por los productores de menores recursos. El efecto de esto sería un incremento en la fertilidad y el contenido de carbono de algunos suelos mientras se degradan las áreas vecinas.

MODELACIÓN DEL CARBONO DEL SUELO EN LAS ALDEAS EN ESTUDIO

Al modelo de agroecosistemas CENTURY se le definieron los parámetros utilizando datos del clima y el suelo. Para lograr su equilibrio se ejecutó comenzando con un sistema de pastos/bosque para representar la vegetación de esta región. Se incluyeron en el ciclo el pastoreo de baja densidad y los fuegos que ocurrían cada 30 años. Hace mil años, los efectos de la interferencia humana se introdujeron con eventos de tala y quema, conjuntamente con el cultivo de granos. La frecuencia de estos eventos se incrementó lentamente y hacia el comienzo del siglo XX se incluyeron períodos de cultivo de cuatro años de cada diez. A mediados del siglo XX, un año de barbecho con pastoreo fue seguido de cuatro años de cultivo (sorgo en «kharif», y caupí en «rabi»). El cultivo consistió de labranza a mano o arada con bueyes y la utilización de azada. El promedio de aplicaciones anuales de abonos de corral fue de 2,1 toneladas/ha durante un ciclo de cinco años y se cosechó todo el material superficial. En los últimos 30 años del siglo XX, se ajustó el cultivo para reflejar las prácticas actuales. El modelo RothC se ejecutó para establecer un equilibrio a mediados del siglo XX y luego se establecieron los parámetros utilizando las prácticas actuales y las cantidades de residuos vegetales calculados mediante el modelo CENTURY.

Los datos de cinco tipos de finca y localidades se presentan a continuación:

- i. finca extensa en tierras áridas y con mezcla de prácticas agrícolas (Lingampally);
- ii. finca pequeña en tierras áridas, sin ganado (Lingampally);
- iii. finca extensa con uso de riego (Yedakulapaly);
- iv. finca pequeña en tierras áridas y con mezcla de prácticas agrícolas (Metalkunta);
- iv. finca pequeña en tierras áridas y con mezcla de prácticas agrícolas (Malligere).

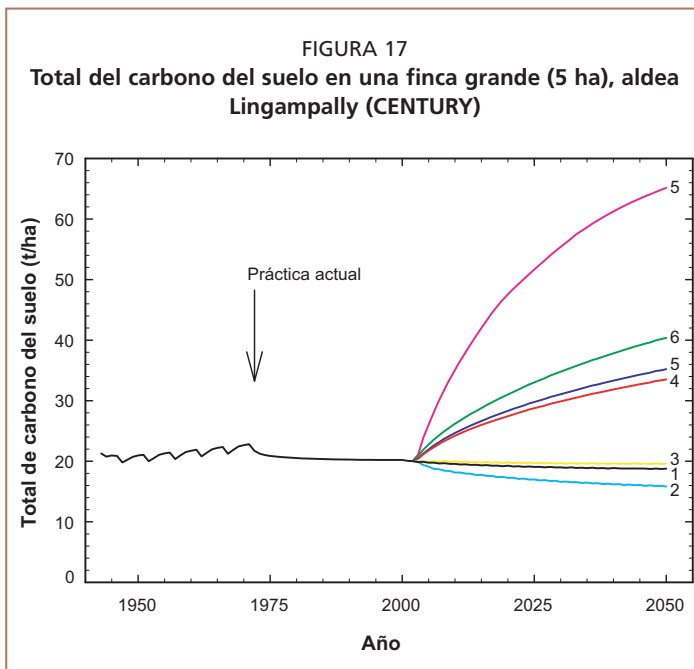
i. Análisis del manejo de la tierra en una finca grande de explotación mixta, aldea Lingampally, distrito Medak

Es una propiedad de algo más de cinco hectáreas sobre suelos predominantemente vertisoles. El ganado se alimenta con forraje y residuos vegetales de los campos. Por lo tanto, ningún material vegetal se devuelve al suelo. A los animales también se les permite pastar en las tierras locales. El ganado suministra estiércol (2-3 toneladas/ha/año). El fertilizante inorgánico se ha utilizado en los años recientes (30-45 kg/ha de fosfato di-amónico). Los cultivos sometidos a modelación son sorgo («kharif», de mayo a septiembre) y caupí («rabi», de octubre a enero).

El modelo CENTURY predice que la práctica agrícola actual está dando como resultado un contenido de carbono del suelo casi estable, de alrededor de 19 toneladas/ha, con una disminución en el año 2050 a casi 1,5 toneladas/ha (Figura 17). El modelo RothC muestra un contenido total de carbono del suelo más bajo, de 16 toneladas/ha en el año 2000, disminuyendo a 15 toneladas en el 2050 (Cuadro 20). Los escenarios que se muestran en la Figura 17 (detallados en el Cuadro 21) comparan las prácticas actuales con las aplicaciones de fertilizantes inorgánicos, abonos de corral, abonos verdes, composte de lombrices, residuos vegetales incorporados al suelo y el cultivo de árboles. La Figura 18 indica la variación promedio anual en el carbono del suelo en un período de 50 años.

Efecto de los fertilizantes inorgánicos

Si se detuviera la aplicación de fertilizante inorgánico y se incrementara la aplicación de abonos orgánicos para reemplazar la aplicación de nitrógeno y mantener los rendimientos (incrementar la aplicación de abono en alrededor de 0,6 toneladas/ha, Escenario 3), el carbono del suelo se incrementaría en solo 0,85 toneladas/ha para el 2050 (Figura 17) y no habría ganancia neta del carbono del suelo (Figura 18). Por el contrario, reemplazar todas las aplicaciones orgánicas con fertilizante inorgánico daría



Escenarios descritos en el Cuadro 21.

CUADRO 20
Carbono total del suelo en una finca grande de la aldea Lingampally

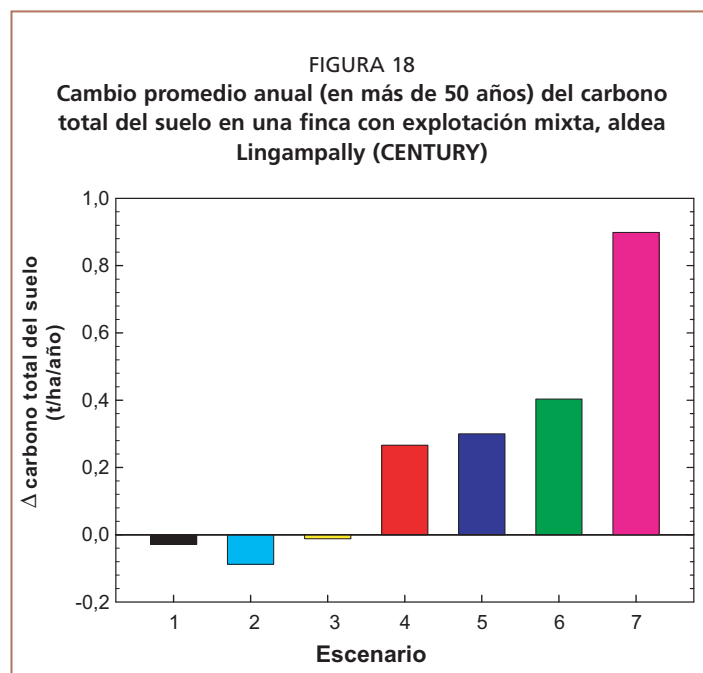
Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	20,2	18,8	-7,2	18,3	17,9	-2,3
4		33,5	65,9		28,3	54,2
6		40,4	100		31,0	68,8

¹Escenarios descritos en el Cuadro 21.
Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 21
Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra en una finca grande en la aldea de Lingampally

Escenario	Manejo de tierra
1	Práctica actual
2	AC 3 t/ha/año
3	AC 3 t/ha/año, abono verde 500 kg/ha/año, composte de lombrices 250 kg/ha/año
4	Como la práctica actual pero incorpora los residuos de suelo
5	AC 3 t/ha/año, dejar los residuos de las plantas
6	AC 3 t/ha/año, residuos de plantas, abono verde, composte de lombrices
7	AC 6 t/ha/año, residuos de las plantas, abono verde, composte de lombrices

AC - Abono de corral.



Escenarios descritos en el Cuadro 21.

como resultado una disminución en el carbono del suelo de más de cuatro toneladas/ha para el 2050, una pérdida de 0,09 toneladas/ha/año (Escenario 2). De esta forma, el fertilizante inorgánico genera una caída en el carbono del suelo.

Efecto del abono de corral

Duplicar la aplicación actual de abonos de corral en un año, a 4-6 toneladas/ha (Escenario 4) sin aplicar fertilizante inorgánico tiene un efecto marcado sobre el carbono del suelo: se fijan 0,27 toneladas/ha/año en los próximos 50 años (Figura 18), sin que el sistema se encuentre todavía en un punto de equilibrio (Figura 17). De manera similar, el modelo RothC muestra un incremento continuo, alcanzando 28,3 toneladas/ha, aproximadamente en el mismo tiempo (Cuadro 20).

Efecto de otros insumos orgánicos

Adicionar solamente cantidades modestas de vermicompost (100 kg/ha) y abono verde (250 kg/ha) además de duplicar el abono de corral (Escenario 5) tiene un efecto limitado, mientras que aplicar dos toneladas/ha de residuos vegetales hace una mayor contribución, 0,4 toneladas/ha/año (Figura 18).

Efecto de los árboles

Esta finca tiene la capacidad de introducir árboles fijadores de nitrógeno, tales como *Glyricidia*, que crea el Escenario 7 cuando se le adiciona como práctica al abono y los residuos vegetales. Luego de 10 años, los árboles se cortan anualmente para obtener madera. El resultado es un incremento muy significativo en la captura de carbono con 0,4 toneladas/ha/año (Figure 18). Este incremento excede en unas cuatro veces el que se obtendría mediante el incremento de la aplicación de abono.

Resumen

Los dos modelos para el carbono del suelo muestran resultados muy similares para este sistema agrícola. La práctica actual es casi sostenible y muestra solo una pequeña disminución (< 2 por ciento) en el carbono del suelo como pronóstico para los próximos 50 años. Sin embargo, actualmente el ganado está pastando sobre otro suelo y por consiguiente, parte del carbono está siendo extraído de otro lugar.

Se requeriría un incremento modesto del material orgánico para remplazar los fertilizantes inorgánicos que se usan actualmente. Aplicaciones orgánicas adicionales podrían incrementar la captura de carbono del suelo de manera sustancial. La introducción de árboles es probable que tenga un efecto marcado sobre el carbono del suelo e incrementaría de forma simultánea el almacenamiento de carbono en la parte superior de las plantas.

Sin embargo, puede haberse introducido una mayor proporción de árboles que los que resultan factibles para el modelo y, por lo tanto, podría sobreestimarse el grado de secuestro de carbono que puede llevarse a cabo de forma efectiva en este sistema

ii. Análisis del manejo de la tierra en una finca pequeña en un sistema de secano, aldea Lingampally, distrito Medak

Esta propiedad tiene menos de una hectárea y el vertisol está muy degradado. En el pasado se criaron animales, pero luego fueron vendidos y actualmente el sorgo es el único cultivo importante. Todo el follaje es cosechado y sacado del campo. Se aplica abono de corral en diferentes momentos, equivalente a 3,9 toneladas/ha/año.

El modelo CENTURY muestra como las prácticas actuales han producido un declive marcado en el carbono del suelo, alcanzando alrededor de 13 toneladas/ha en el 2000 (Figura 19). Sin embargo, el sistema está alcanzando su punto de equilibrio y no se pronostica que la práctica actual de manejo de la tierra cause una disminución adicional del carbono del suelo en los próximos 50 años. El modelo RothC refleja un contenido de carbono ligeramente más alto en el 2000, pero pronostica un declive ligeramente mayor (1,8 toneladas/ha) para el 2050 (Cuadro 22).

Efecto de los residuos retenidos

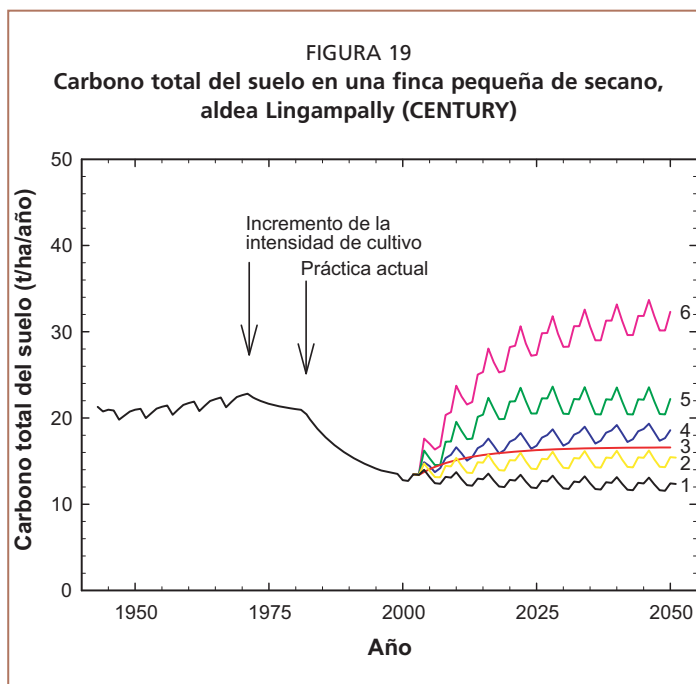
Cosechar solo los granos y luego incorporar los residuos de cultivo al suelo produciría un balance positivo de carbono, fijando 0,05 toneladas/ha/año (Figura 20 y Escenario 2, Cuadro 23).

Efecto del abono de corral

Incrementar la aplicación de abono de corral en un 50 por ciento a seis toneladas/ha/año incrementaría el carbono del suelo en alrededor de 3,8 toneladas/ha para el año 2050 (Figura 20 y Escenario 3). El modelo RothC pronostica un incremento de 3,0 toneladas/ha.

Efecto de los cultivos de leguminosas

Adicionar caupí a la rotación (cuatro toneladas de abono de corral/ha, cosechar solamente el grano, Escenario 4) fijaría 0,12 toneladas/ha/año. Introducir árboles fijadores de nitrógeno (cortarlos cada dos años después de los primeros 10 años) para el sistema sorgo como único cultivo, con abono orgánico a razón de cuatro toneladas/ha, produciría una tasa de retención de 0,19 toneladas/ha/año (Escenario 5).



Escenarios descritos en el Cuadro 23.

CUADRO 22
Carbono total del suelo en una pequeña finca de secano, aldea Lingampally

Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	12,77	12,41	-2,8	16,07	14,92	-7,2
3		16,58	29,8		19,11	18,9

¹Escenarios descritos en el Cuadro 23.
Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 23
Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo en una pequeña finca de secano, aldea Lingampally

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Solo cosecha de granos
3	AC 6 t/ha/año
4	Inclusión de leguminosas (caupi)
5	Inclusión de árboles, ej, <i>Glyricidia</i>
6	Todos los agregados

AC - Abono de corral.

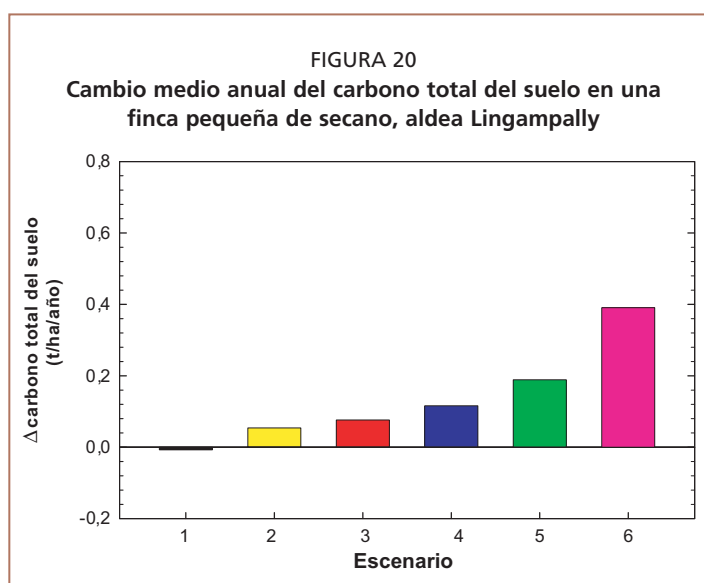
Combinar todos los tratamientos conduciría a una tasa de captura de carbono de 0,39 toneladas/ha/año (Escenario 6, Figura 20).

Resumen

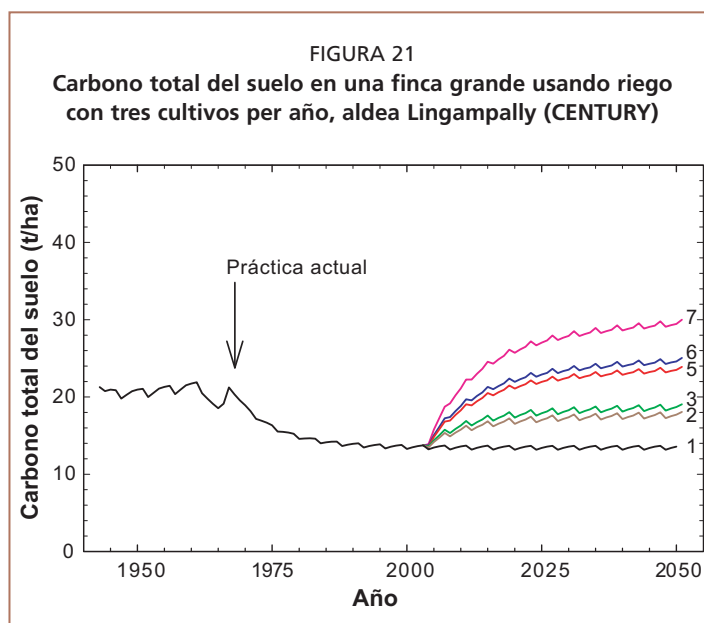
La modelación sugiere que la pérdida de carbono del suelo puede revertirse en este tipo de finca, incluso sobre el suelo degradado. Además de las aplicaciones directas, este ejemplo ilustra la importancia de los cultivos de leguminosas y la inclusión de árboles como *Glyricidia*.

iii. Análisis del manejo de la tierra en una finca grande con uso de riego, aldea Yedakulapaly, distrito Medak

La finca comprende 4,5 ha de Vertisol con riego. El agua se bombea desde un pozo. Para los propósitos de modelación, se aplicaron cinco cm de agua cuando la capacidad de retención del suelo es < 25 por ciento durante el estado de crecimiento vegetativo del cultivo. Originalmente se criaba ganado, pero se vendió hace algunos años, debido a que no había suficiente personal para cosechar el forraje y atender al ganado durante el pastoreo. Actualmente, sólo se emplean fertilizantes inorgánicos –650 kg/ha/año de fosfato diamónico y 150 kg/ha/año de urea. Los cultivos se siembran en las tres estaciones (verano-sorgo, «Kharif» –leguminosas, «rabi»– leguminosas) y todo el material superficial se cosecha y se retira del campo. Para los propósitos de la modelación se utilizó caupí como cultivo de leguminosa.



Escenarios descritos en el Cuadro 23.
Fuente: CENTURY y RothC.



El modelo CENTURY calculó que las prácticas actuales han agotado el carbono del suelo hasta 13,26 toneladas/ha y predice que no habrá una reducción adicional en los próximos 50 años (Figura 21).

El modelo CENTURY calculó que las prácticas actuales han agotado el carbono del suelo hasta 13,26 toneladas/ha y predice que no habrá una reducción adicional en los próximos 50 años (Figura 21).

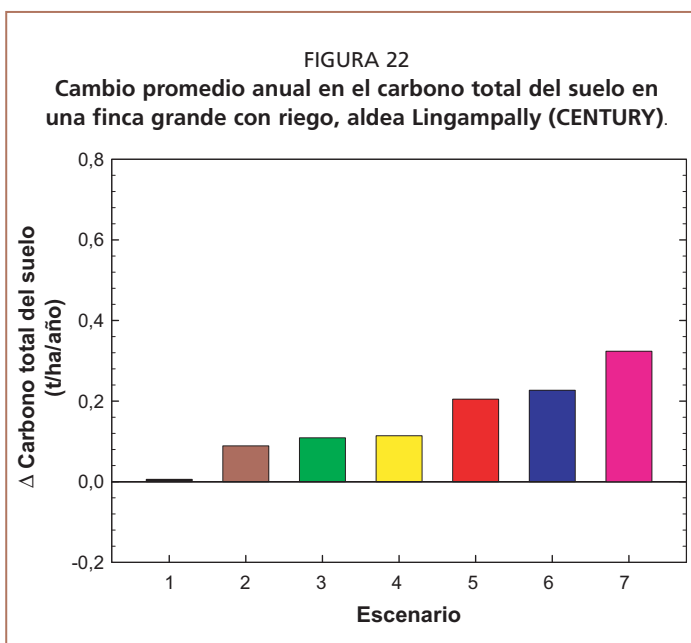
Efecto de aplicaciones orgánicas

Adicionar tres toneladas de abono de corral/ha/año como en el Escenario 2 (Cuadro 24) incrementaría el carbono del suelo en 4,4 toneladas/ha para el 2050, fijando 0,09 toneladas/ha/año (Figura 22). Incluir 500 kg/ha/año de abono verde y 250 kg/ha/año de composte de lombrices (Escenario 3) incrementaría el carbono orgánico del suelo en una tonelada más, fijando 0,11 toneladas/ha/año (Figura 21). Un incremento similar en el carbono del suelo puede

obtenerse sin aplicaciones orgánicas extra, cosechando el grano y devolviendo los residuos vegetales al suelo (Figura 22). Cuando se aplican tres toneladas de abono de corral/ha/año y solo se cosecha el grano (Escenario 5), el carbono del suelo se incrementa en más de 10 toneladas/ha para el 2050, equivalente a 0,20 toneladas/ha/año. Realizar todas las aplicaciones orgánicas e incrementar el componente de abono de corral a seis toneladas/ha, fijaría 0,32 toneladas/ha/año.

Resumen

Una combinación de dejar los residuos del cultivo y añadir estiércol podría hacer una contribución significativa al carbono del suelo en este tipo de sistema de producción agropecuaria, en los cuales las prácticas actuales han causado un declive significativo en su contenido de carbono. Sin embargo, el fertilizante inorgánico y el riego continúan teniendo un costo de carbono, dando como resultado incrementos menos significativos en los diferentes escenarios. Las aplicaciones de abono de corral pueden compensar los nutrientes aplicados en los fertilizantes inorgánicos. Por ejemplo, eliminar el fertilizante inorgánico del Escenario 6 mantiene el rendimiento sin afectar el carbono del suelo. Eliminar el riego del escenario anterior no tiene un efecto perjudicial sobre el carbono del suelo, pero aparentemente tampoco parece haber un efecto sobre el rendimiento.



Escenarios descritos en el Cuadro 24

CUADRO 24

Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo en una finca grande de secano, aldea Lingampally

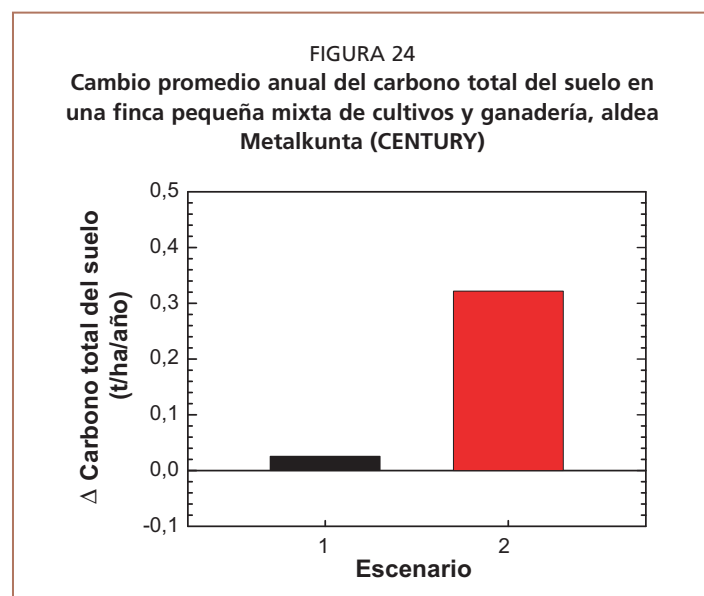
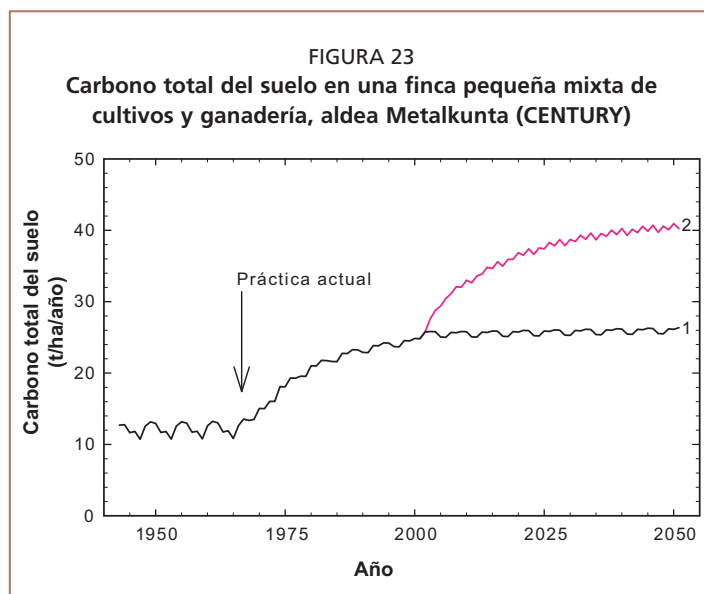
Escenario	Manejo del suelo
1	Práctica actual
2	AC 3 t/ha/año
3	AC 3 t/ha/año, abono verde 500 kg/ha/año + composte de lombriz 250 kg/ha/año
4	Como 1 + incorporación de residuos al suelo
5	AC 3 t/ha/año, dejar residuos de plantas
6	AC 3 t/ha/año, residuos plantas + abono verde + composte de lombriz
7	AC 6 t/ha/año, residuos plantas + abono verde + vermi compost

AC - Abono de corral.

iv. Análisis del manejo del suelo en una finca pequeña con mezcla de cultivos y ganado, aldea Metalkunta, distrito Medak

Esta propiedad de 2,7 ha tiene una gran variedad de cultivos sobre suelos rojos lateríticos. Hay ganado como parte de la propiedad, se practica un buen programa de siembra y también hay árboles alrededor de la finca. Se cosecha toda la producción sobre la superficie, de manera que los residuos vegetales puedan suministrarse como alimento a los animales. El ganado también pasta en tierras cercanas y el forraje se trae de otros lugares. La aplicación promedio anual de abono orgánico es de dos toneladas/ha y a la tierra se le añade composte de lombriz.

Al modelo CENTURY se le establecieron los parámetros con una rotación de sorgo-caupí-mijo-caupí-maíz-caupí para reflejar el variado programa de cultivos. El modelo se ejecutó con este escenario desde finales de la década de 1960 y sugiere que este sistema de manejo de la tierra habría duplicado aproximadamente el contenido de carbono en el suelo a 25 toneladas/ha para el año 2000 y alcanzaría 26 toneladas de C/ha



CUADRO 25

Contenido total de carbono del suelo en una pequeña finca mixta de cultivos y ganadería, aldea Metalkunta

Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	24,9	26,1	5,2	25,0	29,2	16,7
2		40,9	64,7		49,2	96,6

¹Escenarios descritos en el Cuadro 26.

Fuente: Modelos CENTURY y RothC.

para el 2050 (Figura 23). El modelo RothC estima unas 25 toneladas de C/ha en el 2000, incrementándose a 29,1 toneladas/ha en el 2050 (Cuadro 25 y 26). Este sistema con la integración de cultivos y ganado tiene un impacto positivo sustancial sobre el carbono del suelo.

Efectos de la retención de residuos de cultivos

La incorporación de los residuos de cultivos al suelo (Escenario 2) incrementaría significativamente el contenido de carbono, secuestrando 0,3 toneladas de carbono por ha/año en los próximos 50 años (Figura 24) y el contenido de carbono del suelo alcanzaría las 40,9 toneladas para el año 2050. El modelo RothC calcula que dejar los residuos de cultivos incrementaría el carbono del suelo a 49,2 toneladas/ha (Cuadro 25).

Resumen

El productor practica actualmente un buen manejo de la tierra y los modelos calculan que el contenido de carbono del suelo se ha incrementado ya de manera sustancial. Sin embargo, esto se está logrando en parte mediante el pastoreo del ganado sobre las tierras y el hecho de traer el forraje desde afuera. Esto significa que el carbono está siendo extraído de manera efectiva desde otra parte. De esta manera, aunque incorporar los residuos de cultivo al suelo hace una contribución posterior al carbono del suelo, esto requeriría traer más forraje para sustituir los residuos vegetales, lo cual implica nuevamente la extracción de carbono.

v. Análisis del manejo de la tierra en una finca pequeña, aldea Malligere, distrito Tumkur, estado de Karnataka

Esta finca cubre dos hectáreas en un suelo arenoso rojo. Para el transporte se alquilan tractores, se mantiene el ganado y a éste se le permite alimentarse de los residuos de los cultivos, pero se trae forraje adicional. Los cultivos «kharif» modelados son el sorgo y el mijo y el cultivo «rabi» es el caupí. Como promedio, se aplican tres

se alquilan tractores, se mantiene el ganado y a éste se le permite alimentarse de los residuos de los cultivos, pero se trae forraje adicional. Los cultivos «kharif» modelados son el sorgo y el mijo y el cultivo «rabi» es el caupí. Como promedio, se aplican tres

toneladas/ha/año de abono de corral. También se utilizan fertilizantes inorgánicos: 75 kg/ha/año de fosfato di-amónico y 75 kg/ha/año de urea.

La simulación con el modelo CENTURY muestra que las prácticas actuales están incrementando el carbono del suelo y que este continuará elevándose hasta unas 2,7 toneladas/ha en los próximos 50 años, alcanzando casi 20 toneladas de C/ha en el 2050 (Figura 25). El modelo RothC también muestra que la práctica actual está incrementando el carbono del suelo. El carbono del suelo en el año 2000 se predice que será de 19,8 toneladas/ha, elevándose hasta 24,3 toneladas/ha en el año 2050 (Cuadros 27 y 28).

Efecto de las aplicaciones orgánicas

El fertilizante inorgánico tiene un costo de carbono, por lo que reemplazar el nitrógeno suministrado captura carbono a 0,17 toneladas/ha/año. El nivel de carbono del suelo alcanza 25,7 toneladas en el 2050 (Figura 26, Escenario 2 en el Cuadro 27). El modelo RothC predice un efecto mucho mayor sobre el carbono orgánico del suelo al reemplazar el fertilizante con abono de corral: se pronostica que el carbono del suelo se eleve hasta 34,2 toneladas/ha para el año 2050.

Efecto de los árboles

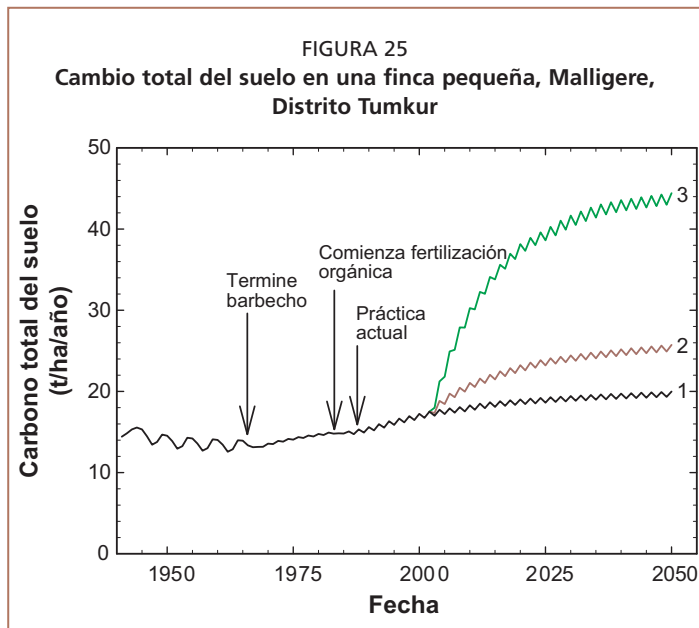
Los árboles, tales como *Glyricidia* (Escenario 3), son cosechados anualmente después de diez años para obtener madera. Añadir árboles produce una diferencia muy grande, incrementando la captura de carbono a 0,54 toneladas/ha/año (Figura 26).

Resumen

Ambos modelos muestran tendencias similares; el cambio de fertilizante inorgánico a orgánico incrementa el carbono del suelo de manera significativa. El modelo RothC predice un incremento mayor. El cese de las aplicaciones de fertilizante inorgánico elimina el balance negativo de carbono asociado con su producción, y la adición de árboles puede ser suficiente para compensar los ingresos de carbono que se generan del forraje obtenido fuera del sistema de la finca. Sin embargo, si se utilizan tractores para transportar el forraje, el balance de carbono del sistema probablemente será negativo.

CUADRO 26
Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, pequeña finca mixta de cultivos y ganadería, aldea Metalkunta

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Residuos de hojas de plantas



Escenarios descritos en el Cuadro 28.

CUADRO 27
Carbono total del suelo en una finca pequeña, aldea Malligere, Distrito Tumkur

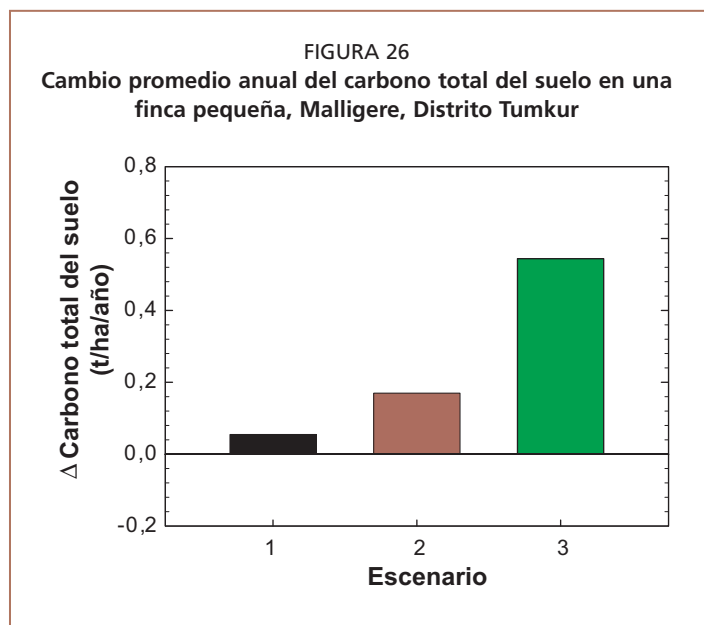
Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	17,24	19,97	15,8	19,82	24,32	22,7
2		25,73	49,2		34,2	72,6

¹Escenarios descritos en el Cuadro 28.
Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 28
Escenarios para modelar practicas de manejo de la tierra en una finca pequeña, aldea Malligere

Escenario	Manejo del suelo
1	Práctica actual
2	Reemplazar fertilizante inorgánico con AC
3	Incluir árboles, Glyricidia

AC - Abono de corral



Escenarios descritos en el Cuadro 28.

Conclusiones sobre los casos de la India

La modelación de los datos de las fincas para las tierras áridas de la India muestra que el contenido de carbono del suelo puede incrementarse con gran variedad de tecnologías y prácticas disponibles para los campesinos.

También muestra que algunas prácticas producen como resultado una disminución sustancial en el contenido de carbono, particularmente el uso de fertilizante inorgánico como la única fuente de nutrientes y el cultivo continuo de cereales. En la finca extensa (cinco ha) con tecnologías mixtas, el fertilizante inorgánico genera la pérdida de 0,1 toneladas/ha/año, mientras que el uso, tanto de abono de corral, como

de abono verde, vermicompost y/o residuos vegetales produce incrementos de 0,2-0,4 toneladas/ha/año.

La agroforestería incrementa sustancialmente el secuestro de carbono por debajo del suelo a 0,9 toneladas/ha/año. Los modelos muestran declives del carbono del suelo en las fincas pequeñas que cultivan solo sorgo y en aquellas que siembran tres cultivos con riego por año de manera intensiva – una pérdida de cinco toneladas de C/ha en un período de 25 años. Sin embargo, parece que estas caídas pueden revertirse en 5-10 años con la adopción de rotaciones con leguminosas, la aplicación de abono de corral y el cultivo de árboles.

La finca pequeña con tecnologías mixtas, con rotaciones de cereales y caupí y ganado, incrementa el carbono del suelo desde un contenido de 13 toneladas de C/ha a 24,8 toneladas de C/ha en 25 años. Este puede incrementarse hasta más de 40 toneladas de C/ha en los próximos 50 años si se adicionan residuos vegetales al suelo.

Para la cuantificación total del carbono utilizado o secuestrado en estas fincas, es importante considerar el alto costo de energía que se requiere para la elaboración del fertilizante nitrogenado (65,3 MJ/kg para el N, 7,2 MJ/kg para el fósforo, 6,4 MJ/kg para el potasio) (Pretty *et al.*, 2002), el uso de operaciones mecanizadas en las fincas, el costo del riego y el transporte mecánico y el aspecto relacionado con la transferencia de carbono en el alimento o del ganado mismo, desde una finca hacia otra o desde las áreas de pastoreo hacia los campos cultivados.

Existen beneficios evidentes para los productores y el carbono del suelo si se incluyen cultivos de leguminosas en las rotaciones y en los sistemas agroforestales.

Estudio de caso 3

Kenya – distrito Makueni

Las tierras áridas y semiáridas ocupan alrededor de dos tercios de la superficie de Kenya (FAO, 1999b). Los factores principales que limitan el desarrollo de los cultivos en estas áreas son las lluvias erráticas, el mal manejo del ganado y la decadente fertilidad del suelo causada por el cultivo continuo (Kenya Agricultural Research Institute, 1999). El Instituto de Investigaciones sobre las Tierras Áridas ha examinado la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en la región semiárida de Kenya, registrando los aspectos físicos del ambiente conjuntamente con las prácticas de manejo de la tierra en cuatro aldeas del distrito Makueni (Mbuji, 2000). Estas abarcan un conjunto de fechas de establecimiento entre las décadas de 1950 y 1970. Un problema de gran importancia para la agricultura en esta región ha sido la frecuencia con la que ha sido afectada por la sequía. Las sequías reducen las ganancias de los agricultores y, por consiguiente, tienen escasos incentivos para realizar inversiones en la fertilidad del suelo.

ATRIBUTOS FÍSICOS

El clima de esta región se caracteriza por dos períodos lluviosos: las lluvias cortas, que producen la mayor parte de las precipitaciones en octubre-diciembre y las lluvias largas de marzo-mayo. Sin embargo, dentro del promedio de lluvia anual (600-670 mm) está la ocurrencia periódica de sequías (Gichuki, 2000). La temperatura media anual está en el rango de 21-24 °C. La altitud es de 800-1 600 m, y la vegetación natural es de praderas y tierras densamente pobladas de arbustos o bosques. El fuego afectó el área en el pasado y las praderas se utilizan para el pastoreo. Los suelos mayormente son ferrasoles (ródicos y xánticos) y naturalmente poseen bajo contenido de fósforo (Mbuji, 2000).

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Se practica el cultivo múltiple anual con la incorporación ocasional de barbechos de un año, aunque este último es cada vez menos común. Cada año hay dos campañas de siembra. Los cultivos principales son maíz y leguminosas para grano seco, con el mijo y el sorgo recomendados como cultivos de época seca. Los rendimientos varían considerablemente entre los distintos años dependiendo de la lluvia; como promedio el maíz produce una tonelada/ha, aunque las variedades modernas producen cuatro toneladas/ha (Mbogoh, 2000).

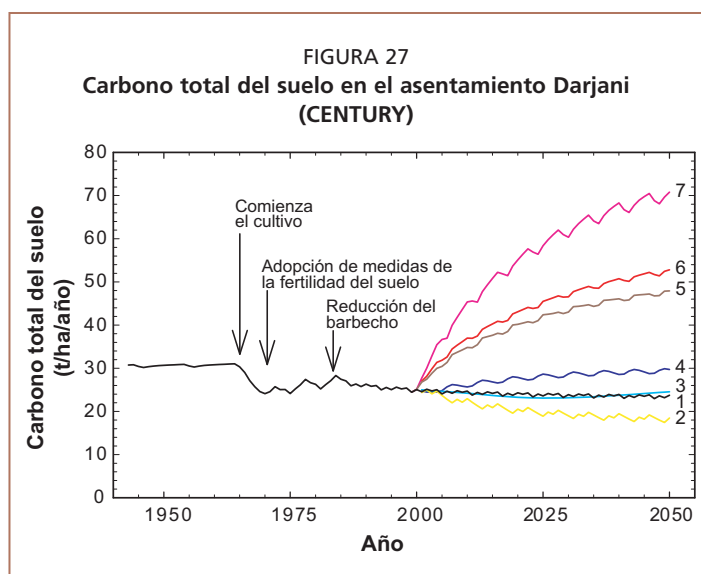
La población animal no es grande debido a que resulta difícil alimentarla adecuadamente durante los períodos de sequía. En consecuencia, el estiércol es muy escaso y muy valioso; en razón de esta escasez su aplicación a menudo se hace en forma rotativa. Se realizan pocas inversiones en las tierras de pastoreo y los animales se mantienen usualmente en corrales durante la época de lluvia. Se utilizan pocos fertilizantes, especialmente debido a que en la época de sequía causan «quemaduras» en los cultivos. Los residuos de cultivos son quemados, se les suministran a los animales como alimentos o se incorporan al suelo. La labranza se hace con arados simples tirados por bueyes; el uso del azadón y palas para cavar son también comunes. La fuerza de trabajo es escasa y constituye una limitación para los campesinos. Se utilizan un conjunto de técnicas de manejo de los residuos de los cultivos y de labranza para conservar la humedad y para proteger los suelos contra la erosión (Pretty, Thompson y Kiara, 1995; Gichuki, 2000).

Los bosques están siendo eliminados, aunque la tala selectiva se practica con frecuencia para salvar aquellas especies que suministran productos útiles. Muchos

campesinos también plantan árboles, especialmente frutales y otros como la morera para la producción de gusanos de seda (Gichuki, 2000). Las aldeas en estudio están ubicadas a lo largo de un gradiente de precipitación, que decrece desde Kymausoi a través de Kaiani y Darjani, hasta Athi Kamunyuni. El modelo CENTURY se ejecutó para establecer su equilibrio, utilizando un escenario de praderas – árboles con quema de pastos cada 10 años y fuegos más extensos cada 30 años.

i. Darjani

Los cultivos principales en este asentamiento son: mijo, henequén, caupí y sorgo y el pasto natural puede sostener un pastoreo de baja intensidad. El establecimiento de la aldea tuvo lugar en la década de 1960. El contenido promedio de carbono en los suelos donde se encuentran los arbustos es de $37,6 \pm 7,5$ toneladas/ha y para los suelos cultivados es de $33,7 \pm 2,8$ toneladas/ha (Mbuvi, 2000).



Escenarios descritos en el Cuadro 30

CUADRO 29

Carbono total del suelo en el asentamiento de Darjani

Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	25,04	23,74	-5,2	34,57	34	-1,6
5		47,92	91,4		59,3	71,5
6		52,79	110,8		65,67	90,0

¹Escenarios descritos en el Cuadro 30.

Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 30

Escenarios para modelar las prácticas de manejo de la tierra, asentamiento Darjani

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Remoción del barbecho
3	Solo fertilizante inorgánico, quema de residuos, sin barbecho
4	Solo fertilizante inorgánico, quema de residuos, barbecho
5	AC 4,5 t/ha/año, quema de residuos, barbecho
6	AC 4,5 toneladas/ha/año, sin quema de residuos, barbecho
7	AC 6,75 t/ha/año, sin quema de residuos, barbecho

AC - Abono de corral.

Una ejecución del modelo CENTURY para establecer su equilibrio suministró un valor de carbono del suelo de 31,0 toneladas/ha en 1964. Este se encuentra justamente dentro del rango esperado para los suelos vírgenes. El modelo se ejecutó luego para unos 35 años adicionales, reproduciendo el manejo actual del suelo. Este comenzó con un ciclo de seis años de cultivos alternos de maíz y mijo durante cuatro años, seguido de dos años de barbecho. La labranza se hizo con arado de reja y el deshierbe fue manual. Los residuos de cultivo se quemaron. En 1971, comenzaron las aplicaciones de abono de corral, promediando 1,5 toneladas/ha en un ciclo de seis años y comenzaron a adoptarse las medidas de conservación. En 1983, el período de barbecho se redujo a un año de cada seis y para el 2000 el carbono del suelo modelado fue de 24 toneladas/ha (Figura 27). Esta reducción de siete toneladas/ha a partir del nivel modelado para el suelo vírgen no cultivado, es mayor que la disminución de cinco toneladas/ha medida en el campo. La continuación de esta práctica de manejo lleva a predecir una pérdida adicional de 1,3 toneladas de C/ha para el año 2050 (Figura 27 y Cuadros 29 y 30).

El modelo RothC se ejecutó para establecer su equilibrio, utilizando el nivel actual del carbono de un suelo de arbustos y luego se utilizó para predecir el efecto de manejo

de la tierra utilizando insumos de las plantas, calculados mediante el modelo CENTURY. El modelo RothC predijo que el carbono del suelo sería 34,6 toneladas/ha en 1999, el cual se encuentra dentro del valor medido de una tonelada/ha. En los próximos 50 años, el modelo RothC pronostica una disminución adicional de 0,6 toneladas de C/ha (Cuadro 29).

Efecto de la eliminación del barbecho

El modelo CENTURY predice que eliminar el barbecho de la práctica actual daría como resultado una reducción del carbono del suelo (6,6 toneladas/ha) para el año 2050 (Escenario 2, Figura 27).

Efecto de los abonos orgánicos

Añadir un promedio de 4,5 toneladas/ha/año de abono de corral durante el ciclo de cultivo – barbecho de seis años, conduce a una tasa de secuestro de carbono de 0,5 toneladas/ha/año (Escenario 5, Figura 28). Si se incorporan los residuos de cultivo al suelo en lugar de ser quemados, unas 4,9 toneladas de C/ha adicionales pueden acumularse para el 2050, representando una tasa de retención de 0,6 toneladas/ha/año (Figura 27 y 28). El modelo RothC predice incrementos similares (Cuadro 29). El incremento de las aplicaciones de abono de corral a 6,75 toneladas/ha/año elevaría la tasa de retención a 0,9 toneladas/ha/año (Figura 28).

Efecto del fertilizante inorgánico

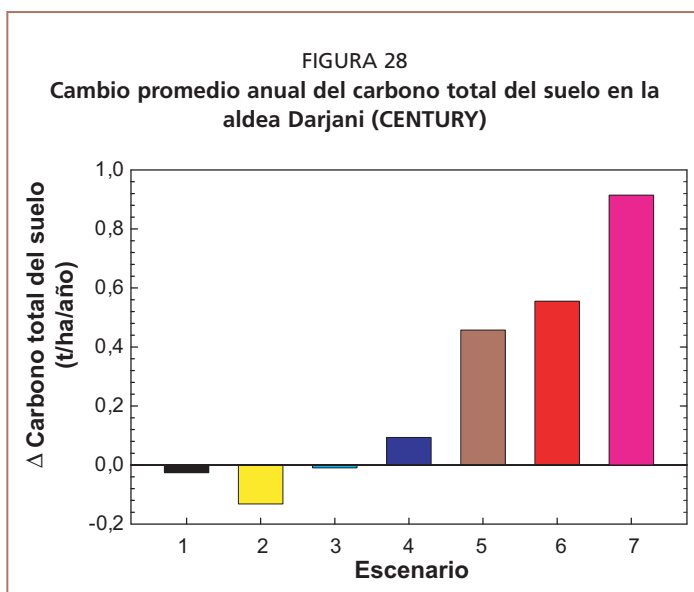
El reemplazo de todas las aplicaciones orgánicas con fertilizante inorgánico (100 kg de N/ha/año, Escenario 4) da como resultado solo un incremento moderado en el secuestro de carbono del suelo (0,09 toneladas/ha/año). Sin embargo, la cantidad de nitrógeno aplicado es equivalente a alrededor de cinco veces la que se añadió en el abono de corral para el escenario de prácticas agrícolas actuales. Si el período de barbecho se elimina y solo se añade fertilizante inorgánico (Escenario 3), el sistema se comporta en forma muy similar al escenario de las prácticas actuales, a pesar del nitrógeno adicional.

Resumen

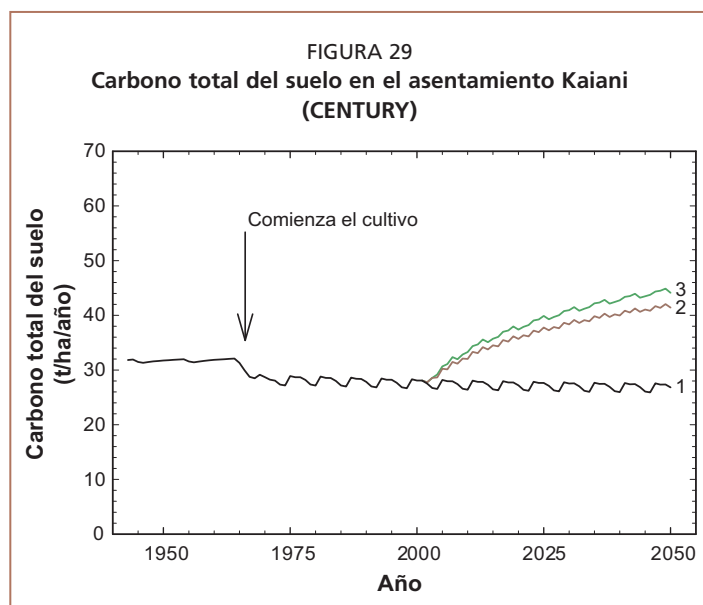
La importancia del abono de corral como un insumo orgánico está demostrada, de la misma forma que lo es la incorporación de residuos al suelo en lugar de quemarlos. Aunque la adición de fertilizante inorgánico puede incrementar el secuestro de carbono, la elevación del carbono por unidad de nitrógeno añadida es mucho menos eficiente que si se añade el abono de corral. La energía indirecta contenida en el fertilizante nitrogenado constituye un costo adicional de carbono.

ii. Kaiani

El asentamiento de Kaiani tiene un sistema agrícola similar al de Darajani. El modelo CENTURY subestimó el contenido bruto actual del carbono del suelo en casi 32 toneladas/ha comparado con los valores medidos de $41,5 \pm 3,1$ toneladas/ha. El modelo CENTURY se ejecutó nuevamente con un escenario para reflejar los últimos



Escenarios descritos en el Cuadro 30.



CUADRO 31
Carbono total del suelo en la aldea de Kaiani

Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	28,07	26,81	-4,5	42,32	43,89	3,9
2		41,4	47,5		62,82	48,8
3		42,73	52,2		65,16	54,3

¹Escenarios descritos en el Cuadro 32.

Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 32
Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, aldea Kaiani

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	AC 2 t/ha/año
3	AC 2 t/ha/año, residuos de plantas 0,3 t/ha/año

Abono de corral.

40 años de cultivo utilizando un sistema mijo-caupí, con pastoreo de los residuos vegetales y aplicación de 4,5 toneladas/ha de abono orgánico, una vez en el ciclo de seis años. Hubo un año de barbecho. Se calculó que la labranza había reducido el contenido de carbono del suelo a 28,1 toneladas/ha para el año 2000, el cual se comparó con el valor medido para un suelo cultivado de $30,5 \pm 4,8$ toneladas/ha. Se predice que el contenido de carbono del suelo pueda decrecer a algo más de una tonelada/ha en los próximos 50 años (Figura 29, Cuadros 31 y 32).

Después del establecimiento de los parámetros del contenido de carbono para los suelos vírgenes, el modelo RothC muestra muy poco efecto de la labranza cuando se utilizan los insumos de las plantas calculadas por el modelo CENTURY. A diferencia del modelo CENTURY, el modelo RothC predice una ligera elevación en el carbono del suelo para el 2050 (Cuadro 31).

Efecto de los insumos orgánicos

Incrementos modestos en las dosis de aplicación de abono de corral (0,75 toneladas/ha/año a 2 toneladas/ha/año) dan como resultado una acumulación marcada de carbono en el suelo (Figuras 29 y 30). Añadir residuos vegetales adicionales incrementa mucho más aún la tasa de secuestro a 0,3 toneladas/ha/año.

El modelo RothC predice incrementos proporcionales muy similares en el carbono del suelo (Cuadro 31).

Resumen

Los modelos sugieren que el sistema actual está cerca o, de hecho, está en su punto de equilibrio. Es posible alcanzar tasas razonables de secuestro de carbono (0,3 toneladas/ha/año) con incrementos modestos en las aplicaciones de abono orgánico.

iii. Kymausoi

Kymausoi está situada en una zona algodonera marginal, donde se cultivan también maíz, frijol gandul y henequén. Se practica la cría de ganado y la aldea se estableció en la década de 1950. El promedio del contenido de carbono de los suelos vírgenes es de $38,4 \pm 4,8$ toneladas/ha, mientras que para los suelos cultivados el promedio es de 33,5 toneladas/ha con un rango de 17,4–38,9 toneladas/ha. Se ejecutó el modelo de agroecosistemas CENTURY para establecer su equilibrio y suministró un nivel de

carbono para los suelos vírgenes de 28,5 toneladas/ha en 1955, lo cual está por debajo de la concentración media para los suelos de esta área. El modelo se ejecutó después para reflejar el sistema agrícola desde que se estableció la aldea. Esto incluyó cultivo continuo de maíz con pastoreo de los residuos de cultivo y una dosis promedio de aplicación de abono orgánico de 0,75 toneladas/ha/año. El manejo de la conservación y fertilidad del suelo comenzó a finales de la década de 1960, incrementando la dosis de aplicación promedio de estiércol a una tonelada/ha para reflejar esto. El modelo CENTURY estimó el contenido de carbono del suelo en 17,6 toneladas/ha para el año 2000, el cual está entre los valores más bajos medidos. Se prevé que ocurra una disminución de menos de una tonelada de C/ha en los próximos 50 años.

Efecto de los insumos orgánicos

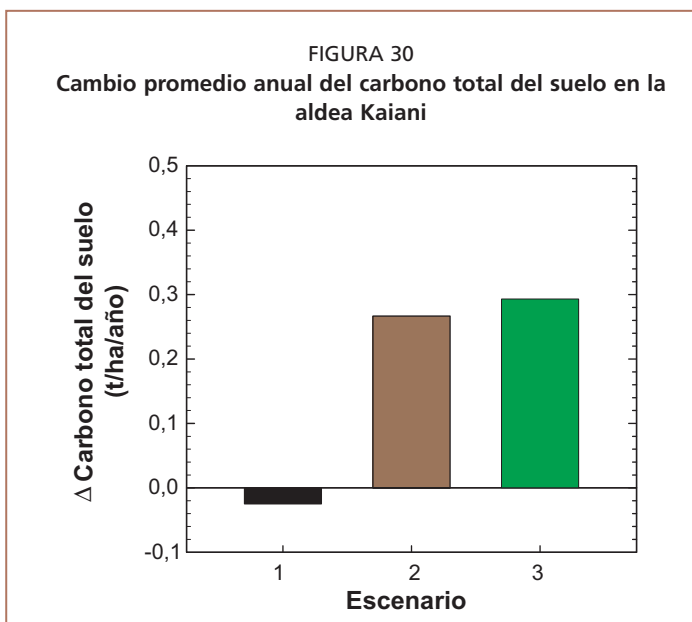
Aplicar residuos vegetales adicionales e incrementar la dosis de aplicación de abono de corral a 1,5 toneladas/ha/año (Escenarios 2 y 3) incrementará los niveles de carbono del suelo por lo menos en un 50 por ciento (Cuadro 33).

Efecto de los cultivos de leguminosas

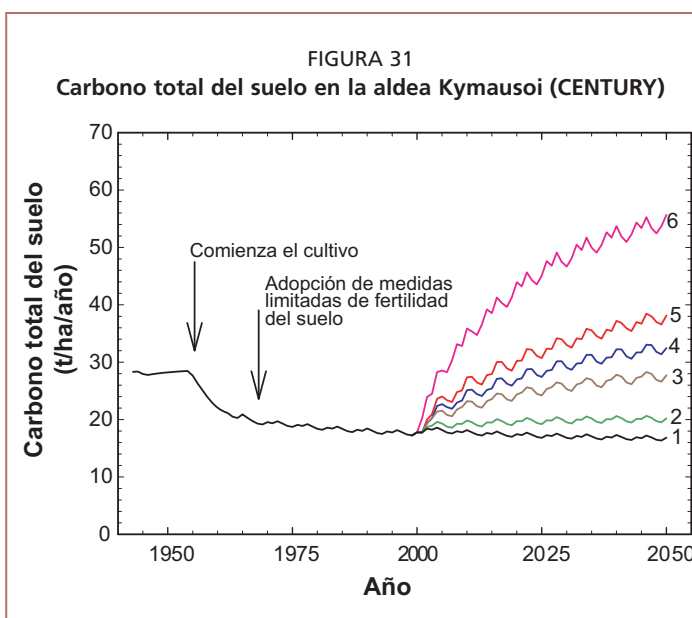
Introducir un cultivo de leguminosa como el caupí en el sistema, puede producir un mejoramiento significativo en la captura de carbono (Escenarios 4-6, Figuras 31 y 32), incrementando la tasa de 0,2 a 0,3 toneladas/ha/año con las mismas dosis de aplicación de abono de corral.

Resumen

Este ejemplo ilustra la ventaja de incluir cultivos de leguminosas en la rotación. Un sistema agrícola que utiliza cuatro toneladas/ha/año de abono de corral, manteniendo los residuos vegetales en el campo y con



Escenarios descritos en el Cuadro 32.

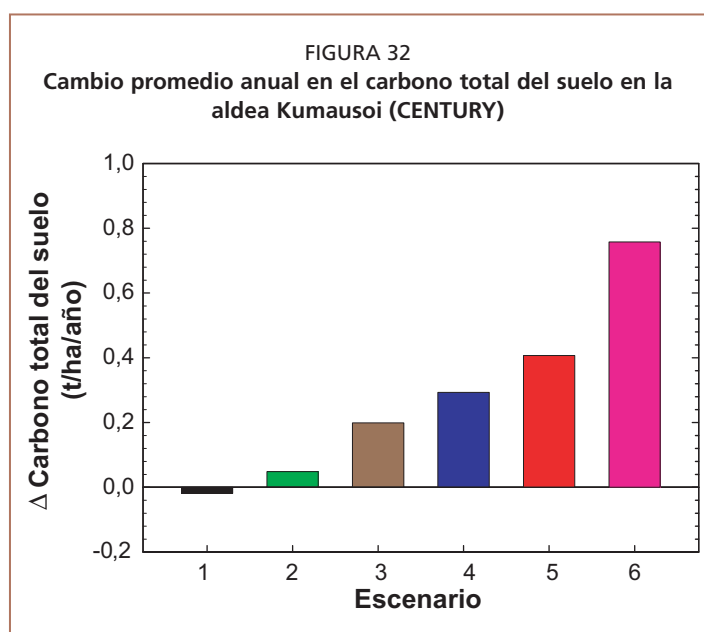


Escenarios descritos en el Cuadro 33.

CUADRO 33
Carbono total del suelo en la aldea Kymausoi

Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)			(t/ha)		
1	17,76	16,82	-5,3	35,69	34,79	-2,5
2		20,18	13,6		43,4	21,6
3		27,7	56,0		58,86	64,9

¹Escenarios descritos en el Cuadro 34.
Fuentes: CENTURY y RothC



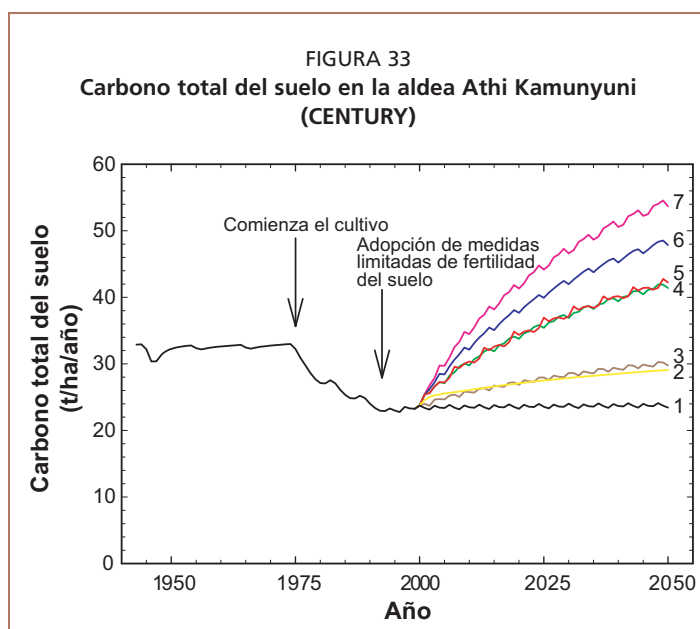
Escenarios descritos en el Cuadro 34.

CUADRO 34

Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, asentamiento Kymausoi

Escenario	Manejo del suelo
1	Práctica actual
2	Residuos de plantas 0,3 t/ha/año
3	AC 1,5 t/ha/año + residuos de plantas 0,6 t/ha/año
4	AC 1,5 t/ha/año + residuos de plantas 0,6 t/ha/año, leguminosa (caupí)
5	AC 2 t/ha/año + residuos de plantas 0,6 t/ha/año, leguminosa (caupí)
6	AC 4 t/ha/año, residuos de plantas 0,6 t/ha/año, leguminosa (caupí)

AC - Abono de corral.



Escenarios descritos en el Cuadro 35

una leguminosa en la rotación, puede acumular 0,7 toneladas/ha/año. La práctica actual está reduciendo el contenido total de carbono del suelo.

iv. Athi Kamunyuni

Esta aldea está situada en una zona agroecológica ubicada en tierras bajas. Las fincas solo sustentan una baja densidad de animales de pastoreo y el área está en el límite para la producción de mijo, caupí y henequén de secano. El asentamiento se estableció en la década de 1970. Al modelo CENTURY se le establecieron los parámetros para el comienzo del cultivo/pastoreo durante los últimos 30 años. Se sembró mijo y se aplicó un promedio de 0,75 toneladas/ha durante los últimos seis años.

El valor del carbono del suelo modelado por el sistema CENTURY coincidió con el nivel actual de los suelos vírgenes ($33,2 \pm 3,2$ toneladas C/ha). El modelo CENTURY calculó que hubo una disminución en el carbono del suelo de alrededor de nueve toneladas/ha después de 25 años del comienzo del asentamiento. Este es un valor muy cercano a las mediciones actuales que muestran que los suelos cultivados contienen $24,0 \pm 3,0$ toneladas de C/ha. Continuando este escenario en el siglo XXI resulta que el sistema casi ha alcanzado un nuevo estado de equilibrio (Figura 33). El modelo RothC calcula un efecto más bajo de la labranza sobre el carbono del suelo, prediciendo un valor de 29,7 toneladas de C/ha en el 2000 y una ligera disminución en los próximos 50 años (Cuadros 35 y 36).

Efecto de los insumos orgánicos

Incrementar la dosis media actual de aplicación de abono de corral de 0,75 toneladas/ha/año a 1,25 o 2,25 toneladas/ha/año (Escenario 3 y 4) incrementa las tasas de secuestro de carbono en 0,12 – 0,37 toneladas/ha/

año (Figura 33 y 34). Si se dispone de abonos orgánicos adicionales para posteriores aplicaciones se podría producir un incremento en las tasas de secuestro de carbono de hasta 0,6 toneladas/ha/año.

Efecto de los barbechos

Reducir el período de barbecho de dos años a uno (Escenario 5) tiene muy poco efecto sobre el carbono del suelo, suponiendo que se mantengan los insumos orgánicos. Usar esta región solamente para la cría de animales daría como resultado un incremento en el carbono del suelo puesto que el sistema retornó a condiciones similares que existían antes de comenzar la labranza (Escenario 2). La tasa de captura de carbono es muy similar a la del Escenario 3, donde se añadió un promedio de 1,25 toneladas/ha de abono de corral anualmente. El modelo RothC predice un incremento mucho menor en el carbono del suelo cuando se retorna a la cría de ganado. Esto refleja el hecho de que este modelo inicialmente calculó una disminución menor en el total de carbono del suelo, después del inicio de la labranza.

Resumen

El nivel de carbono del suelo en este sistema recientemente establecido, podría restablecerse a los niveles iniciales y luego elevarse más mediante la aplicación de abono de corral. Las condiciones en esta localidad no son ideales para la labranza y un retorno al sistema de pastoreo por si solo también podría restablecer el carbono del suelo al nivel previo a la instalación del asentamiento.

Conclusiones de los casos de Kenya

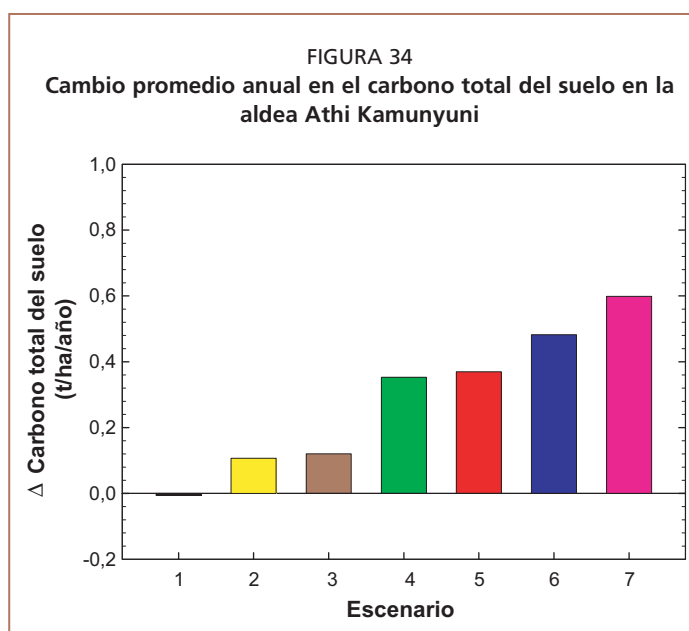
La modelación de los datos de cuatro fincas en comunidades del Distrito semiárido Makueni, nuevamente muestra que el contenido de carbono puede incrementarse cuando se utilizan una serie de tecnologías y prácticas que ya están disponibles para los productores.

Aplicaciones modestas de material orgánico en forma de abono de corral y residuos vegetales pueden conducir al secuestro de carbono, particularmente cuando los

CUADRO 35
Carbono total del suelo en el asentamiento Athi Kamunyuni

Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
1	23,75	23,45	-1,3	29,68	28,29	-4,7
2		29,09	22,5		31,40	5,8
3		29,77	25,3		42,76	44,1

¹Escenarios descritos en el Cuadro 36
Fuente: CENTURY y RothC.



Escenarios descritos en el Cuadro 36.

CUADRO 36
Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo en la aldea Athi Kamunyuni

Escenario	Manejo de la tierra
1	Práctica actual
2	Pastoreo
3	AC 1,25 t/ha/año
4	AC 2,25 t/ha/año
5	AC 2,27 t/ha/año, barbecho solo un año
6	AC 3,3 t/ha/año
7	AC 3,9 t/ha/año, residuos de plantas 0,3 t/ha

AC - Abono de corral.

sistemas están o se encuentran cerca del estado de equilibrio del contenido de carbono del suelo.

La eliminación de los períodos de barbecho de los sistemas existentes da como resultado pérdidas de 0,1 toneladas de C/ha/año. Los fertilizantes inorgánicos nuevamente son una elección ineficiente para suministrar nutrientes a las plantas cuando el carbono del suelo constituye un problema. Quemar los residuos vegetales no resulta provechoso.

La combinación de las leguminosas en las rotaciones, 2-4 toneladas/ha/año de abono de corral, además de 0,6 toneladas/ha/año de residuos vegetales, produce la tasa más alta de secuestro de carbono en todos los casos de tierras áridas -0.7 toneladas de C/ha/año. A dosis menores de abono de corral, pero manteniendo los barbechos, combinados con las leguminosas en la rotación, se pueden lograr incrementos en el carbono del suelo de 0,3 a 0,4 toneladas/ha/año.

Estudio de caso 4

Argentina – provincias de Catamarca, Córdoba y Tucumán

En los años recientes, Argentina ha experimentado un rápido crecimiento en la adopción de la labranza mínima y la labranza cero, especialmente en las regiones de tierras áridas. Este cambio ha sido provocado por el deterioro de la calidad de suelos y la disminución de los rendimientos de los cultivos. Muchos suelos locales no se ajustan a la labranza pesada y a las prácticas de labranza introducidas por los colonizadores europeos.

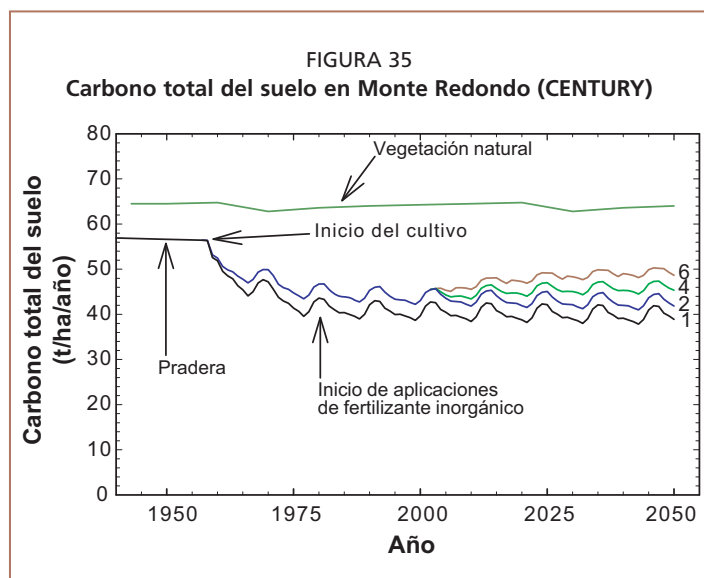
La Pampa Argentina tiene ahora poca vegetación natural. La vegetación xerofítica como *Prosopis algarrobilla* y *Larrea divaricata* aún se puede encontrar en las regiones más áridas. Las prácticas agrícolas se iniciaron con la llegada de los colonizadores en el siglo XVI. Se introdujeron animales ungulados para pastar en las praderas que hoy en día han sido en su mayoría resemebradas. Quedan muy pocos árboles, excepto en los alrededores de las fincas. Inicialmente se cultivaba el trigo y los cultivos en hileras se han incrementado con el tiempo. En muchas partes, predominaban las pasturas hasta la década de 1990, pero desde entonces ha habido un incremento marcado en la siembra de cultivos anuales de verano como el maíz, el girasol y la soya (Díaz-Zorita, Duarte y Grove, 2002). La Pampa Argentina ha sido reconocida como una región con potencial para incrementar la producción siempre que se puedan mejorar los suelos (Álvarez, 2001). Los rendimientos de los cultivos han disminuido en muchas regiones. Esta disminución ha estado estrechamente correlacionada con una reducción en el contenido de materia orgánica del suelo (Díaz-Zorita, Duarte y Grove, 2002). Esto ha impulsado la necesidad de cambio en las prácticas existentes para el manejo de la tierra. Los efectos negativos del cultivo intenso sobre la materia orgánica del suelo condujeron a la puesta en marcha de los experimentos de labranza cero en la década de 1960 en un intento por desarrollar un sistema agrícola más sostenible. Actualmente, alrededor de 13 millones de hectáreas, o sea casi la mitad del área agrícola de Argentina, se encuentra bajo alguna forma de sistema de labranza reducida. La fertilización de los cultivos se logra fundamentalmente mediante el empleo de fertilizantes inorgánicos, con una tendencia a la conservación del material orgánico para su uso en los sistemas hortícolas.

ESTUDIOS DE MODELACIÓN DE LABRANZA CERO

Se revisaron tres estudios de caso para modelar el carbono del suelo bajo un grupo de sistemas convencionales y de labranza cero en las provincias de Tucumán, Catamarca y Córdoba.

i. Monte Redondo, provincia de Tucumán

Es una región semiárida que naturalmente propicia el desarrollo de vegetación xerofítica. Las prácticas agrícolas incluyen praderas pastoreadas y cultivos en hileras, siendo rotados con frecuencia los dos sistemas. En este sitio el proceso productivo consiste de siembras durante siete años, seguido de cuatro años como pradera de pastoreo. La secuencia de cultivos es trigo/soya, maíz, soya, trigo/soya, maíz, soya, trigo y cuatro años de pradera. Se practican tanto la labranza convencional como la labranza cero. En el sistema de labranza convencional, se utilizan el arado de disco y de cincel para la preparación de suelos, mientras que el sistema de labranza cero utiliza la misma secuencia de cultivos sin labranza.



Escenarios en el Cuadro 37

CUADRO 37

Carbono total del suelo en Monte Redondo

Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
Pradera	55,40	54,50	-1,6	43,95	43,21	-1,7
Cultivo	40,43	39,27	-2,9	32,57	27,58	-15,3
Labranza cero	43,64	42,23	-3,2	35,33	33,58	-5,0
5		48,23	4,4		41,89	18,6

¹Escenarios descritos en el Cuadro 38.

Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 38

Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, Monte Redondo

Escenario	Manejo del suelo
1	Labranza convencional, fertilizantes inorgánicos
2	Sin labranza, fertilizantes inorgánicos
3	Sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, fertilizantes inorgánicos
4	Sin labranza, abono verde 10 t/ha/cultivo, fertilizantes inorgánicos
5	Sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, sin fertilizantes inorgánicos
6	Sin labranza, AC 3,3 t/ha/año, sin fertilizantes inorgánicos

AC - Abono de corral.

Después de una fase de equilibrio entre pasturas y árboles, con quemas cada 60 años, se establecieron los parámetros al modelo CENTURY para ejecutarlo en un sistema de pradera mejorado desde mediados del siglo XIX. El modelo predice que el sistema de pradera se encuentra perdiendo carbono a razón de 0,06 toneladas/ha/año bajo el régimen actual, pero con un contenido total de 55,4 toneladas de C/ha, está sobreestimando el nivel actual de 48,8 toneladas de C/ha.

Se planificó la siembra comenzando en la década de 1950 (Figura 35). Las aplicaciones de urea como fertilizante a razón de 110 kg/ha comenzaron en 1980. Se compara en dos escenarios el efecto de la labranza convencional con la labranza cero. El modelo pronostica una diferencia de menos de tres toneladas de C/ha consistente entre los dos sistemas. Esto es menos de la diferencia de seis toneladas/ha de carbono que se detectó realmente en el campo. El modelo CENTURY predice que esta diferencia entre los dos sistemas se mantendrá en el futuro, aunque ambos continúan perdiendo carbono del suelo. El patrón de caída y elevación del carbono del suelo ocurre, debido a que la parte que incluye los cultivos en las rotaciones produce pérdidas de carbono del suelo, mientras que el regreso a la condición de pradera incrementa este componente.

El modelo RothC calcula niveles más bajos de carbono del suelo, pero

predice un mayor diferencial de seis toneladas/ha para el año 2050, debido principalmente a una pérdida mayor de carbono de los sistemas con labranza (Cuadro 37 y 38).

Efecto de la labranza cero y los abonos orgánicos

Las aplicaciones de abono verde (10 toneladas/ha/cultivo) o de abonos de corral (1,5 toneladas/ha cada año de siembra) para el sistema de labranza cero, conducen ambas a incrementos en la captura de carbono (Escenarios 3 y 4; 0,029–0,034 toneladas/ha/año) (Figura 36). Una combinación de estas aplicaciones sin fertilizante inorgánico produce un resultado similar (Escenario 5). El cese del uso de fertilizante inorgánico y el empleo de abonos de corral como una fuente de sustitución de nitrógeno produce una tasa más alta de secuestro de carbono (Escenario 6), 0.1 toneladas/ha/año (Figura 36).

Resumen

Ambos modelos registran el mejoramiento que genera la labranza cero sobre el contenido de carbono del suelo. Sin embargo, si se quiere revertir el declive del contenido de carbono del suelo, se requieren aplicaciones adicionales de materia orgánica - ya sea de abonos de corral o sembrar abonos verdes en la rotación. Un incremento de la fase de pradera en la rotación también incrementará el contenido total de carbono del suelo.

ii. Río Valle Santa María, provincia de Catamarca

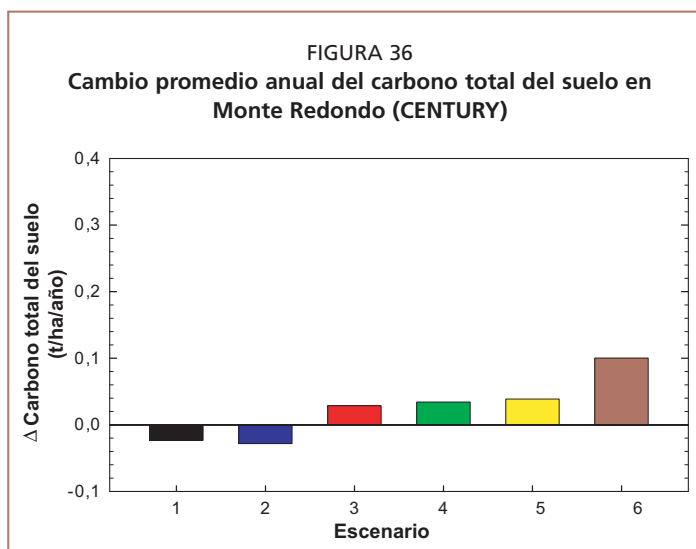
Es una región árida, con un promedio anual de lluvia de 400 mm y temperaturas entre 7 y 32 °C. La vegetación nativa es xerofítica y está compuesta por arbustos de creosota (*Larrea divaricata*) y árboles como *Prosopis algarrobilla*. En las áreas cultivadas, se explotan viñedos y los cultivos incluyen plantaciones alternas de pimiento rojo y cebada. El contenido de carbono medido es alto, de 3,9 por ciento.

Luego de alcanzar el estado de equilibrio con la vegetación natural, se ejecutó el modelo CENTURY con un escenario de pradera desde mediados del siglo XIX e inicio de las siembras a finales de la década de 1950 utilizando la labranza convencional (arado de disco). Se inició una rotación de algodón –cebada en 1980. El modelo CENTURY calculó que el carbono del suelo habría decrecido a dos tercios de su valor inicial para el año 2000 (Figura 37). Las mediciones en la región confirman las disminuciones en el carbono del suelo en las áreas cultivadas entre 33-66 por ciento. Por lo tanto, la estimación del modelo está en el punto máximo de este rango. Sin embargo, se prevé que el sistema alcance un nuevo punto de equilibrio y se estima una disminución de tres toneladas/ha del carbono del suelo en los próximos 50 años.

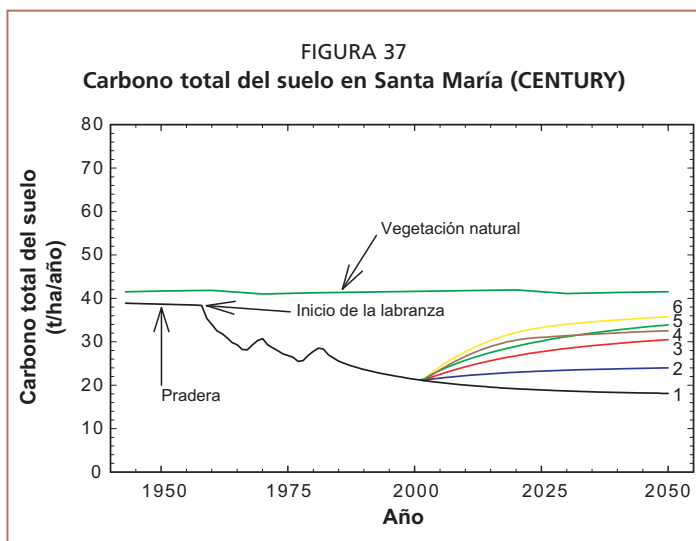
El modelo RothC, al cual se le establecieron los parámetros medidos de carbono del suelo más altos y con el que se utilizaron las cantidades de residuos vegetales calculados con el modelo CENTURY, muestra un efecto proporcionalmente menor que la práctica de cultivo actual sobre el carbono del suelo (Cuadros 39 y 40).

Efecto de la labranza cero

Adoptar un sistema de labranza cero no solo detiene la pérdida de carbono del suelo predicha por el modelo CENTURY sino que también conduce a una baja tasa de secuestro de carbono de 0,05 toneladas/ha/año en los próximos 50 años (Figuras 37 y 38). El modelo RothC es menos sensible a este escenario (Cuadro 39).



Escenarios descritos en el Cuadro 38.



Escenarios descritos en el Cuadro 40.

CUADRO 39
Carbono total del suelo en Santa María

Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio	2000 (t/ha)	2050 (t/ha)	% de cambio
Pradera	37,11	35,75	-3,7	70,68	74,71	5,7
Labranza	21,39	18,11	-15,3	51,46	47,36	-8,0
Sin labranza		24,00	12,2		53,53	4,0
3		30,49	42,5		58,71	14,1

¹Escenarios descritos en el Cuadro 40
Fuente: CENTURY y RothC.

CUADRO 40
Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, Santa María

Escenario	Manejo de la tierra
1	Labranza convencional, fertilizante inorgánico
2	Sin labranza, fertilizante inorgánico
3	Sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, fertilizante inorgánico
4	Sin labranza, AC 3,3 t/ha/año, sin fertilizante inorgánico
5	Sin labranza, abono verde 10 t/ha/cultivo, fertilizante inorgánico
6	Sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, abono verde 10 t/ha/cultivo, sin fertilizante inorgánico

AC - Abono de corral.

Efecto de los abonos orgánicos

Las aplicaciones de materiales orgánicos como abonos de corral y abono verde (Escenarios 3 y 5) conducen ambas a incrementos marcados en las tasas de captura de carbono de 0,18 – 0,25 toneladas/ha/año (Figura 37 y 38). El modelo RothC muestra nuevamente un efecto menor (Cuadro 39).

Efecto del fertilizante inorgánico

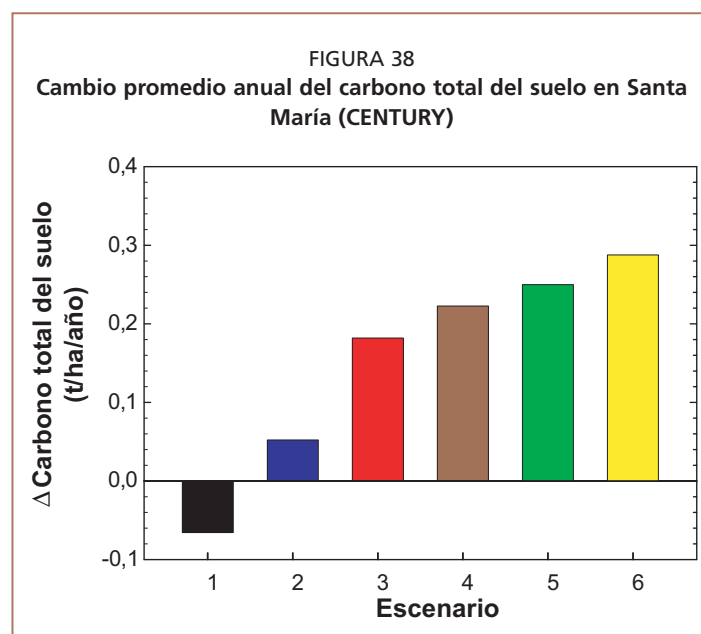
Reemplazar el fertilizante inorgánico con abono de corral (Escenario 4) promueve el secuestro de carbono (0,22 toneladas/ha/año). Combinar el abono verde y las aplicaciones de abono de corral produce la mejor tasa de incremento de carbono, 0,29 toneladas/ha/año (Escenario 6, Figuras 37 y 38). El fertilizante inorgánico es insuficiente, debido al alto costo de energía para su elaboración.

Resumen

Ambos modelos sugieren que la adopción de la labranza cero detendría la disminución en el carbono del suelo. Sin embargo, para incrementar el secuestro de carbono son necesarias aplicaciones orgánicas más altas (abonos verdes y abonos de corral), las que pueden utilizarse para reemplazar las aplicaciones de fertilizante inorgánico.

iii. Provincias de Córdoba, Buenos Aires y La Pampa

A continuación de un período de equilibrio con vegetación natural y condiciones subsecuentes en la fase de pradera desde la década de 1800, se establecieron los parámetros para el modelo CENTURY con un



Escenarios descritos en el Cuadro 40.

régimen de cultivo comenzando en la década de 1950. Este incluyó cuatro años de siembra (trigo – soya – maíz – soya) y cuatro años en la fase de pradera con aplicaciones de fertilizante inorgánico (100 kg/urea/ha) comenzando en 1985. En 1987, se aplicó un sistema con rotación y otro sin ésta, que es similar a las prácticas de cultivo que se llevan a cabo en el campo. La secuencia de cultivos en rotación fue forraje de invierno-soya-maíz-soya-trigo-soya-maíz-cuatro años de pradera y forraje de invierno-trigo-soya-maíz-soya-maíz-pradera. La secuencia sin rotación de cultivos fue similar, pero sin los intervalos de pradera.

Los resultados modelados para el sistema de cultivos sin rotación muestran una caída brusca en el carbono del suelo a 37 toneladas/ha en el año 2000 y pérdidas posteriores en los años subsiguientes (Figura 39). El modelo RothC estima una caída proporcionalmente mayor a partir de un contenido básico más alto (Cuadro 41 y 42). El sistema de rotación cultivo-pradera no muestra el mismo descenso agudo en el carbono del suelo que el sistema sin rotación y oscila alrededor de un nivel de poco más de 40 toneladas/ha (Figura 39). Sin embargo, el modelo RothC estima una disminución ligeramente proporcional en el carbono para el sistema de rotación de cultivos. Ambos modelos calculan diferencias pequeñas entre los sistemas con y sin rotación en el año 2000, en comparación con la diferencia de 8,5 toneladas/ha medida en el campo.

Efecto de la labranza cero

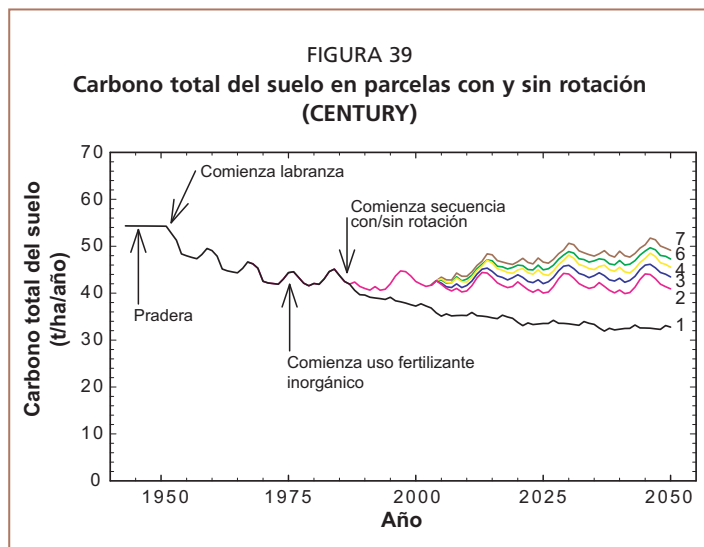
La adopción de un régimen de labranza cero para el sistema de parcelas con rotación, incrementa el contenido de carbono del suelo en 2,5 toneladas/ha en los próximos 50 años, representando una tasa de secuestro de carbono de 0,02 toneladas/ha/año (Figura 40). La tasa se incrementa a 0,1 toneladas de C/ha/año si se emplean abonos verdes y abono de corral en lugar de fertilizantes.

Efecto de los abonos orgánicos

Las aplicaciones de abono verde y abono de corral con o sin un fertilizante inorgánico pueden conducir a tasas de captura de carbono de 0,06-0,13 toneladas/ha (Figura 39 y 40). El material orgánico puede remplazar exitosamente al fertilizante inorgánico.

Resumen

La inclusión de intervalos de pradera en el sistema de cultivo es un factor importante para reducir la disminución del carbono del suelo. Sin embargo, los modelos muestran que la labranza cero y las aplicaciones orgánicas son necesarias si se desea capturar carbono en este sistema.



Escenarios descritos en el Cuadro 42.

CUADRO 41 Carbono total del suelo en parcelas con y sin rotación modelados con CENTURY y RothC

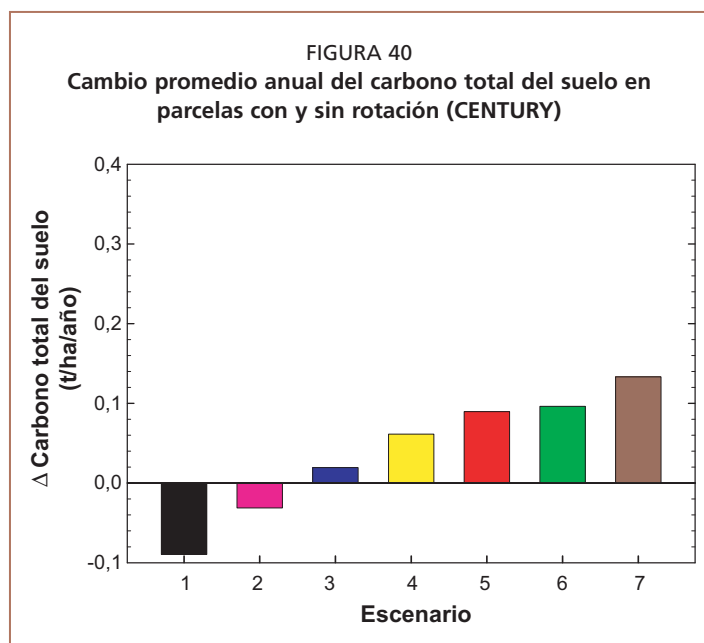
Escenario ¹	Modelo CENTURY			Modelo RothC		
	2000	2050	% de cambio	2000	2050	% de cambio
	(t/ha)					
Parcelas sin rotación	37,22	32,74	-12,0	50,61	41,17	-18,7
Parcelas con rotación	42,47	40,91	-3,7	54,62	49,53	-9,3
4		45,54	7,2		62,86	15,1

*Escenario descritos en el Cuadro 42

CUADRO 42 Escenarios para modelar las prácticas de manejo del suelo, Santa María

Escenario	Manejo del suelo
1	Parcelas sin rotación, fertilizante inorgánico
2	Parcelas con rotación, fertilizante inorgánico
3	Parcelas con rotación, sin labranza, fertilizante inorgánico
4	Parcelas con rotación, sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, abono verde 10 t/ha/cultivo, sin fertilizante inorgánico
5	Sin labranza, AC 1,5 t/ha/año, fertilizante inorgánico
6	Sin labranza, abono verde 10 t/ha/cultivo, fertilizante inorgánico
7	Sin labranza, AC 3,3 t/ha/cultivo, sin fertilizante inorgánico

AC - Abono de corral.



Escenarios descritos en el Cuadro 42

Conclusiones de los casos de Argentina

La modelación de los datos agrícolas de las tres provincias en tierras áridas de Argentina muestra que el contenido total de carbono ha decaído de manera sustancial desde que se comenzaron a utilizar las praderas para el cultivo. En las tres localidades ha habido caídas bruscas en el contenido de carbono con pérdidas de alrededor de 15 toneladas/ha. Sin embargo, la adopción de sistemas de labranza cero en los años recientes ha detenido estos procesos y ha dado como resultado incrementos anuales pequeños del carbono del suelo de 0,02 toneladas/ha/año. Las rotaciones con períodos significativos de retorno a praderas

(p. ej. 4 años en 11) produjeron un incremento posterior de carbono en el suelo. Las tasas más altas de fijación (0,1 – 0,25 toneladas/ha/año) ocurren cuando los sistemas de labranza cero incluyen también el cultivo de abonos verdes y aplicaciones de abono de corral.

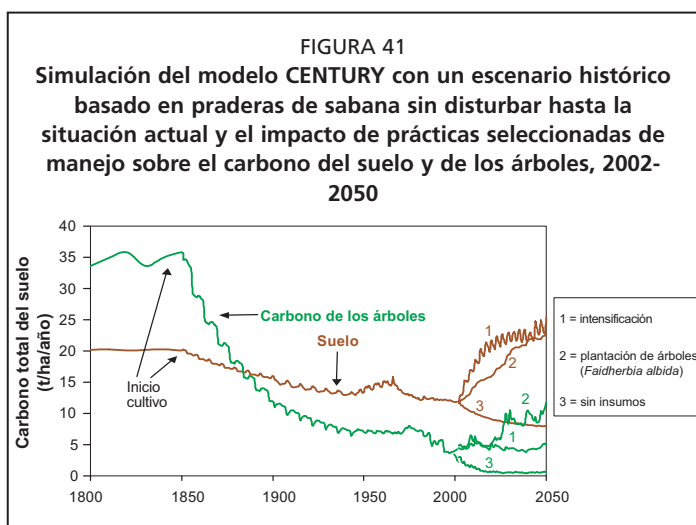
Estudio de caso 5

Senegal – cuenca «Old Peanut»

El área de estudio de Senegal, la cuenca «Old Peanut», está ubicada en la parte centro-occidental del país. El clima es semiárido con precipitaciones anuales que oscilan entre 350 y 700 mm. Casi toda la tierra arable se utiliza para la agricultura de secano. El mijo, el maní, el sorgo y el caupí son los cultivos principales. La estación lluviosa usualmente dura desde julio a septiembre/octubre. Sin embargo, tanto la variación espacial como temporal de la lluvia es alta, por lo que las malas cosechas son comunes. La vegetación natural, incluyendo *Faidherbia albida* y muchos otros árboles se han degradado, principalmente debido a la larga historia agrícola y a la creciente presión de población.

Según describió Tschakert (2004b), las simulaciones del modelo CENTURY sugieren que el carbono del suelo en el área en estudio decreció desde 20,1 toneladas de C/ha en un ambiente de sabana nativa en 1851 a 11,9 toneladas de C/ha en el 2001. Esto indica una pérdida anual de carbono del suelo de 0,055 toneladas de C/ha/año. El carbono de los árboles descendió desde 33,6 toneladas/ha a 4,2 toneladas/ha, correspondiendo a un decrecimiento de 0,2 toneladas de C/ha/año. Bajo condiciones de manejo mejoradas (asumiendo un período de 50 años), el carbono del suelo podría incrementarse en 0,3–13,5 toneladas/ha, o 0,006–0,27 toneladas/ha/año. Las ganancias de carbono en los árboles podrían triplicarse (de 4,2 a 11,8 toneladas/ha), asumiendo una conversión de las tierras de cultivos a pasturas - plantaciones de árboles. Dado que la mayor parte de las ganancias de carbono se logran en los primeros 25 años, los incrementos anuales para este período oscilan de 0,02 a 0,43 toneladas de C/ha/año, lo cual es más alto que las estimaciones suministradas por Lal, Hassan y Dumanski (1999). Bajo condiciones de manejo inadecuado, en este caso una rotación de un año de mijo – sorgo sin insumos y con eliminación y poda permanente de los recursos suministrados por los árboles, tanto el contenido de carbono del suelo como el de los árboles continua descendiendo, alcanzando un nivel mínimo absoluto de 7,9 toneladas/ha y 0,6 toneladas/ha, respectivamente (Figura 41).

El Cuadro 43 muestra las diferentes prácticas de manejo mejorado con los cambios anticipados en el carbono del suelo en dos períodos (2002–2026 y 2027–2050) tal como lo discute Tschakert (2004b). Como se ilustra, las ganancias más altas de carbono del suelo pueden lograrse en los primeros 25 años, excepto para el escenario de plantaciones de árboles. Sin embargo, en algunos casos estas ganancias no pueden sostenerse en el segundo período de 25 años y se deben esperar pérdidas si no se aplican insumos adicionales. Esto es particularmente cierto para los escenarios de barbecho.



CUADRO 43

Efectos de las prácticas de manejo o uso de la tierra sobre el potencial de secuestro de carbono en la Cuenca «Old Peanut», Senegal

Opciones tecnológicas*	Cambio en el C del suelo (t/ha/año) 2001–2026 (primeros 25 años)	Cambio en el C del suelo (t/ha/año) 2027–2050 (segundos 25 años)
Composte (2 toneladas)	0,02	-0,01
Conversión de las tierras de cultivo a pasturas + pastoreo	0,06	0,02
3 años de barbecho + 2 toneladas de abono orgánico en la rotación con 4 años de siembra	0,14	-0,05
Estiércol vacuno (4 toneladas)	0,10	0,01
Conversión de las tierras de cultivo a pasturas	0,17	0,04
Estiércol vacuno (4 toneladas) fertilizante mineral (250 kg en mijo; 150 kg en maní)	0,12	0,01
Estiércol de ovejas (5 toneladas)	0,13	0,01
3 años de barbecho + ramas de Leucaena (2 toneladas) en rotación con 4 años de cultivos	0,18	-0,05
Conversión de las tierras de cultivos a pasturas con protección de árboles	0,10	0,04
Estiércol de ovejas (10 toneladas)	0,17	0,01
10 años de barbecho + 2 toneladas de abono orgánico en rotación con 6 años de cultivo	0,25	-0,04
10 años de barbecho + ramas de Leucaena (2 toneladas) en rotación con 6 años de cultivos	0,25	-0,04
Conversión de tierras de cultivos a pasturas + plantación de árboles (Faidherbia albida)	0,23	0,21
Intensificación agrícola (mijo mejorado, abono orgánico, ramas de Leucaena, fertilizante mineral, tracción animal, 1 año de barbecho)	0,43	0,11

* Todas las opciones tecnológicas calculadas para 1 ha. Rotación anual de mijo y maní para los escenarios de cultivos.

Fuente: Tschakert (2004b).

Estudio de caso 6

Sudán – provincia de Kordofán del Norte

El estudio se llevó a cabo en la provincia de Kordofán, norte de Sudán, un área con predominio de los suelos de textura gruesa de origen Eólico, localmente llamados *Qoz*. El sitio de estudio es representativo en términos de suelos, clima y tipo de vegetación para una gran región que se extiende desde la costa atlántica hasta las alturas etíopes (Olsson y Ardö, 2002; Olsson y Tschakert, 2002).

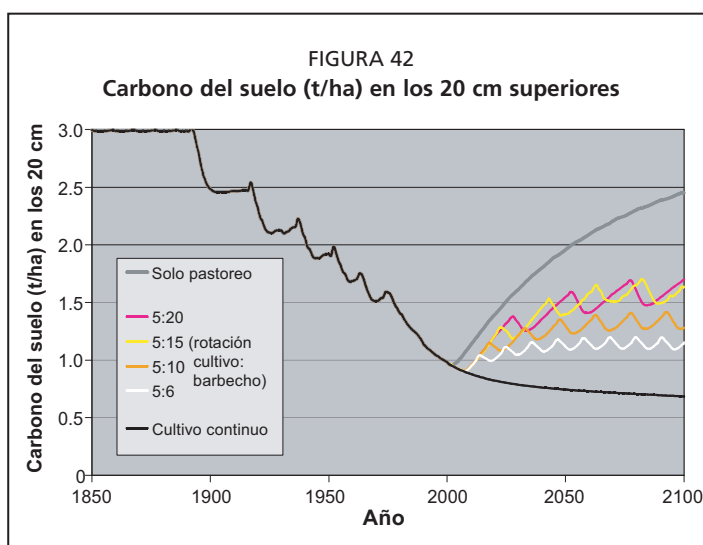
El clima es semiárido con lluvias anuales que oscilan desde menos de 200 mm en el norte hasta alrededor de 350 mm en el sur. El uso de la tierra se caracteriza por un incremento gradual de la intensidad de precipitación pluvial. En la parte norte, solamente es posible el pastoreo muy extensivo de camellos debido a la falta de fuentes permanentes de agua. El cultivo, especialmente mijo, y en menor grado ajonjolí y maní, predominan en la medida en que la lluvia y los recursos hídricos se incrementan hacia el sur. El pastoreo de ganado vacuno, ovejas y cabras también es un factor importante en las partes cultivadas del área.

Las entrevistas y la literatura indican que las prácticas de uso de la tierra han cambiado de manera significativa de un sistema de rotación con períodos largos de barbecho (15 – 20 años), intercalados con períodos cortos de cultivo (4 – 5 años), a una práctica de siembra más continua en las últimas tres a cuatro décadas. En el mismo período, los rendimientos de los cultivos han decrecido, principalmente debido a la marcada disminución de las lluvias, pero también en cierto grado debido al abandono de los períodos de barbecho.

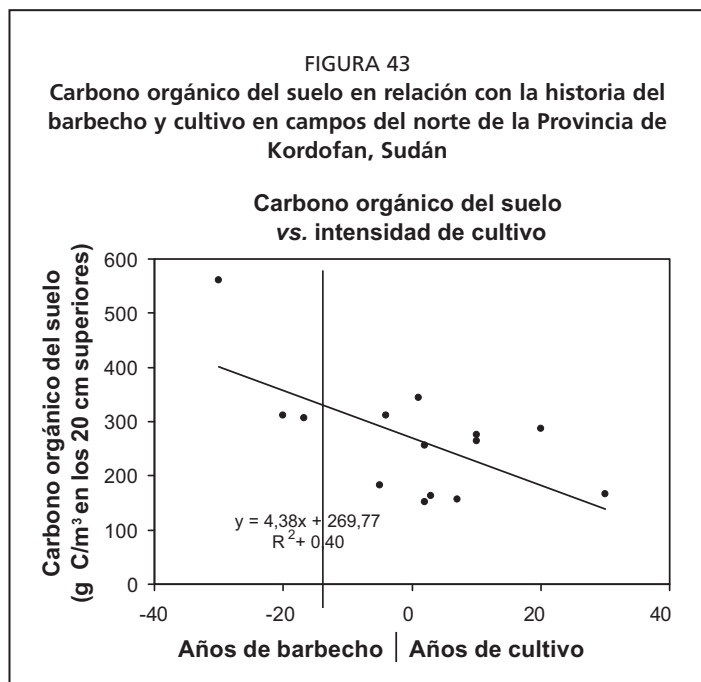
La demanda creciente de alimentos como resultado del incremento de la población combinada con la disminución de los rendimientos, ha forzado a los productores a extender su área cultivada, reduciendo principalmente los períodos de barbecho.

Con el fin de investigar el potencial para incrementar el contenido de carbono del suelo a través de los cambios en el manejo de la tierra, se simuló un conjunto de escenarios futuros. Primero, se estableció el nivel de equilibrio ejecutando el modelo para 2000 años sin uso de la tierra, y luego se simuló seis escenarios diferentes de manejo de la tierra para el período 2000 – 2100. Los escenarios de manejo de la tierra fueron: cultivo continuo, cultivo – barbecho en proporciones de 5:6, 5:10, 5:15, 5:20, y cero cultivo, pero con pastoreo. La Figura 42 presenta los resultados de las simulaciones.

Mientras que los resultados de la Figura 42 provienen de simulaciones, la Figura 43 muestra el resultado de la investigación empírica, usando el muestreo de suelo, vinculando períodos de barbecho con niveles incrementados de carbono orgánico del suelo. Con el fin de investigar la función de los períodos de barbecho, se muestrearon campos en diferentes estados de la rotación de cultivos y se determinaron los niveles de carbono orgánico del suelo correspondientes



Fuente: Olsson y Ardö (2002).



(Olsson y Ardö, 2002). El gráfico confirma en gran medida los resultados del modelo y muestra que no existe potencial significativo para incrementar el carbono orgánico del suelo, incluso en estos suelos arenosos secos.

La Figura 43 muestra que incrementar los períodos de barbecho, es decir disminuir la relación cultivo: barbecho, causa un incremento en el contenido de carbono del suelo proporcional a la relación (es decir, mientras más largo es el barbecho mayor es el contenido de carbono).

Un cambio en el uso de la tierra de cultivo de mijo a pastoreo, se estima que incremente el contenido de carbono del suelo alrededor de 1,5 toneladas/ha a 2,5 toneladas/ha en 100 años. Esto es el 82 por ciento

de la fase de equilibrio previa al cultivo de mijo. Si se continua el cultivo de mijo en el futuro, se espera un decrecimiento adicional en el contenido de carbono del suelo de 0,68 toneladas/ha en el 2100. El cambio del cultivo continuo a relaciones de cultivo: barbecho de 5:6, 5:10, 5:15 y 5:20 incrementarían el contenido de carbono del suelo de acuerdo con la Figura 42 a 1,15, 1,28, 1,63 y 170 toneladas/ha, respectivamente, para el año 2100.

Capítulo 6

Proyectos de secuestro de carbono

Los resultados obtenidos en los estudios de caso de Senegal y Sudán presentados en el Capítulo 5 se analizaron con el fin de ilustrar algunos aspectos del secuestro de carbono. Incrementar el carbono del suelo puede producir beneficios locales, nacionales y globales. La Figura 44 representa estos tres niveles. También muestra que estos beneficios pueden ocurrir en las fincas individuales bajo forma de incremento de los rendimientos de cultivos, madera y ganado como resultado del aumento de la fertilidad del suelo, o en la forma de beneficios sociales fuera de la finca en los tres niveles. A nivel local, este segundo tipo de beneficio constituye una mejor base de recursos de tierra y suelo para las generaciones futuras. Los beneficios a escala nacional se refieren principalmente a un mejoramiento en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola. A nivel global, los beneficios anticipados del manejo del carbono del suelo son: mejoramiento de la biodiversidad, incremento en el secuestro del carbono y mitigación del cambio climático. De esta manera, la captura de carbono en las tierras áridas podría constituir una situación de ganancias netas.

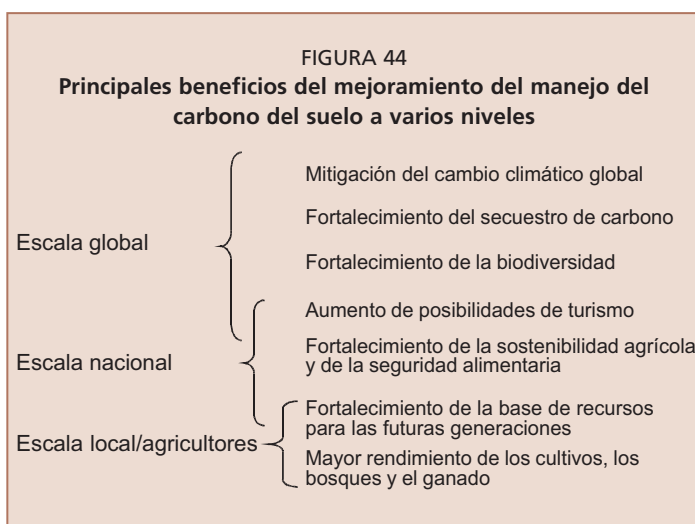
Sin embargo, según destacó Izac (1997), se requiere precaución, puesto que los costos serán principalmente locales, mientras que los beneficios serán locales, nacionales y globales. Desde el punto de vista de costo/beneficio, sería racional para los productores manejar sus recursos de carbono con respecto a los beneficios de la finca, a pesar de que ignoren los beneficios sociales fuera de la finca. En otras palabras, en ausencia de intervenciones políticas y de apoyo financiero externo, los propietarios locales utilizarían las prácticas mejoradas de manejo a niveles individuales óptimos, pero a niveles subóptimos desde el punto de vista social. Las siguientes secciones suministran un panorama de los costos y beneficios anticipados, tanto del comercio de carbono (intervención política), como de la inversión directa a nivel local.

Sin embargo, según destacó Izac (1997), se requiere precaución, puesto que los costos serán principalmente locales, mientras que los beneficios serán locales, nacionales y globales. Desde el punto de vista de costo/beneficio, sería racional para los productores manejar sus recursos de carbono con respecto a los beneficios de la finca, a pesar de que ignoren los beneficios sociales fuera de la finca. En otras palabras, en ausencia de intervenciones políticas y de apoyo financiero externo, los propietarios locales utilizarían las prácticas mejoradas de manejo a niveles individuales óptimos, pero a niveles subóptimos desde el punto de vista social. Las siguientes secciones suministran un panorama de los costos y beneficios anticipados, tanto del comercio de carbono (intervención política), como de la inversión directa a nivel local.

BENEFICIOS DEL COMERCIO DE CARBONO

Uno de los beneficios anticipados para los pequeños propietarios que aprovechan los esquemas de secuestro de carbono es la ganancia que podría lograrse a partir del comercio de carbono. Actualmente, los valores de los créditos de carbono según se establece por los sistemas de intercambio y comercio, oscilan entre \$EE.UU. 1 y \$EE.UU. 38 por tonelada de carbono (FAO, 2001b).

Con el fin de poner la ganancia estimada por la captura de carbono en la perspectiva de los productores, se compararon los precios de los productos agrícolas y los precios asumidos del carbono como mercancía negociable, para los estudios de casos de Senegal y Sudán. En ambos casos, se asumió que los productores utilizan una práctica de manejo mejorada o tipo alternativo de uso de la tierra en todas las tierras cultivables



Fuente: Izac (1997)

CUADRO 44

Beneficios económicos esperados a partir del comercio de carbono (1 tonelada de C = \$EEUU 15)

Práctica de manejo	Retención de C (toneladas/ha)	Ganancias anuales TP pobre (\$EE.UU. 15)	Ganancias anuales TP promedio (\$EE.UU. 15)	Ganancias anuales TP rica (\$EE.UU.15)	% del valor anual de la producción
Composte (2 toneladas)	0,02	0,73	1,93	2,28	0,2
Conversión de tierras cultivables a pasturas + protección de los árboles	0,10	3,65	9,63	11,39	0,9
Estiércol vacuno (4 toneladas) + fertilizante químico	0,12	4,38	11,55	13,66	1,1
Estiércol de ovejas (10 toneladas)	0,17	6,20	16,36	19,36	1,6
Rotación 10 años de barbecho - <i>Leucaena</i> (2 toneladas) y 6 años de cultivos	0,25	9,12	24,07	28,46	2,3
Intensificación agrícola	0,43	15,68	41,39	48,96	4,0

TP = Tipo de Propiedad

Fuente: Tschakert (trabajo de campo).

actuales (Cuadros 44 y 45). Las cantidades totales de tierras cultivables varían dependiendo de la riqueza de las poblaciones estudiadas. Los incrementos actuales del carbono, según se estima por el modelo CENTURY, se asumió que generarían \$EE.UU. 15/ha, dando como resultado ganancias financieras por grupo de propiedad. Estas ganancias financieras se compararon luego con el valor promedio de los alimentos y cultivos importantes que sembrarían los productores en estas tierras si no existiera otra alternativa.

En el caso de Senegal, las dimensiones promedio de las fincas en las aldeas en estudio varían entre 3,2 y 15,5 ha, de las cuales 2,8–8,9 ha son cultivadas (Tschakert, 2004a). Si se retuviera el carbono en estas tierras siguiendo las prácticas de manejo del Cuadro 43, las ganancias financieras potenciales a partir del comercio de carbono promediarían \$EE.UU. 1,4 a \$EE.UU. 31 por año. Se espera que tales ganancias sean significativamente bajas para las propiedades pobres en comparación con las propiedades medias y ricas. Esto es debido a que las propiedades pobres tienen menos tierra que la que podría utilizarse para las prácticas de manejo y/o usos de la tierra alternativos. Como se muestra en el Cuadro 44, las ganancias máximas anuales cuantificarían alrededor de \$EE.UU. 16 para las propiedades pobres, \$EE.UU. 41 para las propiedades medias y \$EE.UU. 49 para las propiedades ricas. Una comparación de los beneficios esperados del comercio de carbono con el valor actual del mijo y el maní -los principales cultivos en las áreas en estudio- indica que los beneficios anticipados promediarían entre menos del uno por ciento y cuatro por ciento de los valores de los cultivos anuales. Estos valores son extremadamente bajos y, por lo tanto, es poco probable que representen un incentivo financiero suficiente para que los pequeños propietarios participen en el programa de secuestro de carbono.

En el ejemplo de Sudán, cálculos similares realizados sobre la importancia económica potencial del secuestro de carbono son bastante diferentes. Debido al mayor tamaño de las fincas y los bajos insumos económicos en este caso, el carbono orgánico del suelo podría tener una función más significativa.

En base al censo de dos aldeas respecto a las propiedades y prácticas agrícolas (Warren y Khatir, 2003), se asumieron dos categorías de propiedad para el cálculo de los elementos económicos de la captura de carbono del suelo: una finca grande de cinco hectáreas de mijo y dos hectáreas de ajonjolí y una propiedad chica con cinco hectáreas de mijo. Si se retuviera carbono en estas tierras de acuerdo con las estimaciones realizadas anteriormente por el modelo CENTURY, la ganancia económica potencial sería como se muestra en el Cuadro 45. Con un precio de \$EE.UU. 15/tonelada, la

CUADRO 45

Ganancia económica anual derivada de la adopción de cambios en el manejo de la tierra para producir mijo, con respecto a diferentes niveles de precios de carbono

Opciones de manejo (relación cultivo:barbecho)	Fijación de C (kg/ha)	Ganancias anuales TP pobre (\$EE.UU. 15)	Ganancias anuales TP rica (\$EE.UU. 15)	% del valor de la producción anual (pobre)	% del valor de la producción anual (rica)
Pastoreo	15,00	1,15	1,56	16,6	3,8
05:20	7,20	0,55	0,75	8,0	1,8
05:15	6,50	0,50	0,68	7,2	1,7
05:10	3,00	0,23	0,31	3,3	0,8

TP= Tipo de Propiedad

Fuente: Olsson y Ardö (2002).

ganancia económica que se obtiene de convertir tierras de cultivo en tierras de pastoreo, sería de alrededor del 17 por ciento y 4 por ciento del rendimiento del cultivo que se obtiene normalmente en las fincas pobres y la ricas, respectivamente.

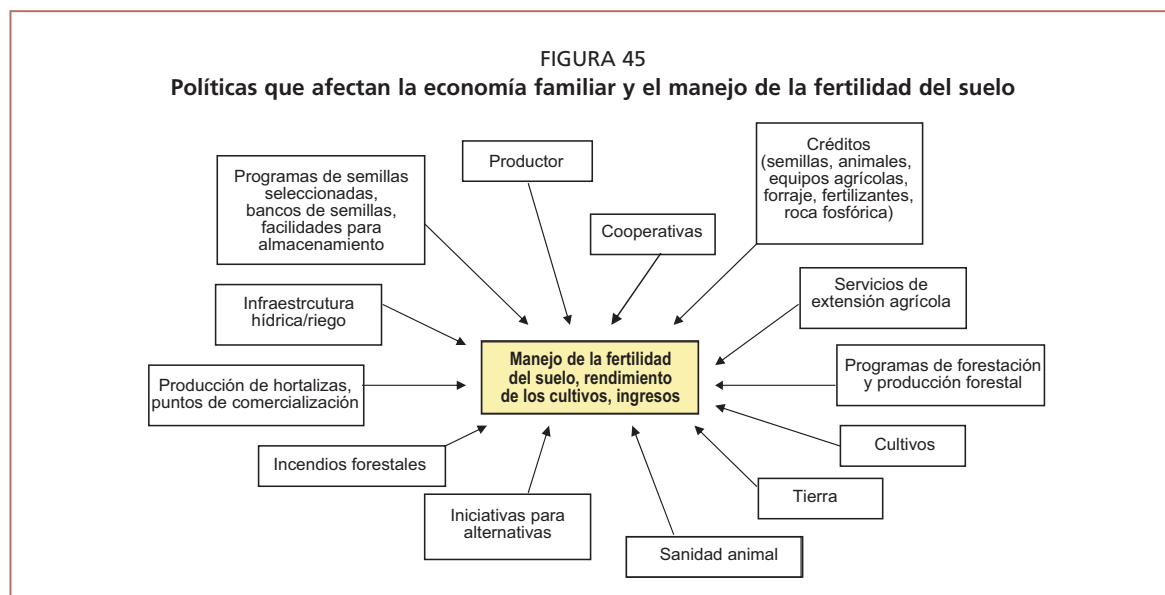
Sin embargo, cuando se tienen en cuenta los costos y la mano de obra requeridos para producir el cultivo, la ganancia del secuestro de carbono orgánico del suelo es más significativa. Un estudio realizado en una región cercana (International Fund for Agricultural Development, 1988) mostró que las ganancias económicas de varios cultivos fueron negativas. Como promedio, el estudio mostró que solo los ingresos obtenidos a partir de la producción de melones y carcadé suministró ganancias, mientras que cuesta más producir mijo, sorgo, ajonjolí y maní que el ingreso que se obtiene de vender su producción. Esta comparación económica indica que el nivel al cual se hace económicamente importante el secuestro de carbono es muy bajo para los productores en el estudio de caso de Sudán.

Los resultados de los dos estudios de caso sugieren que los beneficios de comercializar el carbono por parte del agricultor, son relativamente bajos. Una alternativa de ingresos netos que debería considerarse por parte de los pequeños propietarios durante las negociaciones del proyecto con las instituciones, podría ser una infraestructura comunal nueva o mejorada, como escuelas, servicios de bienes y salud.

COSTOS Y BENEFICIOS LOCALES DIRECTOS

Los beneficios directos de los pequeños propietarios locales se espera que ocurran a nivel de campo, principalmente a través del incremento de la fertilidad del suelo y los rendimientos de los cultivos que, en cambio, contribuirán a un mejoramiento en sus medios de vida y seguridad alimentaria a escala nacional (Figura 45). Las prácticas que involucran animales para la producción de estiércol pueden combinarse con las actividades que generen ganancias, tales como la ceba y venta de animales, que crean también ingresos adicionales. Cambiar de la siembra a otras alternativas de uso de la tierra, como las praderas y las tierras de pastoreo, liberarían mano de obra agrícola, principalmente durante la campaña de siembra principal. Tales ganancias de tiempo y energía podrían utilizarse para las actividades en las áreas rurales y urbanas. Los sistemas agroforestales bien manejados pueden generar ingresos de la tala controlada de madera, de semillas y de la venta de frutos. Sin embargo, no es probable que tales ganancias ocurran en un tiempo corto. En el caso de las especies fijadoras de nitrógeno, si se introducen en los campos especies como *Faidherbia albida*, se pueden esperar impactos positivos sobre los rendimientos.

Respecto al costo, el uso de prácticas de manejo mejoradas o el cambio de una práctica de manejo a otra podría incluir costos de transacción significativos. Hoy en día, es poco probable que la mayor parte de los pequeños propietarios de las tierras áridas tengan los insumos necesarios para aplicar prácticas de manejo mejoradas como se asumió en el modelo CENTURY. Los costos a nivel local incluirían la compra de animales, forraje, equipo agrícola y mano de obra, dependiendo de la dotación de recursos que posean los



pequeños propietarios interesados en dicho esquema de secuestro de carbono. También es probable que los productores demanden compensación por las producciones anteriores, con respecto a las tierras cultivables que han sido transferidas a usos alternativos (praderas y tierras de pastoreo) y períodos de barbecho prolongados. Como en la mayoría de los casos, al menos la mitad de todas las tierras cultivables se utilizan para cultivos de subsistencia, dicha compensación podría ocurrir en el tipo de cultivo. Un análisis detallado de costo beneficio realizado para la cuenca «Old Peanut» reveló diferencias significativas en los beneficios netos anticipados en 15 opciones de manejo de los sistemas de cultivo-barbecho, que promediaron de \$EE.UU. 1 400 a \$EE.UU. 9 600/tonelada de carbono (Tschakert, 2004a). Estas diferencias son principalmente el resultado de la dotación desigual de recursos de los productores; de costos altamente desiguales en las inversiones del primer año y de los costos de mantenimiento en un período asumido de 25 años. Además de los costos de transacción local, los esquemas de secuestro de carbono también incluirían los costos relacionados con el diseño del proyecto, implementación, seguimiento y verificación. Los costos de seguimiento y verificación podrían ser sustanciales, debido a que se requeriría el muestreo directo de suelo a nivel de campo con el fin de obtener resultados confiables y efectivos. Según demostraron Poussart y Ardö (2002), se necesitarían un número considerable de muestras del suelo, para detectar diferencias en el carbono del suelo con un nivel de confiabilidad adecuado. En el caso de la región semiárida del Sudán, se necesitarían al menos 100 muestras para detectar una diferencia de 50 g de C/m² 90 por ciento del tiempo, analizándolas con un nivel de significación de 0,05. El valor de 50 g de C/m² corresponde a una cantidad promedio que podría fijarse en esta área en 100 años. Si el seguimiento y verificación ocurrieran cada 10 años, el número de muestras requeridas sería por lo menos diez veces más alto. Existen técnicas que permiten utilizar teledetección para evaluar los cambios de carbono, pero estas carecen de precisión para detectar variaciones a pequeña escala dentro de las fincas y los sistemas de producción agropecuaria.

Dados los resultados de los estudios de caso, se puede concluir que serían necesarios fondos sustanciales de organizaciones de desarrollo o inversionistas para disminuir el contenido de carbono con el objetivo de hacer realidad los proyectos de secuestro de carbono en los pequeños sistemas agrícolas presentes en las tierras áridas. Además de estos cálculos puramente económicos, existe preocupación respecto al aspecto ético. Asumiendo que los pequeños propietarios adopten las prácticas de manejo a niveles

óptimos, social y globalmente, esto implicaría que subsidiarían al resto de la sociedad en sus respectivos países, al igual que a la sociedad global, especialmente a los grandes contaminadores del norte (Izac, 1997). De esta forma, sería fundamental que se realizaran regulaciones institucionales e intervenciones políticas para rectificar esta situación.

FACTORES INSTITUCIONALES Y DE POLÍTICAS

Factores de políticas

Parece haber un reconocimiento creciente entre los interesados, los investigadores y los responsables de la toma de decisiones respecto a que las políticas modelo que incluyan amplios planes de acción y soluciones universales para un ambiente rural altamente dinámico y diverso, son insuficientes y podrían ser contraproducentes. Según percibieron Scoones y Chibudu (1996), los esfuerzos para obtener más datos y elaborar modelos más certeros, con el fin de construir una imagen más precisa de la realidad, no necesariamente generarían mejores políticas. Solo si se toman en cuenta seriamente las incertidumbres y complejidades de vivir en tierras áridas propensas a riesgos e integrando de forma consciente en la formulación de los planes de acción, entonces serían posibles la mejoría en las políticas.

Si entre los objetivos principales del secuestro de carbono en tierras áridas está contribuir de forma simultánea a la agricultura sostenible, la restauración ambiental y a la mitigación de la pobreza en gran escala y durante un período más largo, se necesita un enfoque de manejo y una política más flexible y adaptable (Tschakert, 2004a). Dicho enfoque necesita estar basado en un entendimiento más detallado de los sistemas de producción agropecuaria. Esto generaría posibilidades para fortalecer las propias estrategias de los productores para enfrentar las inseguridades a la vez que les suministra el incentivo necesario para promover formas exitosas de producción. Mortimore y Adams (1999) mencionan nueve principios a incluir en un nuevo marco político que son relevantes para el éxito de los programas de secuestro de carbono. Estos principios son:

- considerar la variabilidad;
- promover la diversidad en las tecnologías adaptables;
- facilitar el uso flexible de la mano obra;
- permitir la intensificación agrícola (a través de una integración mayor entre los cultivos y el ganado);
- alcance multisectorial;
- promover las condiciones de mercado abierto;
- mitigar la pobreza entre los grupos vulnerables: propiedades pobres;
- mitigar la pobreza entre grupos vulnerables: mujeres;
- reducir el impacto de las enfermedades.

Como punto de partida es necesario entender los vínculos actuales e históricos de las políticas y los procesos de toma de decisión entre los pequeños agricultores. Las más importantes son las políticas con respecto a la agricultura, el ambiente y las disposiciones para la posesión de la tierra. Especialmente en los países sahelianos, el deterioro de los servicios rurales que ha ocurrido como resultado de las políticas de ajuste estructural y el abandono de compromisos gubernamentales desde la década de 1980 ha provocado impactos sobre los sistemas de producción agropecuaria. La Figura 45 muestra el conjunto de políticas que pueden afectar la producción de cultivos, los ingresos y las decisiones de manejo a nivel local.

Además de las políticas agrícolas y ambientales, la toma de decisión de los productores sobre las posibles estrategias para los sistemas de producción agropecuaria, está

determinada, en gran medida, por el acceso y control de la tierra, usualmente regulada por las disposiciones de tenencia formal e informal de la tierra. Es importante entender que leyes oficiales sobre la tenencia de la tierra están en vigor y, donde no sea así, cuan fuerte puede ser la influencia de las disposiciones informales/convencionales.

Uno de las preocupaciones principales de los inversionistas potenciales en el secuestro de carbono en las tierras áridas es la inseguridad en la propiedad de la tierra. Existe gran debate con respecto a lo que significa tenencia de la tierra para los pequeños agricultores y sobre si los títulos inseguros les impiden establecer compromisos a largo plazo e inversiones en el mejor manejo de la tierra y el suelo (Zeeuw, 1997; Kirk, 1999). Los resultados del estudio de Senegal muestran que los productores perciben derechos de usufructo suficientes para invertir en «sus» tierras, aunque estas tierras sean oficialmente estatales (Tschakert y Tappan, 2004). Lo que se considera más importante que un título oficial de la tierra es la posibilidad de contratar transacciones relacionadas con la tierra, libremente, con flexibilidad y a largo plazo, incluyendo préstamos libres de impuestos, acuerdos de alquiler y créditos hipotecarios. Actualmente la ley senegalesa sobre tenencia de tierras (*Loi sur le Domaine National*) prohíbe cualquier tipo de transacción o usos no productivos de la tierra (barbecho) que exceda la duración de un año. De esta forma, los productores se inclinan menos por las prácticas de manejo con efectos a más largo plazo en tierras donde cultivarán por no más de un año. Donde existen los medios, probablemente comprarán fertilizantes para extraer tanto como les sea posible de esa tierra en el breve período que se les permite.

Los sistemas de producción agropecuaria actuales tienen que ser vistos también como resultado de las disposiciones legales sobre tenencia de la tierra. La noción de poner a un lado la tierra para los tipos de uso alternativos (conversión de tierras de cultivo en praderas o tierras de pastoreo, plantaciones de árboles, o tierras mejoradas y de barbecho largo), necesita entenderse en este contexto. El grado en el cual son factibles las actividades de secuestro de carbono a gran escala dependerán del grado en el que se implementan las leyes sobre tenencia formal de la tierra, el grado en que se hacen cumplir las disposiciones de tenencia convencional y la flexibilidad de las redes sociales para evadir una o la otra.

Organización institucional

El «principio de subsidiaridad» (Scoones y Chibudu, 1996) necesita incluirse en un enfoque de políticas y de manejo más flexible y adaptable. De acuerdo con este principio, las tareas relacionadas con los programas de secuestro de carbono tendrían que dividirse en varios niveles de toma de decisiones. Estos niveles abarcan desde instituciones a nivel local (productores y sus organizaciones) hasta instituciones comunitarias y a nivel de distrito y proveedores de servicios (consejos rurales y regionales, servicios de extensión y agencias de investigación).

Un programa de secuestro de carbono a largo plazo y en gran escala que podría incluir varios miles de pequeños agricultores es poco probable que tenga éxito, si todas las decisiones del programa se toman siguiendo un enfoque intervencionista. Es probable que este tipo de «macro control» desilusione a los agricultores e incremente el riesgo de que abandonen los acuerdos. Un primer paso importante hacia la integración institucional es identificar las instituciones locales y/o regionales que podrían ser las que mejor se ajustan para actuar como vehículo para un programa de secuestro de carbono. Además de ser confiable para la mayoría de los pequeños agricultores, dicha institución deberá ser capaz y de hecho tendrá que: a) participar en el diseño de un programa regional/local; b) asegurar la participación necesaria de un conjunto de pequeños agricultores; c) garantizar una distribución justa de los costos; d) coordinar la supervisión y la verificación y, e) canalizar los beneficios esperados en la forma más deseable y equitativa (Tschakert, 2004b).

En el estudio de caso de Senegal los agricultores definieron los siguientes requisitos como los más importantes para una institución elegida para organizar, movilizar y supervisar a los agricultores locales que participan en el programa de secuestro de carbono:

- ser capaz de hacer una evaluación detallada de los asentamientos comprendidos en su área de influencia, incluyendo todas las familias, sus necesidades alimentarias, los sistemas de producción agropecuaria, las condiciones ambientales, la disponibilidad de tierra y los principales impedimentos del desarrollo económico;
- ser capaz de identificar las opciones de manejo de la tierra más prometedoras y factibles y los cambios en el uso de la tierra con y sin modificaciones en las políticas agrícolas y ambientales (subsidios y créditos) y disposiciones sobre tenencia de tierras;
- tener suficiente influencia para solicitar cambios en la política regional y nacional si se considerara esencial;
- ser capaz de identificar las aldeas y familias con antecedentes de innovación y compromiso (especialmente en términos de reembolso de créditos);
- ser capaz de asegurar una distribución justa de los costos y beneficios;
- ser capaz de decidir con que propósitos podrán emplearse más provechosamente los beneficios y fondos adicionales (infraestructura rural, supervisión ambiental, etc.);
- ser capaz de asegurar el compromiso total de los pequeños agricultores participantes.

CUANTIFICACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL CARBONO

La cuantificación y verificación del carbono fijado es un componente integral de un proyecto de secuestro de carbono. La cuantificación implica que todas las extracciones por parte de los sumideros y las emisiones de las fuentes de CO₂ deben ser registradas y cuantificadas. La verificación implica que cualquier remoción de CO₂ por retención en el suelo o en la biomasa debe verificarse por medio de mediciones. La verificación usualmente se lleva a cabo por parte de una organización independiente. Sin embargo, el control continuo de las pérdidas y ganancias de carbono en el sistema de producción agropecuaria deben ser una parte integral de un proyecto para el cual podría ser responsable una institución local designada. El procedimiento general para la verificación es que se desarrolle un estudio básico antes de que comience cualquier otra actividad del proyecto y después de cierto período dirigido por el contrato del proyecto. Otro levantamiento se lleva a cabo para verificar cualquier cambio en el contenido total de carbono.

Tanto las investigaciones básicas como el seguimiento harán uso de la modelación y la estratificación como instrumentos para mejorar la confiabilidad y reducir los costos de los levantamientos, pero se requerirá también el muestreo directo del suelo. El número de muestras necesarias para verificar los cambios en el contenido total de carbono en el tiempo está relacionado con:

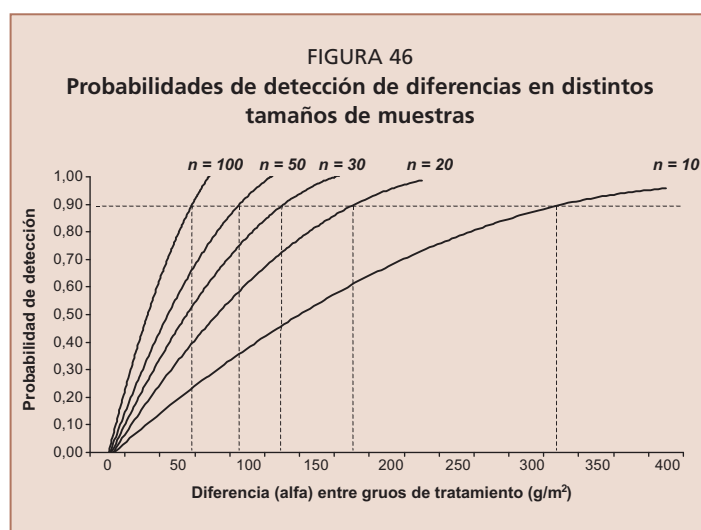
- a. la variabilidad espacial del contenido total de carbono del suelo en el área del proyecto;
- b. el cambio mínimo en el contenido de carbono que debe detectarse;
- c. el nivel de significación estadística que debe obtenerse.

El Cuadro 46 y la Figura 46 ilustran un ejemplo del muestreo de suelo requerido para la verificación (Poussart y Ardö, 2002). El estudio incluyó tres campos diferentes pero adyacentes en el estudio de caso de Sudán. Todos los campos tenían condiciones naturales similares en cuanto a suelo, relieve o clima, pero diferentes usos de la tierra. El uso de la tierra de los tres campos fueron: cultivo de mijo desde 1996, barbecho con árboles por más de 20 años y pastoreo solamente durante 18 años. El Cuadro 46

CUADRO 46
Datos de suelo medidos para los lugares experimentales en el estudio de caso de Sudán

	Cultivado	Barbecho	Pastoreo
COS, 0-20 cm, [g/m ²] (n = 100)			
Media ± desviación estándar	519,2±_461,5	532,3±_455	411±226,8
Mediana	374,7	426	367,9
Mínimo, máximo	242,9, 3 716,3	239,5, 4 277,5	181,4, 2 303
Varianza	212 952	207 043	51 425
Textura [%] arena, limo, arcilla	93,7, 3,6, 2,7	95,1, 3,0, 1,9	93,6, 3,2, 3,2

Fuente: Poussart y Ardö 2002.



Nota: las líneas punteadas indican las diferencia detectables en el 90 por ciento de los casos con la prueba de Kruskal-Wallis (nivel significativo * = 0,05) para cinco tamaños de muestras (n = 10, 20, 30, 50 y 100).

muestra la estadística descriptiva de los tres campos. La Figura 46 ilustra el tamaño de muestra requerido para verificar un cambio en el contenido total de carbono para los niveles de diferencia detectable y los diferentes niveles de significación estadística.

RIESGOS E INCERTIDUMBRES PARA LOS INVERSIONISTAS Y PRODUCTORES

Existe un grupo de riesgos predecibles e impredecibles asociados con las actividades de secuestro de carbono (Bass y Dubois, 2000; FAO, 2002b; Tschakert y Tappan, 2004). Estos riesgos parecen inevitables en un programa de larga duración (25 años) y requieren un gran número de pequeños agricultores participantes, con el fin de alcanzar una cantidad total de carbono retenido que sea atractiva para los inversionistas potenciales. Los riesgos tendrán que dividirse en varios niveles de toma de decisión. La eficiencia de distribuir los riesgos dependerá de la fuerza institucional de cada estructura organizacional, desde las asociaciones de productores, hasta el nivel máximo de los gobiernos nacionales y organizaciones internacionales.

Riesgo de reversión

Las ganancias de las prácticas de manejo o cambios en el uso de la tierra pueden ser revertidas tan pronto como son interrumpidas o abandonadas. Esto podría ocurrir, ya sea como consecuencia de los riesgos o eventos naturales (sequía, fuegos, cambio climático, etc.) o de la decisión consciente de los agricultores para desechar un esquema convenido.

Los factores que desalientan o impiden a los productores de cumplir sus acuerdos podrían incluir:

- alternativas económicas más atractivas para una cierta tierra;
- falta de medios para continuar las prácticas (mano de obra, tierra y capital);
- actividades económicas más lucrativas fuera de la agricultura;
- falta de confianza en los arreglos institucionales establecidos en el lugar;
- inseguridad de las disposiciones de tenencia de la tierra;
- cambios en los precios de los productos agrícolas en el mercado;
- cambios en las políticas nacionales y regionales (ej. eliminación de subsidios, cambios en las disposiciones de tenencia de la tierra, nuevas regulaciones requeridas por agencias externas, por ejemplo el Banco Mundial);
- cambios relacionados con intervenciones internacionales y los esquemas de comercialización de carbono.

Inexactitud de los datos básicos, procedimientos y herramientas de seguimiento y verificación

Los datos inexactos en el inicio, durante y al final de un proyecto podrían subestimar o sobrestimar los beneficios actuales que obtendrían los pequeños propietarios y la sociedad en general de las actividades de secuestro de carbono. Se necesita realizar previsiones adicionales con el fin de determinar los aspectos indefinidos en el potencial de almacenamiento de carbono.

Confusión de prioridades y objetivos

El conflicto de intereses entre los compradores, los vendedores y los que propician el secuestro de carbono puede socavar el diseño exitoso de un proyecto y su implementación. Es más probable que los contribuyentes e inversionistas se concentren en las prácticas de maximización del manejo de carbono, mientras que es posible que los pequeños agricultores locales perciban el secuestro de carbono como un instrumento adicional en el manejo de riesgos con el objetivo final de mejorar sus mecanismos de adaptación en un ambiente más proclive al riesgo que al equilibrio del carbono. Esto podría implicar que una porción específica de tierra recibe una combinación de prácticas que incrementan, estabilizan o incluso disminuyen el carbono en forma alternativa durante la duración de un proyecto, dependiendo de las dinámicas generales del sistema agrícola y del sistema de medios de vida.

Fracaso en implementación de una estructura institucional

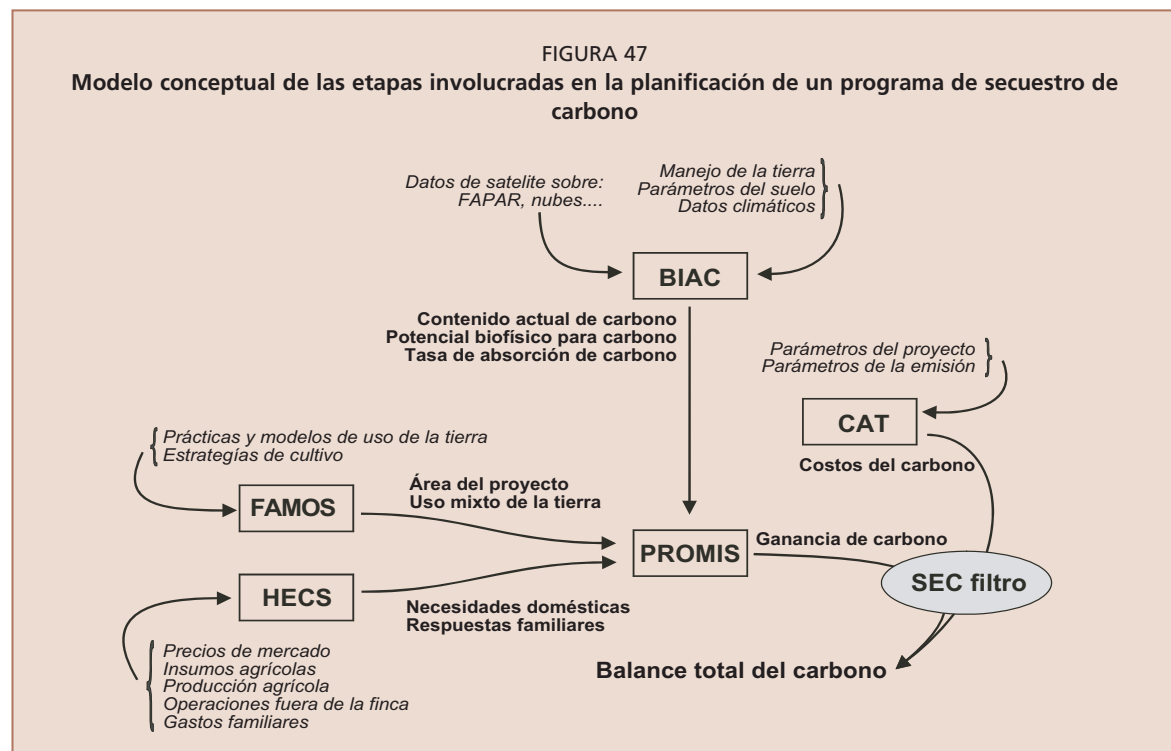
Es poco probable que un proyecto concerniente a un gran número de pequeños agricultores en un largo período pueda operar de forma exitosa sin una institución local o regional fuerte, respetada y confiable. Dicha institución debería organizar, movilizar y supervisar la participación de los agricultores y asegurar la conformidad con los acuerdos del proyecto y la justa remuneración de todos los participantes. Por lo tanto, se deberá dedicar tiempo y cuidado suficientes para la selección o creación de dicha institución.

Incremento de la desigualdad entre los participantes

Los proyectos tienen una tendencia a enfocarse en los agricultores más interesados, motivados e innovadores como participantes potenciales, simplemente debido a que los porcentajes de éxito a corto plazo posiblemente serán más altos. Estos agricultores son a menudo los que tienen la mayor dotación de recursos y enfrentan los menores riesgos y, por lo tanto, tienen mayor probabilidad de adoptar nuevas prácticas. A menudo se descartan los agricultores que más necesitan los beneficios del secuestro de carbono porque se encuentran en desventaja y enfrentan los riesgos mayores, y por ello están menos dispuestos a participar. Con el fin de minimizar el riesgo de incrementar la desigualdad entre las poblaciones rurales, necesitará tomarse en cuenta la paradoja «innovación – necesidades» (Rogers, 1995). Si uno de los objetivos más importantes del secuestro de carbono es mejorar los medios de vida del sector rural, se deberán crear incentivos diferentes para incluir a los grupos de agricultores económicamente más débiles (Tschakert, 2004a).

No aprobación de «actividades adicionales» para los países en desarrollo

El secuestro de carbono en los suelos no constituye un aspecto elegible durante el primer período de compromiso (2008-2012) del Protocolo de Kyoto. Aunque la presión política para incluirla al menos en el segundo período de compromiso se está incrementando, no hay garantía de que en el futuro habrá disponibilidad de apoyo financiero para los proyectos de secuestro de carbono del suelo a través del Marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (MCCC).



BIAC = análisis biogeoquímico del balance de carbono; FAMOS = opciones de manejo de los agricultores para la captura de carbono; HECS = economía de una propiedad para la captura de carbono; PROMIS = manejo de proyectos para incrementar el carbono del suelo; CAT = instrumento para la cuantificación del carbono; SEC filter = criterios de sostenibilidad y equidad.

PLANIFICACIÓN, DISEÑO Y MANEJO DE LOS PROYECTOS DE SECUESTRO DE CARBONO

Con el fin de planificar, diseñar, implementar, supervisar y manejar un proyecto de secuestro de carbono, se deben desarrollar una serie de etapas de trabajo. La Figura 47 presenta un modelo conceptual de estas etapas.

Los componentes de la Figura 47 necesitan desarrollarse como modelos de sistema mediante los cuales se podrían probar diferentes escenarios de planificación antes de implementar los proyectos. En detalle, los diferentes componentes son:

- Análisis biogeoquímico del balance de carbono (BIAC). El modelo BIAC, influenciado por diversas variables biofísicas y datos obtenidos mediante sensores remotos, produce información sobre el potencial biofísico para incrementar el almacenamiento del carbono del suelo, si se suministra información sobre la productividad primaria básica, el clima, los suelos y su manejo.
- Opciones de manejo para los productores para la retención de carbono (FAMOS). Este componente constituirá un modelo de como se emplean las prácticas de trabajo y de manejo de la tierra en el marco de un asentamiento determinado. El modelo establece la probabilidad que poseen los diferentes grupos de agricultores para intensificar la producción de ciertas porciones de su tierra, mientras establecen prácticas de barbecho o pasturas, dependiendo de un gran número de factores (p. ej. disponibilidad de mano de obra, fuentes alternativas de ingresos, acceso a créditos para cubrir las transacciones y costos de oportunidad, prácticas agronómicas y derechos de tenencia de la tierra). Los resultados son la cantidad de tierra dedicada a usos diferentes y la tasa de conversión.
- Economía de una propiedad para la retención de carbono (HECS). Este componente modela el desempeño económico, con y sin la captura de carbono. El modelo genera información acerca de como los ingresos y egresos financieros que surgen a partir de los nuevos usos de la tierra, podrían distribuirse en las

propiedades y entre propiedades. Un primer prototipo ha sido desarrollado y probado en Senegal y Sudán (Olsson y Tschakert, 2002).

- Manejo de proyectos para incrementar el carbono del suelo (PROMIS). Este modelo utiliza datos de los modelos anteriores para simular el grado en el que los agricultores y las aldeas pueden ser inducidos a participar en un proyecto de secuestro de carbono. Necesitará datos adicionales sobre cuán rápido los productores y las aldeas pueden ser contactados por el proyecto (principalmente a través de las redes institucionales existentes), cuantos grupos de trabajo e infraestructura se necesitan en este proceso, y otros detalles.
- Instrumento para la cuantificación del carbono (CAT). La cuantificación en el proyecto de las fuentes y sumideros de CO₂ es vital. Este componente calcula el balance total de carbono del proyecto. Los datos son necesarios para definir cualquier contrato con los inversionistas.
- Criterios de sostenibilidad y equidad (SEC). Como objetivo principal del proyecto está el mejoramiento de la vida de los agricultores de menores recursos; cualquier solución sugerida por otros medios, debe comprobarse contra los criterios existentes para apreciar su contribución, o de otra manera con relación a sistemas de producción agropecuaria más sostenibles y equitativos.

FASE I

SELECCIÓN DEL PROYECTO

La Fase I incluye la recolección de los datos necesarios para seleccionar un área de trabajo y para modelar los diferentes escenarios de secuestro de carbono. Este proceso es un diálogo iterativo entre cuestiones biofísicas y socioeconómicas. Las iteraciones deben ser:

- i. criterios socio-políticos para seleccionar una zona amplia de interés: por ejemplo, la selección de comunidades con necesidades de desarrollo, empleando criterios como la productividad y los ingresos; se podría seleccionar una unidad política principal;
- ii. la recolección de datos biofísicos para esta zona: datos sobre suelos, lluvia, biomasa y otros a partir de bases de datos, mapas y sensores remotos; estos datos deben ser suficientes para ejecutar los modelos de potencial biofísico:
 - iniciación de modelos con estos datos: el potencial biofísico para incrementar el contenido de carbono del suelo es un primer prerrequisito para un proyecto; este es principalmente dirigido en el componente BIAC de la Figura 47;
 - datos sobre las categorías de uso de la tierra y su distribución: los datos para estos levantamientos pueden provenir de fuentes publicadas, datos de teledetección y algunas observaciones de campo; estos datos pueden utilizarse luego con los modelos iniciales para producir proyecciones de carbono en diferentes escenarios de uso de la tierra y estos modelos de escenarios necesitan verificarse después con los datos muestreados del campo;
 - preparación de una cartera de posibilidades para cambio en el uso de la tierra: estas posibilidades se deben categorizar según al potencial de secuestro de carbono; cuando se suman en varias combinaciones y se comparan con las cantidades de carbono secuestrado a las que se quiere llegar, dicho portafolio suministra cifras ideales para los tipos propuestos de cambios en el uso de la tierra;
 - encuestas sobre en cuestionario de muestreo para determinar el área total de un posible proyecto: el área dependerá del número probable de participantes, el grado en que se podrían unir al proyecto y la mezcla de cambios en el uso de la tierra que puedan ocurrir: períodos más largos de barbecho, retiro total del cultivo de la tierra, incremento/disminución del área bajo riego e incremento/disminución del uso de fertilizantes.

FASE II

SELECCIÓN DEL ÁREA Y PERSONAL DEL PROYECTO

El primer proceso en la Fase II es la selección de un área para un proyecto específico, usando los criterios desarrollados en la Fase I. La selección será tanto un proceso político/administrativo como técnico.

Después de la selección del área se debe establecer el comité local de manejo y el equipo técnico. Este equipo debe diseñar luego los detalles del proyecto.

FASE III

DISEÑO DEL PROYECTO

Recordando que los sistemas de producción agropecuaria de las tierras áridas son diversos, complejos y sensibles a riesgos, el diseño de un proyecto de secuestro de carbono debe ajustarse al sistema y añadir componentes que los productores perciban como valiosos. Es importante para cualquier proyecto de secuestro de carbono suministrar varias oportunidades de ingresos, tanto en las actividades agrícolas como no agrícolas (p. ej., procesamiento y elaboración de la producción local, servicios). El valor añadido del procesamiento puede ser un componente importante para lograr un grupo de beneficios, p. ej. mejores acuerdos de comercialización, oportunidades de ingresos, reducción de los costos de transporte y provisión de subproductos útiles.

El tipo de componentes que puede ofrecer un proyecto de secuestro de carbono puede ser estructurado en forma de facilidades de créditos y facilidades de recompensas para los campesinos que han firmado el proyecto y servicios generales para toda la comunidad:

- créditos: las facilidades crediticias deben proveer préstamos justos y equitativos a los productores para inversiones que favorezcan el secuestro de carbono tales como la plantación de árboles, compra de animales, hornallas más eficientes, equipos y construcciones;
- recompensación: debe suministrar compensación a los campesinos por la producción que se esté perdiendo hasta que obtengan los ingresos de las inversiones en el secuestro de carbono;
- servicios: deben permitir a los campesinos adoptar actividades de secuestro de carbono y reducir los riesgos asociados con estas actividades, tales como los servicios veterinarios, entrenamiento y extensión, servicios de salud, suministro de agua, suministro de energía, manejo de la finca, mercadeo y vínculos con las autoridades.

Un programa de secuestro de carbono debería ser idealmente combinado con otras actividades de manejo de los gases de efecto invernadero con el fin de reducir las emisiones actuales y prevenir las emisiones futuras de esos gases. Dichas actividades deberían contribuir a un desarrollo sostenible de la comunidad en general. Algunos ejemplos son:

- suministro de electricidad a instituciones sociales vitales, como escuelas, clínicas y abastecimiento de agua, posiblemente provisto mediante luz solar y energía eólica. Estos instrumentos son económicamente viables a largo plazo, pero su implementación debe ser apoyada mediante facilidades de créditos y seguros. Las emisiones de carbono pueden reducirse si se reemplazan los equipos que funcionan con combustible diesel;
- cuando las cantidades de combustible de biomasa utilizadas para cocinar en una comunidad exceden el crecimiento anual de la vegetación, existe una emisión neta de carbono. Además la quema de los residuos de cultivo puede empobrecer los suelos. El reemplazo de las fogatas al abierto por hornallas mejoradas o por biogás obtenido a partir de la fermentación de desechos orgánicos tales como desechos del hogar o excrementos animales, reducen las emisiones de CO₂. La reducción de la quema de combustible obtenido de la madera, también puede reducir el riesgo de generación de humo que es catalogado por la Organización Mundial de la

Salud como uno de los mayores riesgos para la salud a nivel mundial.

➤ En un proyecto piloto financiado por el GEF, se determinó que hasta el 50 por ciento de la cantidad de combustible obtenido de la madera podría ahorrarse mediante hornallas de arcilla mejoradas (PNUD, 1999). Las hornallas fueron elaboradas a nivel local a partir

de material de la comunidad (pasta de barro y estiércol). En este caso se utilizó menos combustible para obtener el mismo resultado y se cambiaron las fuentes de combustible de árboles y sus ramas, por desechos de plantas. Las hornallas se emplearon en el 90 por ciento de las casas o grupos familiares. El Cuadro 47 indica el efecto sobre el consumo de combustible de madera en estas propiedades.

El consumo anual total de combustible de madera en el área del proyecto decayó de 1 836 toneladas a 432 toneladas entre el año 1995 y el 2000. La mano de obra utilizada inicialmente en la cosecha de combustible quedó disponible para emplearla de manera productiva en la agricultura y otras actividades fuera de la finca.

CUADRO 47

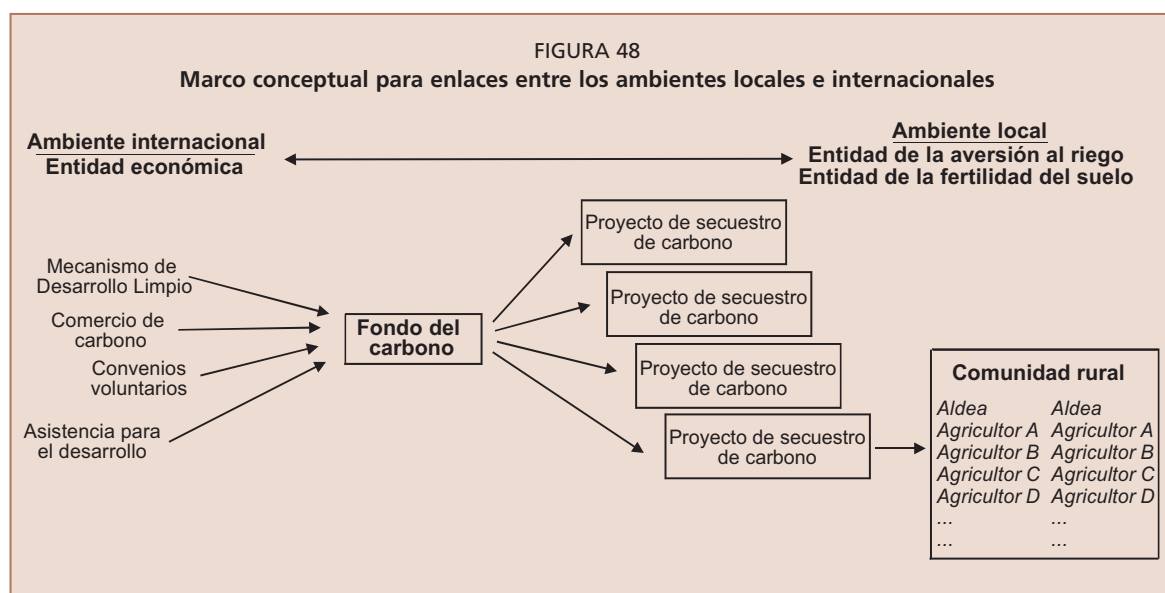
Consumo promedio de leña como combustible en propiedades de un proyecto piloto en Sudán, antes y después de utilizar las hornallas mejoradas

Consumo de combustible de madera	Antes de la utilización	Después de la utilización
	%	%
> 4,5 kg/día	60	0
4,5 kg/día	26	0
3 kg/día	10	0
1,5 kg/día	3	41
< 1,5 kg/día	0	59

Fuente: PNUD (1999).

FASE IV IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

En esta fase, se necesita establecer la infraestructura necesaria para el funcionamiento del proyecto. Una parte fundamental será crear los vínculos necesarios entre los ámbitos internacionales donde se formulan las políticas y se toman las decisiones y el ámbito nacional/local donde se está ejecutando el proyecto. En el ámbito internacional, el carbono es generalmente visto como una mercancía valorada en términos monetarios, mientras que a nivel local es visto como una entidad biofísica que tiene muchas funciones diferentes y se valora de muchas maneras (Figura 48). Un fondo de carbono, como el Fondo BioCarbono o el Fondo del Carbono para el Desarrollo Comunitario podrían funcionar como el vínculo requerido entre los ámbitos nacionales e internacional.



FASE V SEGUIMIENTO Y MANEJO

El seguimiento y los ajustes deben ser una parte integral de cualquier proyecto de secuestro de carbono. Un comité local de manejo o una institución local/regional encargada tendrá que jugar un papel crítico en esta fase de un proyecto de carbono. A través de ajustes y negociaciones continuas, esta tendrá que asegurar que todos los elementos de un contrato de carbono sean cumplidos, incluyendo el número de productores participantes, opciones de manejo seleccionadas, distribución justa de los créditos y las compensaciones, acceso igualitario a los servicios y otros. El seguimiento eficiente también requiere un caso testigo (un «escenario convencional») con el cual se puedan comparar los efectos de las opciones de manejo adoptadas o los modelos alterados del uso de la tierra. Dicho caso testigo podría estar basado en experimentos empíricos y controlados (parcelas control) que podrían ser simples aunque representativas del área del proyecto y cuidadosamente descritas. Estos experimentos podrían ser un tipo de «guía», mantenida también por el comité local de manejo seleccionado por el proyecto.

ESTRUCTURA DE POLÍTICAS Y DE FINANCIAMIENTO PARA EL SECUESTRO DEL CARBONO Y LA MITIGACIÓN DE LA POBREZA EN LAS TIERRAS ÁRIDAS

La idea del secuestro de carbono para la mitigación de la pobreza está basada en el hecho de que el manejo del carbono puede ser visto como el centro de varios sistemas internacionales. El CMNUCC estableció como su objetivo principal: *«la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático»*. Con posterioridad, la CCD plantea la preocupación de la degradación de los suelos en las tierras áridas -que de otra forma serían productivos- que han sido convertidos en tierras inadecuadas para satisfacer las necesidades de la población. Este proceso de degradación de la tierra también significa que el carbono almacenado en estos ecosistemas se ha perdido y ha sido añadido a la atmósfera en forma de gases de efecto invernadero (principalmente CO₂ y CH₄). De esta forma, la CCD y el CMNUCC conjuntamente con el Protocolo de Kyoto comparten un objetivo común: el manejo adecuado del carbono. Además, el cambio en el uso de la tierra, la agricultura y las actividades forestales reconocidas por el Protocolo de Kyoto también están estrechamente vinculados a la CCD y la CBD, si bien el Protocolo de Kyoto no establece de manera explícita su relación con estos.

El CMNUCC en sí mismo fue elaborado con los temas de la desertificación en la mente de los negociadores de las Partes. El Preámbulo recuerda:

...«y las disposiciones pertinentes de la resolución 44/172 de la Asamblea General, de 19 de diciembre de 1989, relativa a la ejecución del Plan de Acción para combatir la desertificación», un precursor de la CCD. Las Partes reconocieron luego que:

...«los países con ... zonas áridas y semiáridas, o zonas expuestas a inundaciones, sequía y desertificación, y los países en desarrollo con ecosistemas montañosos frágiles, son particularmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático».

Particularmente en los Artículos 4.8 (c) y 4.8 (e), las Partes del CMNUCC:

...« estudiarán a fondo las medidas que sea necesario ... inclusive medidas relacionadas con la financiación, los seguros y la transferencia de tecnología, para atender a las necesidades y preocupaciones específicas de las Partes que son países en desarrollo derivadas de los efectos adversos del cambio climático o del impacto de la aplicación de medidas de respuesta, en especial de ... (c) los países con zonas áridas y semiáridas, zonas con cobertura forestal y zonas expuestas al deterioro forestal ... : [y] ... (e) los países con zonas expuestas a la sequía y a la desertificación [...]»

Un requisito más explícito del CMNUCC que podría ser efectivo en la unión de las actividades más diversas contempladas bajo la CCD, es el artículo 4.1 (d) y (e): todas las partes deberán:

- (d) *promover la gestión sostenible y promover y apoyar con su cooperación la conservación y el reforzamiento, según proceda, de los sumideros y depósitos de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, inclusive la biomasa, los bosques y los océanos, así como otros ecosistemas terrestres, costeros y marinos;*
- (e) *cooperar en los preparativos para la adaptación a los impactos del cambio climático; desarrollar y elaborar planes apropiados e integrados para la ordenación de las zonas costeras, los recursos hídricos y la agricultura, y para la protección y rehabilitación de las zonas, particularmente de África, afectadas por la sequía y la desertificación, así como por las inundaciones [..].*

De esta manera, la CCD y el CMNUCC están vinculados y esta conexión provee una base conceptual para satisfacer los objetivos compatibles.

EL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO DEL PROTOCOLO DE KYOTO

El Protocolo de Kyoto proporciona un mecanismo que potencialmente puede convertirse en una vía para los programas agrícolas que involucran a los países en desarrollo con las características discutidas en este informe: el Artículo 12, conocido comúnmente como el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

El MDL es el único de los tres mecanismos flexibles que se dirige de manera explícita a los países en desarrollo. El propósito del MDL es asistir a los países en desarrollo en el cumplimiento de los compromisos establecidos en el Protocolo de Kyoto. Sin embargo, en el primer período de compromisos del Protocolo existe una restricción importante para la inclusión del secuestro de carbono del suelo en el MDL. Esto significa que la elegibilidad de las actividades de los proyectos en el sector Uso de la tierra, el cambio del uso de la tierra y la silvicultura, están limitadas a la forestación y a la reforestación (Artículo 12, Párrafo 3b y Artículo 3). Su tratamiento en los períodos de compromisos futuros será decidido como parte de las negociaciones sobre el segundo período. También es necesario decidir sobre como tratar el almacenamiento del carbono subterráneo.

Otra característica del MDL, restringiendo su aplicación a muchas tierras áridas de los países en desarrollo, son los complicados procedimientos para los proyectos del MDL y la escala requerida. La mayoría de los proyectos de MDL han sido muy largos, de hecho, demasiado complejos para una capacidad institucional insuficiente de algunos países africanos. Sin embargo, hubo una modificación importante de los estatutos del MDL en enero de 2003. Esta permite ahora proyectos en pequeña escala y grupos de proyectos en pequeña escala relacionados con el MDL. También incluye requisitos simplificados para los procedimientos básicos y el seguimiento de los logros de los proyectos.

Los procedimientos básicos y de seguimiento simplificados han sido definidos para 14 actividades del MDL en pequeña escala; estos se agrupan en tres tipos de proyectos como se muestra a continuación:

- proyectos tipo I: proyectos sobre energía renovable con una capacidad de producción equivalente a 15 megaWatts (o un equivalente adecuado). Las actividades elegibles son:
 - A. generación de electricidad por parte del usuario/grupo familiar;
 - B. energía mecánica para el usuario/empresa;
 - C. energía térmica para el usuario;
 - D. generación de energía para un sistema.
- proyectos tipo II: proyectos de mejoramiento de la eficiencia energética que reducen el consumo de energía, en cuanto a suministro y/o demanda, hasta el equivalente a 15 gigaWatt hora por día. Las actividades elegibles son:

- E. mejoramiento en la eficiencia energética con relación al suministro – transmisión y actividades de distribución;
 - F. mejoramiento en la eficiencia energética con relación al suministro – generación;
 - G. programas de eficiencia energética en cuanto a demanda para tecnologías específicas;
 - H. medidas de eficiencia energética y cambio de combustible para las instalaciones industriales;
 - I. medidas de eficiencia energética y cambio de combustible para las construcciones.
- proyectos tipo III: otros proyectos que reducen las emisiones antropogénicas por parte de las fuentes de emisión y emiten directamente menos de 15 kilotoneladas equivalentes de CO₂ anualmente. Las actividades elegibles son:
- J. agricultura;
 - K. cambio de los combustibles fósiles;
 - L. reducción de las emisiones en el sector del transporte;
 - M. recuperación del CH₄.

Aunque ninguno de estos tipos de proyectos incluyen actualmente operaciones de UTS y el uso de los suelos como sumideros, existe una fuerte presión internacional por parte de muchos promotores para incluir estas actividades elegibles como parte del MDL.

Incluso con las restricciones actuales sobre la inclusión de las actividades UTS, las actividades a pequeña escala podrían integrarse de manera exitosa en los proyectos de secuestro de carbono.

En el marco de varias convenciones de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente, existen un grupo de oportunidades importantes de financiamiento que podrían ayudar en la implementación de programas de secuestro de carbono para la mitigación de la pobreza. Las convenciones más importantes que se citan son el CMNUCC, la CBD y la CCD.

FONDOS PARA EL CARBONO

En el año 2002, el comercio global de créditos de emisiones de gases de invernadero se triplicó a cerca de 67 millones de toneladas de CO₂. Sin embargo, solamente el 13 por ciento de estos créditos involucraron países en desarrollo. Con el fin de incrementar el potencial de los países en desarrollo para participar en esta negociación, el Banco Mundial ha creado recientemente dos fondos de carbono específicamente dirigidos a los proyectos de los países en desarrollo. No obstante, estos fondos están basados en las reglas del MDL y son, a fin de cuentas, dependientes del MDL como organismo internacional para el reconocimiento y certificación. El objetivo de ambos fondos es el desarrollo de proyectos a pequeña escala en los países menos desarrollados. Ambos fondos comprenden una mezcla de financiamiento público y privado y cada uno tiene un objetivo de presupuesto de \$EE.UU. 100 millones.

FONDO DE BIOCARBONO

El Fondo de BioCarbono fue lanzado en noviembre de 2002 para iniciar sus operaciones en el otoño del año 2003 y ejecutarse durante 18 años (Newcombe, 2003). El fondo intenta suministrar financiamientos para los proyectos de sumideros de carbono a través de varias actividades de manejo del ambiente, tales como las descritas en este informe. El Fondo de BioCarbono debe apreciarse como experiencia de aprendizaje para los proyectos piloto, en cuanto a como implementar, dar seguimiento y verificar los esquemas de captura de carbono y también para probar la permanencia del carbono almacenado. Se estima que el Fondo de BioCarbono incluirá menos de 4 millones de toneladas de CO₂, que es mucho menos del uno por ciento estipulado por el MDL.

A pesar de la relativamente pequeña cantidad de carbono que pretende secuestrar, tiene el potencial para propiciar inversiones sustanciales en las tierras áridas. El Fondo de BioCarbono implementará proyectos en dos campos diferentes. El primero será consecuente con los requisitos actuales del MDL, o sea, limitado a la forestación y a la reforestación. El segundo campo, implementará actividades que actualmente no resultan elegibles para los créditos de carbono consecuentes con el Protocolo de Kyoto. Esto incluye el UTS y las actividades en los sumideros de suelo.

Otro aspecto discutido en el MDL es la posibilidad de obtener créditos para evitar la deforestación. Actualmente no existen créditos disponibles para este tipo de actividad. Sin embargo, el segundo campo del Fondo de BioCarbono bien podría suministrar oportunidades para explorarlos.

EL FONDO DE CARBONO PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO

El Fondo de Carbono para el Desarrollo Comunitario (FCDC) se anunció por parte del Banco Mundial en abril de 2003 y es similar en muchos aspectos al Fondo de BioCarbono. La diferencia principal es que el FCDC no invertirá en los sumideros de carbono sino en la reducción de las emisiones. El principio fundamental es que cada proyecto debe conducir a mejorías en el bienestar material de la comunidad o comunidades involucradas en el mismo.

Los proyectos que respondan al FCDC deben cumplir con los principios mencionados anteriormente. Sin embargo, los proyectos que no accedan a estos principios pueden proponerse y ser considerados para su financiamiento por parte del Comité Ejecutivo. Entre los ejemplos del tipo de bienes y servicios que podrían suministrarse por parte del FCDC son: electricidad para escuelas, clínicas de salud, talleres, abastecimiento de agua potable, servicios técnicos y médicos. En la mayoría de los casos, el patrocinador del proyecto suministrará los beneficios directamente o a través de la contratación con una tercera parte.

FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL

El FMAM es un programa conjunto de financiamiento establecido por los países desarrollados para cumplir sus obligaciones contraídas en varios tratados ambientales internacionales. El FMAM ha destinado \$EE.UU. 4 000 000 000 en donaciones y ha adicionado a esta cantidad \$EE.UU. 12 000 000 000 como cofinanciamiento obtenido a partir de otras fuentes para desarrollar más de 1 000 proyectos en más de 140 países en desarrollo y países con economías en transición. Existen seis áreas focales para el FMAM: la biodiversidad, el cambio climático, las aguas internacionales, el ozono, la degradación de la tierra y las sustancias contaminantes orgánicas persistentes. Los proyectos que son financiados y ejecutados a través del FMAM son gobernados por parte de los programas operacionales. Desde marzo de 2003 existen 14 programas operacionales a través de los cuales el FMAM contribuye con donaciones. Once de estos, reflejan las áreas focales originales del FMAM: cuatro en el campo de la biodiversidad, cuatro en el cambio climático y tres en las aguas internacionales. El programa operacional más relevante con relación al secuestro de carbono, según se describe en este informe es el OP12-Manejo Integrado del Ecosistema. Este programa operacional más importante abarca proyectos multisectoriales que dirigen el manejo de los ecosistemas de forma que se optimicen los bienes y servicios del ecosistema en al menos dos áreas focales dentro del contexto de un desarrollo sostenible.

El OP-12 está dirigido a iniciar proyectos en lo que se promueva el sinergismo entre tres de las áreas focales del FMAM -la biodiversidad, el cambio climático y las aguas internacionales- y la degradación de la tierra. Esto puede incluir dos o más de los siguientes beneficios:

- a. conservación y uso sostenible de la biodiversidad biológica, así como repartición equitativa de los beneficios que surjan del uso de la biodiversidad;

- b. reducción de las emisiones netas e incremento del almacenamiento de los gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres y acuáticos;
- c. conservación y uso sostenible de los cuerpos de agua, incluyendo las vertientes, los ríos, las cuencas y las zonas costeras;
- d. prevención de la contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos importantes a nivel global.

Los resultados esperados de los proyectos apoyados por el FMAM también deberán incluir:

- a. la creación de un ambiente propicio para: políticas adecuadas, regulaciones y estructuras de incentivos para apoyar el manejo integrado del ecosistema;
- b. fortalecimiento institucional: la capacidad de las instituciones para implementar enfoques de manejo integrado de ecosistemas se fortalece a través del entrenamiento y el apoyo logístico;
- c. inversiones: se realizan inversiones, basadas en enfoques de ecosistemas integrados y asociaciones de propietarios para dirigir de forma simultánea los aspectos locales/nacionales y globales en el contexto del desarrollo sostenible.

Con el fin de alcanzar los beneficios de ambas categorías mencionados anteriormente, el FMAM define un grupo de actividades que son elegibles para el financiamiento; estas se dividen en tres categorías:

- a. asistencia técnica, incluyendo: levantamientos de diferentes tipos, planes de acción para el desarrollo y modificación de políticas, desarrollo de los recursos humanos, desarrollo de mecanismos para la solución de conflictos y desarrollo de asociaciones en los sectores público/comunitario/privado.
- b. inversiones para propósitos tales como: la rehabilitación de pasturas para restaurar la vegetación original y el mejoramiento del manejo del agua, rehabilitación de cuencas reforestadas o zonas inundables, manejo integrado de ecosistemas costeros y desarrollo de medidas para controlar la contaminación y consecuentemente prevenir la degradación de los hábitats y minimizar los riesgos de salud pública.
- c. investigación dirigida a ciertos objetivos como: desarrollo de sistemas de manejo integrado de recursos naturales y desarrollo de enfoques innovadores y rentables sobre el manejo integrado de ecosistemas.

Las actividades apoyadas por el FMAM son siempre convenios de colaboración con los socios públicos y privados, incluyendo ONGs. Las actividades también deberán apoyar un plan de desarrollo más amplio del país o región donde se implementen.

FONDO PARA LA ADAPTACIÓN

El establecimiento del Fondo de Adaptación se decidió en la sexta sesión de la Conferencia de las Partes del MNUCC (COP6). Según esta decisión, el Fondo de Adaptación:

- se establecerá mediante el FMAM como fondo de créditos;
- financiará la implementación de los proyectos de adaptación en las Partes no comprendidas dentro del Anexo I, incluyendo las siguientes actividades de adaptación: evitar la deforestación, combatir la degradación de la tierra y la desertificación. Los proyectos serán desarrollados por las agencias ejecutantes de las Naciones Unidas;
- recibirán financiamiento generado mediante división de los ingresos del MDL en el orden del 2 por ciento de las reducciones de las emisiones certificadas – y mediante otras fuentes de financiamiento;
- serán manejados por parte del Comité Ejecutivo del MDL bajo la dirección del COP/MOP. El COP/MOP proporcionará directrices sobre los programas, las prioridades y los criterios de selección para financiar las actividades de adaptación.

FONDO PROTOTIPO DE CARBONO

El Fondo Prototipo de Carbono (FPC) tiene tres objetivos estratégicos primarios:

- reducción de las emisiones: para demostrar como los proyectos basados en la transacción de la reducción de emisiones de gases de invernadero pueden promover y contribuir al desarrollo sostenible y a disminuir los costos para cumplir con el Protocolo de Kyoto;
- diseminación del conocimiento: para suministrar a las Partes del MNUCC, al sector privado y otras partes interesadas la oportunidad de «aprender haciendo» el desarrollo de políticas, reglas y procesos de negocios para el logro de las reducciones de emisiones bajo el MDL y la Implementación Conjunta;
- asociaciones públicas-privadas para demostrar como el Banco Mundial puede trabajar en colaboración con el público y los sectores privados para movilizar nuevos recursos para los países miembros que solicitan préstamos, mientras que enfrenta los problemas ambientales globales por medio de mecanismos de mercado.

El Fondo Prototipo de Carbono establecerá áreas piloto para la generación de mecanismos de reducción de las emisiones dentro del marco de la Iniciativa Conjunta y el MDL. El Fondo invertirá las contribuciones realizadas por parte de compañías y gobiernos en los proyectos diseñados para promover la reducciones de las emisiones con el Protocolo de Kyoto y el marco emergente para la Iniciativa Conjunta y el MDL. Los contribuyentes, o «Participantes» en el Fondo recibirán una cuota prorata de las reducciones de las emisiones, verificadas y certificadas según los acuerdos alcanzados con los respectivos países donde tengan sede los proyectos.

Es poco probable que un enfoque puramente de mercado de carbono sea exitoso en las tierras áridas. Se requiere un enfoque multifocal donde se consideren otros aspectos como el desarrollo sostenible, la desertificación, la biodiversidad y la seguridad alimentaria. Los fondos de otras convenciones también podrían utilizarse para financiar los programas de secuestro de carbono en las tierras áridas (Cuadro 48).

CUADRO 48
Posibles fuentes de financiamiento para la aplicación de programas multifocales de secuestro del carbono en tierras áridas

Fondos de carbono suministrados por las convenciones de las NNUU	Sitio web
CONVENCIÓN PARA EL COMBATE DE LA DESERTIFICACIÓN (CCD)	www.unccd.int
<input type="checkbox"/> Mecanismo global (MG)	www.gm-unccd.org
<input type="checkbox"/> FMMA área focal sobre degradación de las tierras	www.gefweb.org
CONVENCIÓN SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO (MNUCC)	www.unfccc.int/
<input type="checkbox"/> FMAM Cambio Climático	www.gefweb.org
<input type="checkbox"/> Área multifocal del FMAM: Manejo Integrado de Ecosistemas	
<input type="checkbox"/> FMAM Cambio Climático Especial	
<input type="checkbox"/> FMAM Países Menos Desarrollados	
PROTOCOLO DE KYOTO (PK)	www.unfccc.int
<input type="checkbox"/> Fondo de Adaptación del FMAM	www.gm-unccd.org
<input type="checkbox"/> Fondo de BioCarbono	www.carbonfinance.org
<input type="checkbox"/> Fondo Prototipo del Carbono	www.prototypecarbonfund.org

Capítulo 7

Conclusiones

La concentración de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera se está incrementando como resultado del uso de combustibles fósiles, la producción de cemento y el cambio en el uso de la tierra. Este incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera está conduciendo al cambio climático y al calentamiento global. La preocupación acerca del cambio climático condujo al Protocolo de Kyoto, en una gran mayoría de los países se comprometieron a la reducción de sus emisiones de gases de invernadero y a incrementar los sumideros de carbono. Actualmente, la biosfera se considera que sea un sumidero de carbono que absorbe alrededor de 2,8 gigatoneladas de carbono al año, lo cual representa el 30 por ciento de las emisiones de los combustibles fósiles.

El proceso de secuestro de carbono del suelo o flujo de carbono al suelo forma parte del balance del carbono global. Muchos de los factores que afectan el flujo de carbono hacia y desde el suelo son afectados por las prácticas de manejo de la tierra. Si bien se desconoce el potencial real de retención del carbono del suelo terrestre, cualquier acción para secuestrar el carbono en la biomasa y en el suelo, en términos generales, incrementará su contenido de materia orgánica. A su vez, esto tendrá un impacto positivo sobre los ecosistemas desde el punto de vista ambiental, agrícola y sobre la biodiversidad. El potencial de secuestro de carbono a largo plazo se determina mediante el ingreso de carbono en los suelos y el tiempo de residencia en el depósito en el cual se almacena el carbono.

Los suelos de las tierras áridas han perdido una cantidad importante de carbono y estos tienen un gran potencial de rehabilitación desde el punto de vista del secuestro de carbono, estimado en 12-16 Pg de carbono. Existen vastas áreas de ecosistemas áridos en los países en desarrollo donde el mejoramiento de los sistemas agrícolas podría adicionar carbono a los suelos. Los resultados de los estudios de caso presentados en este informe muestran que existen diferentes prácticas para incrementar el contenido de carbono en los suelos.

Puesto que el secuestro de carbono en si mismo no es una prioridad en los países de menores recursos, las opciones de manejo de la tierra que incrementan el secuestro de carbono y al mismo tiempo mejoran la productividad y previenen la erosión y desertificación son de gran interés en estas regiones. Sin embargo, no es probable que los mecanismos actuales, tales como el MDL, puedan suministrar los fondos necesarios para ello. Aunque los suelos son el principal reservorio terrestre de carbono y se reconoce a la agricultura como una de las causas de emisiones de gases de efecto invernadero, ni las prácticas de manejo de suelos ni las de uso la tierra son elegibles dentro del primer período de compromisos del Protocolo de Kyoto.

Sin embargo, son necesarias inversiones en el secuestro de carbono en las tierras áridas, como áreas menos favorecidas debido a que constituyen el sitio de asentamiento de una gran cantidad de personas de escasos recursos y porque son los guardianes de recursos ambientales importantes que se encuentran en riesgo de degradación o desaparición. Las inversiones en mejor manejo de la tierra para incrementar la fertilidad del suelo y el secuestro de carbono también pueden justificarse, en muchos casos, debido a que constituyen situaciones positivas con mayor productividad agronómica y que contribuyen al crecimiento de la economía nacional, la seguridad alimentaria y la conservación de la biodiversidad.

Incrementar el secuestro de carbono en las tierras áridas degradadas podría tener beneficios ambientales, económicos y sociales para las poblaciones locales. Esta podría incrementar los beneficios de los productores, así como mitigar el calentamiento global, al menos en las próximas décadas, hasta que se desarrollen fuentes alternativas de energía. Por lo tanto, las iniciativas de secuestro de carbono vinculadas con el mejoramiento de los suelos degradados y la productividad de las plantas, y consecuentemente con la seguridad alimentaria y la mitigación de la pobreza en las regiones de tierras áridas, son bienvenidas y se encuentran entre las principales prioridades de la FAO.

Como es improbable que un enfoque puramente de mercado del carbono pueda ser aplicable en los sistemas agrícolas en pequeña escala de los países en desarrollo, será necesaria una estrategia multilateral para la movilización de fondos. El Mecanismo Global de la CCD promueve esa vía multilateral al implementar su mandato de incrementar la efectividad y eficiencia de los recursos financieros existentes y explorar mecanismos nuevos y adicionales de financiación para la implementación de la convención. Esto hace énfasis específico sobre los sistemas agrícolas de las áreas de tierras áridas de los países en desarrollo. Los enfoques multilaterales incluyen fuentes para combatir el cambio climático con los fondos contra la desertificación, los vínculos con medio de vida sostenibles y la provisión de beneficios visibles para los habitantes locales y la movilización de recursos del sector privado.

La CCD, el UNMCC, el CBD y el Protocolo de Kyoto comparten un objetivo común: el manejo adecuado de los suelos, incluyendo el incremento del carbono en el suelo. Por lo tanto, un objetivo importante del programa FAO-GM sobre secuestro de carbono es promover la sinergia entre las convenciones y el sector privado para el establecimiento de un fondo ambiental, especialmente para proyectos de secuestro de carbono en las tierras áridas. Existen oportunidades para las asociaciones bilaterales con las instituciones en los países industriales para iniciar los proyectos de secuestro de carbono que involucran las comunidades locales, también vinculados a las redes globales sobre secuestro de carbono. La FAO entiende que deben realizarse más esfuerzos para explorar y explotar esas oportunidades.

La FAO tomará parte en el diseño y ejecución de programas en tierras áridas de los países tropicales en base a las políticas regionales. También, hará notar a los gobiernos los beneficios que las medidas de secuestro de carbono pueden traer a las comunidades y sociedades agrícolas de las tierras áridas. La FAO podría cumplir también una función importante al proporcionar un soporte institucional seguro para la ejecución de los programas de secuestro de carbono que promueven la colaboración entre los productores locales y los inversionistas.

Referencias

- Abdurahman, M.D., Seeling, B., Rego, T.J. y Reddy, B.B. 1998. Organic matter inputs by selected cropping systems on a Vertisol in the semi-arid tropics of India. *Ann. Arid Zone*, 37: 363–371.
- Abril, A. y Bucher E.H. 2001. Overgrazing and soil carbon dynamics in the western Chaco of Argentina. *Appl. Soil Ecol.*, 16: 243–249.
- Albaladejo, J., Martínez-Mena, M., Roldán, A. y Castillo, V. 1998. Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semi arid environment. *Soil Use Man.*, 14: 1–5.
- Álvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century Model. *Soil Use Man.*, 17: 62–66.
- Álvarez, R., Díaz, R.A., Barbero, N., Santanatoglia, O. J. y Blotta, L. 1995. Soil organic carbon, microbial biomass and CO₂-C production from 3 tillage systems. *Soil Till. Res.*, 33: 17–28.
- Ansley, R.J., Dugas, W.A., Heuer, M.L. y Kramp, B.A. 2002. Bowen ratio/energy balance and scaled leaf measurements of CO₂ flux over burned *Prosopis* savanna. *Ecol. Appl.*, 12: 948–961.
- Badiane, A.N., Khouma, M. y Senè, M. 2000. *Région de Diourbel: Gestion des sols*. Drylands Research Working Paper 15. Crewkerne, R.U., Drylands Research.
- Balescent, J., Chenu, C., y Baladane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.*, 53: 215–220.
- Bass, S. y Dubois, O. 2000. *Rural livelihoods and carbon management*. Londres, IIED.
- Batjes, N.H. 1999. *Management options for reducing CO₂-concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil*. Wageningen, Países Bajos, International Soil Reference and Information Centre.
- Batjes, N.H. y Sombroek, W.G. 1997. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Glob. Change Biol.*, 3: 161–173.
- Bayer, C., Mielniczuk, J., Amado, T. J. C., Martín-Neto, L. y Fernández, S.V. 2000. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 54: 101–109.
- Breman, H. y De Wit, C.T. 1983. Rangeland productivity and exploitation in the Sahel *Science*, 221: 1311–1347.
- Breman, H., Groot, J. J. R. y van Keulen, H. 2000. *Resource limitations in Sahelian agriculture*. Global Environmental Change – Human and Policy Dimensions.
- Buschiazzo, D. E., Hevia, G. G., Hepper, E. N., Urioste, A., Bono, A. A. y Babinec, F. 2001. Organic C, N and P in size fractions of virgin and cultivated soils of the semi-arid pampa of Argentina. *J. Arid Env.*, 48: 501–508.
- Butterworth, J. A., Adolph, B. y Satheesh, P.V. 2000. *Human and social capital aspects of soil nutrient management, India*. Working Document. Chatham, R.U., Natural Resources Institute; Hyderabad Pastapur, India, Deccan Development Society; Tiptur Lakihalli, India, BAIF Institute of Rural Development.
- Campbell, C. A., Zentner, R. P., Selles, F., Biederbeck, V. O., McConkey, B. G., Blomert, B. y Jefferson, P.G. 2000. Quantifying short-term effects of crop rotations on soil organic carbon in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil. Sci.*, 80: 193–202.
- Chan, K.Y. y Bowman, A.M. 1995. Degradation of Australian vertisols after conversion from native grassland (*Astrelba lappacea*) to continuous cropping in a semi-arid subtropical environment. *Trop. Grass.*, 29: 210–217.
- Chone, T., Andreux, F., Correa, J. C., Volkoff, B. y Cerri, C.C. 1991. Changes in organic matter on an Oxisol from the Central Amazonian forest during eight years as pasture

- determined by ^{13}C isotope composition. In J. Berthelin, ed. *Diversity of environmental biogeochemistry*, pp. 397–405. Amsterdam, Países Bajos, Elsevier.
- Cole, V., Cerri, C., Minami, K., Mosier, A., Rosenberg, N. y Sauerbeck, D. 1996. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. In R.T. Watson, M.C. Zynowera & R.H. Moss, eds. *Climate change 1995. Impact, adaptations and mitigation of climate change: scientific technical analyses*, pp. 744–771. Contribution of Working group II to the Second Assessment Report of the IPCC. Cambridge, R.U., Cambridge University Press.
- Cole, C.V., Paustian, K., Elliott, E. T., Metherell, A. K., Ojima, D. S., y Parton, W. J. 1993. Analysis of agroecosystems carbon pools. *Wat. Air Soil Poll.*, 70: 357–371.
- Coleman, K. y Jenkinson, D.S. 1995. *RothC-26 3. A model for the turnover of carbon in soil: model description and users guide*. ISBN 0951 4456 69.
- Collinson, M. 2000. Farming systems research – understanding farmers and their farming. In: *A history of farming systems research*. Wallingford, R.U., CABI; Roma, FAO.
- Costantini, A., Cosentino, D. y Segat, A. 1996. Influence of tillage systems on biological properties of a Typic Argiudoll soil under continuous maize in central Argentina. *Soil Till. Res.*, 38: 265–271.
- Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S.A. y Totterdell, I.J. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408: 184–187.
- Curtin, D., Wang, H., Selles, F., Zentner, R. P., Biederbeck, V. O. y Campbell, C.A. 2000. Legume green manure as partial fallow replacement in semi-arid Saskatchewan: effect on carbon fluxes. *Can. J. Soil. Sci.*, 80, 499–505.
- Dahiya, R., Malik, R. S. y Jhorar, B.S. 2001. Organic mulch decomposition kinetics in semi-arid environment at bare and crop field conditions. *Arid Land Res. Man.*, 15, 49–60.
- Del Giorgio, P. A. y Duarte, C. M. 2002. Respiration in the open ocean. *Nature*, 420: 379–383.
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G. A. y Grove, J.H. 2002. A review of non-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semi-arid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.*, 65: 1–18.
- Doran, J. W., Elliott, E. T. y Paustian, K. 1998. Soil microbial activity, nitrogen cycling, and long-term changes in organic carbon pools as related to fallow tillage management. *Soil Till. Res.*, 49: 3–18.
- Dregne, H. E. 1976. *Soils of Arid Regions*. Elsevier, Amsterdam, Países Bajos. p. 237.
- Dregne, H. E. 2002. Land degradation in drylands. *Arid Land Res. Man.*, 16: 99–132.
- Drinkwater, L. E., Wagoner, P. y Sarrantonio, M. 1998. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature*, 396: 262–265.
- Duiker, S. W. y Lal, R. 2000. Carbon budget study using CO_2 flux measurements from a no till system in central Ohio. *Soil Till. Res.*, 54: 21–30.
- El Tahir, B. A. y Madibo, M.G. (en prensa). *Potential of indigenous leguminous tree species in improving properties of sandy soil in North Kordofan, Sudan*.
- Ellert, B. H. y Janzen, H. H. 1999. Short-term influence of tillage on CO_2 fluxes from a semi-arid soil on the Canadian Prairies. *Soil Till. Res.*, 50: 21–32.
- Elmqvist, B. y Olsson, L. 2003. A resilient dryland farming system under threat – gum arabic. *Int. J. Agrofor.*
- Falkowski, P., Scholes y R. J., Boyle, E. 2000. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 290: 291–296.
- Falloon, P. y Smith, P. 2002. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: a model evaluation for a regional scale application. *Soil Use Man.*, 18: 101–111.
- FAO. 1999a. *Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land-use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean*. Roma.
- FAO. 1999b. Kenya – country report, por S. M. Nandwa, P. T. Gicheru, J. N. Qureshi, C. Kibunja y S. Makokha. In: H. Nabhan, A. M. Mashali y A.R. Mermut, eds. *Integrated soil management for sustainable agriculture and food security in Southern and East Africa*. Roma.

- FAO. 2000a. *Understanding farming systems. A history of farming systems research*, by R. Hart. Roma.
- FAO. 2000b. *Land resources potential and constraints at region and country levels*. World Soil Resources Report No. 90. Roma.
- FAO. 2001a. *Farming systems and poverty. Improving farmer's livelihoods in a changing world*, por J. Dixon, A. Gulliver y D. Gibbon. Roma, y Banco Mundial, Washington DC.
- FAO. 2001b. *Soil carbon sequestration for improved land management*, por M. Robert. World Soil Resources Report No. 96. Roma.
- FAO. 2002a. *Land degradation assessment in drylands – LADA project*. World Soil Resources Reports No. 97. Roma.
- FAO. 2002b. Harvesting carbon sequestration through land-use change: A way out of rural poverty? *In: The state of food and agriculture 2002*. Roma.
- FAO. 2003. *Data sets, indicators, and methods to assess land degradation in drylands*. World Soil Resources Report No. 100. Roma.
- FAOCLIM 2. 2000. *Worldwide agroclimatic database*. FAO Agrometeorology Group.
- Feng, Y. S. y Li, X. M. 2001. An analytical model of soil organic carbon dynamics based on a simple «hockey stick» function. *Soil Sci.*, 166: 431–440.
- Franzluëbbers, A. J., Hons, F. M. y Zuberer, D.A. 1995. Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping. *Soil Till. Res.*, 34: 41–60.
- Franzluëbbers, A. J., Stuedemann, J. A., Schomberg, H. H. y Wilkinson, S. R. 2000. Soil organic C and N pools under long-term pasture management in the Southern Piedmont USA. *Soil Biol. Biochem.*, 32: 469–478.
- Garg, V.K. 1998. Interaction of tree crops with a sodic soil environment: Potential for rehabilitation of degraded environments. *Land Deg. Dev.*, 9: 81–93.
- Garin, P. y Faye, A. 1990. Evolution du rôle du bétail dans la gestion de la fertilité des terroirs sereer au Sénégal. *Cah. Rech. Dév.*, 26: 65–84.
- Garten, C. T. y Wullschleger, S.D. 2000. Soil carbon dynamics beneath switchgrass as indicated by stable isotope analysis. *J. Env. Qual.*, 29: 645–653.
- Gaur, A. C. 1992. Bulky organic manure and crop residues. *In: Fertiliser, organic manure, recyclable organic waste and biofertiliser*, pp. 36–51. New Delhi, Fertiliser Development and Consultant Organisation.
- Geesing, D., Felker, P. y Bingham, R.L. 2000. Influence of mesquite (*Prosopis glandulosa*) on soil nitrogen and carbon development: implications for global carbon sequestration. *J. Arid Env.*, 46: 157–180.
- Geiger, S. C., Manu, A. y Bationo, A. 1992. Changes in a sandy sahelian soil following. Crop residue and fertiliser additions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 172–177.
- Gichuki, F. N. 2000. *Makueni district profile: rainfall variability, 1950–1997*. Drylands Research Working Paper 2. Crewkerne, R.U., Drylands Research.
- Glenn, E. P., Pitelka, L. F. y Olsen, M.W. 1992. The use of halophytes to sequester carbon. *Wat. Air Soil Poll.*, 64: 251–263.
- Glenn, E., Squires, V., Olsen, M. y Frye, R. 1993. Potential for carbon sequestration in drylands. *Wat. Air Soil Poll.*, 70: 341–355.
- Goldewijk, K. K., Vanminnen, J. G., Kreileman, G. J. J., Vloedbeld, M. y Leemans, R. 1994. Simulating the carbon flux between the terrestrial environment and the atmosphere. *Wat. Air Soil Poll.*, 76: 199–230.
- Gregorich, E. G., Drury, C. F. y Baldock, J.A. 2001. Changes in soil carbon under longterm maize in monoculture and legume-based rotation. *Can. J. Soil. Sci.*, 81: 21–31.
- Gregorich, E. G., Rochette, P., McGuire, S., Liang, B. C. y Lessard, R. 1998. Soluble organic carbon and carbon dioxide fluxes in maize fields receiving spring-applied manure. *J. Env. Qual.*, 27: 209–214.
- Harris, F. 2000. Changes in soils fertility under indigenous agricultural intensification in the Kano region. Drylands Research Working Paper 36. Crewkerne, R.U., Drylands Research.

- Haynes, R.J. y Naidu, R. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nut. Cyc. Agroeco.*, 51: 123–137.
- Heathcote, R. 1983. *Arid lands: their use and abuse*. Londres, Longman.
- Hilhorst, T. y Muchena, F. 2000. Managing soil fertility in Africa: diverse settings and changing practice. In T. Hilhorst y F. Muchena, eds. *Nutrients on the move: soil fertility dynamics in African farming systems*. Londres, IIED Drylands Programme.
- Hoffmann, I. y Gerling, D. 2001. Farmers' management strategies to maintain soil fertility in a remote area in northwest Nigeria. *Ag. Ecosys. Env.*, 86: 263–275.
- Houghton, R. A. 1995. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850. In R. Lal, J. Kimble, E. Levin y B.A. Stewart, eds. *Soils and global change*, pp. 45–65. CRC Press. Inc.
- Humphries, S. W. y Long, S.P. 1995. WIMOVAC: a software package for modelling the dynamics of plant leaf and canopy photosynthesis. *Cabios*, 11: 361–371.
- Hunt, D. 1991. Farm system and household economy as frameworks for prioritising and appraising technical research: a critical appraisal of current approaches. In D.H.M. Haswell, ed. *Rural households in emerging societies: technology and change in sub-Saharan Africa*, pp. 49–76. Oxford, R.U., Berg.
- Hussain, I., Olsson, K. R. y Ebelhar, S.A. 1999. Long-term tillage effects on soil chemical properties and organic matter fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 1335–1341. International Fund for Agricultural Development. 1988. *Appraisal Report, En Nahud Cooperative Credit Project*. Khartoum.
- IPCC. 1990. *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva y Nairobi, WMP/UNEP.
- IPCC. 1996. *Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific, technical analyses*. Working Group II. Cambridge, RU, Cambridge University Press.
- IPCC. 2000. *Land use, land use change and forestry. A special report of the IPCC*. Cambridge, R.U., Cambridge University Press.
- IPCC. 2001. *Climate change: the scientific basis*. Cambridge, R.U., Cambridge University Press.
- Izac, A. M. N. 1997. Developing policies for soil carbon management in tropical regions. *Geoderma*, 79: 261–276.
- Izaurrealde, R. C., McGill, W. B. y Rosenberg, N.J. 2000. Carbon cost of applying nitrogen fertiliser. *Science*, 288: 809–810.
- Jacinte, P. A., Lal, R. y Kimble, J. M. 2002. Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisol as influenced by wheat residue amendment. *Soil Till. Res.*, 67: 147–157.
- Jackson, R. B., Banner, J. L., Jobbagy, E. G., Pockman, W.T. y Wall, D.H. 2002. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 418: 623–626.
- Jenkinson, D.S. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Phil. Trans. R. Soc.*, Series B, 329: 361–368.
- Jenkinson, D. S. y Rayner, J. H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.*, 123: 298–305.
- Jenkinson, D. S., Harris, H. C., Ryan, J., McNeil, A. M., Pilbeam, C. J. y Coleman, K. 1999. Organic matter turnover in calcareous soil from Syria under a two-course cereal rotation. *Soil Biol. Biochem.*, 31: 687–693.
- Juo, A. S. R., Franzluebbers, K., Dabiri, A. e Ikhile, B. 1995. Changes in soil properties during long-term fallow and continuous cultivation after forest clearing in Nigeria. *Ag. Ecosys. Env.*, 56: 9–18.
- Kapkiyai, J. J., Karanja, N. K., Qureshi, J. N., Smithson, P. C. y Woomer, P.L. 1999. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nitisol under long-term fertilizer and organic input management. *Soil Biol. Biochem.*, 31: 1773–1782.

- Kassas, M. 1999. Rescuing drylands: a project for the world. *Futures*, 31: 949–958.
- Kenya Agricultural Research Institute. 1999. *Soil fertility and plant nutrition*. Annual Report. Nairobi.
- Kern, J. S. y Johnson, M.G. 1993. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57: 200–210.
- Kirk, M. 1999. *Land tenure, technological change and resource use*. Frankfurt, Alemania, Peter Lang.
- Kirschbaum, M. U. F. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic storage. *Soil Biol. Biochem.*, 27: 753–760.
- Knapp, A. K. 1985. Effect of fire and drought on the ecophysiology of *Andropogon gerardii* and *Panicum virgatum* in a tallgrass prairie. *Ecology*, 66: 1309–1320.
- Kumar, S., Datta, R., Sinha, S., Kojima, T., Katoh, S. y Mohan, M. 2001. Carbon stock, afforestation and acidic deposition: An analysis of inter-relation with reference to arid areas. *Wat. Air Soil Poll.*, 130: 1127–1132.
- Kundu, S., Singh, M., Saha, J. K., Biswas, A., Tripathi, A. K. y Acharya, C. L. 2001. Relationship between C addition and storage in a Vertisol under soybean-wheat cropping system in sub-tropical central India. *J. Plant Nut. Soil. Sci.*, 164: 483–486.
- Lal, R. 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂- enrichment. *Soil Till. Res.*, 43: 81–107.
- Lal, R. 2000. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Adv. Agron.*, 71: 145–191.
- Lal, R. 2001a. World cropland soils as a source or sink for atmospheric C. *Adv. Agron.*, 71: 145–174.
- Lal, R. 2001b. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Clim. Change*, 51: 35–92.
- Lal, R. 2001c. The potential of soils of the tropics to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Adv. Agron.*, 76: 1–30.
- Lal, R. 2002a. Soil carbon dynamics in crop land and rangeland. *Env. Poll.*, 116: 353–362.
- Lal, R. 2002b. Carbon sequestration in dryland ecosystems of west Asia and north Africa. *Land Deg. Dev.*, 13: 45–59.
- Lal, R., Hassan, H. M. y Dumanski, J. 1999. Desertification control to sequester C and mitigate the greenhouse effect. In N. Rosenberg, R. C. Izaurralde y E. L. Malone, eds. *Carbon sequestration in soils: science. monitoring and beyond*, pp. 83–149. Columbus, EE.UU.A., Battelle Press.
- Lal, R., Kimble, J. M., Follet, R. F. y Cole, C.V. 1998. The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Chelsea, EE.UU.A., Ann. Arbor. Press.
- Leach, M. y Mearns, R. 1999. Environmental entitlements: dynamics and institutions in community-based natural resource management. *W. Dev.*, 27: 225–247.
- Li, C. S., Narayanan, V. y Harriss, R.C. 1996. Model estimates of nitrous oxide emissions from agricultural lands in the United States. *Glob. Biogeo. Cyc.*, 10: 297–306.
- Li, C. S., Frolking, S., Harriss, R. y Rolking, S. 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Glob. Biogeo. Cyc.*, 8: 237–254.
- Mafongoya, P. L., Barak, P. y Reed, J.D. 2000. Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization of tree leaves and manure. *Biol. Fert. Soils*, 30: 298–305.
- Mbogoh, S. 2000. *Makueni district profile: crop production and marketing 1988–1999*. Drylands Research Working Paper 7. Crewkerne, R.U., Drylands Research.
- Mbuvu, J.P. 2000. *Makueni district profile: soil fertility management*. Drylands Research Working Paper 6. Crewkerne, R.U., Drylands Research.
- Metting, F., Smith, J. y Amthor, J. 1999. Science needs and new technology for soil carbon sequestration. In: N. Rosenberg, R. Izaurralde y E. Malone, eds. *Carbon sequestration in soils. Science monitoring and beyond*, pp 1–34. Proc. St. Michaels Workshop. Columbus, EE.UU.A., Battelle Press.

- Miglierina, A. M., Iglesias, J. O., Landriscini, M. R., Galantini, J.A. y Rosell, R. A. 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties. *Soil Till. Res.*, 53: 129–135.
- Mortimore, M. 1989. *The causes, nature and rate of soil degradation in the northern most states of Nigeria and an assessment of the role of fertilizer in counteracting the problems of degradation.* Environment Department Working Paper No. 17. Washington, DC, World Bank.
- Mortimore, M. 2000. Profile of rainfall change and variability in the Kano-Maradi region, 1960–2000. Drylands Research Working Paper 25. Crewkerne, R.U., Drylands Research.
- Mortimore, M. y Adams, W. M. 1999. *Working the Sabel: environment and society in northern Nigeria.* Londres, Routledge.
- Nagarajan, M. y Sundaramoorthy, S. 2000. Effect of *Prosopis cineraria* (Linn.) druce on microbial biomass and soil C, N in arid agroforestry systems of western Rajasthan, India. *Ann. Arid. Zone*, 39: 431–438.
- Needelman, B. A., Wander, M. M., Bollero, G. A., Boast, C. W., Sims, G. K. y Bullock, D.G. 1999. Interaction of tillage and soil texture: biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 1326–1334.
- Newcombe, K.J. 2003. *Extending the carbon market to the world's poor.* Paris, ABCDE.
- Niles, J. O., Brown, S., Pretty, J. N., Ball, A. y Fay, J. 2002. Potential carbon mitigation and income in developing countries from changes in use and management of agricultural and forest lands. *Phil. Trans. R. Soc. Series A*, 360: 1621–1639.
- Nyberg, G., Ekblad, A., Buresh, R. y Hogberg, P. 2002. Short-term patterns of carbon and nitrogen mineralisation in a fallow field amended with green manures from agroforestry trees. *Biol. Fert. Soils*, 36: 18–25.
- Oldeman, L. R. y Van Lyden, G. W. J. 1998. Revisiting the GLASOD methodology. In: R. Lal, W.H. Blum, C. Valentine y B.A. Stewart, eds. *Methods for assessment of soil degradation*, pp. 423–440. Boca Raton, EE.UU.A., CRC/Lewis Publishers.
- Olsson, L. y Ardö, J. 2002. Soil carbon sequestration in degraded semi-arid agroecosystems – perils and potentials. *Ambio*, 31: 471–477.
- Olsson, L. y Tschakert, P. 2002. *Indigenous knowledge in African drylands and the Kyoto Protocol – a systems analysis approach.* Proc. Berlin Conference on the Human Dimension of Global Environmental Change.
- Oren, R., Ellsworth, D. S., y Johnsen, K. H. 2001. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂-enriched atmosphere. *Nature*, 411: 469–471.
- Osbañ, H. y Allen, C. 2002. Soil management at Fandou Béri, SW Niger: ethnopedological frameworks and soil fertility management. *Geoderma*, Special publication on ethnopedology.
- Øygard, R., Vedeld, T. y Aune, J. 1999. *Good practices in dryland management.* Noragric Agricultural University of Norway. pp. 116.
- Parton, W. J., Stewardt, W. B. y Cole, C.V. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*, 5: 109–1131.
- Parton, W. J., Schimel, D. S., Cole, C.V. y Ojima, D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plain grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 1173–1179.
- Parton, W. J., Scurlock, J. M. O., Ojima, D. S., Schimel, D. S. y Hall, D. O. 1995. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. *Glob. Change Biol.*, 1: 133–220.
- Paustian, K., Collins, H. P. y Paul, E. A. 1997. Management control on soil carbon. In: E.A. Paul, K. Paustian, E.T. Elliot y C.V. Cole, eds. *Soil organic matter in temperate agroecosystems. Long term experiments in north America*, pp. 15–49. Boca Raton, EE.UU.A., CRC Press.
- Phillips, R. E., Blevins, R. L., Thomas, G. W., Frye, W. W. y Phillips, S.H. 1980. No-tillage agriculture. *Science*, 208: 1108–1113.
- Plante, A.F. y McGill, W.B. 2002. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil Till. Res.*, 66: 79–92.

- PNUMA. 1991a. *Status of desertification and implementation of the United Nations Plan of Action to combat desertification*. Nairobi. 79 pp.
- PNUMA. 1991b. *GLASOD: global assessment of human and induced soil degradation*. Nairobi.
- PNUMA. 1992. *World atlas of desertification*. Nairobi.
- PNUMA. 1997. *World atlas of desertification*. 2nd Edition. Nairobi.
- Polwson, S. D., Smith, P. y Coleman, K. 1998. European network of long-term sites for studies on soil organic matter. *Soil Till. Res.* 47: 309–321.
- Pound, B. 2000. *Visit report, March 12–30, 2000*. Bangalore, India, Karnataka Watershed Development Society.
- Poussart, J.N. y Ardö, J. 2002. *Verification of soil carbon sequestration – sample requirements*. Soil Carbon Sequestration Conference, North Carolina, EE.UU.A..
- Powell, J.M. 1986. Manure for cropping: a case study from central Nigeria. *Exp. Agric.*, 22: 15–24.
- Prather, M., Derwent, R., Ehhalt, D., Fraser, P., Sanhueza, E. y Zhou, X. 1995. Other trace gases and atmospheric chemistry. In J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, H. Lee, B.A. Callender, E. Haites, N. Harris y K. Maskell, eds. *Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*, pp. 73–126. Cambridge, R.U., Cambridge University Press.
- Pretty, J. N., Thompson, J. y Kiara, J.K. 1995. Agricultural regeneration in Kenya: the catchment approach to soil and water conservation. *Ambio*, XXIV (1): 7–15.
- Pretty, J. N., Ball, A. S., Xiaoyun, L. y Ravindranath, N. H. 2002. The role of sustainable agriculture and renewable resource management in reducing greenhouse gas emissions and increasing sinks in China and India. *Phil. Trans. Roy. Soc., Series A*, 360: 1741–1761.
- Puget, P. y Drinkwater, L.E. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 771–779.
- Ramaswamy, V., Boucher, O. y Haigh, J., 2001. Radiative forcing of climate change. In J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, H. Lee, B.A. Callender, E. Haites, N. Harris y K. Maskell, eds. *Climate change 2001: the scientific basis*, pp. 349–416. Cambridge, R.U., Cambridge University Press.
- Rasmussen, P. E. y Collins, H. P. 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semi-arid regions. *Adv. Agron.*, 45: 93–134.
- Rasmussen, P.E. y Rohde, C.R. 1988. Long-term tillage and nitrogen fertilisation effects on organic nitrogen and carbon in a semi-arid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1114–1117.
- Rasmussen, P. E., Albrecht, S. L. y Smiley, R.W. 1998. Soil C and N changes under tillage and cropping systems in semi-arid Pacific Northwest agriculture. *Soil Till. Res.*, 47: 197–205.
- Reddy, G. N. S. 2001. *Human and social capital aspects of soil nutrient management, India*. Annex D: Karnataka fieldwork report. Tiptur, India, BAIF Institute for Rural Development.
- Reeder, J. D. y Schuman, G. E. 2002. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Env. Poll.*, 116: 457–463.
- Reenberg, A. 2001. Agricultural land use pattern dynamics in the Sudan-Sahel - towards an event-driven framework. *Land Use Pol.*, 18: 309–319.
- Reicosky, D.C. 1997. Tillage-induced CO₂ emission from soil. *Nut. Cyc. Agroeco.*, 49: 273–285.
- Reicosky, D. C., Kemper, W. D., Langdale, G. W., Douglas Jr., C. L. y Rasmussen, P.E. 1995. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Wat. Con.*, 50: 253–261.
- Rice, C. W., García, F. O., Hampton, C. O. y Owensby, C.E. 1994. Soil microbial response in tallgrass prairie to elevate CO₂. *Plant Soil*, 165: 67–74.
- Richey, J. E., Melack, J. M., Aufdenkampe, A. K., Ballester, V. M. y Hess, L.L. 2002. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. *Nature*, 416: 617–620.
- Ringius, L. 2002. Soil carbon sequestration and the CDM: opportunities and challenges for Africa. *Clim. Change*, 54: 471–495.

- Robert, M. 1996. *Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement*. Paris, Dunod/Masson. 240 pp.
- Rogers, E.M. 1995. *Diffusion of innovation*. New York, EE.UU.A., Free Press.
- Rosenberg, N. J., Izaurrealde, R. C. y Malone, E.L., eds. 1999. *Carbon sequestration in soils: science, monitoring and beyond*. Proc. St. Michaels Workshop. Columbus, EE.UU.A., Battelle Press; Boca Raton, EE.UU.A., CRC Press.
- Ryan, J. 1997. Change in organic carbon in long-term rotation and tillage trials in northern Syria. In R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett y B.A. Stewart, eds. *Management of carbon sequestration in soil*, p. 28.
- Sa, J. C., Cerri, C. C., Lal, R., Dick, W. A., Filho, S. P. V., Piccolo, M. C. y Feigl, B.E. 2001. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 1486–1499.
- Sagna-Cabral, M. A. 1989. *Utilisation et gestion de la matière organique d'origine animale dans un terroir du centre nord du Sénégal. Cas du village de Ndiamsil*. Montpellier, Francia, Centre National d'Etudes Agronomiques des Régions Chaudes.
- Schimel, D.S. 1998. The carbon equation. *Nature*, 393: 208–209.
- Schimel, D. S., House, J. I., y Hibbard, K. A. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 414: 169–172.
- Schlesinger, W. H. 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage in soils. *Nature*, 343: 232.
- Schlesinger, W. H. 1997. Biogeochemistry. *Geotimes*, 42: 44.
- Schlesinger, W. H. 1999. Carbon sequestration in soils. *Science*, 284: 2095.
- Schlesinger, W. H. 2000. Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. *Agric. Ecosys. Env.*, 82: 121–127.
- Schnitzer, M. 1991. Soil organic matter – the next 75 years. *Soil Sci.*, 151: 41–58.
- Schuman, G. E., Janzen, H. H. y Herrick, J. E. 2002. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Env. Poll.*, 116: 391–396.
- Scoones, I. 1999. New ecology and the social sciences: what prospects for a fruitful engagement? *Ann. Rev. Anthr.*, 28: 479–507.
- Scoones, I. 2001. *Dynamics and diversity: soil fertility and farming livelihoods in Africa: case studies from Ethiopia, Mali, and Zimbabwe*. Londres, Earthscan Publications Ltd.
- Scoones, I. y Chibudu, C. 1996. *Hazards and opportunities. Farming livelihoods in dryland Africa: lessons from Zimbabwe*. Londres, Zed Books.
- Scurlock, J. M. O. y Hall, D. O. 1998. The global carbon sink: a grassland perspective. *Glob. Change Biol.*, 4: 229–233.
- Selvaraju, R., Subbian, P., Balasubramanian, A. y Lal, R. 1999. Land configuration and soil nutrient management options for sustainable crop production on Alfisols and Vertisols of southern peninsular India. *Soil Till. Res.*, 52: 203–216.
- Silver, W. L., Ostertag, R. y Lugo, A.E. 2000. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. *Rest. Ecol.*, 8: 394–407.
- Sinha, S., Matsumoto, T., Tanaka, Y., Ishida, J., Kojima, T. y Kumar, S. 2002. Solar desalination of saline soil for afforestation in arid areas: numerical and experimental investigation. *Ener. Cons. Man.*, 43: 15–31.
- Six, J., Elliott, E. T. y Paustian, K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.*, 32: 2099–2103.
- Skujins, J., ed. 1991. *Semi-arid land and deserts: soil resource and reclamation*. New York, EE.UU.A., Marcel Dekker Inc. 668 pp.
- Smith, P. y Powlson, D.S. 2000. Considering manure and carbon sequestration. *Science*, 287: 428–429.
- Smith, W. N., Desjardins, R. L. y Grant, B. 2001. Estimated changes in soil carbon associated with agricultural practices in Canada. *Can. J. Soil. Sci.*, 81: 221–227.

- Smith, P., Powlson, D. S., Smith, J. U., y Elliot, E. T. 1997. Evaluation and comparison of soils organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 81 (special issue): 225.
- Smith, P., Goulding, K. W., Smith, K. A., Powlson, D. S., Smith, J. U., Falloon, P. y Coleman, K. 2001. Enhancing the carbon sink in European agricultural soils: including trace gas fluxes in estimates of carbon mitigation potential. *Nut. Cyc. Agroeco.*, 60: 237–252.
- Somda, Z. C. y Powell, J.M. 1998. Seasonal decomposition of sheep manure and forage leaves in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 29: 2961–2979.
- Sorbo, G. 2003. Pastoral ecosystems and the issue of scale. *Ambio*, 32: 113–117.
- Srivastava, J. P., Tamboli, P. M., English, J. C., Lal, R. y Stewart, B. A. 1993. Technological options for enhancing the sustainability of production systems. In: *Conserving soil moisture and fertility in the warm seasonally dry tropics*, pp. 61–68. World Bank Technical Paper No. 221. Washington, DC, World Bank.
- Studdert, G. A. y Echeverría, H.E. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1496–1503.
- Svejar, T. J. y Browing, J.A. 1988. Growth and gas exchange of *Andropogon gerardii* as influenced by burning. *J. Range Man.*, 14: 239–244.
- Swift R.S. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Sci.*, 166: 858–871.
- Swift, M. J., Seward, P. D., Frost, P. G. H., Qureshi, J. N. y Muchena, F.N. 1994. Longterm experiments in Africa: developing a database for sustainable land use under global change. In R.A. Leigh y Johnston A.E., eds. *Long-term experiments in agricultural and ecological sciences*, pp. 229–251. Wallingford, R.U., CAB International.
- Taboada, M. A., Micucci, F. G., Cosentino, D. J. y Lavado, R.S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the rolling pampa of Argentina. *Soil Till. Res.*, 49: 57–63.
- Thomas, D. S. G., ed. 1997a. *Arid zone geomorphology: process, form and change in drylands*. R.U., J. Wiley & Sons. 713 pp.
- Thomas, D. S. G. 1997b. Arid environments: their nature and extent. In D.S.G. Thomas, ed. *Arid zone geomorphology: process, form and change in drylands*, pp. 3–12. R.U., J. Wiley & Sons.
- Tiffen, M. y Mortimore, M. 1993. *More people, less erosion: environmental recovery in Kenya*. Chichester, R.U., John Wiley & Sons.
- Tiessen, H. y Cuevas, E. 1994. The role of organic matter in sustaining soil fertility. *Nature*, 371: 783–785.
- Tiessen, H. y Feller, C. 1998. Carbon sequestration and turnover in semi-arid savannas and dry forest. *Clim. Change*, 40: 105–117.
- Trumbmore, S. E., Davidson, E. A., Barbosa de Camargo, P., Nepstad, D. C. y Martinelli, L.A. 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Glob. Biochem. Cyc.*, 9: 515–528.
- Tschakert, P. 2004a. The costs of soil carbon sequestration: an economic analysis for smallscale farming systems in Senegal. *Agric. Sys.*, 81: 227–253.
- Tschakert, P. 2004b. Cattle, crops and carbon: prospects for carbon sequestration in smallholder farming systems in Senegal. *Land Deg. Dev.*, (en prensa).
- Tschakert, P. y Tappan, G. 2004. The social context of carbon sequestration: considerations from a multi-scale environmental history of the Old Peanut Basin of Senegal. *J. Arid Env.*, 59: 535–564.
- Tschakert, P., Khouma, M. y Sène, M. 2004. Biophysical potential for soil carbon sequestration in agricultural systems of the Old Peanut Basin of Senegal. *J. Arid Env.*, 59: 511–533.
- UNDP. 1999. Estimation and monitoring of carbon sequestration in Gireigikh community based range land rehabilitation project (SUD/93/G31), North Kordofan, Sudan. Khartoum, UNDP. 70 pp.
- Unger, P.W. 1990. Conservation tillage systems. *Adv. Soil Sci.*, 13: 27–68.

- Valentini, R., Matteucci, G. y Dolman, H. 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance of European forests. *Nature*, 404: 861–865.
- Vanamstel, A.R. y Swart, R.J. 1994. Methane and nitrous-oxide emissions – an introduction. *Fert. Res.*, 37: 213–225.
- Warren, A., y Khatir, A. 2003. Carbon sequestration, fallowing, intervention, variability, delivery and equity: evidence from the Sudan and the Sahel. *Dev. Env.*, (presentado).
- Whalen, J. K. y Chang, C. 2002. Macroaggregate characteristics in cultivated soils after 25 annual manure applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 1637–1647.
- Willms, W. D., Dormaar, J. F., Adams, B. W. y Douwes, H. E. 2002. Response of the mixed prairie to protection from grazing. *J. Range Man.*, 55: 210–216.
- Woomer, P. L., Palm, C. A., Quereshi, J. N. y Kotte-Same, J. 1997. Carbon sequestration and organic resource management in African smallholder management. In R. Lal, R.F. Follett y B.A. Stewart, eds. *Management of carbon sequestration in soil*, pp. 153–173. Boca Raton, EE.UU.A., CRC Press.
- Woomer, P. L., Martin, A., Albrecht, A., Resck, D. V. S. y Scharpenseel, H. W. 1994. The importance of management of soil organic matter in the tropics. In P.L. Woomer y M.J. Swift, eds. *Biological management of tropical soil fertility*, pp. 74–80. Chichester, R.U., John Wiley.
- Zeeuw, F.D. 1997. Borrowing of land, security of tenure and sustainable land use in Burkina Faso. *Dev. Change*, 28: 583–595.
- Zibilske, L. M., Bradford, J. M. y Smart, J. R. 2002. Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. *Soil Till. Res.*, 66: 153–163.

INFORMES SOBRE RECURSOS MUNDIALES DE SUELOS

1. Report of the First Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Rome, 19-23 June 1961 (I)**
2. Report of the First Meeting on Soil Survey, Correlation and Interpretation for Latin America, Rio de Janeiro, Brazil, 28-31 May 1962 (I)**
3. Report of the First Soil Correlation Seminar for Europe, Moscow, USSR, 16-28 July 1962 (I)**
4. Report of the First Soil Correlation Seminar for South and Central Asia, Tashkent, Uzbekistan, USSR, 14 September-2 October 1962 (I)**
5. Report of the Fourth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey (Subcommission on Land and Water Use of the European Commission on Agriculture), Lisbon, Portugal, 6-10 March 1963 (I)**
6. Report of the Second Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Rome, 9-11 July 1963 (I)**
7. Report of the Second Soil Correlation Seminar for Europe, Bucharest, Romania, 29 July-6 August 1963 (I)**
8. Report of the Third Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Paris, 3 January 1964 (I)**
9. Adequacy of Soil Studies in Paraguay, Bolivia and Peru, November-December 1963.**
10. Report on the Soils of Bolivia, January 1964 (I)**
11. Report on the Soils of Paraguay, January 1964 (I)**
12. Preliminary Definition, Legend and Correlation Table for the Soil Map of the World, Rome, August 1964 (I)**
13. Report of the Fourth Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Rome, 16-21 May 1964 (I)**
14. Report of the Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, Japan, 11-27 June 1964 (I)**
15. Report of the First Session of the Working Party on Soil Classification, Survey and Soil Resources of the European Commission on Agriculture, Florence, Italy, 1-3 October 1964 (I)**
16. Detailed Legend for the Third Draft on the Soil Map of South America, June 1965 (I)**
17. Report of the First Meeting on Soil Correlation for North America, Mexico, 1-8 February 1965 (I)**
18. The Soil Resources of Latin America, October 1965 (I)**
19. Report of the Third Correlation Seminar for Europe: Bulgaria, Greece, Romania, Turkey, Yugoslavia, 29 August-22 September 1965 (I)**
20. Report of the Meeting of Rapporteurs, Soil Map of Europe (Scale 1:1 000 000) (Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture), Bonn, Federal Republic of Germany, 29 November-3 December 1965 (I)**
21. Report of the Second Meeting on Soil Survey, Correlation and Interpretation for Latin America, Rio de Janeiro, Brazil, 13-16 July 1965 (I)**
22. Report of the Soil Resources Expedition in Western and Central Brazil, 24 June-9 July 1965 (I)**
23. Bibliography on Soils and Related Sciences for Latin America (1st edition), December 1965 (I)**
24. Report on the Soils of Paraguay (2nd edition), August 1964 (I)**
25. Report of the Soil Correlation Study Tour in Uruguay, Brazil and Argentina, June-August 1964 (I)**
26. Report of the Meeting on Soil Correlation and Soil Resources Appraisal in India, New Delhi, India, 5-15 April 1965 (I)**
27. Report of the Sixth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Montpellier, France, 7-11 March 1967 (I)**
28. Report of the Second Meeting on Soil Correlation for North America, Winnipeg-Vancouver, Canada, 25 July-5 August 1966 (I)**
29. Report of the Fifth Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Moscow, USSR, 20-28 August 1966 (I)**
30. Report of the Meeting of the Soil Correlation Committee for South America, Buenos Aires, Argentina, 12-19 December 1966 (I)**
31. Trace Element Problems in Relation to Soil Units in Europe (Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture), Rome, 1967 (I)**
32. Approaches to Soil Classification, 1968 (I)**
33. Definitions of Soil Units for the Soil Map of the World, April 1968 (I)**
34. Soil Map of South America 1:5 000 000, Draft Explanatory Text, November 1968 (I)**
35. Report of a Soil Correlation Study Tour in Sweden and Poland, 27 September-14 October 1968 (I)**

36. Meeting of Rapporteurs, Soil Map of Europe (Scale 1:1 000 000) (Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture), Poitiers, France 21-23 June 1967 (I)**
37. Supplement to Definition of Soil Units for the Soil Map of the World, July 1969 (I)**
38. Seventh Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Varna, Bulgaria, 11-13 September 1969 (I)**
39. A Correlation Study of Red and Yellow Soils in Areas with a Mediterranean Climate (I)**
40. Report of the Regional Seminar of the Evaluation of Soil Resources in West Africa, Kumasi, Ghana, 14-19 December 1970 (I)**
41. Soil Survey and Soil Fertility Research in Asia and the Far East, New Delhi, 15-20 February 1971 (I)**
42. Report of the Eighth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Helsinki, Finland, 5-7 July 1971 (I)**
43. Report of the Ninth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Ghent, Belgium 28-31 August 1973 (I)**
44. First Meeting of the West African Sub-Committee on Soil Correlation for Soil Evaluation and Management, Accra, Ghana, 12-19 June 1972 (I)**
45. Report of the Ad Hoc Expert Consultation on Land Evaluation, Rome, Italy, 6-8 January 1975 (I)**
46. First Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Nairobi, Kenya, 11-16 March 1974 (I)**
47. Second Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Addis Ababa, Ethiopia, 25-30 October 1976 (I)
48. Report on the Agro-Ecological Zones Project, Vol. 1 - Methodology and Results for Africa, 1978. Vol. 2 - Results for Southwest Asia, 1978 (I)
49. Report of an Expert Consultation on Land Evaluation Standards for Rainfed Agriculture, Rome, Italy, 25-28 October 1977 (I)
50. Report of an Expert Consultation on Land Evaluation Criteria for Irrigation, Rome, Italy, 27 February-2 March 1979 (I)
51. Third Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Lusaka, Zambia, 18-30 April 1978 (I)
52. Land Evaluation Guidelines for Rainfed Agriculture, Report of an Expert Consultation, 12-14 December 1979 (I)
53. Fourth Meeting of the West African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Banjul, The Gambia, 20-27 October 1979 (I)
54. Fourth Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Arusha, Tanzania, 27 October-4 November 1980 (I)
55. Cinquième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Lomé, Togo, 7-12 décembre 1981 (F)
56. Fifth Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Wad Medani, Sudan, 5-10 December 1983 (I)
57. Sixième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre Africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Niamey, Niger, 6-12 février 1984 (F)
58. Sixth Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Maseru, Lesotho, 9-18 October 1985 (I)
59. Septième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Ouagadougou, Burkina Faso, 10-17 novembre 1985 (F)
60. Revised Legend, Soil Map of the World, FAO-Unesco-ISRIC, 1988. Reprinted 1990 (I)
61. Huitième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Yaoundé, Cameroun, 19-28 janvier 1987 (F)
62. Seventh Meeting of the East and Southern African Sub-Committee for Soil Correlation and Evaluation, Gaborone, Botswana, 30 March-8 April 1987 (I)
63. Neuvième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Cotonou, Bénin, 14-23 novembre 1988 (F)
64. FAO-ISRIC Soil Database (SDB), 1989 (I)
65. Eighth Meeting of the East and Southern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Harare, Zimbabwe, 9-13 October 1989 (I)
66. World soil resources. An explanatory note on the FAO World Soil Resources Map at 1: 25 000 000 scale, 1991. Rev. 1, 1993 (I)
67. Digitized Soil Map of the World, Volume 1: Africa. Volume 2: North and Central America. Volume 3: Central and South America. Volume 4: Europe and West of the Urals. Volume 5: North East Asia. Volume 6: Near East and Far East. Volume 7: South East Asia and Oceania. Release 1.0, November 1991 (I)
68. Land Use Planning Applications. Proceedings of the FAO Expert Consultation 1990, Rome, 10-14 December 1990 (I)
69. Dixième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Bouaké, Odienné, Côte d'Ivoire, 5-12 novembre 1990 (F)

70. Ninth Meeting of the East and Southern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Lilongwe, Malawi, 25 November - 2 December 1991 (I)
71. Agro-ecological land resources assessment for agricultural development planning. A case study of Kenya. Resources data base and land productivity. Main Report. Technical Annex 1: Land resources. Technical Annex 2: Soil erosion and productivity. Technical Annex 3: Agro-climatic and agro-edaphic suitabilities for barley, oat, cowpea, green gram and pigeonpea. Technical Annex 4: Crop productivity. Technical Annex 5: Livestock productivity. Technical Annex 6: Fuelwood productivity. Technical Annex 7: Systems documentation guide to computer programs for land productivity assessments. Technical Annex 8: Crop productivity assessment: results at district level. 1991. Main Report 71/9: Making land use choices for district planning, 1994 (I)
72. Computerized systems of land resources appraisal for agricultural development, 1993 (I)
73. FESLM: an international framework for evaluating sustainable land management, 1993 (I)
74. Global and national soils and terrain digital databases (SOTER), 1993. Rev. 1, 1995 (I)
75. AEZ in Asia. Proceedings of the Regional Workshop on Agro-ecological Zones Methodology and Applications, Bangkok, Thailand, 17-23 November 1991 (I)
76. Green manuring for soil productivity improvement, 1994 (I)
77. Onzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Ségou, Mali, 18-26 janvier 1993 (F)
78. Land degradation in South Asia: its severity, causes and effects upon the people, 1994 (I)
79. Status of sulphur in soils and plants of thirty countries, 1995 (I)
80. Soil survey: perspectives and strategies for the 21st century, 1995 (I)
81. Multilingual soil database, 1995 (Multi)
82. Potential for forage legumes of land in West Africa, 1995 (I)
83. Douzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Bangui, République Centrafricain, 5-10 décembre 1994 (F)
84. World reference base for soil resources, 1998 (I)
85. Soil Fertility Initiative for sub-Saharan Africa, 1999 (I)
86. Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean, 1999. (I)
87. AEZWIN: An interactive multiple-criteria analysis tool for land resources appraisal, 1999 (I)
88. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂, 2000 (E)
89. Land resources information systems for food security in SADC countries, 2000 (I)
90. Land resource potential and constraints at regional and country levels, 2000 (I)
91. The European soil information system, 2000 (I)
92. Carbon sequestration projects under the clean development mechanism to address land degradation, 2000 (I)
93. Land resources information systems in Asia, 2000 (I)
94. Lecture notes on the major soils of the world, 2001 (I)
95. Land resources information systems in the Caribbean, 2001 (I)
96. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra, 2002 (I E F)
97. Land degradation assessment in drylands – LADA project, 2002 (I)
98. Quatorzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Abomey, Bénin, 9–13 octobre 2000, 2002 (F)
99. Land resources information systems in the Near East, 2002 (I)
100. Data sets, indicators and methods to assess land degradation in drylands, 2003 (I)
101. Biological management of soil ecosystems for sustainable agriculture, 2003 (I)
102. Secuestro de carbono en tierras áridas, 2006 (E I)
103. World reference base for soil resources 2006 – A framework for international classification, correlation and communication, 2006 (I)

Disponibilidad: julio de 2007

E – Español
 F – Francés
 I – Inglés

Multil – Multilingüe
 ** Agotado

Secuestro de carbono en tierras áridas

Esta publicación refleja parte del trabajo de la FAO sobre secuestro de carbono dentro del marco de su programa sobre planificación y manejo integrado de los recursos de tierras para el desarrollo rural sostenible. El informe presenta un análisis completo de los aspectos científicos y el potencial secuestro de carbono en las tierras áridas –algunas de las cuales son las zonas más degradadas y empobrecidas del mundo. El informe está basado en estudios de caso hechos sobre distintas zonas áridas. Incluye una revisión de las políticas y la clarificación de los distintos incentivos económicos relacionados con el secuestro de carbono de modo de determinar en que forma pueden ser usados los recursos disponibles y pueden ser ejecutados programas específicos para mejorar la seguridad alimentaria y los medios de vida en las tierras áridas.

ISBN 978-92-5-305230-1 ISSN 1020-430X



9 789253 052301

TC/M/Y5738S/1/05.07/1000