



SEQÜESTRO E EMISSÃO DE CARBONO EM ECOSISTEMAS AGRÍCOLAS
ESTRATÉGIAS PARA O AUMENTO DOS ESTOQUES DE MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS TROPICAIS



República Federativa do Brasil

Presidente: Fernando Henrique Cardoso

Ministério da Agricultura e do Abastecimento

Ministro: Marcus Vinicius Pratini de Moraes

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

Presidente: Alberto Duque Portugal

Diretores: Elza Ângela Battaglia Brito da Cunha
José Roberto Rodrigues Peres
Dante Daniel Giacomelli Scolari

Embrapa Solos

Chefe Geral: Doracy Pessoa Ramos

Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento: Celso Vainer Manzatto

Chefe Adjunto de Apoio e Administração: Paulo Augusto da Eira

SEQÜESTRO E EMISSÃO DE CARBONO EM ECOSISTEMAS AGRÍCOLAS
ESTRATÉGIAS PARA O AUMENTO DOS ESTOQUES DE MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS TROPICAIS

Carlos Alberto Silva
Pedro Luiz O. de Almeida Machado

Embrapa

Solos

Copyright © 2000. Embrapa
Embrapa Solos. Documentos n° 19

Revisão de Português

André Luiz da Silva Lopes

Tratamento editorial

Jacqueline Silva Rezende Mattos

Normalização bibliográfica

Léa Marques de Lima

Maria da Penha Delaia

Tiragem desta edição: 300 exemplares

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1.024

22460-000 Rio de Janeiro, RJ

Tel: (021) 274-4999

Fax: (021) 274-5291

E-mail: embrapa.solos@cnps.embrapa.br

Site: <http://www.cnps.embrapa.br>

Embrapa Solos

Catálogo-na-publicação (CIP)

Silva, Carlos Alberto.

Seqüestro e emissão de carbono em ecossistemas agrícolas : estratégias para o aumento dos estoques de matéria orgânica em solos tropicais / Carlos Alberto Silva, Pedro Luiz O. de Almeida Machado. – Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2000.

23p. – (Embrapa Solos. Documentos; 19).

ISSN 1517-2627

1.Ecossistemas florestais. 2.Solos tropicais - Matéria orgânica. 3.Sistemas de cultivo. 4.Carbono - seqüestro. 5.Carbono - Emissão. I.Machado, Pedro Luiz O. de Almeida. II.Título. III.Embrapa Solos (Rio de Janeiro, RJ). VI. Série.

CDD (21.ed.) 338.9

AUTORIA

Carlos Alberto Silva¹

Pedro Luiz O. de Almeida Machado¹

¹ Pesquisador, Embrapa Solos. E-mail: csilva@cnps.embrapa.br;
pedro@cnps.embrapa.br.

SUMÁRIO

- Resumo • vii*
- 1 INTRODUÇÃO • 1
 - 2 EFEITO ESTUFA E SUAS CONSEQÜÊNCIAS PARA O MEIO AMBIENTE • 4
 - 3 CICLO DO CARBONO • 6
 - 4 DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS TROPICAIS • 8
 - 4.1 Fatores que regulam os estoques de matéria orgânica em solo • 8
 - 4.2 Armazenamento de matéria orgânica no solo sob influência de diferentes sistemas de cultivo • 12
 - 4.3 Preservação da matéria orgânica do solo pela adoção do plantio direto • 13
 - 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS • 19
 - 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS • 21

RESUMO

A matéria orgânica do solo é um dos maiores compartimentos terrestres de carbono e uma das principais fontes de emissão de CO₂, CH₄ e outros gases-estufa para a atmosfera. O solo pode funcionar como uma fonte de emissão ou como um sumidouro de carbono atmosférico, dependendo do tipo de manejo adotado, podendo essa matriz vir a desempenhar um importante papel na mitigação dos efeitos negativos do efeito estufa sobre diferentes processos naturais. De modo geral, há uma maior preservação da matéria orgânica em áreas sob vegetação natural, havendo perdas consideráveis de carbono quando essas são convertidas em áreas de cultivo, principalmente nos locais onde há revolvimento freqüente do solo. Nas regiões tropicais, essas perdas de carbono do solo para a atmosfera são mais aceleradas, sendo comum, em áreas de floresta desmatada, a redução de mais de 50% nos estoques de matéria orgânica, em menos de 10 anos de cultivo. As perdas sistemáticas de matéria orgânica em áreas cultivadas relacionam-se às perdas de solo por erosão, ao cultivo excessivo do solo sem a reposição de nutrientes, ao manejo inadequado de resíduos vegetais, à adoção de métodos de preparo que priorizam o maior revolvimento do solo, ao uso inadequado do solo e ao cultivo de solos inundados ricos em carbono. Uma série de estudos têm mostrado que o uso de Práticas de Manejo Conservacionistas (PMC) tem um grande potencial em aumentar o seqüestro de carbono no solo e diminuir o fluxo de gases-estufa para a atmosfera. Entre essas práticas, poderiam

ser citadas: o aumento de áreas cultivadas sob sistema de plantio direto, o incremento no aporte de carbono ao solo, a permanência de restos culturais nas áreas de plantio, o controle da erosão, a diminuição do desmatamento, o aumento dos índices de produtividade como fator relevante à restrição de criação de novas fronteiras agrícolas, a melhoria da fertilidade do solo como fator essencial ao aumento da produção de resíduos culturais, a revegetação de solos degradados e, por fim, a preservação ambiental de solos orgânicos em ambiente de várzea. Em países industrializados, o uso dessas práticas tem sido cada vez mais freqüente, sendo necessário, para as condições de solos tropicais, a identificação e o ajuste dessas práticas conservacionistas. A exaustão dos estoques de matéria orgânica, além de comprometer a qualidade do solo e a sustentabilidade dos agroecossistemas, contribui também para o agravamento do efeito estufa, sendo, desse modo, premente a adoção de práticas de manejo de maior sustentabilidade, no sentido de preservar e aumentar os teores de carbono em solos tropicais.

Termos de indexação: matéria orgânica, solos tropicais, efeito estufa, plantio direto, preparo de solo, sistemas de cultivo.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos séculos, principalmente após o advento da revolução industrial, os reservatórios de carbono na biosfera, geosfera (incluindo os solos) e atmosfera têm sido bastante modificados pelas atividades agrícolas e industriais (Izac, 1997). O ciclo do carbono, de fato, reflete as trocas de CO₂ entre compartimentos de carbono ligados ao solo, à água e ao ar, havendo, nos anos mais recentes, uma grande transferência de carbono do solo e de reservatórios fósseis para a atmosfera. No período que compreende o final do século passado até os dias atuais, a concentração de CO₂ na atmosfera saltou de 280 para 365ppm por volume (Lal et al., 1998). A título de exemplo, um aumento de duas vezes nos níveis de CO₂ na atmosfera, em relação ao nível pré-revolução industrial, significa um acréscimo de temperatura na faixa de 1,5 a 4,5°C, além de causar outros efeitos não menos preocupantes, como a extinção de espécies componentes da fauna e flora terrestres, diminuição de produtividade das culturas em algumas áreas, degradação de florestas e elevação no nível do oceano (Mahlman, 1997, Lal et al., 1998).

Entre as principais fontes de emissão de carbono para a atmosfera, algumas atividades se destacam: combustão de combustíveis fósseis para a produção de energia, emissão de gases por veículos, produção de gases na indústria química e mudanças no uso do solo, incluindo o desmatamento e o subsequente cultivo das áreas desmatadas. Nas nações mais industrializadas, a atividade industrial e a queima de combustíveis fósseis são os principais fatores que contribuem para o efeito estufa. Nesses países, tem havido uma maior conscientização no sentido de utilizar práticas de manejo mitigadoras da emissão de carbono do solo para a atmosfera. Entre as estratégias mais usadas, incluem-se: controle da erosão, menor revolvimento do solo,

melhoria do manejo do solo e maior permanência dos restos de culturas nas áreas de plantio, aumento da área sob plantio direto, maior preservação ambiental de solos orgânicos presentes em áreas inundadas e o manejo adequado dos fertilizantes, já que a produção de biomassa nos diversos ecossistemas depende do grau de fertilidade do solo, isso tudo visando uma diminuição do fluxo de gases para a atmosfera.

Nas regiões tropicais, só agora essas estratégias que visam um aumento no seqüestro de carbono no solo começam a ser mais difundidas, contudo são poucas as práticas de manejo adaptadas aos solos mais comumente encontrados nessa zona geográfica. Em ecossistemas tropicais, há, basicamente, dois processos de uso de solo que afetam negativamente o ciclo de carbono, na medida em que aumentam as emissões de CO₂ e contribuem para o aquecimento global (Izac, 1997): o desmatamento acelerado, sendo 60% deste associado à agricultura itinerante com queima de vegetação, cultivo do solo e derrubada da mata em outra área para reinício do processo de degradação, e o processo de redução sistemática dos estoques de carbono em área sob cultivo (The World Bank, 1991).

Uma das principais conseqüências desses processos de decomposição acelerada da matéria orgânica é uma drástica diminuição na fertilidade do solo. Nos solos tropicais, predominam minerais e óxidos de argila de baixa atividade. Nestes tipos de solos, a matéria orgânica passa a ter um papel de extrema importância, pois, além de ser a principal matriz de cargas, é também o principal reservatório de nutrientes para as plantas. Para que não haja uma completa exaustão de nutrientes e uma queda drástica no rendimento das culturas, torna-se necessário a adoção de práticas de manejo que resultem em uma diminuição na emissão de CO₂ para a atmosfera e um aumento no seqüestro de carbono no solo. Segundo SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA (1997), preparo conservacionista é qualquer tipo de preparo

do solo que resulte em redução da perda de solo e água, deixando, no mínimo, 30% da superfície do solo coberta com resíduos vegetais. Essas práticas conservacionistas que visam uma melhoria na qualidade do solo são amplamente divulgadas, contudo há uma necessidade urgente que elas sejam identificadas e o seu uso seja estimulado, via políticas governamentais. Em última instância, as considerações que serão abordadas nesse documento se referem à identificação de estratégias de manejo de solo, com ênfase em ecossistemas agrícolas tropicais, que resultem em uma redução da emissão de CO₂ para a atmosfera e um aumento nas quantidades de carbono seqüestradas no solo, contribuindo, desse modo, para uma diminuição dos danos associados ao efeito estufa.

Com o agravamento do efeito estufa, o planeta pode passar por mudanças catastróficas no próximo século. A exaustão dos estoques de matéria orgânica no solo e o aumento da emissão de CO₂ para a atmosfera comprometem em muito a sustentabilidade dos agroecossistemas tropicais, onerando ainda mais o custo das diversas cadeias produtivas do agronegócio.

2 EFEITO ESTUFA E SUAS CONSEQÜÊNCIAS PARA O MEIO AMBIENTE

A temperatura no interior de uma casa de vegetação é mais alta do que a temperatura ambiente. Isso acontece porque o vidro não permite que a radiação de ondas longas seja refletida para o exterior da casa de vegetação. Alguns gases na natureza possuem propriedades análogas ao vidro, ou seja, eles também absorvem determinados comprimentos de onda de luz, não permitindo que parte do calor que chega à Terra seja refletido para o espaço. Isso é o que comumente chamamos de efeito estufa.

Os gases responsáveis pelo efeito estufa podem ser tanto de origem natural (dióxido de carbono, CO₂; vapor d'água, monóxido de carbono, CO; metano, CH₄ e óxidos gasosos nitrogenados, NO_x), quanto sintética (clorofluorcarbono e clorofluorhidrocarbono, conhecidos também como CFCs). Os gases sintéticos foram introduzidos na década de 30, ao passo que as emissões dos gases-estufa naturais se intensificaram com o advento da Revolução Industrial (Lal et al., 1998). Em 1850, a concentração de CO₂ na atmosfera era de aproximadamente 280ppmv (parte por milhão por volume). Agora, está próxima a 365ppmv, um acréscimo de cerca de 30%. Nos dias atuais, as atividades humanas contribuem, todo ano, para um aporte de cerca de 7 bilhões de toneladas de CO₂ na atmosfera, o que representa acréscimo anual de cerca de 1% na concentração de gases. Nesse ritmo, a concentração de CO₂ poderá chegar, entre 2.050 e 2.100, a 560ppmv, o dobro do valor pré-revolução industrial.

O efeito estufa é um fenômeno natural que permite o surgimento e a manutenção da vida na Terra. Sem ele, a superfície da Terra seria, em média, 33°C mais fria. Em condições de efeito estufa normal, parte da radiação solar que entra na atmosfera é refletida e volta para o espaço. O mesmo acontece na Terra, ou seja, parte da radiação que chega à superfície do nosso planeta também é refletida para o espaço, sendo o restante da radiação solar absorvida pela superfície terrestre. A queima excessiva de combustíveis fósseis pelas atividades humanas, o desmatamento e as queimadas de florestas e a decomposição acelerada da matéria orgânica em áreas agrícolas aumenta a concentração de

gases-estufa na atmosfera. Esse aumento intensifica a retenção do calor pelo efeito estufa, o que contribui para o aquecimento global.

De fato, as temperaturas médias na superfície terrestre subiram entre 0,3°C e 0,6°C desde de 1860, havendo indícios de que a temperatura da Terra nos anos 90 está ainda mais alta. Segundo relatório do Departamento de Energia dos Estados Unidos (Estados Unidos, 1999), com o aumento do aquecimento global, a Terra ficará mais quente e mais úmida, havendo mais chuvas e enchentes em algumas áreas. Outras regiões poderão sofrer secas crônicas, sendo difícil prever ao certo as conseqüências, mas, conforme a magnitude do aquecimento global, elas podem ser incontroláveis, já que a previsões sinalizam para um aumento das áreas de deserto. Com o aumento da temperatura na superfície terrestre, haverá um expansão do volume da água e um maior derretimento de geleiras, o que poderá elevar ainda mais o nível do mar. Estima-se que até o ano 2100 a elevação no nível das águas será, em média, de 50cm. Haverá também conseqüências negativas para a agricultura. O aquecimento poderá resultar em queda de produção em algumas áreas, mas, em compensação, poderá permitir a agricultura em regiões que hoje são muito frias. Com o maior aquecimento da superfície terrestre, há ainda um sério risco de desaparecimento de zonas ecológicas, com perdas de habitats e extinção de espécies.

3 CICLO DO CARBONO

Os quatro compartimentos principais de carbono no globo são: oceanos, atmosfera, ecossistemas terrestres e formações geológicas contendo carbono fóssil e mineral (Figura 1). O 'pool' de carbono orgânico no solo (1.500Pg) representa o equilíbrio entre o carbono adicionado ao solo pela vegetação e o perdido para a atmosfera via a atividade de microrganismos decompositores. Além do carbono orgânico, os solos, principalmente aqueles localizados em regiões áridas e semi-áridas, contém também em torno de 1.000Pg de formas inorgânicas de C, na forma de calcitas.

Os solos do mundo constituem um dos cinco principais 'pools' globais de carbono. Esses "pools" incluem: "pool" oceânico, contendo 38.000Pg de C; "pool" geológico, com 5.000Pg consistindo de 4.000Pg de carvão, 500Pg de óleo e 500Pg de gás natural; solo, com 2.500Pg; "pool" atmosférico com 760Pg e "pool" da biomassa terrestre, com 620Pg. O reservatório de carbono no solo contém dois componentes, um orgânico com 1.550Pg de C na profundidade de 1m de solo e o inorgânico, que contém 950Pg de C na forma de carbonatos. Desse modo, o reservatório de C no solo é cerca de 3,3 vezes maior do que o atmosférico e 4 vezes o 'pool' de C na biomassa terrestre. Esses cinco compartimentos de carbono na natureza são interconectados, havendo, sistematicamente, troca de carbono entre eles.

O incremento de C do "pool" atmosférico situa-se na faixa de 3,2Pg/ano. São três as principais atividades antropogênicas que contribuem para o acréscimo no reservatório de carbono na atmosfera: i) queima de combustíveis fósseis; ii) manufatura de cimento; iii) desmatamento, mudança de uso do solo e cultivo, que resultam em diminuição dos estoques de C ligados à matéria orgânica do solo. Até a década de 1950, 75 a 80% do aumento de C atmosférico era devido ao desmatamento e mudança no uso do solo. Nos anos 70, a contribuição dessas práticas caiu para próximo de 50% do aumento anual na concentração de C na atmosfera. Na década de 90, somente 20% do acréscimo anual de C na atmosfera pode ser atribuído ao desmantamento, mudança de uso do solo e cultivo.

Historicamente, as perdas de carbono dos compartimentos solo e biomassa terrestre tem se situado na faixa de 50 a 100Pg e de 100 a 150Pg, respectivamente. A magnitude e a taxa de diminuição de C do solo é aumentada pela degradação e declínio da qualidade do solo (Lal, 1999). Entre os principais processos de degradação do solo, poderiam ser citados: i) degradação física; ii) degradação química; iii) degradação biológica. Existe, todavia, um grande potencial em reverter esses processos de degradação e, ao mesmo tempo, aumentar o seqüestro de C no solo. O potencial de seqüestro de carbono pode ser estimado em 50 a 75% da perdas históricas de carbono. Nas áreas de cerrado brasileiras, esse potencial pode até superar os níveis originais de carbono estocados em solos solos sob vegetação natural. Para isso, é necessário manejar adequadamente os solos, sendo bastante importante corrigir os problemas de acidez e aplicar, de forma correta, fertilizantes, no sentido de eliminar a toxidez de alumínio e a deficiência severa de fósforo. Com essas operações, sempre há ganhos em produtividade das culturas, contudo, para que os estoques de matéria orgânica sejam aumentados, é necessário que a maior passagem de C no solo e a permanência de resíduos culturais nas áreas de plantio sejam priorizados.

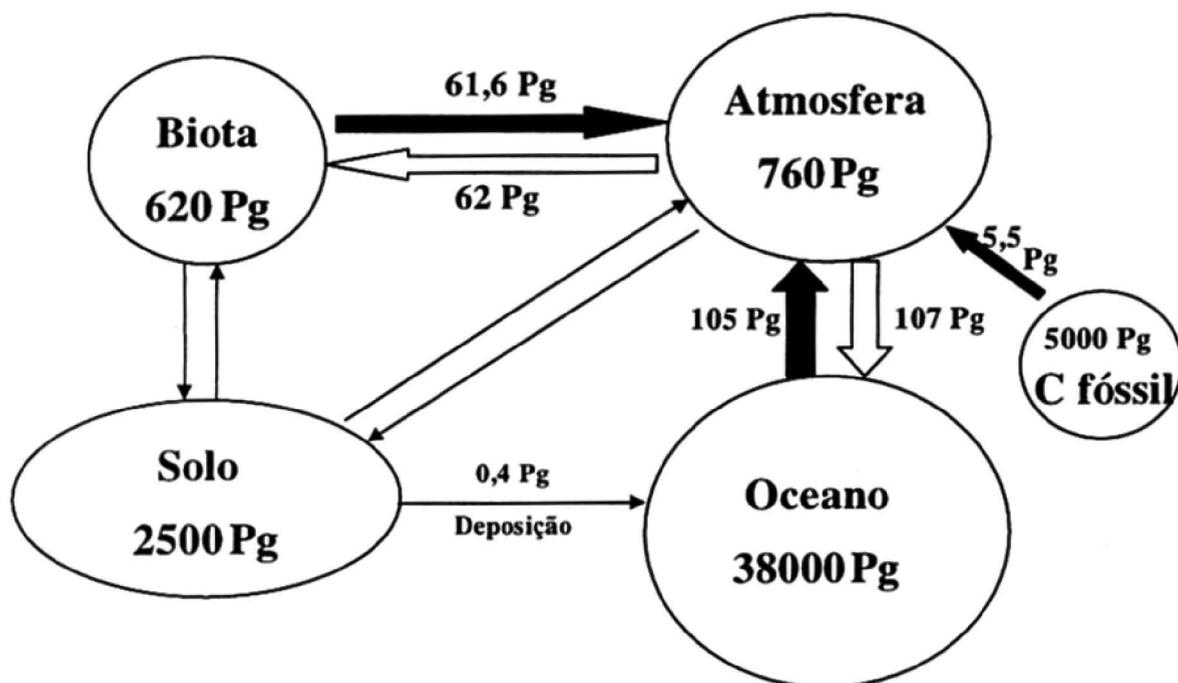


FIGURA 1. Ciclo e compartimentos globais do carbono. Fonte: Lal (1999).

4 DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS TROPICAIS

4.1 Fatores que regulam os estoques de matéria orgânica em solo

A matéria orgânica do solo engloba resíduos de plantas, animais e microrganismos em diversos estádios de decomposição, em íntima associação com os minerais do solo (Christensen, 1992). O estoque de matéria orgânica no solo depende da intensidade dos processos de adição de resíduos vegetais e de decomposição de compostos orgânicos. Num dado instante, o estoque de matéria orgânica depende da quantidade de resíduos orgânicos que são adicionadas ao solo e do grau de proteção oferecido à matéria orgânica pelo solo.

O modelo apresentado por Noordwijk et al. (1997) ilustra com clareza os fatores que determinam a taxa de decomposição e o grau de proteção de resíduos orgânicos no solo (Figura 2). São vários os fatores biológicos, químicos e físicos que conferem às frações orgânicas grau variado de proteção ao ataque de microrganismos. A inibição química de organismos decompositores é freqüentemente atribuída a compostos que protegem os tecidos vegetais de ataques de pragas e de agentes causadores de doenças (Noordwijk et al., 1997). A associação de frações orgânicas com minerais no solo é outro mecanismo de proteção que limita o acesso, às frações orgânicas, de microrganismos decompositores. A estabilização da matéria orgânica pela interação com minerais do solo, segundo Zech et al. (1997), é mais importante em solos tropicais do que em temperados, devido às condições climáticas prevalentes na primeira região favorecerem a rápida decomposição dos componentes orgânicos. As barreiras físicas à decomposição resultam da oclusão de compostos orgânicos pelos minerais de argila e pela exclusão de organismos decompositores de determinados poros do solo. As frações orgânicas lábeis (polissacarídeos e proteínas), mais sujeitas à rápida decomposição, são protegidas no interior dos agregados, o que resulta em maior perenização dessas substâncias no solo (Zech et al., 1997). Num dado instante, o esquema apresentado na Figura 2 mostra que os estoques de matéria orgânica dependem da quantidade de resíduos orgânicos que são adicionadas ao solo, do grau de proteção oferecido à matéria orgânica pelos fatores mencionados e das interações

e influências que esses fatores exercem sobre a diversidade e atividade dos microorganismos decompositores.

Em solos sob vegetação natural, a preservação da matéria orgânica tende a ser máxima, pois o revolvimento do solo é mínimo, sendo o aporte de carbono nas florestas mais elevado do que em áreas cultivadas (Lathwell & Bouldin, 1981; Nobre & Gash, 1997). Em áreas cultivadas, os teores de matéria orgânica, via de regra, diminuem, já que as frações orgânicas são mais expostas ao ataque de microorganismos, em função do maior revolvimento e desestruturação do solo (Resck et al., 1991, Christensen, 1996).

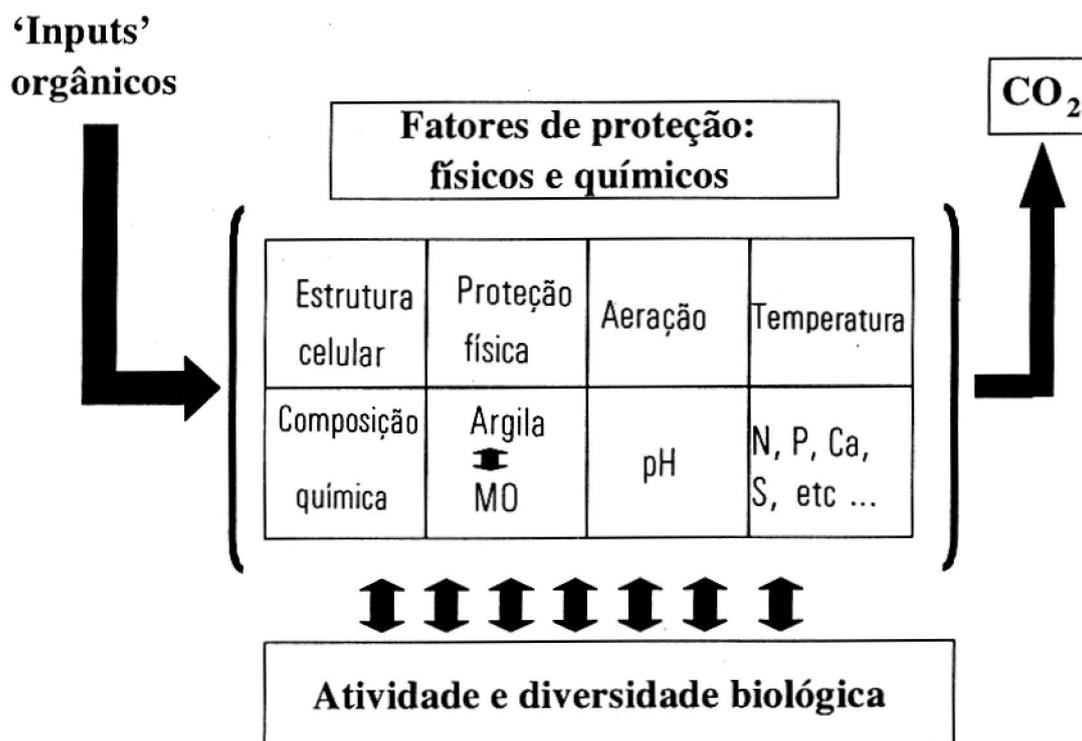


FIGURA 2. Fatores que condicionam a decomposição de resíduos orgânicos no solo. Fonte: Noordwijk *et al.* (1997).

Em solos tropicais, as perdas de carbono observadas após a retirada da vegetação natural e cultivo do solos são mais elevadas do que em regiões temperadas. Muitas vezes, a decomposição da matéria orgânica é bastante acelerada em solos tropicais, havendo situações em que os estoques de carbono são reduzidos em mais de 50%, em menos de 10 anos de cultivo (Shang & Tiessen, 1997). Perdas sistemáticas de matéria orgânica, em cinco anos de plantio de soja em solos de cerrado do Oeste baiano, foram observadas por Silva et al. (1994), tendo-se constatado decréscimos de 80, 76 e 41% do estoque inicial de matéria orgânica em Areia Quartzosa, Latossolo Vermelho-Amarelo textura média e Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, respectivamente. Esses dados ilustram o fato de que as maiores reduções nos teores de matéria orgânica ocorrem nos solos mais arenosos, contudo, em termos de estoque, as perdas de matéria orgânica são maiores nos solos mais ricos em argila.

Uma inferência que pode ser feita é a de que as perdas de matéria orgânica em ambas as situações são aceleradas, sendo necessária a adoção de práticas de manejo criteriosas, no sentido de melhor conservar a matéria orgânica em solos tropicais.

As perdas de matéria orgânica nos solos cultivados, além de se mostrarem dependentes da textura do solo e da adoção de diferentes práticas de manejo, mostram-se condicionadas também pela vegetação original do solo. Os modelos apresentados por Scholes et al. (1997), adaptados de Jenkinson (1990), ilustram com bastante propriedade esse fenômeno, na medida que os diagramas mostrados representam as perdas históricas de carbono com o cultivo de dois ecossistemas tropicais, floresta e cerrado (Figura 3). Segundo os dados ilustrados nessa figura, o aporte de carbono no ecossistema de floresta é, em média, de $11\text{ton ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. Pela predição realizada, os estoques de C reduzirão de 43 para $28,5\text{ton ha}^{-1}$ nesse ecossistema, após o cultivo com a adição de $2\text{ton ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ de carbono. No ecossistema de cerrado, os estoques de carbono serão reduzidos de 18 para 16ton ha^{-1} , ou seja, proporcionalmente as perdas de matéria orgânica serão bem menores. Os estoques iniciais de C no cerrado são menores do que na floresta, sendo bastante factível o cultivo de espécies que propiciem a adição de $1,5\text{ton C ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. Por tudo isso, o desmatamento e o cultivo de uma área ou de outra têm conseqüências ambientais diferenciadas, e os

danos causados pela redução nos estoques de C serão mais acentuados nas áreas de vegetação mais exuberante.

Essas perdas aceleradas de matéria orgânica com o cultivo adquirem proporções catastróficas em solos tropicais, pois há nessa região um predomínio de solos ácidos altamente intemperizados, com baixa reserva de nutrientes e com presença de argilas, quartzo, óxidos e sesquióxidos de Fe e Al de baixa atividade. Nessas condições, a matéria orgânica desempenha um papel de extrema importância na determinação do grau de fertilidade do solo, muito mais do que em solos temperados, e, por conseguinte, no rendimento das culturas, pois é nessa matriz que estão os maiores reservatórios de cargas elétricas e de nutrientes. Por tudo isso, a perda de carbono e seus efeitos sobre a CTC constituem fortes indícios da fragilidade dos solos tropicais, enfatizando a importância do manejo e preservação da matéria orgânica (Silva et al., 1994).

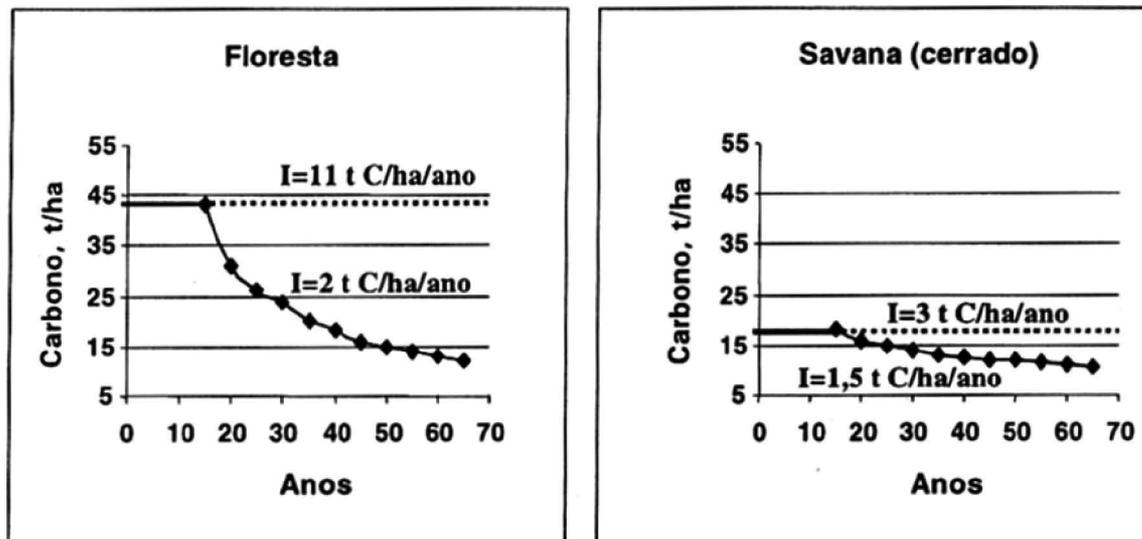


FIGURA 3. Simulação dos efeitos de desmatamento e cultivo sobre o estoque de carbono em dois ecossistemas tropicais, floresta e cerrado. I = 'Input' de C por ha/ano. Fonte: Adaptado de Scholes *et al.* (1997) e Jenkinson (1990).

4.2 Armazenamento de matéria orgânica no solo sob influência de diferentes sistemas de cultivo

As quantidades de carbono armazenadas no solo mantêm relação direta com a taxa de adição de resíduos vegetais e inversa com a taxa de decomposição da matéria orgânica. A taxa de decomposição da matéria orgânica depende, entre outros fatores, do grau de aeração, da relação C/N e da natureza dos resíduos vegetais (Alexander, 1977). O efeito dos sistemas de culturas no teor de carbono depende da quantidade de carbono produzido e adicionado ao solo, da relação C/N dos resíduos, do controle da erosão, em função da cobertura proporcionada à superfície do solo, e da composição química dos restos de cultura adicionados ao solo (Testa et al., 1992). No estudo de Testa et al. (1992), o uso de sucessões de culturas com produções de biomassa maiores que a da vegetação espontânea permitiu elevar o teor de carbono do solo, desde que cultivadas sem revolvimento do solo, com aumentos tanto maiores e mais rápidos, quanto maior a produção adicional de biomassa das sucessões. O aumento no teor de carbono do solo promoveu um aumento da CTC, com destaque para os sistemas milho + guandu, siratro e milho + lablabe, incluindo, todos, leguminosas de origem tropical.

No estudo de Debarba & Amado (1997), os sistemas de produção de milho com a inclusão de adubos verdes proporcionaram elevada cobertura do solo e foram efetivos no controle da erosão, reduzindo as perdas de solo, água e matéria orgânica. A perda de matéria orgânica no solo descoberto foi de $7.124,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, ao passo que no sistema de cultura mais conservacionista, que incluiu o plantio de aveia + ervilhaca/milho, a perda de matéria orgânica reduziu-se drasticamente, situando-se na faixa de $28 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Os dados obtidos por Burle et al. (1997), num período de 10 anos, evidenciaram uma relação direta entre as quantidades de resíduos adicionados ao solo e os teores de carbono no solo (0 a 17,5cm), representada pela seguinte equação: $C \text{ no solo (\%)} = 0,9436 + 0,008639 (C \text{ resíduo, ton ha}^{-1})$ ($r=0,91$). Os dados dessa equação nos permite inferir que seria necessário, num período de 10 anos, adicionar $67,3 \text{ ton ha}^{-1}$ de carbono ($16,8 \text{ ton ha}^{-1}$ de resíduos por ano) para se aumentar em 1% o teor de matéria orgânica do solo, ou seja, nos

agroecossistemas tropicais as quantidades de resíduos adicionadas ao solo, no sentido de se aumentar a matéria orgânica, são bem maiores do que em regiões temperadas, já que na última região, para crescer o teor de matéria orgânica no solo em 1%, seria necessário, em média, adicionar 10ton ha⁻¹ de resíduos vegetais por ano, durante 10 anos.

4.3 Preservação da matéria orgânica do solo pela adoção do plantio direto

O revolvimento e o preparo intensivos do solo acelera a decomposição da matéria orgânica, aumenta a liberação de carbono para a atmosfera e contribui para o aquecimento global do planeta (Rosenzweig & Hilled, 2000). Entre os sistemas de preparo de solo, o plantio direto é o mais conservacionista, pois, ao contrário dos sistemas que envolvem a aração, gradagem e escarificação do solo, esse sistema visa perturbar ao mínimo a estrutura do solo e preserva ao máximo os resíduos culturais, de modo que pelo menos 30% da superfície do solo seja coberta por palha.

O diagrama apresentado na Figura 4, baseado em modelo elaborado por Donigian et al. (1994), ilustra os efeitos dos sistemas de preparo de solo sobre os estoques de matéria orgânica, na medida que representa as perdas históricas de carbono do solo em área de milho dos EUA, no período de 1907 (ano de retirada da vegetação nativa e início do cultivo do solo) a 1990. Os resultados obtidos indicam um perda sistemática de carbono no período que vai de 1907 a 1950, época que coincide com a adoção de práticas intensivas de revolvimento do solo, a ponto de se ter notado um decréscimo de 47% no estoque de carbono presente no solo em 1907. Com a adoção do sistema de plantio direto, no início da década de 60, as perdas de C foram contidas e, a partir da década de 70, houve um maior seqüestro de carbono, sendo notado, no ano de 1990, estoque de C no solo correspondente a 61% daquele presente no início do cultivo da área de milho estudada.

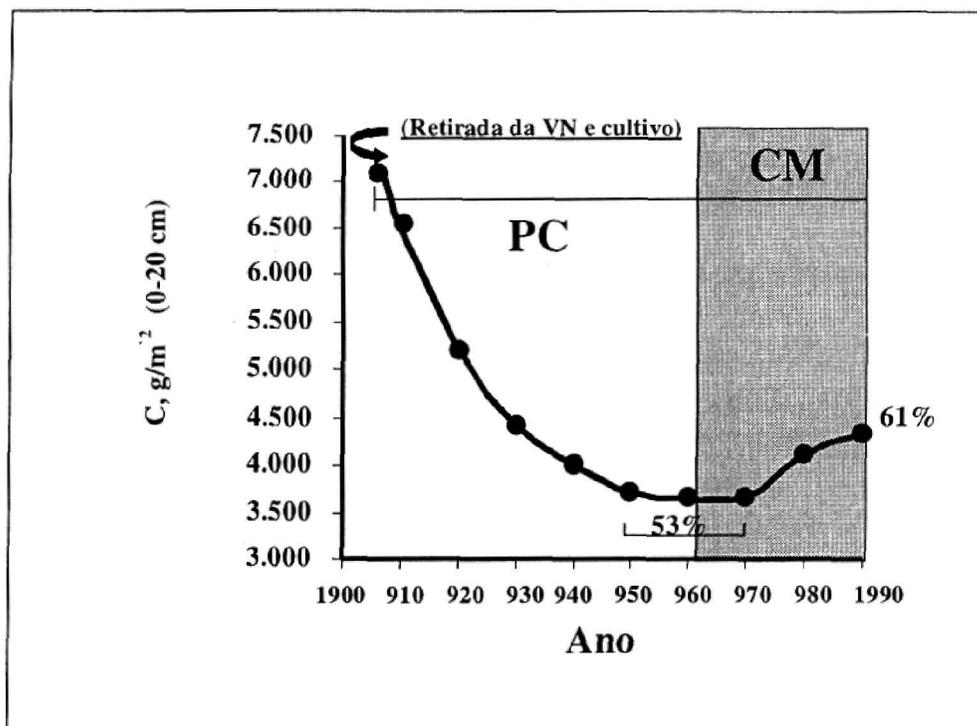


FIGURA 4. Estoque de carbono em solo (0-20 cm) de região temperada sob efeito de retirada da vegetação natural, VN, cultivo e de sistemas de preparo do solo. I = 'input' de C por ha/ ano, PC, plantio convencional; CM, cultivo mínimo. Fonte: adaptado de Donigian al (1994)

Kern & Johnson (1993), ao avaliarem os teores de carbono no solo e a emissão de C por queima de combustíveis fósseis em 3 cenários de adoção de plantio direto nos Estados Unidos até o ano de 2020, verificaram que, no cenário 1, ou seja, naquele em que a taxa de adoção de plantio direto no ano de 1993 (27%) seria mantida, quase 200 milhões de toneladas de C seriam liberadas para a atmosfera. Nos cenários 2 e 3, em que as taxas de adoção do plantio direto seriam, respectivamente, de 57 e 76%, ou seja, uma predominância desse sistema de preparo sobre o convencional, as perdas de C para a atmosfera seriam diminuídas, a ponto de no cenário de maior adoção do plantio direto as quantidades de C perdidas serem aproximadamente a metade da prevista para o cenário 1. Além disso, no cenário em que, no

ano de 2020, 76% da área plantada nos EUA estariam sob o sistema de plantio direto, as quantidades de C seqüestradas no solo seriam incrementadas em quase 400 milhões de toneladas, o que contribuiria sobremaneira para o aumento do grau de fertilidade do solo (Saturnino & Landers, 1997).

No Brasil, onde já há uma área de quase 12,5 milhões de hectares sob plantio direto, são vários os estudos que analisam as relações entre os sistemas de preparo do solo e os estoques de matéria orgânica. Entre esses, destacam-se os apresentados na Tabela 1, que trata dos aumentos nos teores de C no solo sob plantio direto, em relação a áreas com revolvimento do solo. A análise desses dados nos revela que o incremento nos teores de C em área sob plantio direto se concentra na camada superficial do solo, de 0 a 5cm de profundidade. Nas camadas mais profundas, há uma inversão, ou seja, os teores de C nas áreas com revolvimento do solo são maiores, em relação à área sem preparo. Um fato importante é o de que a maioria dos estudos apresentados avalia somente os teores de C e não os estoques de matéria orgânica no solo. Os dados apresentados na Tabela, desse modo, nos revela a importância em se avaliar as quantidades de matéria orgânica armazenadas no solo, no sentido de identificar se a ausência de revolvimento do solo, nos diversos agroecossistemas brasileiros, aumenta ou não o seqüestro de carbono.

TABELA 1. Aumento percentual nos teores de carbono do solo pela adoção do plantio direto em diferentes agroecossistemas brasileiros, em relação aos teores de C medidos em áreas sob preparo convencional do solo (aração + gradagem).

Fonte	Profundidade de solo cm			
	0-5	5-10	10-20	20-40
Maria & Castro (1993)	+ 20,1*	-6,9	-4,0	-
Santos et al. (1995)	+ 19,0	+ 3,3	-5,5	-
Bayer & Mielniczuk (1997)	+ 11,8	-11,2	-	-
Castro Filho et al. (1998)	+ 28,8**		0,0	
Rheinheimer et al. (1998)	+ 24,8	+ 6,9	-23,0	

* Valores negativos implicam em teores de C no solo sob preparo convencional maiores do que nas áreas sob plantio direto.

** Valores centralizados representam o aumento ou diminuição no teor de C no intervalo de profundidade de solo das duas colunas apresentadas.

A adoção do plantio direto afeta também uma série de outros processos ligados ao solo. Um deles é a redução da erosão do solo, pela proteção que a palhada oferece ao solo e pelo menor revolvimento da terra. A diminuição das perdas de solo por erosão tem conseqüências diretas sobre os estoques de matéria orgânica do solo. Em estudo que avaliou a influência de diferentes sistemas de cultivo sobre os níveis de matéria orgânica perdidos em sedimento erodido, Hernani et al. (1999) verificaram que o plantio direto foi o sistema mais eficaz no controle da erosão, perdendo as menores quantidades de nutrientes e matéria orgânica (Figura 5). Nesse estudo, as perdas de matéria orgânica por erosão hídrica superficial variaram de $29\text{kg ha}^{-1}\text{ ano}^{-1}$, na área sob plantio direto, a $216\text{kg ha}^{-1}\text{ ano}^{-1}$, no sistema menos conservacionista, ou seja, na área sem cobertura vegetal onde se usou arado de discos e grade niveladora.

Outros benefícios notados em áreas sob plantio direto se relacionam à melhoria da estrutura do solo, ao maior armazenamento de água no solo, à diminuição das flutuações da temperatura do solo e, como conseqüência de todas essas melhorias, um incremento na qualidade do solo. Todos esses benefícios oriundos da adoção do plantio direto podem reverter em maior seqüestro de C no solo. Num cenário de uso intensivo do plantio direto, as quantidades de C sequestradas em solo podem atingir patamares de 1,5Pg de C nos EUA e 4,9Pg de C no mundo (Lal, 1997).

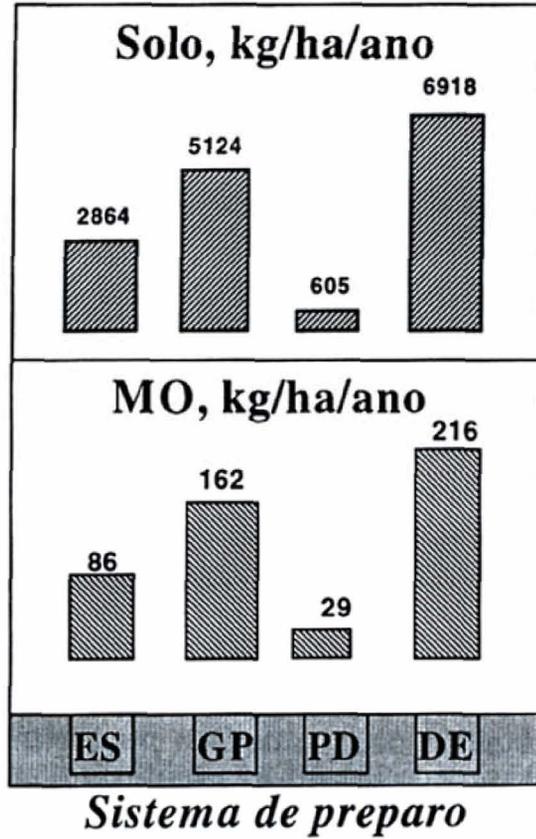


FIGURA 5. Perdas médias de solo e matéria orgânica (MO) sob influência de sistemas de preparo do solo. ES: escarificação + gradagem niveladora; GP: gradagens (pesada + niveladora); PD: plantio direto; DE: aração com discos + duas gradagens niveladoras. Fonte: Hernani *et al.* (1999).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em nível mundial, as maiores transferências de carbono para a atmosfera têm sua origem na queima de combustíveis fósseis. O aumento nos níveis de C atmosférico também podem ser atribuídos, embora em menor escala, à decomposição da matéria orgânica do solo. De fato, é bastante provável que, em solos tropicais, as transferências de C do solo para a atmosfera contribuam em maior escala para o efeito estufa, em relação às perdas de C verificadas em solos de países mais industrializados. Nos solos de regiões temperadas, nos dias atuais, o desmatamento é praticamente nulo; em regiões tropicais, ao contrário, o desmatamento acelerado, o uso inadequado da terra e a ausência de adoção de práticas conservacionistas do solo contribuem sobremaneira para a diminuição dos estoques de matéria orgânica, sendo esses importantes aspectos causadores de mudanças climáticas. O consumo rápido da matéria orgânica após a retirada da mata e o cultivo de solos tropicais contribuem para as perdas sistemáticas em produtividade das culturas, notadas com o decorrer dos anos, e para o declínio da qualidade do solo. Pelo papel de destaque que a matéria orgânica exerce sobre propriedades físicas, químicas e biológicas de solos tropicais, torna-se muito importante a adoção de práticas de manejo e uso do solo mais conservacionistas. Entre essas, poderiam ser citadas (Lal, 1997, 1999):

- diminuição do desmatamento em áreas sem infra-estrutura de transporte, comércio de insumos e de venda de produtos agrícolas, como as áreas da floresta amazônica;
- incentivo ao uso de terras de maior vocação agrícola, como as do cerrado brasileiro;
- incentivo à busca, pelos agricultores, de maiores ganhos em produtividade, no sentido de conter a abertura de novas fronteiras agrícolas;
- manejo adequado de resíduos, com maior permanência de restos culturais nas áreas de plantio;
- viabilização de políticas de incentivo ao uso de plantio direto;
- política eficaz de controle da erosão do solo;

- incremento nas quantidades de fertilizantes usadas, como meio de aumentar o rendimento das culturas e de retornar ao solo maiores quantidades de carbono;
- recuperação de áreas degradadas, para que o seqüestro de carbono no solo e na vegetação dessas áreas sejam aumentados;
- uso de pastagens melhoradas;
- adoção de sistemas de cultivo e de variedades melhoradas com maior aptidão para produção de massa vegetal;
- maior proteção e uso judicioso de solos orgânicos;
- diminuição do uso de combustíveis fósseis, com ênfase ao menor uso de máquinas em áreas agrícolas;
- evitar as queimadas nas operações de limpeza das pastagens; e
- corte mecânico da cana-de-açúcar.

A médio e longo prazos, conforme relata Lal (1999), a adoção das estratégias mencionadas possibilitará aos países usuários dessas práticas de manejo ganho de tempo no sentido de viabilizar tecnologias que diminuam o consumo de combustíveis fósseis nos setores industrial e de transporte. Em áreas agrícolas, os ganhos advindos do uso das práticas mencionadas reverterão em aumento da biodiversidade, melhoria do grau de fertilidade do solo, em maiores rendimentos das culturas e, por conseguinte, em maior sustentabilidade dos agroecossistemas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, M. **Introduction to soil microbiology**. 2.ed. New York: John Wiley, 1977. 467p.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.105-112, 1997.
- BURLE, M.L.; MIELNICZUK, J.; FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. **Plant and Soil**, The Hague, v.190, p.309-316, 1997.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio direto, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, p.527-538, 1998.
- CHRISTENSEN, B.T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A., ed. **Structures and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1996. p.97-165.
- CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, New York, v.20, p.1-90, 1992.
- DEBARBA, L.; AMADO, T.J.C. Desenvolvimento de sistemas de produção de milho no sul do Brasil com características de sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.473-480, 1997.
- DONIGIAN, A.S.; BARNWELL, R.B.; JACKSON, R.B.; PATWARDHAN, A.S.; WEINREICH, K.B.; ROWELL, A.L.; CHINNAWAMY, R.V.; COLE, C.V. **Assessment of alternative management practices and policies affecting soil carbon in agroecosystems of the central United States**. Athens: USEPA, 1994. Não paginado (Publication, EPA/600/r-94/067).
- ESTADOS UNIDOS. Department of Energy (Washington, D.C.). **Sequestration of carbon: state of the science**. Washington, D.C., 1999. Não paginado.

- HERNANI, L.C.; KURIHARA, C.H.; SILVA, W.M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, p.145-154, 1999.
- IZAC, A.M.N. Developing policies for soil carbon management in tropical regions. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, p.261-276, 1997.
- JENKINSON, D.S. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, London, v.329, p.361-368, 1990.
- KERN, J.S.; JOHNSON, M.G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.57, p.200-210, 1993.
- LAL, R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.43, p.81-107, 1997.
- LAL, R. World soils and the greenhouse effect. **Global Change Newsletter**, Stockholm, n.37, p.4-5, March 1999.
- LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLETT, R.F.; COLE, C.V. **The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect**. Chelsea: Ann Arbor, 1998. 128p.
- MAHLMAN, J.D. Uncertainties in projections of human-caused climate warming. **Science**, Washington, D.C., v.278, p.746-1417, 1997.
- MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um Latossolo Roxo, sob sistemas de manejo com milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p.471-477, 1993.
- NOBRE, C.A.; GASH, J. Desmatamento muda clima da Amazônia. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v.22, p.33-42, 1997.
- NOORDWIJK, M. van; CERRI, C.; WOOMER, P.L.; NUGROHO, K.; BERNOUX, M. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, p.187-225, 1997.
- RESCK, D.V.S.; PEREIRA, J.; SILVA, J.E. Dinâmica da matéria orgânica na região dos cerrados. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1991. 22p. (EMBRAPA-CPAC. Documentos, 36).

- RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G.C.; SANTOS, E.J.S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, p.713-721, 1998.
- ROSENZWEIG, C.; HILLED, D. Soil and global climate change: challenges and opportunities. **Soil Science**, Baltimore, v.165, p.47-56, 2000.
- SANTOS, H.P.; TOMM, G.O.; LHAMBY, J.C.B. Plantio direto versus convencional: efeito na fertilidade do solo e no rendimento de grãos de culturas em rotação com cevada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, p.449-454, 1995.
- SATURNINO, H.M.; LANDERS, J.N. **O meio ambiente e o plantio direto**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1997. 116p.
- SCHOLES, M.C.; POWLSON, D.; TIAN, G. Input control of organic matter dynamics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, p.25-47, 1997.
- SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, densityic frationations. **Soil Science**, Baltimore, v.162, p.795-807, 1997.
- SILVA, J.E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p.541-547, 1994.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA (Madison, USA). **Glossary of soil science terms**. Madison, 1997. 138p.
- TESTA, V.M.; TEIXEIRA, L.A.J.; MIELNICZUK, J. Características químicas de um Podzólico Vermelho-Escuro afetadas por sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.107-114, 1992.
- THE WORLD BANK (Washington, D.C.). **The forest sector**. Washington, D.C., 1991. 52p.
- ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T.M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, p.117-161, 1997.

**MINISTÉRIO DA AGRICULTURA
E DO ABASTECIMENTO**



Produção editorial
Embrapa Solos
Área de Comunicação e Negócios (ACN)