

ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO NO SOLO E EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO INFLUENCIADAS POR SISTEMAS DE MANEJO NO SUL DO BRASIL⁽¹⁾

Falberni de Souza Costa⁽²⁾, Cimélio Bayer⁽³⁾, Josiléia Acordi Zanatta⁽⁴⁾ & João Mielniczuk⁽³⁾

RESUMO

O C fotossintetizado adicionado ao solo pelos resíduos vegetais (C-resíduo), as emissões de C na forma de dióxido de carbono (C-CO₂) e o estoque de C orgânico do solo (C-solo) são componentes do ciclo deste elemento no sistema solo-planta-atmosfera. O efeito de práticas de manejo de solo sobre esses componentes necessita de melhor entendimento, visando à identificação de um sistema com potencial de reter C atmosférico no solo e contribuir para a mitigação do aquecimento global. Neste estudo, as emissões de C-CO₂, o estoque de C e as adições de C pelos resíduos vegetais foram avaliados em experimento de longa duração (18 anos), localizado em Eldorado do Sul (RS). O quociente C-CO₂/(C-resíduo + C-solo) foi proposto como índice da capacidade de sistemas de preparo e de cultura em conservar C no solo (ICC). A emissão de C-CO₂ foi medida durante 17 meses; a quantidade de C-resíduo foi estimada com base em amostragens da massa de plantas de cobertura de inverno e no índice de colheita do milho; e o estoque de C-solo, avaliado na camada de 0-0,2 m do solo submetido aos sistemas de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD), associados às sucessões de aveia (*Avena strigosa* Schreb)/milho (*Zea mays* L.) (A/M) e ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.)/milho (E/M). Com objetivo de avaliar a relação das emissões de C-CO₂ com fatores ambientais, foram monitoradas a temperatura a 0,05 m de profundidade e a umidade gravimétrica do solo nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,1; e 0,1-0,2 m. Em comparação ao estoque de C-solo no início do experimento (33,4 t ha⁻¹), o balanço foi negativo no solo em PC (-0,31 t ha⁻¹ ano⁻¹ no A/M e -0,10 t ha⁻¹ ano⁻¹ no E/M) e positivo no solo em PD (0,15 t ha⁻¹ ano⁻¹) apenas quando associado ao sistema E/M, o qual apresentou maior aporte de resíduos. As taxas mensais médias das emissões variaram entre 0,27 g m⁻² de C-CO₂ no inverno (média das temperaturas mínimas = 8 °C) e 1,36 g m⁻²

⁽¹⁾ Parte da pesquisa de Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Recebido para publicação em novembro de 2006 e aprovado em outubro de 2007.

⁽²⁾ Professor do Campus Floresta, Universidade Federal do Acre – UFAC. Estrada do Canela Fina, km12, Colônia São Francisco, CEP 69980-000 Cruzeiro do Sul (AC). E-mail: falberni@ufac.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, Caixa Postal 15100, CEP 91501-970 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: cimelio.bayer@ufrgs.br

⁽⁴⁾ Doutoranda do PPGCS-UFRGS. E-mail: josizanatta@yahoo.com.br

de C-CO₂ no verão (média das temperaturas máximas = 38° C), que se relacionaram com a temperatura do solo ($r > 0,85$). A emissão total de C-CO₂ no período variou entre 3,6 e 4,0 t ha⁻¹ de C-CO₂, não tendo sido verificada diferença significativa entre os sistemas de preparo de solo e de cultura. Entretanto, o ICC evidenciou que o potencial dos sistemas de manejo em conservar C no solo aumentou na ordem PC A/M < PC E/M < PD A/M < PD E/M. As condições menos oxidativas contribuíram para o balanço positivo de C no solo em plantio direto, característica que é potencializada pela utilização de sistemas de cultura com leguminosas como plantas de cobertura, que favorecem o acúmulo de C no solo por permitirem maior produção de massa das gramíneas cultivadas em sucessão, devido ao fornecimento de N.

Termos de indexação: dióxido de carbono, carbono orgânico, plantio direto, plantas de cobertura, leguminosas.

SUMMARY: *CARBON STOCK AND CARBON DIOXIDE EMISSIONS AS AFFECTED BY SOIL MANAGEMENT SYSTEMS IN SOUTHERN BRAZIL*

Carbon (C) addition through crop residues (residue-C), C dioxide emission (CO₂-C) and the soil C stock (soil-C) are components of the C cycle in the soil-plant-atmosphere system. This 18-year study was conducted to identify agricultural practices that could potentially increase C retention in the soil and lessen global warming trends. The three C pools (residue-C, CO₂-C and soil-C) under different tillage systems (CT-conventional tillage and NT-no tillage) and cropping systems (O/M-oat (*Avena strigosa* Schreb)/maize (*Zea mays* L.) and V/M-vetch (*Vicia sativa* L.)/maize) were evaluated and the CO₂-C/[residue-C+soil-C] quotient was proposed as C retention index (CRI), where low values indicate a high capacity of the management system to keep C in the soil. The CO₂-C emissions were measured for 17 months (between November 2002 and March 2004), sampling of aboveground residues of cover crops and harvest indexes of maize were used to quantify C addition by cropping systems, and soil-C stocks (0–0.2 m) were evaluated in 2003. The soil temperature (0.05 m) and gravimetric water content (0–0.05, 0.05–0.1 and 0.1–0.2 m) were also monitored from May 2003 onwards. In comparison to 1985, the C balance was negative in the soil under CT (-0.31 t ha⁻¹ yr⁻¹ for O/M and -0.10 t ha⁻¹ yr⁻¹ for V/M). On the other hand, the C balance was positive in NT soil, but only under V/M (+0.15 t ha⁻¹ yr⁻¹) due to the greater C addition by crop residues. The CO₂-C emission was related to the soil temperature ($r > 0.85$). The total CO₂-C emission varied from 3.6 to 4.0 t ha⁻¹ and was not affected by the soil management systems. However, the CRI allowed a clear discrimination of the soil management systems to keep C in the soil. The C retention potential increased in the following order: CT O/M < CT V/M < NT O/M < NT V/M. Results reinforced the importance of symbiotically-fixed N by legume crops for C accumulation in untilled soils due to greater biomass production by succeeding graminaceae.

Index terms: carbon dioxide, cover crops, legumes, no-tillage, soil organic carbon.

INTRODUÇÃO

No âmbito das mudanças climáticas globais, o solo e suas formas de uso estão em foco, sobretudo no que se refere à agricultura. Os solos agrícolas podem atuar como dreno ou fonte de gases de efeito estufa (GEE), dependendo do sistema de manejo a que forem submetidos (IPCC, 2001). Sistemas de manejo que aumentem a adição de resíduos vegetais e a retenção de C no solo se constituem em alternativas importantes para aumentar a capacidade de dreno de C-CO₂ atmosférico e mitigação do aquecimento global (Amado et al., 2001; Bayer et al., 2006).

Várias são as ênfases e as formas de quantificar o efeito de sistemas de manejo sobre os fluxos de C no sistema solo-planta-atmosfera citadas na literatura (Paustian et al., 1997; Janzen et al., 1998). O balanço de C no solo é dependente da relação entre as adições de C fotossintetizado pelas plantas (parte aérea e raízes) e as perdas de C para a atmosfera resultantes da oxidação microbiana do C orgânico a CO₂. A magnitude desses processos pode ser avaliada em experimentos de longa duração, pela quantificação dos estoques de C orgânico no solo, em comparação ao estoque inicial de C-solo (Costa et al., 2006).

Embora o método de avaliação do balanço de C no solo quantifique os fluxos anuais médios de C em sistemas de manejo, ele não é adequado na avaliação da dinâmica temporal da emissão de C-CO₂ em função das estações do ano e de alterações nos fluxos de C-CO₂ devido a fatores ambientais e de práticas de manejo de solo (Franzluebbers et al., 1995). O preparo de solo e o manejo de culturas afetam as taxas metabólicas dos microrganismos nos processos de decomposição dos resíduos vegetais e da matéria orgânica no solo (MOS), as quais também são influenciadas pela temperatura e umidade do solo (La Scala Jr. et al., 2006). Geralmente, a atividade decompositora dos microrganismos atinge valores elevados no período imediatamente posterior ao revolvimento do solo, o qual é associado às estações de temperatura mais elevada no Sul do Brasil, decrescendo posteriormente à atividade basal, devido à redução ao mínimo das frações orgânicas de fácil decomposição (Paul & Clark, 1996; La Scala Jr. et al., 2006).

A atividade basal e a emissão de C-CO₂ decorrente da ação decompositora dos microrganismos heterotróficos no solo são dependentes das condições de solo, principalmente do conteúdo de MOS e da disponibilidade de resíduos vegetais, os quais se constituem nas principais fontes de C à microbiota e têm influência nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Vargas & Scholles, 2000; Costa et al., 2003; Ciotta et al., 2004). Nesse contexto, a emissão basal de C-CO₂ será diferente em sistemas de manejo que apresentem distintas adições de resíduos vegetais e estoques de C-solo, determinando que o uso isolado das emissões de C-CO₂ não seja indicador adequado do potencial de sistemas de manejo na conservação de C no solo, devendo-se considerar para isso as emissões de C-CO₂ por unidade de C orgânico na MOS e em resíduos vegetais. Dessa forma, sistemas de manejo com menor emissão de C-CO₂ por unidade de C na MOS e em resíduos vegetais apresentam maior potencial de conservação de C no solo, em comparação com sistemas de maior emissão de C-CO₂ por unidade de C potencialmente disponível para oxidação microbiana.

O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de sistemas de preparo de solo e de culturas na conservação de C em um Argissolo Vermelho da Depressão Central do Rio Grande do Sul (RS). Além do balanço de C no solo nos diferentes sistemas de manejo, avaliou-se a adequação do quociente C-CO₂/[C-resíduo+C-solo] como um índice da capacidade de sistemas de manejo em conservar C no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização edafoclimática

O estudo foi feito na região da Depressão Central do RS, em experimento realizado na Estação

Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (30 ° 05 ' 27 " S; 51 ° 40 ' 18 " W), município de Eldorado do Sul, a 46 m de altitude. O clima da região é subtropical úmido e Cfa, segundo classificação climática de Köppen. As médias anuais da temperatura do ar e da precipitação pluvial são, respectivamente, de 19,2 °C e 1.446 mm, com médias mensais da temperatura variando de 9 °C no inverno a 25 °C no verão (Bergamaschi et al., 2003). O solo da área experimental é um Argissolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 1999), com 540 g kg⁻¹ de areia, 240 de silte e 220 de argila.

Experimento de longa duração

O experimento foi instalado em 1985, em uma área com avançado grau de degradação física, sendo composto por três sistemas de preparo de solo (PC-preparo convencional, PR-preparo reduzido e PD-plantio direto) nas parcelas principais (15 x 20 m), três sistemas de culturas (A/M-aveia-preta [*Avena strigosa* Schreb]/milho (*Zea mays* L.), E/M-ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.)/milho e A+E/M+C-aveia+ervilhaca comum/milho+caupi (*Vigna unguiculata* L.)) nas subparcelas (5 x 20 m) e duas doses de N mineral (uréia) na cultura do milho (0 e 180 kg ha⁻¹ de N), aplicado em faixas (45 x 10 m) nos blocos. Os tratamentos foram dispostos segundo delineamento de blocos casualizados, com três repetições. Neste estudo, foram avaliados somente os tratamentos PC e PD, ambos nos sistemas A/M e E/M e sem aplicação de N mineral.

Os preparos de solo foram realizados somente na primavera/verão, sendo as culturas de inverno semeadas (80 kg ha⁻¹ de semente) em plantio direto nos meses de abril/maio. No PC, o preparo de solo consistiu em uma aração e duas gradagens na primavera, anterior à semeadura do milho, enquanto no PD o manejo das culturas de inverno consistiu na aplicação de herbicida dessecante à base de glifosate (720 g ha⁻¹ de IA) e passagem de rolo-faca. O milho foi semeado em setembro-outubro, com população aproximada de 50-60 mil plantas ha⁻¹. Detalhes da condução experimental são descritos em Bayer et al. (2000) e Lovato et al. (2004).

Avaliação da adição de C pelas culturas de cobertura e milho

A adição de C pelas culturas de cobertura ao solo foi avaliada a partir de amostragem, no período de pleno florescimento, da fitomassa (método do quadrado de 1 m²), a qual foi seca em estufa até peso constante e quantificada em relação a sua massa de resíduos secos. As adições de C pelo milho foram estimadas a partir da relação entre a produtividade da cultura nos diferentes sistemas de manejo e a produção de MS da parte aérea do milho [equação 1, obtida por Lovato (2001)] para esta mesma área experimental. Considerou-se o percentual de 40 % de C na matéria seca (MS) das plantas de cobertura e do milho (Aita et

al., 1994; Bayer et al., 1998; Spagnollo et al., 2002) e a contribuição do sistema radicular na adição de C equivalente a 30 % do C adicionado pela parte aérea das culturas (Fehrenbacher & Alexander, 1955; Buyanovsky & Wagner, 1986; Balesdent & Balabane, 1992; Crozier & King, 1993; Bolinder et al., 1997; Kissele et al., 2001).

$$MS_{\text{adicionada}} \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = [0,96 * \text{rendimento de grãos} \\ \text{(t ha}^{-1}\text{)} + 2,91] \quad (1)$$

Amostragem do solo, análise dos teores de C orgânico e cálculo de seus estoques no solo

O solo foi amostrado em outubro de 2003 nas camadas de 0–0,025, 0,025–0,05, 0,05–0,1 e 0,1–0,2 m, seco, moído a 0,15 mm em gral de ágatha, e analisado quanto ao teor de C orgânico por combustão seca, em analisador Shimadzu – TOC (modelo V_{CSH}). A partir dos valores de densidade de solo obtidos por Silva et al. (2005), foram calculados os estoques de C orgânico da camada de 0–0,2 m em massa equivalente de solo (Ellert & Bettany, 1995), utilizando-se como referência a massa de solo (44,7 t ha⁻¹) de uma área de campo nativo adjacente ao experimento (Zanatta et al., 2007). O estoque de C-solo no início do experimento (em 1985), o qual havia sido analisado por oxidação com dicromato de potássio e aquecimento externo, foi corrigido a partir da relação entre os teores de C obtidos por esse método e o utilizado no presente estudo. Para isso, amostras de solo com ampla variação nos teores de C orgânico foram selecionadas e analisadas quanto ao teor de C orgânico pelos dois métodos, gerando um fator de correção para o estoque de C orgânico do início do experimento (Zanatta et al., 2007).

Avaliação das emissões de carbono na forma de dióxido de C (C-CO₂) do solo

As emissões de C-CO₂ foram avaliadas pelo método da “captura” do C-CO₂ em solução de hidróxido de sódio (Anderson, 1982), de novembro de 2002 a março de 2004 (17 meses), totalizando 33 avaliações. A frequência das avaliações foi estabelecida de acordo com a estação do ano e com as práticas de manejo, sendo diária após o manejo das culturas de inverno e o preparo do solo na primavera, e uma vez por mês em dezembro de 2002, julho a setembro de 2003 e nos meses avaliados em 2004. Nos demais meses, foram realizadas no mínimo duas avaliações. Em abril de 2003 não houve avaliação, sendo a emissão de C-CO₂ estimada por interpolação entre as emissões nos meses de março e maio.

O sistema de coleta consistiu de uma base metálica, com canal de 0,07 m de profundidade, sobre o qual foi disposta uma câmara cilíndrica de policloreto de vinila (PVC) de 0,2 e 0,25 m de altura e diâmetro, respectivamente, cuja extremidade superior foi fechada por uma tampa também de PVC. A base foi inserida

no solo (0,05 m), nas entrelinhas das culturas da estação anterior, e permaneceu fixa ao longo de cada estação de cultivo. Na extremidade inferior do cilindro foi colada uma borracha para auxiliar a vedação do sistema, a qual foi realizada pela colocação de água dentro do canal da base, além do uso de molas para fixar a câmara à base metálica. Na tampa da câmara foi perfurado um orifício de aproximadamente 10 mm de diâmetro, o qual teve a função de equilibrar a pressão interna da câmara com a pressão atmosférica quando da disposição da câmara sobre a base, após o que o orifício foi vedado por septo de borracha. Utilizaram-se três câmaras por tratamento, em cada uma das três repetições do experimento.

As coletas foram realizadas em duas microparcelas de 2 x 2 m, as quais foram dispostas nas extremidades das subparcelas (5 x 20 m) do experimento e foram utilizadas alternadamente. A alternância do uso das microparcelas possibilitou que durante todo o período de avaliações uma das microparcelas fosse mantida com plantas em crescimento (aveia, vicia ou milho), enquanto a outra fosse avaliada sem plantas, mas com resíduos vegetais sobre o solo, visando somente avaliar a emissão resultante do solo e dos resíduos, excluindo a contribuição da respiração das raízes. Por exemplo, no inverno uma microparcela tinha as culturas de cobertura em crescimento, e a outra foi utilizada na avaliação da emissão C-CO₂. Posteriormente ao manejo das culturas de inverno, o uso das microparcelas foi invertido e a emissão de C-CO₂ foi avaliada na microparcela sobre os resíduos das culturas de inverno, enquanto a outra microparcela recebeu a cultura do milho. É importante salientar que as microparcelas recebiam resíduos das culturas da estação após o final da avaliação das emissões de C-CO₂.

Taxas mensais de emissão de C-CO₂ foram calculadas pelo quociente entre a área sob a curva da emissão de C-CO₂ de cada mês (método do trapézio) e o respectivo número de dias do mês. A emissão de C-CO₂ total nos 17 meses foi calculada por integração da área sob a curva de efluxo de C-CO₂ em cada sistema de manejo do solo.

Monitoramento da temperatura e da umidade do solo

As avaliações da temperatura e da umidade do solo foram iniciadas a partir da 11ª avaliação (maio de 2003). O registro da temperatura (a 0,05 m de profundidade) foi às 9 e 15 h do dia da avaliação da emissão de C-CO₂, e às 9 h do dia seguinte. Foram utilizados termômetros de mercúrio, instalados nas microparcelas de dois blocos do experimento. Temperaturas diárias médias foram calculadas a partir das temperaturas mínimas (9 h do primeiro e segundo dia de avaliação) e da temperatura máxima (15 h). A cada avaliação da emissão de C-CO₂, o solo foi amostrado com trado (0–0,05, 0,05–0,1 e 0,1–0,2 m), para determinação da umidade gravimétrica.

Estimativa do potencial dos sistemas de manejo em conservar C no solo

O potencial de um sistema de manejo em conservar C no solo foi avaliado pela emissão de C-CO₂ por unidade de C nos resíduos vegetais e no solo (0–0,2 m) (equação 2), expresso como índice de conservação de C no solo (ICC), na unidade de g C-CO₂ kg C (resíduo + solo)⁻¹.

$$ICC = \frac{C - CO_2}{C - \text{resíduo} + C - \text{solo}} \quad (2)$$

Informações meteorológicas

Os dados de temperatura do ar, radiação solar e precipitação pluvial foram obtidos no Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia (UFRGS), cuja estação meteorológica está situada também na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS.

Análise estatística

Os dados de estoque de C orgânico, a temperatura e a umidade do solo foram submetidos à análise de variância por data de avaliação, e as médias, comparadas pelo teste de Duncan a 5 %. A umidade do solo foi analisada por camada. A análise descritiva foi utilizada para adições de C-resíduo e emissões de C-CO₂. As relações das emissões de C-CO₂ com a temperatura e umidade do solo foram analisadas por correlação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Condições meteorológicas durante o período de estudo

As variações da temperatura média do ar no período avaliado (11/2002 a 3/2004) foram características para a região, com temperaturas mínimas ocorrendo no inverno (13 °C), intermediárias no outono e primavera (18 °C) e máximas no verão (24 °C). Já as variações da precipitação pluvial no período foram irregulares (Figura 1a), apresentando tendência de aumento na primavera, sendo dezembro geralmente o mês mais chuvoso. Entre os anos, o verão de 2003 teve maior volume de chuva em relação a 2004 (Figura 1a). Destaque é dado a fevereiro e outubro de 2003, meses nos quais choveu 197 e 277 mm, respectivamente, correspondendo a precipitação ocorrida nesses dois meses a aproximadamente um terço da precipitação anual total.

Adição de C-resíduo e balanço de C orgânico no solo

A adição de C-resíduo no período de avaliação variou de 5,8 a 7,5 t ha⁻¹, sendo maior no sistema E/M (6,5

no PC e 7,5 t ha⁻¹ no PD) do que no sistema A/M (5,8 t ha⁻¹ no PD e no PC). Como todos os tratamentos avaliados não receberam aplicação de fertilizantes nitrogenados, em grande parte a variação das adições de C nos sistemas de cultura foi devido ao diferente crescimento da cultura do milho em sucessão à ervilhaca comum (E/M) e à aveia-preta (A/M).

A adição diferenciada de resíduos vegetais ao solo, durante os 18 anos de condução do experimento, afetou os estoques de C orgânico no solo, os quais variaram de 27,8 t ha⁻¹ (PC A/M) a 36,1 t ha⁻¹ (PD E/M). O balanço de C no solo foi sempre negativo sob PC (-0,31 t ha⁻¹ ano⁻¹ no A/M e -0,10 t ha⁻¹ ano⁻¹ no E/M), evidenciando que o solo cultivado neste sistema de preparo atuou como uma fonte de C-CO₂ para a atmosfera, independentemente do sistema de cultura adotado. Em PD, o solo apresentou influxo líquido de C (0,15 t ha⁻¹ ano⁻¹) somente no sistema E/M, o qual apresentou maior adição de resíduos ao solo, principalmente pela cultura do milho em sucessão. No sistema A/M, em que a adição de resíduos vegetais foi menor, o solo em PD também atuou como fonte de C-CO₂ para a atmosfera numa taxa de 0,12 t ha⁻¹ ano⁻¹ (Quadro 1). Esse fato resultou da baixa capacidade de aporte de C do sistema A/M, cuja adição anual foi inferior à necessidade do sistema de PD para contrabalancear a oxidação do material orgânico pela microbiota do solo, ocorrendo diminuição do estoque de C do solo ao longo do tempo mesmo cultivado em PD. Outros estudos nesta mesma área experimental evidenciaram a necessidade de 13 e 21 t ha⁻¹ de MS no PD e PC, respectivamente, para manter o estoque inicial de C no solo (Zanatta et al., 2007).

Os resultados ressaltam a importância do alto aporte de resíduos vegetais mesmo no sistema PD quando se visa ao acúmulo de C orgânico no solo, similarmente ao que já foi observado por Lovato et al. (2004) e Bayer et al. (2006). Nesse sentido, Drinkwater et al. (1998) e Amado et al. (2001) sugerem que o uso de leguminosas, combinado com maior diversidade de espécies em sucessão ou rotação de culturas, aumenta de forma significativa a retenção de C e N no solo, com implicações importantes para o balanço destes elementos em escala regional e global e para a produção sustentável e a qualidade ambiental. Esses autores destacam ainda que, além de melhorar a qualidade do solo, o uso de leguminosas resulta em menor custo financeiro e energético da produção de alimentos, pelo suprimento parcial do N e redução da necessidade de fertilizantes nitrogenados.

Emissões médias mensais de C-CO₂

As emissões de C-CO₂ apresentaram padrão de variação temporal semelhante entre os sistemas de manejo (Figura 1b), sendo decrescente do verão de 2002/2003 até o inverno seguinte, crescente da primavera de 2003 até o verão de 2003/2004 e decrescente a partir de então. Nos meses de novembro e dezembro de 2002, as taxas de emissão de C-CO₂ do

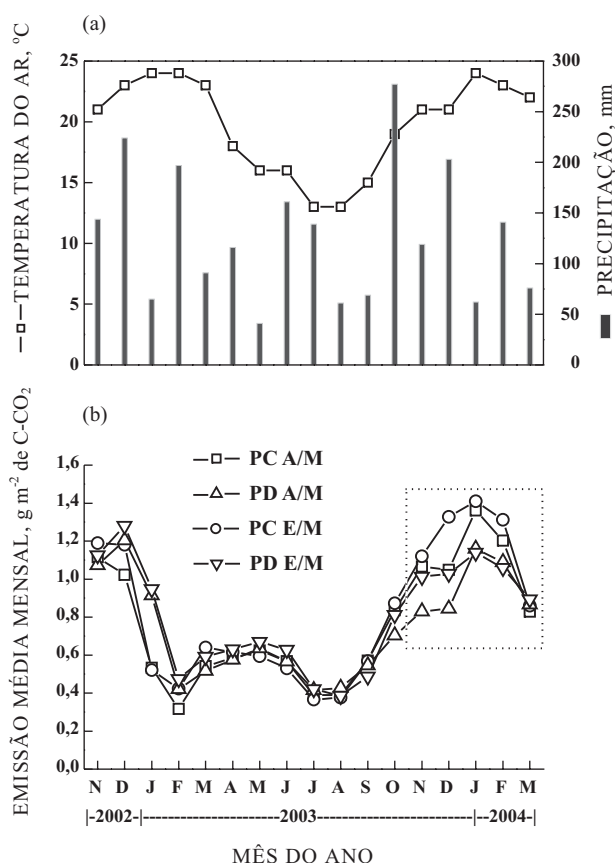


Figura 1. Médias mensais da temperatura do ar, da precipitação pluviométrica (a) e da emissão de C-CO₂ do solo (b) nas combinações de sistemas de preparo e de culturas. A área pontilhada representa o período logo após o manejo das culturas de inverno e realização dos preparos do solo, em outubro de 2003. PC: preparo convencional, PD: plantio direto, A: aveia-preta, E: ervilhaca comum e M: milho.

solo dos sistemas variaram de 1,0 a 1,3 g m⁻², valores estes 25 e 62 % maiores do que a média geral do período de avaliação (0,8 g m⁻²), respectivamente. Mesmo com temperaturas acima de 20 °C, a emissão de C-CO₂ em fevereiro de 2003 foi aproximadamente 50 % menor do que a observada para o mesmo mês em 2004 (Figura 1b), devido principalmente à ocorrência de chuvas de até 80 mm concentradas neste mês, o que pode ter reduzido a atividade microbiana pela diminuição da concentração de O₂ no solo. No período de outono/inverno de 2003, as taxas de emissão de C-CO₂ do solo, na média dos sistemas de manejo, foram 36 % menores do que a média geral. Na primavera/verão seguinte, as taxas de emissão de C-CO₂ tiveram sua maior amplitude em relação à média geral, com valores de 0,5 g m⁻² em setembro de 2003 a 1,4 g m⁻² em janeiro de 2004, as quais foram, respectivamente, 38 % menor e 75 % maior do que a média geral do período avaliado (Figura 1b).

As emissões mensais médias de C-CO₂ não diferiram significativamente entre os sistemas de manejo (Figura 1b). As médias das emissões do período total avaliado foram de 0,76 (± 0,3) no PC A/M, 0,84 (± 0,4) no PC E/M, 0,76 (± 0,3) no PD A/M e 0,82 (± 0,3) g m⁻² de C-CO₂ no PD E/M, estando na faixa citada na literatura internacional (Duiker & Lal, 2000). Contudo, após rolagem das culturas de inverno e, principalmente, após o preparo do solo, em outubro de 2003 (Figura 1b), embora sem diferença significativa, o solo em PC apresentou tendência de maior emissão de C-CO₂ do que em PD, independentemente do sistema de cultura. A mesma tendência aconteceu com o sistema E/M em relação ao A/M, sobretudo no solo em PC, onde o contato solo/resíduo foi aumentado pelo revolvimento do solo, permitindo a rápida decomposição dos tecidos das plantas de cobertura, especialmente da ervilhaca, que apresenta menor relação C/N.

Quadro 1. Estoque de C orgânico na camada de 0–0,2 m do solo em 1985 (início do experimento) e em 2003 (18 anos após) e sua variação anual, em relação a 1985, nas combinações dos sistemas de preparo de solo e de culturas

Sistema de manejo	Estoque		Variação no período ⁽²⁾	
	1985	2003 ⁽¹⁾	t ha ⁻¹	t ha ⁻¹ ano ⁻¹
	————— t ha ⁻¹ —————			
PC – A/M	33,4	27,8 Bb	- 5,6	- 0,31
PC – E/M	33,4	31,6 Ba	- 1,8	- 0,10
PD – A/M	33,4	31,2 Ab	- 2,2	- 0,12
PD – E/M	33,4	36,1 Aa	2,7	0,15
CV (%)	-	4,0	-	-

⁽¹⁾ Preparos de solo seguidos de letras maiúsculas iguais, dentro de cada sistema de cultura, e sistemas de cultura seguidos de letras minúsculas iguais, dentro de cada preparo de solo, não diferem pelo teste de Duncan a 5 %. ⁽²⁾ Sinais negativo e positivo significam emissão e retenção líquida de C no sistema solo-atmosfera, respectivamente. PD: plantio direto, PC: preparo convencional, A: aveia-preta, E: ervilhaca comum e M: milho.

Os preparos do solo, em combinação com outras práticas de manejo e com a ação da temperatura e umidade do solo, influenciam a taxa de emissão de C-CO₂ para a atmosfera (Franzluebbers et al., 1995; Kessavalou et al., 1998), atuando sobre fatores que estão direta ou indiretamente relacionados à atividade microbiana, da qual depende a produção de C-CO₂. Os preparos de solo afetam sua cobertura e estrutura, as quais têm implicações na temperatura e umidade do solo e sobre os processos de trocas gasosas entre este e a atmosfera, além do aumento da disponibilidade de C lábil decorrente da incorporação de resíduos vegetais ao solo e exposição de matéria orgânica protegida no interior de agregados de solo (La Scala Jr., et al., 2005). Quanto ao efeito do tipo de resíduos adicionados ao solo, a relação C:N destes parece ter influenciado as emissões de C-CO₂, sobretudo no período logo após a rolagem das culturas (outubro de 2003) no solo em PD. No solo em PC, o efeito foi pouco pronunciado logo após as operações de preparo, mas ficou evidente um mês após o revolvimento do solo. A menor relação C:N da ervilhaca (15,4), em comparação à aveia-preta (36,3), pode explicar a tendência de maior emissão de C-CO₂ do solo sob a sucessão que contém essa leguminosa. Resíduos com relação C:N baixa são mais facilmente decompostos pelos microrganismos do solo do que os com relação C:N alta (Tian et al., 1997). Por outro lado, no solo em PC, o revolvimento deste e o fracionamento dos resíduos vegetais podem ter auxiliado na liberação de N na fase inicial após os preparos, o que provavelmente colaborou para decomposição dos resíduos das culturas e para difusão do C-CO₂ à atmosfera.

Relação da emissão de C-CO₂ com a temperatura e umidade do solo

A umidade gravimétrica do solo, nas três camadas amostradas, não foi afetada significativamente pelos sistemas de preparo e de cultura (dados não apresentados). O uso de sistema de irrigação durante o cultivo do milho e a boa distribuição e frequência de chuvas no período, especialmente no inverno com baixas temperaturas do ar (Figura 1a) e do solo, podem estar associados a esse resultado. Contudo, na camada superficial (0 a 0,05 m), embora o coeficiente de correlação entre a emissão de C-CO₂ e a umidade gravimétrica tenha sido baixo, a correlação negativa foi significativa (Figura 2a). A correlação entre a emissão de C-CO₂ e a umidade gravimétrica nas camadas de 0,05–0,1 e de 0,1–0,2 m não foi significativa. É provável que esse resultado seja decorrente do fato de que as maiores umidades do solo tenham sido verificadas no inverno, devido à maior frequência de chuva e menor evaporação (parcelas mantidas sem plantas).

Na média dos sistemas de manejo (sistemas de preparo + sistemas de culturas), a emissão de C-CO₂ apresentou correlação com a temperatura do solo ($r = 0,88$, $p < 0,0001$) (Figura 2b). No entanto, o coeficiente de correlação, na média dos sistemas de culturas, foi maior para o sistema PC ($r = 0,91$) do que para o PD ($r = 0,85$), indicando que houve relação mais direta da emissão de C-CO₂ em relação à temperatura do solo em PC e que outros fatores, além da temperatura do solo, podem estar influenciando a emissão de C-CO₂ do solo em PD (Figura 2b). Nesse sentido, na média dos sistemas de cultura, o aumento

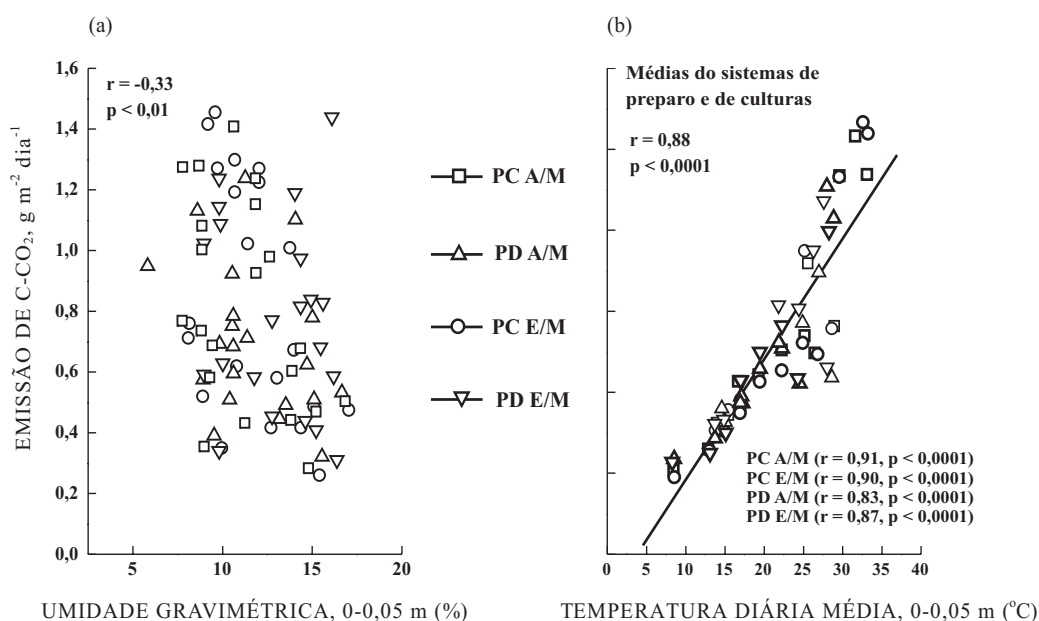


Figura 2. Emissão de C-CO₂ do solo em função da umidade gravimétrica (a) e da temperatura do solo (b), ambas na camada de 0–0,05 m do solo, no período de maio de 2003 a março de 2004. PC: preparo convencional, PD: plantio direto, A: aveia-preta, E: ervilhaca comum e M: milho.

na taxa de emissão de C-CO₂ em função do acréscimo de um grau na temperatura do solo (0–0,05 cm) foi reduzido em 20 % pelo PD, em relação ao PC. Quanto maior é a temperatura, menor é a energia de ativação que deve ser atingida para que uma reação aconteça (Paul & Clark, 1996). Nesse caso, a ausência de cobertura do solo em PC, ao permitir incidência direta de raios solares, aumentou a temperatura do solo, que, por sua vez, intensificou a atividade microbiana, demonstrada pelo aumento da emissão de C-CO₂ do solo para a atmosfera (Figura 1b).

A correlação múltipla entre a emissão de C-CO₂ do solo, a temperatura média diária e a umidade gravimétrica do solo (0 a 0,05 m) não foi significativa para inclusão deste último fator no modelo de análise.

Efluxo total de C-CO₂ e capacidade dos sistemas de manejo em conservar C no solo

As emissões totais de C-CO₂ variaram de 3,6 a 4,0 t ha⁻¹ e não diferiram significativamente entre os sistemas de manejo (Figura 3a). Esse comportamento similar das emissões totais entre os sistemas de manejo tem sido verificado por outros autores (Vargas & Sholles, 2000), o que leva à seguinte questão: Como sistemas de manejo com taxas de emissões de C-CO₂ semelhantes apresentam diferentes acúmulos de C no solo? Essa aparente contradição ocorre porque a análise isolada das emissões de C-CO₂ não é adequada para interpretar o potencial de sistemas de manejo em conservar ou acumular C no solo. Em comparação ao PC, no PD a maior proteção da matéria orgânica no interior dos agregados, o menor fracionamento dos resíduos e a menor área de contato dos resíduos com o solo reduzem a taxa de mineralização da matéria orgânica no solo, resultando em maior estoque de C. Outros fatores que se somam aos diferentes estoques de C orgânico no solo são a adição de quantidades diferenciadas de C via resíduo das culturas e sua relação C/N, os quais irão contribuir distintamente para o potencial de um sistema em emitir C-CO₂ à atmosfera.

Com o objetivo de avaliar o potencial dos sistemas de manejo em conservar C no solo, foi calculado o quociente entre as emissões de C-CO₂ e a quantidade de C no solo e nos resíduos vegetais, e o resultado, proposto como um índice de conservação de C (ICC) (Figura 3b). O ICC variou de 112 ± 6,0 g kg⁻¹ no sistema PC A/M a 90 ± 4,0 g kg⁻¹ no sistema PD E/M, sendo esses valores inversamente relacionados ao seu potencial de conservação de C no solo. O potencial de conservação de C no solo variou na seguinte ordem: PD E/M > PD A/M > PC E/M > PC A/M, reforçando a importância do PD na retenção do C no solo e destacando o papel das leguminosas no acúmulo de C. O PD reduziu as taxas de emissão de C-CO₂, e a leguminosa contribuiu para aumento das quantidades de C aportado ao solo, via maior produção de resíduos de gramíneas cultivadas em sucessão, o que determinou a redução do ICC no PD dentro dos

sistemas de culturas e no sistema E/M dentro dos sistemas de preparo.

A importância das leguminosas para o acúmulo de N no solo pode ser verificada quando se considera que a matéria orgânica humificada do solo apresenta relação C:N de aproximadamente 12:1 (Amado et al., 2001; Lovato et al., 2004). Nessa condição, estima-se que para acumular 1,0 t de C é necessário acumular aproximadamente 0,08 t de N. Ou seja, para acumular C, é necessário acumular N, e isso reforça a importância da inclusão de leguminosas em sistemas de sucessão ou rotação de culturas, além dos seus efeitos na redução de custos pelo suprimento parcial de N às culturas comerciais. Convém salientar que esse efeito positivo da adoção de leguminosas no acúmulo de C no solo é válido provavelmente só para leguminosas utilizadas para cobertura do solo, não sendo válido no caso da soja, cujo N fixado biologicamente sai do sistema quando da colheita dos grãos. Isso significa dizer que, mesmo em sistemas de produção de soja, é necessária a inclusão de leguminosas de cobertura de solo, e isso pode ser feito anteriormente à cultura do milho cultivado em rotação com a soja.

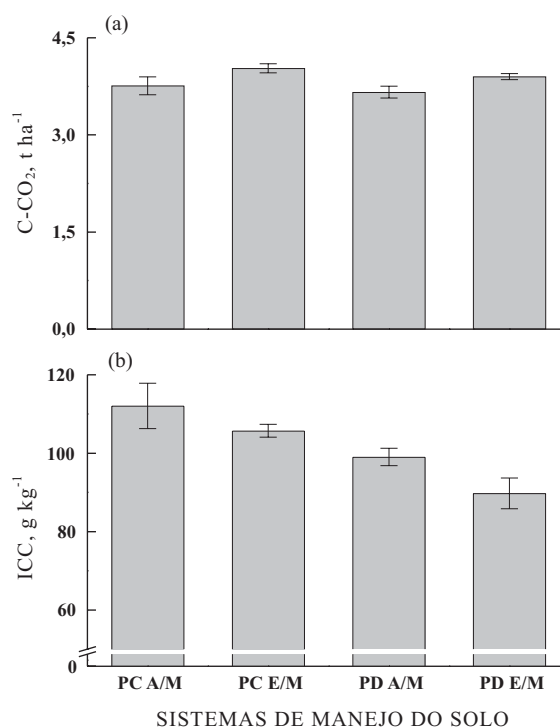


Figura 3. Emissão total de C-CO₂ do solo no período de 17 meses (a) e Índice de Conservação de Carbono-ICC (b), calculado pela razão entre a emissão total de C-CO₂ e a quantidade de C nos resíduos vegetais e na matéria orgânica no solo em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo e de cultura. PC: preparo convencional, PD: plantio direto, A: aveia-preta, E: ervilhaca comum e M: milho. Barras verticais: erro-padrão da média.

CONCLUSÕES

1. O plantio direto associado a sistemas de cultura com alta adição de resíduos vegetais ricos em C e N resulta em balanço positivo de C no solo.

2. O solo em preparo convencional, independentemente do sistema de cultura, e o solo em plantio direto associado a sistemas de cultura com baixo aporte de resíduos vegetais apresentam balanço negativo de C.

3. As emissões totais de C-CO₂ do solo são similares nos diferentes sistemas de manejo; entretanto, quando as emissões de C-CO₂ são ponderadas em função da quantidade de C no solo e nos resíduos vegetais, é possível verificar a importância do plantio direto e da inclusão de plantas de cobertura leguminosas na conservação do C no solo.

4. As emissões de C-CO₂ têm variação sazonal e são correlacionadas positivamente com a temperatura do solo.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Homero Bergamaschi (Departamento de Forrageiras e Agrometeorologia da Faculdade de Agronomia da UFRGS), pelo fornecimento dos dados de temperatura e precipitação pluvial do período em que o trabalho foi realizado. À FAPERGS, ao CNPq e ao MCT, pelo apoio financeiro (Projeto Pronex 04/0850.0 - Seqüestro de carbono e mitigação das emissões de gases de efeito estufa por sistemas conservacionistas de manejo e as oportunidades para o agronegócio no RS”).

LITERATURA CITADA

- AITA, C.; CERETTA, C.A.; THOMAS, A.L.; PAVINATO, A. & BAYER, C. Espécies de inverno como fonte de nitrogênio para o milho no sistema de cultivo mínimo e feijão em plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:101-108, 1994.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F. & BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:189-197, 2001.
- ANDERSON, J.P.E. Soil respiration. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. *Methods of soil analysis. Part 2 - Chemical and microbiological properties* 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1982. p.837-871. (Agronomy Monograph, 9)
- BALESDENT, J. & BALABANE, M. Maize root-derived soil organic carbon estimated by natural ¹³C abundance. *Soil Biol. Biochem.*, 24:97-101, 1992.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Sistemas de manejo do solo e seus efeitos sobre o rendimento do milho. *Ci. Rural*, 28:23-28, 1998.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Till. Res.*, 86:237-245, 2006.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. & MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:599-607, 2000.
- BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R.; CARDOSO, L.S. & SILVA, M.I.G. *Clima da Estação Experimental da UFRGS (e Região de Abrangência)*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 78p.
- BOLINDER, M.A.; ANGERS, D.A. & DUBUC, J.P. Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soil for cereal crops. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 63:61-66, 1997.
- BUYANOVSKY, G.A. & WAGNER, G.H. Post-harvest residue input to cropland. *Plant Soil*, 93:57-65, 1986.
- CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. & ALBUQUERQUE, J.A. Manejo da calagem e seu efeito sobre componentes da acidez de um Oxisol sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:527-535, 2004.
- COSTA, F.S.; GOMES, J.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases de efeito estufa no sistema solo-atmosfera. *Ci. Rural*, 36:693-700, 2006.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:527-535, 2003.
- CROZIER, C.R. & KING, L.D. Corn root dry matter and nitrogen distribution as determined by sampling multiple soil cores around individual plants. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 24:1127-1138, 1993.
- DRINKWATER, L.E.; WAGONER, P. & SARRANTONIO, M. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature*, 396:262-265, 1998.
- DUIKER, S.W. & LAL, R. Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in central Ohio. *Soil Till. Res.*, 54:21-30, 2000.
- ELLERT, B.H. & BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.*, 75:529-538, 1995.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.
- FEHRENBACHER, J.B. & ALEXANDER, J.D. A method for studying corn root distribution using a soil-core sampling machine and shakertype washer. *Agron. J.*, 47:468-472, 1955.
- FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.M. & ZUBERER, D.A. Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping. *Soil Till. Res.*, 34:41-60, 1995.

- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate change 2001: The scientific basis. Cambridge, Cambridge University Press, 2001. 881p.
- JANZEN, H.H.; CAMPBELL, C.A.; IZAURRALDE, R.C.; ELLERT, B.H.; JUMA, N.; MCGILL, W.B. & ZENTNER, R.P. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil Till. Res.*, 47:181-195, 1998.
- KESSAVALOU, A.; DORAN, J.W.; MOSIER, A.R. & DRIJBER, R.A. Greenhouse gas fluxes following tillage and wetting in a wheat-fallow cropping system. *J. Environ. Qual.*, 27:1105-1116, 1998.
- KISSELE, K.W.; GARRETT, C.J.; FU, S.; HEDRIX, P.F.; CROSSLEY, D.A.; COLEMAN, D.C. & POTTER, R.L. Budgets for roots-derived C and litter-derived C: Comparison between conventional tillage and no tillage soils. *Soil Biol. Biochem.*, 33:1067-1075, 2001.
- LA SCALA Jr., N.; BOLONHEZI, D. & PEREIRA, G.T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no till sugar cane area in Southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 91:244-248, 2006.
- LA SCALA Jr., N.; LOPES, A.; PANOSSO, A.R.; CAMARA, F.T. & PEREIRA, G.T. Soil CO₂ efflux following rotary tillage of a tropical soil. *Soil Till. Res.*, 84:233-235, 2005.
- LOVATO, T. Dinâmica do carbono e nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 133p. (Tese de Doutorado)
- LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. & VEZZANI, F. Adições de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:175-187, 2004.
- PAUL, E.A. & CLARK, F.E. Soil microbiology and biochemistry. 2.ed. San Diego, Academic Press, 1996. 340p.
- PAUSTIAN, K.; ANDRÉN, O.; JANZEN, H.H.; LAL, R.; SMITH, P.; TIAN, G.; TIESSEN, H.; Van NOORDWIJK, M. & WOOMER, P.L. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use Manag.*, 13:230-244, 1997.
- SILVA, M.A.S.; MAFRA, A.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ci. Rural*, 35:544-552, 2005.
- SPAGNOLLO, E.; BAYER, C.; WILDNER, L.P.; ERNANI, P.R.; ALBUQUERQUE, J.A. & PROENÇA, M.M. Leguminosas estivais intercalares como fonte de nitrogênio para o milho, no Sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:417-423, 2002.
- TIAN, G.; BRUSSAARD, L.; KANG, B.T. & SWIFT, M.J. Soil fauna-mediated decomposition of plants residues under constrained environmental and residue quality conditions. In: CADISCH, G. & GILLER, K.E. eds. Driven by nature: Plant and litter quality and decomposition. Wallingford, CAB International, 1997. p.125-134.
- VARGAS, L.K. & SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de C-CO₂ e N mineral de um Podzólico Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:35-42, 2000.
- ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F.C.B. & MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. *Soil Till. Res.*, 94:510-519, 2007.