

ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO E SUA RELAÇÃO COM OS ESTOQUES NO SOLO E COM O RENDIMENTO DO MILHO EM SISTEMAS DE MANEJO⁽¹⁾

T. LOVATO⁽²⁾, J. MIELNICZUK⁽³⁾, C. BAYER⁽³⁾ & F. VEZZANI⁽⁴⁾

RESUMO

Experimentos de longa duração constituem ferramenta valiosa para o estudo da dinâmica da matéria orgânica no solo. Com esse objetivo, realizou-se a presente pesquisa a qual foi baseada em experimento instalado, em 1985, em um Argissolo Vermelho degradado pelo cultivo inadequado por 16 anos. O experimento está localizado na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, em Eldorado do Sul (RS), e consiste em três sistemas de preparo de solo (preparo convencional-PC, preparo reduzido-PR, e plantio direto-PD) em parcelas principais, três sistemas de culturas (aveia/milho-A/M, ervilhaca/milho-E/M, e aveia + ervilhaca/ milho + caupi-A + E/M + C), em subparcelas, e duas doses de N mineral na cultura do milho (0 e 139 kg ha⁻¹), em subblocos, distribuídos segundo um delineamento de blocos ao acaso, com três repetições. As adições de C e N pelas culturas foram estimadas para o período experimental de 13 anos; o solo foi amostrado, em setembro de 1998, em seis camadas, até à profundidade de 0,30 m, analisado em relação aos teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), tendo sido calculados os estoques desses elementos nas camadas de 0-0,175 e 0,175-0,30 m. As leguminosas contribuíram para a maior adição anual de C e N ao solo pelos sistemas de culturas, que variaram de 4,17 a 8,39 Mg ha⁻¹ e de -21 a 178 kg ha⁻¹, respectivamente. As maiores adições de C e N refletiram-se num maior acúmulo de COT e NT na camada de 0-0,175 m do solo em PD e em gradativa elevação do rendimento do milho nos três sistemas de preparo. A adição anual de C (A) necessária para manter o estoque inicial de COT (dC/dt = zero) foi estimada em 4,2 Mg ha⁻¹ em PD, 7,3 Mg ha⁻¹ em PR e 8,9 Mg ha⁻¹ em PC. De forma similar, a adição anual de N necessária para manter

⁽¹⁾ Recebido para publicação em novembro de 2002 e aprovado em outubro de 2003.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: thlovato@creta.ccr.ufsm.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: mieln@vortex.ufrgs.br; cimelio.bayer@ufrgs.br

⁽⁴⁾ Pós-Doutorando do Departamento de Solos, UFSM. Bolsista Recém-Doutor do CNPq. E-mail: fvezzani@terra.com.br

os estoques iniciais ($dN/dt = \text{zero}$) foi estimada em 5 kg ha^{-1} para o PD, 31 kg ha^{-1} para o PR e 94 kg ha^{-1} para o PC. Estimou-se, pelo coeficiente angular da regressão linear que relaciona as taxas anuais de adição de C (A) e a variação anual nos estoques de COT na camada de 0-0,175 m do solo (dC/dt), que 12,9, 8,1 e 11,5 % do C adicionado ao solo foi retido na matéria orgânica do solo em PD, PR e PC, respectivamente, o que corresponde a uma estimativa aproximada do coeficiente de humificação (k_1). Analogamente, estimou-se que 49,7, 21,0 e 33,1 % da quantidade líquida de N adicionada foi retida como NT no solo em PD, PR e PC, respectivamente. A taxa de perda de COT do solo (k_2), calculada para a condição $dC/dt = \text{zero}$, foi de $0,0166 \text{ ano}^{-1}$ no solo em PD, $0,0182 \text{ ano}^{-1}$ no solo em PR, e $0,0314 \text{ ano}^{-1}$ no solo em PC. O plantio direto, pela diminuição da taxa de perda de matéria orgânica (k_2), e os sistemas de culturas com leguminosas, pela alta adição de C fotossintetizado e de N fixado simbioticamente, são boas alternativas para recuperar os estoques de COT e NT do solo e aumentar o rendimento do milho na região subtropical do Sul do Brasil.

Termos de indexação: leguminosas, matéria orgânica, plantio direto, preparo reduzido, preparo convencional, solos subtropicais.

SUMMARY: CARBON AND NITROGEN ADDITION RELATED TO STOCKS OF THESE ELEMENTS IN SOIL AND CORN YIELD UNDER MANAGEMENT SYSTEMS

Long-term experiments are essential for research about organic matter dynamics of soils. This paper reports results of an experiment installed in September 1985 on a Paleudult soil degraded under inadequate management for 16 years. The experiment was conducted at the Experimental Station of the Federal University of Rio Grande do Sul (Brazil) in Eldorado do Sul county. Three soil tillage methods (conventional tillage-CT, reduced tillage-RT and no-tillage-NT), three crop systems (oat/corn-O/C, vetch/corn-V/C and oat + vetch/corn + cowpea-O + V/C + Cp), and two N rates applied to corn as urea (0 and 139 kg ha^{-1}) were tested. A split-plot design arranged in randomized blocks with three replications was used with soil tillage as main plot, the cropping systems as sub-plots and nitrogen rates as sub-blocks. Carbon and nitrogen addition by crops was estimated for the experimental period of 13 years. In September 1998, the soil was sampled in six layers down to 0.30 m depth, and total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) contents were determined in each layer and then calculated for the 0-0.175 m and 0.175-0.30 m layers. Legumes were responsible for the greatest annual soil C and N increase by crops (4.17 to 8.39 Mg ha^{-1} and -21 to 178 kg ha^{-1} , respectively). The highest C and N additions were positively related to these elements stocks in the soil under NT (0-0.175 m layer), and promoted gradual corn yield increase in all soil tillage treatments. The annual rate of C addition (A) necessary to maintain de initial condition ($dC/dt = \text{zero}$) was estimated at 4.2 Mg ha^{-1} for NT, 7.3 Mg ha^{-1} for RT and 8.9 Mg ha^{-1} for CT. Similarly, the annual rate of N addition required to maintain the initial condition ($dN/dt = \text{zero}$) was 5 kg ha^{-1} for NT, 31 kg ha^{-1} for RT, and 94 kg ha^{-1} for CT. An estimation by the angular coefficient of the linear regression, which relates the annual C addition rates and annual TOC stock variation in the surface layer, calculated that 12.9 % for NT, 8.1 % for RT, and 11.5 % for CT of the C added to the soil was retained in the soil organic matter, representing approximately the humification coefficient (k_1). Likewise, it was estimated that 49.7 % of the net annual N addition under NT, 21.0 % under RT, and 33.1 % under CT was retained as TN in the soil. The TOC loss coefficient from the soil (k_2), calculated for the condition $dC/dt = \text{zero}$, was 0.0166 yr^{-1} under NT, 0.0182 yr^{-1} under RT, and 0.0314 yr^{-1} under CT. No-tillage systems with the reduction of TOC loss (k_2), and legume based crop systems with the high C and N additions are good alternatives to recover the soil TOC and TN stocks and increase corn yield in the subtropical region of southern Brazil.

Index terms: legume crops, soil organic matter, no-tillage, reduced tillage, conventional tillage, subtropical soils.

INTRODUÇÃO

O solo é um sistema aberto, com permanente troca de matéria e energia com o meio (Addiscott, 1995), e complexo, em virtude de uma intrincada rede de relações entre os subsistemas que o compõem, representados pelos vegetais, organismos (macro e microrganismos) e matéria mineral. Os vegetais são os principais responsáveis pela adição ao solo de compostos orgânicos primários sintetizados no processo de fotossíntese, utilizando energia solar, CO₂ do ar, água e nutrientes do solo. Os organismos, com destaque aos microrganismos heterotróficos, obtêm energia para o seu desenvolvimento pela decomposição de resíduos vegetais e da matéria orgânica do solo, liberando CO₂ para atmosfera, nutrientes, e uma gama de compostos orgânicos secundários oriundos do metabolismo microbiano, os quais passam a compor a matéria orgânica do solo (Vezzani, 2001).

A matéria orgânica interage com minerais no solo formando complexos organominerais por meio de diversos mecanismos de interação, resultando em partículas secundárias de diversos tamanhos e formas, desde microagregados (< 250 µm) até macroagregados de alguns milímetros de tamanho (Tisdall & Oades, 1982). As plantas, pela ação do seu sistema radicular (Silva & Mielniczuk, 1997), e as hifas de fungos (Miller & Jastrow, 1990) potencializam estas interações na formação de agregados estáveis, principalmente pela aproximação de partículas, exsudações bem distribuídas na matriz do solo e união física de agregados de diferentes tamanhos. As interações com os minerais e a formação de agregados diminuem a ação dos microrganismos decompositores, contribuindo para o acúmulo de compostos orgânicos no solo. O processo de proteção física da matéria orgânica é mais intenso em solos não revolvidos (Feller & Beare, 1997; Six et al., 1999).

Dependendo da magnitude do fluxo de carbono propiciado pelo subsistema vegetal, haverá maior ou menor atividade biológica, produção de compostos orgânicos secundários, agregação do solo e aparecimento de outras propriedades emergentes do sistema solo. De modo geral, as propriedades emergentes do ciclo do C no solo (teor de matéria orgânica, agregação, porosidade, infiltração de água, retenção de água, aeração, CTC, balanço de N, dentre outras) melhoram a qualidade do solo (van Breemer, 1993; Vezzani, 2001).

Os estoques de matéria orgânica do solo são determinados pela razão entre as quantidades de carbono C adicionadas (k_1A) e perdas (k_2C), sendo sua variação temporal (dC/dt) expressa pela equação $dC/dt = -k_2C + Ak_1$. Nesta equação, A representa o C fotossintetizado adicionado anualmente ao solo na forma de resíduos vegetais, exsudatos radiculares e raízes (Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e C representa o estoque de

carbono orgânico total (COT) no solo (Mg ha⁻¹). Os coeficientes k_1 e k_2 representam, em base anual, respectivamente, a fração do C adicionado (A), efetivamente retido no solo na forma de matéria orgânica, e a fração do COT do solo, que é perdido por decomposição microbiana, erosão e lixiviação (Dalal & Mayer, 1986).

O uso do solo para fins agrícolas interfere na adição de C (A) pela seleção de sistemas de culturas com capacidades variadas de adição de fitomassa ao longo do ano. Normalmente, sistemas com pousios, culturas de baixa produtividade, queima ou remoção de resíduos culturais apresentam baixo valor anual de A. Em situação oposta, encontram-se os sistemas intensivos, com presença de culturas altamente produtivas durante todo ano e retorno dos resíduos ao solo. O coeficiente k_1 normalmente é pouco afetado pelas práticas de manejo. No entanto, a forma de adição do C ao solo pode ter influência nos valores de k_1 , sendo os maiores valores observados para o C adicionado pelo sistema radicular (Balesdent & Balabane, 1992, 1996; Bolinder et al., 1999). Neste contexto, culturas com sistema radicular abundante e agressivo, como gramíneas forrageiras perenes, que alocam uma maior fração do C fotossintetizado para as raízes do que culturas anuais (Shamoot et al., 1968), serão mais eficientes em aumentar os estoques de COT do solo.

A taxa de perda da matéria orgânica (k_2) é bastante influenciada pelo revolvimento do solo, o qual estimula a ação dos microrganismos decompositores. Em um mesmo solo, o revolvimento pode duplicar o valor de k_2 em relação a um sistema de manejo sem revolvimento (Bayer et al., 2000c), sendo esse efeito menos pronunciado em solos de textura argilosa e com mineralogia oxidica (Bayer, 1996). Em síntese, um sistema de manejo que objetiva recuperar estoques de COT do solo deve maximizar as entradas (k_1A) e minimizar as perdas (k_2C) anuais de C no solo.

Sendo ambos componentes da matéria orgânica, a dinâmica do N no solo é intimamente associada à dinâmica do C, apenas alterando os mecanismos de adição e de perda dos elementos no sistema (Bayer et al., 2000a,b). Além disso, solos degradados pelo cultivo e com baixos teores de COT normalmente são deficientes em N, o que limita a adição de C, principalmente, em sistemas constituídos por gramíneas. A inclusão de leguminosas nas rotações e a adubação nitrogenada constituem práticas altamente eficientes para o incremento dos estoques de COT e NT, melhoria da qualidade do solo e da produtividade das culturas (Teixeira et al., 1994; Testa et al., 1992; Vezzani, 2001).

O presente estudo foi realizado em experimento de longa duração (13 anos) e teve por objetivo avaliar o efeito de sistemas de manejo de solo, constituídos por sistemas de culturas, preparos de solo e adubação nitrogenada, nos estoques de COT e NT de um

Argissolo Vermelho degradado e na produtividade do milho. A fração do C adicionado retido na matéria orgânica do solo (k_1) e a taxa de perda da matéria orgânica (k_2) foram estimadas, em bases anuais, a partir da interpretação dos resultados experimentais.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição do local

O estudo foi baseado em um experimento conduzido, desde 1985, na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS (30° 50' 52" Sul e 51° 38' 08" Oeste), em Eldorado do Sul (RS). O clima local é subtropical úmido, Cfa, pela classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 19,4 °C, variando as médias normais mensais de 13,9 a 24,9 °C. A precipitação média anual é de 1.440 mm, com variação mensal entre 95,7 mm e 168 mm, com curtos períodos de déficit hídrico no verão (Bergamaschi & Guadagnin, 1990). A área experimental apresenta declividade variando de 2 a 6 % e altitude de 46 m.

O experimento situa-se em solo classificado como Argissolo Vermelho típico (EMBRAPA, 1999) e Paleudult (Soil Survey Staff, 1998). A textura na camada de 0-0,2 m é franco-argilo-arenosa, com 540 g kg⁻¹ de areia, 220 g kg⁻¹ de silte e 240 g kg⁻¹ de argila. Na fração argila, predominam caulinita (720 g kg⁻¹) e óxidos de ferro (109 g kg⁻¹ Fe-DCB). O solo em campo nativo, adjacente ao experimento, contém estoques de COT e de NT de 44,76 Mg ha⁻¹ e 3.620 kg ha⁻¹, na camada de 0-0,175 m, e de 67,22 Mg ha⁻¹ e 5.320 kg ha⁻¹, na camada de 0-0,30 m, respectivamente. Por sua vez, quando da instalação do experimento, em 1985, o solo apresentava estoques de COT e NT de, respectivamente, 32,55 Mg ha⁻¹ e 2.710 kg ha⁻¹, na camada de 0-0,175 m, e de 51,61 Mg ha⁻¹ e 4.340 kg ha⁻¹, na camada de 0-0,30 m, reduzidos para estes valores pelo cultivo do solo por 16 anos (1969-1984) baseado em práticas de intenso revolvimento e baixa adição de resíduos vegetais (Lovato, 2001).

Tratamentos e delineamento experimental

O experimento seguiu um delineamento experimental de blocos casualizados, com parcelas subdivididas, com três repetições. As parcelas principais (15 x 20 m) consistiram de três sistemas de preparo de solo (preparo convencional-PC, preparo reduzido-PR e plantio direto-PD), e as subparcelas (5 x 20 m) de três sistemas de culturas [aveia preta (*Avena strigosa*)/milho (*Zea mays*)-A/M, ervilhaca (*Vicia sativa*)/milho-E/M e aveia + ervilhaca/milho + caupi (*Vigna unguiculata*)-A + E/M + C]. Duas doses de N mineral (0 kg ha⁻¹ - N0 e 180 kg ha⁻¹ - N180), na forma de uréia, foram aplicadas na cultura do milho em faixas nos blocos (subblocos com 45 x 10 m).

Os preparos de solo foram realizados na primavera-verão, antes da semeadura do milho; no outono, as culturas de cobertura do solo foram implantadas em plantio direto em todo o experimento. O PC consistiu de uma aração e duas gradagens; o PR consistiu de uma escarificação seguida de uma gradagem leve, e o PD na semeadura do milho na camada de resíduos vegetais na superfície do solo. Nos três sistemas de preparo de solo, os resíduos das culturas de cobertura e do milho foram manejados com uma passagem de rolo-faca. Durante o experimento, houve variações nos consórcios da culturas de outono-inverno e nas quantidades de N mineral aplicadas. Nos atuais tratamentos A + E/M + C e E/M, utilizou-se, no período de 1985-1989, o trevo subterrâneo (*Trifolium subterraneum*) em lugar da ervilhaca. No sistema E/M, utilizou-se, entre 1985 e 1989, o consórcio aveia+trevo, e entre 1990 e 1994, o consórcio aveia + ervilhaca. Em relação ao N mineral, a partir de 1994, a dose de 180 kg ha⁻¹ foi usada em substituição à dose de 120 kg ha⁻¹, resultando em uma média anual nos 13 anos de 139 kg ha⁻¹ (N139).

As práticas do experimento, relativas aos preparos de solo, adubação, calagem, semeadura, irrigação e controle de invasoras, encontram-se descritas em Freitas et al. (1996), Bayer & Mielniczuk (1997a,b), Bayer et al. (2000a,b), Amado et al. (2000) e Lovato (2001).

Amostragem e análise do solo

Em setembro de 1998, após a rolagem das culturas de inverno e precedendo a semeadura do milho, foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-0,025, 0,025-0,05, 0,05-0,075, 0,075-0,125, 0,125-0,175 e 0,175-0,30 m em todos os tratamentos. A amostragem do solo foi manual, em uma faixa de 0,20-0,50 m, transversal às linhas de semeadura do milho. As amostras de solo foram secas ao ar e moídas até passar em peneira de 2 mm. Das amostras assim preparadas, retirou-se uma subamostra a qual foi submetida à moagem em gral de porcelana até passar em peneira de 0,5 mm para posterior análise dos teores de COT e de NT pelos métodos Walkley-Black e Kjeldhal, respectivamente (Tedesco et al., 1995). Os estoques de COT e NT do solo foram calculados com base nos valores de densidades de solo apresentados em Bayer (1996).

Estimativas das adições de C e N ao solo pelos sistemas de culturas

As adições anuais de C e de N (A) pelos sistemas de culturas foram estimadas a partir dos resultados de rendimento de grãos do milho, matéria seca produzida e N absorvido pelo milho e pelas culturas de cobertura de solo, bem como as quantidades de N exportado pela colheita dos grãos do milho, resumidos em Lovato (2001). Considerou-se a contribuição média do sistema radicular em 30 %

do total de C e N contidos na parte aérea. Para calcular as adições de C pelas culturas de cobertura e pelo milho, utilizou-se o teor médio de 40 % deste elemento na matéria seca (Lovato, 2001).

Estimativas do coeficiente de humificação (k_1) e da taxa de perda de matéria orgânica (k_2)

A fração do C adicionado retido na matéria orgânica do solo (k_1), denominado coeficiente de humificação, foi estimada, de forma aproximada, a partir do coeficiente angular da regressão linear que relaciona as quantidades de C adicionadas anualmente com a taxa de variação anual (dC/dt) no estoque de COT na camada de 0-0,175 m do solo. Analogamente, estimou-se a fração da quantidade líquida de N adicionada que foi retida como NT no solo.

A partir dos valores de adição efetiva de C ao solo pelos sistemas de culturas (k_1A) e dos estoques de COT na camada de 0-0,175 m do solo, estimou-se a taxa anual de perda de matéria orgânica do solo (k_2) em cada sistema de preparo de solo, utilizando-se a equação $dC/dt = k_1A - k_2C$, na condição de $dC/dt = \text{zero}$ (Dalal & Mayer, 1986). Nesta condição, $k_1A = k_2C$ e $k_2 = k_1A/C$, em que C representa o estoque de COT do solo na condição inicial ($32,55 \text{ Mg ha}^{-1}$) e A representa a taxa de adição anual de C necessária para manter o estoque inicial de COT do solo inalterado ao longo do tempo, ou seja, $dC/dt = \text{zero}$.

Análise estatística

O efeito dos sistemas de preparo de solo, sistemas de culturas e da adubação nitrogenada nos estoques de COT e de NT do solo tiveram sua significância avaliada pela análise da variância. A diferença entre médias de tratamentos foi obtida pelo teste de Tukey a 5 %. A relação entre variáveis foi determinada pela significância dos coeficientes de regressões polinomiais a 1 e 5 %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Adições de C e N pelos sistemas de culturas e rendimento do milho

Na figura 1a, está apresentada a adição média anual de C ao solo pelos sistemas de culturas (parte aérea e raízes). Verifica-se que a adição variou, na média dos preparos de solo, entre $4,11 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, no sistema A/M sem N mineral, e $8,14 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, no sistema A + E/M + C com adição anual de 139 kg ha^{-1} de N mineral. Como regra geral, o milho apresentou a maior contribuição na adição de C ao solo, destacando a sua importância em sistemas de culturas, quanto à adição de biomassa. A contribuição relativa das culturas de cobertura

variou de 40 a 50 %, nos tratamentos sem N mineral, e de 30 a 40 %, nos tratamentos com adubação nitrogenada.

No entanto, além da adição de C pelas leguminosas, estas espécies aumentaram a adição de C pelo milho, conforme pode ser verificado, comparando a contribuição do milho, sem adubação nitrogenada, nos sistemas A + E/M + C e E/M, com a do sistema A/M. Os sistemas com leguminosas (E/M e A + E/M + C), sem N mineral, atingiram uma adição de C equivalente a 80-90 % da verificada no mesmo sistema com adubação nitrogenada, superando, no caso do sistema A + E/M + C, a adição de C verificada no sistema A/M com N mineral. Esse efeito das leguminosas na adição de C está diretamente relacionado com o suprimento de N às culturas em sucessão (Amado et al., 2000; 2001), e não foi expressivo, quando realizada a adubação nitrogenada (Figura 1).

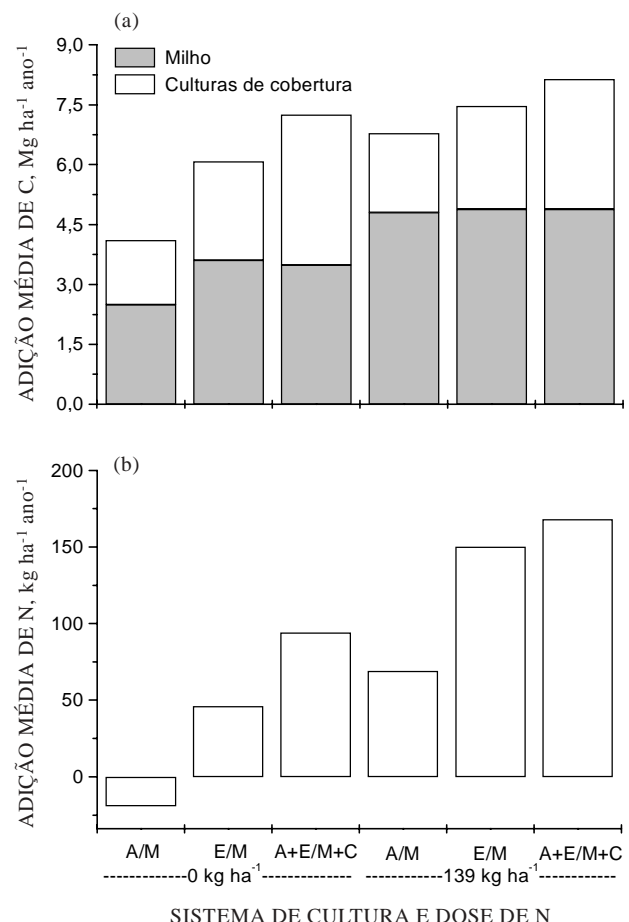


Figura 1. Quantidades anuais médias de C (a) e de N (b) adicionadas ao solo pelos sistemas de culturas, em duas doses de N mineral. Valores médios de três sistemas de preparo de solo no período de 1985 a 1998. N adicionado = (N adubo + N fixado simbioticamente) - N retirado na colheita. A = aveia, M = milho, E = ervilhaca, C = caupi.

Quanto à avaliação das quantidades de N adicionadas ao solo pelos sistemas de culturas depara-se com dificuldades maiores que as relativas às adições de C. Enquanto todo o C adicionado pela fitomassa vem do ar via fotossíntese, o N na fitomassa vem do solo, da fixação simbiótica e da adubação nitrogenada. A dificuldade reside na separação do N reciclado, daquele efetivamente adicionado ao sistema. Esta separação normalmente é feita com o uso de técnicas de N marcado (N^{15}) (Ramos et al., 2001), ou com base em experimentos de campo (Teixeira et al., 1994; Amado et al., 2000).

Esta última técnica, utilizada na presente pesquisa, considera que o N absorvido pelas gramíneas (aveia e milho) provém exclusivamente do solo ou do adubo aplicado, e o N contido nas leguminosas, do solo e da fixação simbiótica. A contribuição da fixação simbiótica foi computada, descontando-se do N contido na fitomassa da leguminosa ou da mistura, o N absorvido pela aveia, acrescido do N do caupi, onde esta cultura estava presente. Esta forma de cálculo, cujos resultados encontram-se no quadro 1, provavelmente, superestima a contribuição da fixação simbiótica,

principalmente na mistura de gramíneas e leguminosas. Neste quadro, a coluna VIII fornece a estimativa do N efetivamente adicionado e a coluna IX a estimativa do N depositado sobre o solo pelas culturas, representando o N absorvido do solo (reciclagem) e o adicionado (fixado + adubo), subtraindo-se, em ambos os casos, o N retirado pelos grãos do milho. Para os cálculos efetuados veja o rodapé do quadro 1. As adições pela chuva e fixação assimbiótica não foram consideradas na presente pesquisa.

Na figura 1b, está representada a adição líquida de N ao solo, na média dos três preparos de solo, em que houve uma remoção média anual de aproximadamente 20 kg ha⁻¹ no sistema A/M, decorrente da exportação pelos grãos de milho. Nos sistemas E/M e A + E/M + C, houve adição líquida de N de aproximadamente 50 e 100 kg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Com a aplicação de N mineral, a adição de N chegou próximo a 170 kg ha⁻¹ ano⁻¹. As quantidades de N depositadas sobre o solo pelas culturas de culturas sem aplicação de N mineral variaram de 38 kg ha⁻¹ ano⁻¹, no sistema PR A/M, a 182 kg ha⁻¹ ano⁻¹, no PC A + E/M + C, enquanto,

Quadro 1. Quantidades médias anuais estimadas de nitrogênio adicionado, reciclado e retirado nos sistemas de culturas, com e sem adubação nitrogenada, em três sistemas de preparo de solo

Sistema		Cultura de cobertura				Milho		Total reciclado ⁽²⁾	Total adicionado ⁽³⁾	Total depositado sobre o solo ⁽⁴⁾
Preparo	Cultura	Aplicado via adubo	Total absorvido	Absorvido pela Aveia	Fixado ⁽¹⁾	Absorvido	Retirado nos grãos			
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ de N										
PC	A/M	0	40	40	0	23	21	63	-21	42
	E/M	0	133	40	93	47	44	87	49	136
	A + E/M + C	0	180	40	140	40	38	80	102	182
PR	A/M	0	36	36	0	22	20	58	-20	38
	E/M	0	125	36	89	40	38	76	51	127
	A + E/M + C	0	170	36	134	41	38	77	96	173
PD	A/M	0	37	37	0	18	16	55	-16	39
	E/M	0	114	37	77	42	39	79	38	117
	A + E/M + C	0	156	37	119	38	36	75	83	158
PC	A/M	139	42	42	0	73	70	115	69	184
	E/M	139	131	42	89	73	71	115	157	272
	A + E/M + C	139	150	42	108	72	69	114	178	292
PR	A/M	139	46	46	0	75	72	121	67	188
	E/M	139	132	46	86	71	68	117	157	274
	A + E/M + C	139	141	46	95	72	69	118	165	283
PD	A/M	139	42	42	0	70	67	112	72	184
	E/M	139	110	42	68	72	70	114	137	251
	A + E/M + C	139	134	42	92	74	71	116	160	276

PC = preparo convencional, PR = preparo reduzido e PD = plantio direto. A = aveia, E = ervilhaca, M = milho e C = caupi.

⁽¹⁾ N fixado = Colunas II - III. ⁽²⁾ N total reciclado = Colunas III + V. ⁽³⁾ N total adicionado = Colunas (I + IV) - VI. ⁽⁴⁾ N total depositado sobre o solo = Colunas (I + II + V) - VI.

quando foi aplicado N mineral, a variação foi de 184 kg ha⁻¹ ano⁻¹ no PC A/M a 292 kg ha⁻¹ ano⁻¹ no PC A + E/M + C (Quadro 1).

A maior quantidade líquida de N adicionado e a maior quantidade de N depositado sobre o solo influenciaram na adição de C pelos resíduos vegetais (Figura 1a) e o rendimento de milho (Figura 2). No sistema A/M, sem N mineral, no qual o balanço de N foi negativo, houve tendência de redução de rendimento de 1985/86 a 1997/98, enquanto, nos sistemas com leguminosas, nos quais o balanço de N foi positivo, houve aumento gradual de rendimento entre o início do experimento e o 13º ano. Tendência similar foi observada no aumento do rendimento médio da cultura. Com aplicação de N mineral, verificou-se aumento expressivo de rendimento do milho entre 1985/86 e 1997/98, nos três sistemas de culturas, atingindo rendimentos superiores a 9 Mg ha⁻¹ nesta última safra.

O aumento de rendimento ao longo dos anos deve-se à melhoria das práticas de manejo, uso de híbridos mais produtivos, melhoria da qualidade do solo e, principalmente, ao aumento do suprimento de N mineral e aos sistemas de culturas com leguminosas, que promoveram acúmulo deste nutriente no solo (Amado et al., 2001).

Alteração nos estoques de carbono orgânico total (COT) do solo

O cultivo do solo, originalmente sob campo nativo, no período que antecedeu a instalação do experimento (1969-1984), resultou na diminuição dos estoques de COT na camada de 0-0,175 m do solo de 44,76 para 32,55 Mg ha⁻¹, em razão do intenso revolvimento do solo com enxada rotativa e baixa

adição de resíduos vegetais (Quadro 2). Durante o período experimental (1985-1998), os estoques de COT nesta camada do solo foram influenciados significativamente pelos preparos de solo, sistemas de culturas e doses de N, não tendo sido observada interação entre as práticas de manejo (Quadro 2). Na camada de 0,175-0,30 m, o estoque de COT foi pouco alterado pelo cultivo do solo no período anterior à instalação do experimento e pelos tratamentos durante o experimento, onde apenas a aplicação de N mineral teve efeito significativo (Quadro 2).

O estoque de COT na camada de 0-0,175 m foi maior no solo em PD do que no solo em PR e PC, os quais não diferiram (Tukey 5 %), apesar da tendência do maior estoque de COT ocorrer no solo em PR. Os estoques de COT no solo (0-0,175 m) nos sistemas de culturas E/M e A + E/M + C não diferiram, porém promoveram maior acúmulo de COT no solo em comparação ao sistema A/M. A adubação nitrogenada aumentou o estoque de COT nas duas camadas de solo (0-0,175 e 0,175-0,30 m) (Quadro 2). Estes resultados são relacionados, conforme será discutido mais adiante, com as maiores taxas anuais de perda de matéria orgânica nos sistemas de preparo com revolvimento, bem como com a maior adição anual de C pelos sistemas de culturas que têm suas deficiências de N supridas pela presença de leguminosas e adubação nitrogenada.

Na figura 3a, são apresentados os estoques de COT na camada de 0-0,175 m do solo nos tratamentos A/M-PC e PD e A + E/M + C-PC e PD, com e sem aplicação de N mineral, bem como a sua comparação ao estoque original do solo em campo nativo (CNativo) e no início do experimento (1985). Verifica-se, nesta figura, a nítida recuperação dos estoques de COT pelo sistema PD A + E/M + C, mesmo sem aplicação de N, enfatizando a importância da presença de leguminosas nos sistemas agrícolas para a recuperação dos estoques de COT do solo. Este efeito foi ampliado pela utilização de N mineral. Observa-se, nesta figura, que, embora tenha ocorrido expressiva recuperação do estoque de COT do solo no período experimental, ainda não foi atingido o estoque original do solo em campo nativo. Nota-se também o efeito deletério do revolvimento sobre o acúmulo de C orgânico no solo, onde a alta adição de C pelo sistema A + E/M + C com N mineral não foi suficiente para manter os estoques de COT observados no início do experimento.

A localização do aporte de C pelos resíduos vegetais resultou numa distribuição dos teores de COT no perfil do solo diferenciada entre os preparos de solo. Na figura 4a, é apresentado o efeito dos tratamentos extremos PC A/M e PD A + E/M + C com e sem N mineral sobre a distribuição do C orgânico no perfil do solo e sua relação com a

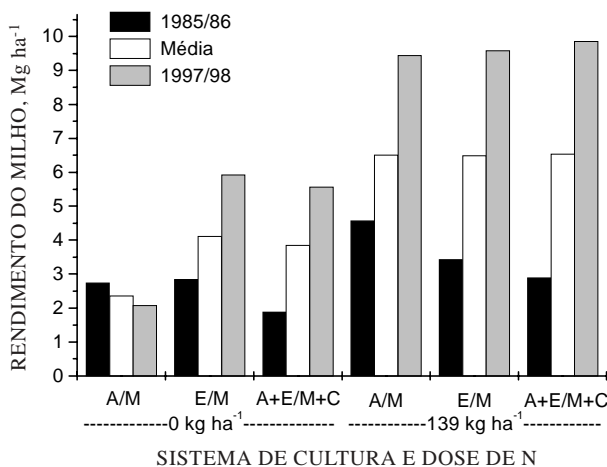


Figura 2. Rendimento de grãos de milho nos sistemas de culturas, em duas doses de N mineral. Médias de três sistemas de preparo de solo. A = aveia, M = milho, E = ervilhaca, C = caupi.

Quadro 2. Carbono adicionado ao solo em base anual (média) e em 13 anos (total) e os estoques de carbono orgânico total (COT) nas camadas de 0-0,175 e 0,175-0,30 m de um Argissolo Vermelho sob campo nativo, por ocasião da implantação do experimento (1985) e após 13 anos (1998) sob três sistemas de preparo de solo, três sistemas de culturas e duas doses de N mineral

Sistema de manejo		C adicionado				COT (1998)			
		N0		N139		0-0,175 m		0,175-0,30 m	
Preparo	Cultura	Média	Total	Média	Total	N0	N139	N0	N139
Mg ha ⁻¹ de C									
PC	A/M	4,23	54,99	6,67	86,71	25,87	29,88	19,11	21,74
	E/M	6,45	83,85	7,82	101,66	27,90	31,58	19,51	20,79
	A + E/M + C	7,52	97,76	8,39	109,07	30,26	31,84	19,37	19,50
PR	A/M	4,17	54,21	7,09	92,17	29,20	30,16	20,12	20,65
	E/M	5,98	77,74	7,47	97,11	32,08	33,76	20,19	19,84
	A + E/M + C	7,35	95,55	8,19	106,47	32,63	33,88	19,17	20,79
PD	A/M	3,92	51,96	6,63	86,19	32,63	34,84	19,11	19,98
	E/M	5,80	75,40	7,11	92,43	35,08	37,33	18,63	20,86
	A + E/M + C	6,90	87,70	7,83	101,71	37,76	39,64	19,10	19,44
Média de preparo									
	PC					29,56 b	20,05 a		
	PR					31,95 b	20,16 a		
	PD					36,22 a	19,47 a		
Média de cultura									
	A/M					30,44 b	20,17 a		
	E/M					32,96 a	20,00 a		
	A + E/M + C					34,33 a	19,51 a		
Média de dose N									
	N0					31,49 b	19,38 b		
	N139					33,66 a	20,40 a		
Campo nativo						44,76	22,45		
Inicial (1985) ⁽¹⁾						32,55	19,06		

⁽¹⁾ Freitas (1988).

Médias seguidas de letras iguais, nas colunas, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

PC = Preparo convencional, PR = Preparo reduzido, PD = Plantio Direto, A = aveia, M = milho, E = ervilhaca, C = caupi, N0 = zero kg ha⁻¹ N mineral, e N139 = 139 kg ha⁻¹ N mineral.

condição inicial em 1985. Observa-se que o PC A/M, mesmo com adição de N, apresentou redução de COT em praticamente toda a camada de 0-0,175 m. Por sua vez, o PD A + E/M + C promoveu uma recuperação nos teores de COT desde a superfície do solo até à profundidade de 0,075 m, com redução na camada de 0,075-0,175 m. No entanto, a diferença nos estoques de COT do solo entre os sistemas PC A/M N0 e PD A + E/M + C N139 foi de 13,77 Mg ha⁻¹ (Figura 4a).

A relação entre o C adicionado (A) e a variação anual nos estoques de COT no solo (dC/dt), calculada em relação ao estoque inicial de COT na camada de 0-0,175 m (32,55 Mg ha⁻¹), encontra-se na figura 5a. Verifica-se que os sistemas de culturas sob PC apresentaram taxas negativas (perdas) de alteração dos estoques de COT, variando de -0,51 a

-0,05 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Em PR, as taxas foram negativas ou muito baixas (-0,26 a 0,10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e sempre positivas em PD (+0,01 a +0,56 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). A aplicação de N mineral reduziu as taxas negativas e aumentou as positivas (Figura 5b).

O tratamento PC A/M N0 apresentou a maior taxa de perda de C (-0,51 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e o PD A + E/M + C N139 a maior taxa de acúmulo (0,56 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) (Figura 5a). O acúmulo diferencial de COT no solo nestes sistemas extremos de manejo de solo (1,06 Mg ha⁻¹ ano⁻¹) foi semelhante aos valores de 1,0 e 1,1 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ verificados aos cinco (Bayer & Mielniczuk, 1997) e nove anos (Bayer et al., 2000b) do presente experimento. Estes resultados evidenciam que o efeito líquido dos sistemas de manejo nos estoques de COT do solo tem apresentado magnitude semelhante ao longo do período

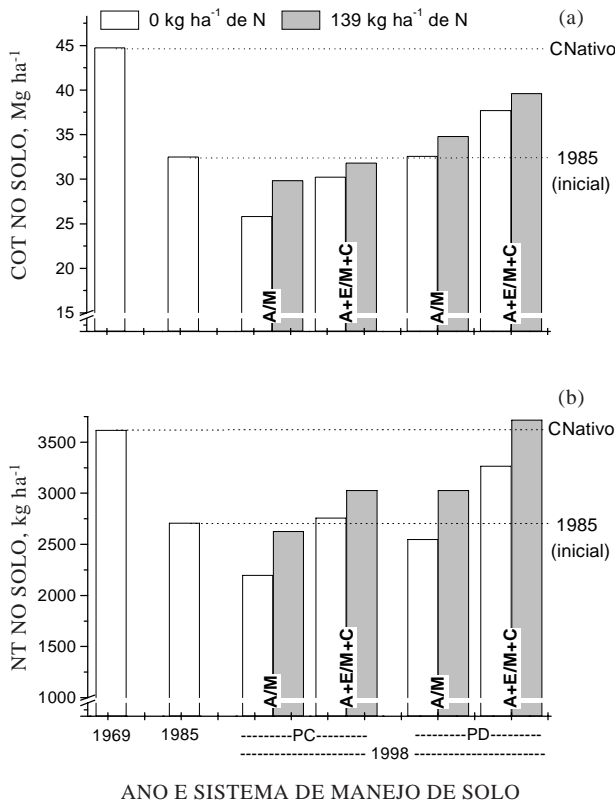


Figura 3. Estoques de carbono orgânico total-COT (a) e de nitrogênio total-NT (b) no solo (0-0,175 m) sob campo nativo (1969), referência da condição original do solo, por ocasião do início do experimento (1985), e após 13 anos (1998) da utilização dos sistemas de preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) nos sistemas de culturas aveia/milho-A/M e aveia + ervilhaca/milho + caupi-A + E/M + C.

experimental, o que significa que, provavelmente, ao final dos 13 anos, ainda não tenham sido alcançados os respectivos estoques estáveis de COT no solo nos diferentes sistemas de manejo.

Verificou-se que apenas o PD favoreceu o aumento do estoque de COT no solo, sendo a magnitude das taxas muito dependentes da quantidade de C adicionado pelos sistemas de culturas (Figura 5a). Dentre outros fatores, estes resultados explicam a variação das taxas de acúmulo do COT do solo encontradas na literatura (Corazza et al., 1999; Lal et al., 1999; Amado et al., 2001; Freixo et al., 2002). Esse efeito da adição de C na taxa de acúmulo de COT no solo fica bastante evidente nos resultados relatados por Bayer et al. (2000a), segundo o qual a taxa de seqüestro de C no solo em oito sistemas de culturas em plantio direto, calculada em relação a um sistema pousio/milho, variou de 0,13 a 0,97 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, estando diretamente relacionada com as adições anuais de C pelas culturas.

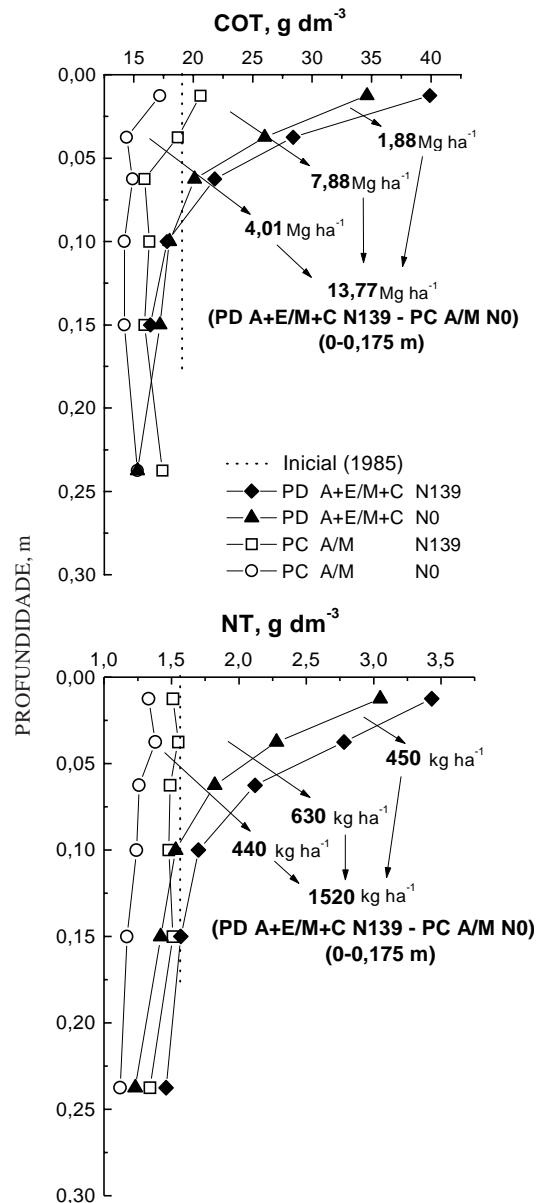


Figura 4. Distribuição dos teores de carbono orgânico total-COT (a) e de nitrogênio total-NT (b) no perfil do solo no início do experimento (1985) e 13 anos após, nos tratamentos com situações extremas de revolvimento do solo e de adição de N. PC = preparo convencional, PD = plantio direto, A = aveia, M = milho, E = ervilhaca, C = caupi.

A extrapolação para períodos mais longos dos efeitos dos sistemas de culturas e dos preparos de solo poderá ser feita por meio do ajuste de modelos de simulação, como os utilizados por Bayer et al. (2000c) e Lovato (2001). No entanto, estes modelos exigem o conhecimento prévio das taxas de conversão efetiva anual do C adicionado em COT (matéria orgânica) do solo (k_1) e da taxa de decomposição ou de perda anual do COT do solo (k_2).

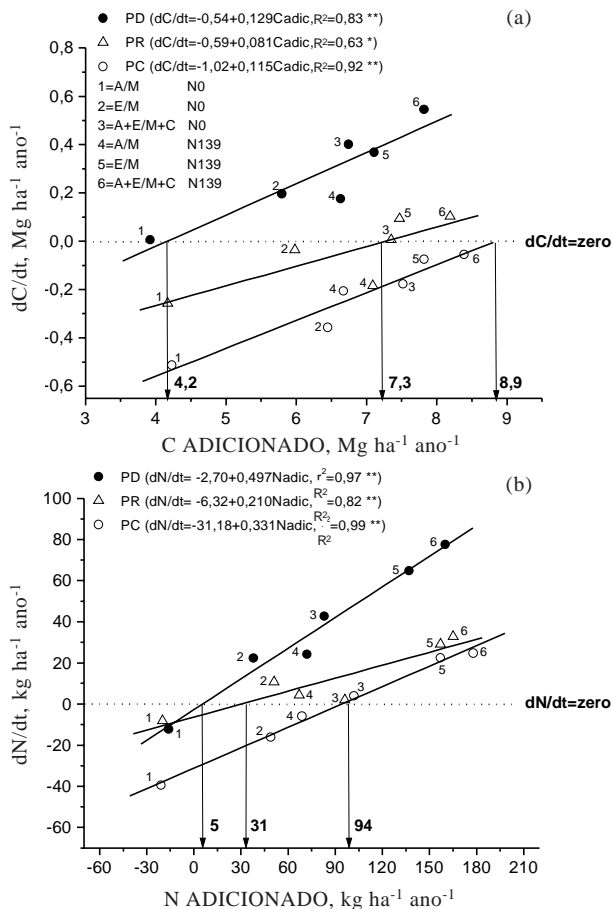


Figura 5. Relação entre as quantidades de carbono (a) e de nitrogênio (b) adicionadas com a variação (dC/dt , dN/dt) dos estoques destes elementos na camada de 0-0,175 m do solo submetido aos sistemas de preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR) e plantio direto (PD) e três sistemas de culturas, com e sem adição de N mineral. A = aveia, M = milho, E = ervilhaca, C = caupi. * e **: Significativo a 5 e 1 %, respectivamente.

A determinação do k_1 normalmente é feita com base em resultados de técnicas isotópicas (Balesdent & Balabane, 1996). Entretanto, valores aproximados de k_1 também podem ser obtidos com base em experimentos de longa duração, conhecendo-se as adições anuais de C pelas culturas e a respectiva variação nos estoques de COT do solo em relação ao início do experimento.

Na figura 5a, apresenta-se a relação entre a quantidade de C adicionado (A) anualmente pelos sistemas de culturas e a taxa de variação anual (dC/dt) dos estoques de COT na camada de 0-0,175 m em relação ao estoque inicial de COT em 1985 ($32,55 \text{ Mg ha}^{-1}$). O coeficiente angular das equações representa o k_1 , ou seja, a fração (ou porcentagem) do C adicionado que efetivamente permanece no solo. Observa-se que o k_1 foi maior no PD (0,129 ou 12,9 %

e menor no PR (0,081 ou 8,1 %), sendo intermediário no PC (0,115 ou 11,5 %). Estes valores estão dentro da faixa de 7 a 23 % relatada na literatura (Bolinder et al., 1999).

É possível que os valores de k_1 obtidos por este procedimento sejam subestimados, e isto se deve ao fato de que a adição de C pelas culturas compensam maiores quantidades perdidas de COT anualmente (k_2C) nos tratamentos que apresentam maiores estoques de COT no solo, determinando menor coeficiente angular da equação que relaciona a adição anual de C com a variação do COT no solo (dC/dt).

Conhecendo k_1 , pode-se obter o k_2 , partindo-se da equação $dC/dt = k_1A - k_2C$, na condição de $dC/dt = \text{zero}$ (Dalal & Mayer, 1986; Bayer et al., 2000c; Lovato, 2001). Nesta condição, $k_1A = -k_2C$ e $k_2 = k_1A/C$, em que A é a taxa anual de adição de C pelos sistemas de culturas e C é o estoque de COT no solo. No caso representado na figura 5a, para manter o estoque de COT do solo que havia no início do experimento ($32,55 \text{ Mg ha}^{-1}$), ou seja, $dC/dt = \text{zero}$, seria necessária uma adição anual de C pelas culturas de $4,2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no PD, $7,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no PR, e $8,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no PC, equivalendo a valores de k_2 de $0,0166 \text{ ano}^{-1}$ ($4,2 \times 0,129 \div 32,55$), $0,0181 \text{ ano}^{-1}$ ($7,3 \times 0,081 \div 32,55$) e $0,0314 \text{ ano}^{-1}$ ($8,9 \times 0,115 \div 32,55$), respectivamente. Os valores de k_2 estimados, embora coerentes, são mais baixos do que os obtidos por Bayer et al. (2000c) e Lovato (2001), o que possivelmente decorre do fato de que estes autores utilizaram um valor de k_1 fixo de 0,20, o qual foi determinado por Cerri (1986) para a cultura da cana-de-açúcar em preparo convencional, num Latossolo da região de Piracicaba (SP).

Se persistirem as atuais tendências representadas nas figuras 3a e 5a, a recuperação dos estoques de COT no solo em campo nativo é impraticável nos sistemas de PC e PR. Com o sistema PD, este objetivo pode ser atingido, desde que com a utilização de culturas com elevada adição de biomassa ao solo. Provavelmente, o uso de pastagens perenes, cuja adição de C diretamente ao solo pelo sistema radicular é mais alta do que em culturas anuais, bem como o k_1 também é mais alto (Balesdent & Balabane, 1996; Bolinder et al., 1999), viabilizaria também a recuperação do estoque de COT ao nível do solo em campo nativo.

Alterações nos estoques de N total (NT) do solo

O estoque original de NT da camada de 0-0,175 m do solo em campo nativo (3.620 kg ha^{-1}) foi reduzido pelo cultivo no período 1969-1984 para 2710 kg ha^{-1} . Durante o período experimental, os estoques de NT do solo nesta camada foram alterados significativamente pelos preparos de solo, sistemas de culturas e doses de N. À semelhança do COT, não foram observadas interações significativas entre os efeitos dos tratamentos nos estoques de NT do solo. Na camada de 0,175-0,30 m, o estoque de NT

do solo foi pouco influenciado pelo cultivo anterior ao experimento e, durante o período experimental, foi afetado significativamente pelos preparos de solo e doses de N (Figura 3b e Quadro 3).

O estoque de NT foi maior no solo em PD, intermediário no solo em PR, e menor no solo em PC (Quadro 3). Os sistemas de culturas E/M e A + E/M + C, pela presença de leguminosas, promoveram maior acúmulo de NT em relação ao sistema A/M. A aplicação de N mineral aumentou o estoque de NT nas camadas de 0-0,175 e 0,175-0,30 m, e, nesta última camada, o PR também promoveu aumento do NT em relação ao PC e PD.

Na figura 3b, estão representados os estoques de NT na camada de 0-0,175 m do solo nos tratamentos

A/M-PC e PD e A + E/M + C-PC e PD, com e sem aplicação de N mineral, e sua relação com os estoques de NT inicial (1985) e original (campo nativo). Verifica-se, nesta figura, que o sistema com maior adição de N e sem revolvimento do solo (PD A + E/M + C com N) recuperou e até superou o estoque de NT do solo em campo nativo. Esta recuperação, conforme pode ser visualizada na figura 4b, ocorreu principalmente nas camadas superficiais. Porém, observa-se uma nítida tendência do efeito das práticas de manejo no estoque de NT na camada de 0,175-0,30 m, evidenciado pela diferença de 430 kg ha⁻¹ entre os tratamentos extremos (PC A/M N0 e PD A + E/M + C N139) nessa camada (Quadro 3). Resultados de deslocamento de N mineral e de acúmulo de NT em profundidade foram

Quadro 3. Nitrogênio adicionado ao solo em base anual (média) e em 13 anos (total) por sistemas de cultura, em duas doses de N, e estoques de nitrogênio total (NT) nas camadas de 0-0,175 e 0,175-0,30 m de um Argissolo Vermelho sob campo nativo, por ocasião da instalação do experimento (1985) e após 13 anos (1998) sob três sistemas de preparo de solo, três sistemas de culturas e duas doses de N mineral

Sistema de manejo		N adicionado				NT (1998)			
		N ₀		N ₁₃₉		0-0,175 m		0,175-0,30 m	
Preparo	Cultura	Média	Total	Média	Total	N ₀	N ₁₃₉	N ₀	N ₁₃₉
kg ha ⁻¹ de N									
PC	A/M	-21	-273	69	897	2.200	2.630	1.390	1.680
	E/M	49	637	157	2.041	2.500	3.000	1.640	1.800
	A + E/M + C	102	1326	178	2.314	2.760	3.030	1.660	1.690
PR	A/M	-20	-260	67	871	2.600	2.770	1.790	1.760
	E/M	51	663	157	2.041	2.850	3.090	1.820	1.680
	A + E/M + C	96	1248	165	2.145	2.740	3.140	1.640	1.840
PD	A/M	-16	-208	72	936	2.550	3.030	1.520	1.610
	E/M	38	494	137	1.781	3.000	3.550	1.580	1.630
	A + E/M + C	83	1079	160	2.080	3.270	3.720	1.530	1.820
Média de preparo									
	PC					2.690 b		1.650 b	
	PR					2.860 ab		1.770 a	
	PD					3.130 a		1.620 b	
Média de cultura									
	A/M					2.630 b		1.680 a	
	E/M					2.940 a		1.700 a	
	A + E/M + C					3.110 a		1.700 a	
Média de dose N									
	N ₀					2.720 b		1.630 b	
	N ₁₃₉					3.070 a		1.720 a	
Campo nativo						3.620		1.700	
Inicial (1985) ⁽¹⁾						2.710		1.630	

Médias seguidas de letras iguais, nas colunas, dentro de cada fator, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %. PC = Preparo convencional, PR = Preparo reduzido, PD = Plantio Direto, A = aveia, M = milho, E = ervilhaca, C = caupi, N₀ = zero kg ha⁻¹ N mineral, e N₁₃₉ = 139 kg ha⁻¹ N mineral. ⁽¹⁾ Freitas (1988).

obtidos por Diekow et al. (2002), em experimento com 17 anos de duração neste mesmo solo, em tratamentos com alta adição de N anualmente pelas culturas de guandu (*Cajanus cajan*) e lab-lab (*Dolichos lablab*). Este fenômeno pode ser positivo pelo aumento de N em camadas mais profundas do solo. Por outro lado, o N mineral, se atingir o lençol freático pode ocasionar danos ambientais.

A relação entre o N adicionado e a variação anual (dN/dt) nos estoques de NT do solo, relativa ao estoque inicial de NT na camada de 0-0,175 m (2,64 Mg ha⁻¹), encontra-se na figura 5b. Observam-se altos coeficientes de determinação (R²) entre estas variáveis, indicando que as estimativas do N adicionado são coerentes, visto que a quantificação do estoque de NT do solo é relativamente precisa. Verifica-se que, sem a aplicação de N mineral, as taxas foram positivas, ou seja, ocorreram acúmulos de NT no solo, apenas nos tratamentos PC A + E/M + C, PR E/M, PR A + E/M + C, PD E/M e PD A + E/M + C (Figura 5b). Com a aplicação de N mineral, as taxas foram positivas em todos os tratamentos, com exceção ao PC A/M, indicando que parte do N aplicado como adubo foi retido na matéria orgânica do solo.

Da mesma forma como para o COT, os coeficientes angulares das equações representam quanto do N adicionado foi efetivamente convertido em NT no solo. Os resultados demonstram que aproximadamente 50 % do N adicionado foi retido como NT no solo em PD, em comparação com a retenção de 21 % no solo em PR e de 33 % no solo em PC. Conforme discutido para o COT (Figura 5a), a adição anual de N necessária para manter o NT no solo no nível do início do experimento é de 5, 31 e 94 kg ha⁻¹ ano⁻¹ no PD, PR e PC, respectivamente. O menor valor de retenção do N adicionado no solo em PR revela a necessidade de pesquisa em relação à intensidade dos processos de perdas de N no solo escarificado.

Pelos resultados obtidos ao final de 13 anos do experimento (Figura 5b), a recuperação dos estoques de NT no solo em campo nativo é inviável com o uso de PR e PC. Por outro lado, o estoque de NT do solo pode ser recuperado no sistema PD, salientando-se, entretanto, a importância das espécies leguminosas com alta produção de resíduos vegetais nos sistemas de culturas, e da adubação nitrogenada, que contribui para a manutenção dos estoques de NT e de COT do solo, para a qualidade do solo e do ambiente e para a produtividade do milho.

CONCLUSÕES

1. A inclusão de leguminosas em sistemas de culturas e a adubação nitrogenada contribuíram para a maior adição anual de C e de N ao solo, a

qual foi diretamente relacionada com as alterações dos estoques destes elementos no solo e com a produtividade do milho.

2. A recuperação dos estoques de C orgânico e de N total ocorreu apenas no solo em plantio direto, o que indica que a eliminação do revolvimento do solo é uma prática fundamental, quando se tem por objetivo a recuperação de solos degradados na região subtropical do Sul do Brasil.

3. A partir da relação entre a adição de C pelas culturas e a variação nos estoques deste elemento no solo, ambos em base anual, foram estimados valores aproximados do coeficiente de humificação (k₁) e da taxa anual de perda de matéria orgânica (k₂) no solo; os maiores valores de k₁ e os menores de k₂ ocorreram no solo em PD, o que explica o maior acúmulo de COT no solo, em comparação aos demais sistemas de preparo de solo. O N apresentou comportamento similar ao do C orgânico no solo, com maior retenção e menores perdas no solo em plantio direto.

LITERATURA CITADA

- ADDISCOTT, T.M. Entropy and sustainability. *Eur. J. Soil Sci.*, 46:161-168, 1995.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & CERETTA, C.A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil Till. Res.*, 53:95-104, 2000a.
- 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, 2000c.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L. & FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 54:101-109, 2000b.
- BERGAMASCHI, H. & GUADAGNIN, M.R. *Agroclima da Estação Experimental Agronômica*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1990. 96p.
- BOLINDER, M.A.; ANGERS, D.A.; GIROUX, M. & LAVERDIÈRE, M.R. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). *Plant Soil*, 215:85-91, 1999.
- CERRI, C.C. *Dinâmica da matéria orgânica do solo no agrossistema cana-de-açúcar*. Piracicaba, Universidade de São Paulo, 1986. 197p. (Tese de Livre Docência)
- CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESK, D.V.S. & GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:425-432, 1999.
- DALAL, R.C. & MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. I. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. *Aust. J. Soil Res.*, 24:281-292, 1986.

- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; VEZZANI, F.M. & LOVATO, T. Nitrogênio inorgânico do solo em sistemas de cultura de milho e leguminosas estivais sob plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 25., Rio de Janeiro, 2002. Anais. Rio de Janeiro, 2002. CD-ROM
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, 1999. 412p. il. (EMBRAPA/CNPS-RJ. Documento, 5)
- FELLER, C. & BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79:69-117, 1997.
- FREITAS, V.H. Eficiência de sistemas de preparo do solo e de culturas no fornecimento de nitrogênio para o milho. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988. 148p. (Tese de Mestrado)
- FREITAS, V.H.; ROSSO, A.; MIELNICZUK, J. & BAYER, C. Efeito de métodos de preparo do solo e sistemas de cultura na absorção de nitrogênio e rendimento do milho. *Pesq. Agropec. Gaúcha*, 2:69-77, 1996.
- FREIXO, A.F.; MACHADO, P.L.O.A.; SANTOS, H.P.; SILVA, C.A. & FADIGAS, F.S. Soil organic and fractions of Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 64:221-230, 2002.
- LAL, R.; FOLLET, R.F.; KIMBLE, J. & COLE, C.V. Managing U.S. cropland to sequester carbon in soil. *J. Soil Water Conserv.*, 5:374-381, 1999.
- LOVATO, T. Dinâmica do carbono e do nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 130p. (Tese de Doutorado)
- MILLER, R.M. & JASTROW, J.D. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biol. Biochem.*, 22:579-584, 1990.
- RAMOS, M.G.; VILLATORO, M.A.A.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R. & BODDEY, R.M. Quantification of the contribution of biological nitrogen fixation to tropical green manure crops and the residual benefit to a subsequent maize crop using ¹⁵N-isotopic techniques. *J. Biotechnol.*, 91:105-115, 2001.
- SHAMOOT, S.; MacDONALDS, L. & BARTHOLOMEW, W.V. Rhizodeposition of organic matter debris in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 32:817-820, 1968.
- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:113-117, 1997.
- SIX, J.; ELLIOTT, E.T. & PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1350-1358, 1999.
- SOIL SURVEY STAFF. Keys to soil taxonomy. 8 ed. Washington, 1998. 326 p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2 ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- TEIXEIRA, L.A.J.; TESTA, V.M. & MIELNICZUK, J. Nitrogênio do solo, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de cultura. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:207-214, 1994.
- TESTA, V.M.; TEIXEIRA, L.A.J. & MIELNICZUK, J. Características químicas de um Podzólico Vermelho-Escuro afetadas por sistemas de cultura. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:107-114, 1992.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33:141-163, 1982.
- van BREEMER, N. Soils as biotic construct favouring net primary productivity. *Geoderma*, 57:183-211, 1993.
- VEZZANI, F.M. Qualidade do sistema solo na produção agrícola. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 184p. (Tese de Doutorado)