VARIABILIDADE ESPACIAL DO FLUXO DE CO₂ DO SOLO EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO

Alexandre Fonseca D'Andréa¹, Marx Leandro Naves Silva², Diego Antonio França de Freitas³, Nilton Curi⁴, Carlos Alberto Silva⁴

¹Eng. Agrônomo, Dr., Coordenação de Gestão Ambiental, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil - alexandre.dandrea@ifpb.edu.br
²Eng. Agrônomo, Dr., Depto. de Ciência do Solo, UFLA, Lavras, MG, Brasil - marx@dcs.ufla.br
³Eng. Agrônomo, Doutorando, Depto. de Ciência do Solo, UFLA, Lavras, MG, Brasil - diego_ufla@yahoo.com.br
⁴Eng. Agrônomo, Dr., Depto. de Ciência do Solo, UFLA, Lavras, MG, Brasil - niltcuri@dcs.ufla.br; csilva@dcs.ufla.br

Recebido para publicação: 25/04/2009 - Aceito para publicação: 28/09/2010

Resumo

A matéria orgânica do solo armazena a maior parte do carbono contido nos sistemas terrestres do planeta, sendo a maioria encontrada nos solos com floresta. O objetivo deste trabalho foi quantificar o fluxo de CO_2 do solo e a sua variabilidade espacial em povoamento de *Eucalyptus* sp. Foram avaliados o fluxo de CO_2 do solo, fatores ambientais (evaporação de água, temperatura e umidade do solo), atributos relacionados à fertilidade (pH, soma de bases e alumínio trocável), estrutura (densidade do solo e porosidade total) e matéria orgânica do solo (carbono orgânico total e carbono da biomassa microbiana). Análises de correlação linear simples indicaram que parte da variabilidade espacial do fluxo de CO_2 do solo pode ser explicada pelo efeito conjunto do teor de carbono orgânico do solo, da biomassa da serapilheira e da presença de árvores no terreno, indicativas da participação de fatores bióticos no processo. No entanto, o fluxo de CO_2 do solo e um fenômeno de natureza complexa, não sendo possível identificar um único atributo do solo ou do ambiente que, isoladamente, explique sua variação no espaço.

Palavras-chave: Matéria orgânica; fatores ambientais; fertilidade; carbono; respiração do solo.

Abstract

Soil CO_2 flux spatial variability on eucalyptus manmade forest. The organic matter on soil retains most of carbon contained in the planet terrestrial systems, specially in forest soils. The aim of this work was to quantify soil CO_2 flux and its spatial variability on *Eucalyptus* sp. manmade forest. In order to that, soil CO_2 flux, environmental factors (water evaporation, soil temperature and moisture), fertility attributes (pH, bases sum and exchangeable aluminum), structure (bulk density and total porosity), and soil organic matter (total organic carbon and microbial biomass carbon) were evaluated. Simple linear correlation analyses indicated that part of the spatial variability of soil CO_2 flux can be explained by the associated effect of soil organic carbon amount, litter biomass and presence of trees, indicatives of participation of biotic factors in the process. However, the soil CO_2 flux is a complex phenomenon, been impossible to identify a single soil or environmental attribute, which, individually, could explain its spatial variability.

Keywords: Organic matter; environmental factors; fertility; carbon; linear correlation.

INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo armazena a maior parte do carbono contido nos sistemas terrestres do planeta, com aproximadamente 1.576 pentagramas (Pg, sendo que 1 Pg = 10^{15} g) de carbono, distribuídos em 12,8 bilhões de hectares de solos continentais (EDWARDS, 1975). Desse montante, que representa cerca de duas vezes o carbono presente na atmosfera e três vezes o da biomassa da vegetação, a maioria é encontrada nos solos com florestas, que contribuem com 787 Pg de carbono (aproximadamente 50%) (DIXON *et al.*, 1994). Apesar dessa grande quantidade armazenada, intervenções humanas nos ambientes florestais podem alterar sensivelmente o quadro apresentado, já que estimativas atuais indicam que práticas como atividades de desmatamento de áreas sob vegetação nativa podem desencadear reduções da ordem de 20% a 50% do carbono nos solos tropicais (BROWN; LUGO, 1984).

Compreender os fatores que governam as perdas de carbono do solo na forma de CO_2 tem sido um desafio nos mais diferentes ecossistemas. Apesar da temperatura e da umidade serem consideradas os principais determinantes das emissões de CO_2 do solo, principalmente em se tratando de variações temporais (FANG *et al.*, 1998; XU; QI, 2001; SCOTT-DENTON *et al.*, 2003; SCHWENDENMANN *et al.*, 2003), existem situações em que são outras as variáveis mais estreitamente relacionadas ao processo, como o teor de carbono orgânico do solo, a umidade da serapilheira e a capacidade de troca catiônica (GÄRDENÄS, 2000; LA SCALA JR. *et al.*, 2000). A variabilidade espacial do fluxo de CO_2 do solo tem sido constantemente atribuída à heterogeneidade de fatores como densidade do sistema radicular, biomassa da serapilheira, acidez do solo, porosidade e atividade e quantidade de microrganismos (DUIKER; LAL, 2000; LONGDOZ *et al.*, 2000).

Em região de clima temperado, Russell; Voroney (1998) verificaram variações nos padrões temporais das emissões de CO_2 do solo, de locais mais quentes, isolados e aleatórios (na primavera) para emissões mais uniformes relacionadas a raízes ativas em crescimento e à difusão de CO_2 das camadas mais profundas do solo (no verão). Essas alterações, no entanto, podem ocorrer de maneira diferente nos solos dos trópicos, em função da dissimilaridade das condições climáticas das duas regiões. No Brasil, foi registrada uma variação das médias mensais do fluxo de CO_2 do solo em florestas com mata nativa e eucalipto, com aumento das emissões nos meses mais quentes do ano (de outubro a fevereiro), o que foi atribuído às condições favoráveis à atividade dos microrganismos do solo (LIRA; POGGIANI; GONÇALVES, 1999), sendo que a precipitação pluviométrica também causou interferências no padrão das emissões de CO_2 do solo (LA SCALA JR. *et al.*, 2000).

Recentemente, estudos de variabilidade espacial têm sido conduzidos com maior frequência nas regiões tropicais, principalmente para atributos físicos ou de fertilidade do solo (SCHLINDWEIN; ANGHINONI, 2000; ALVAREZ; GUARÇONI, 2003; CARVALHO *et al.*, 2003). Apesar disso, ainda existem poucas informações disponíveis sobre a continuidade espacial de atributos do solo, especialmente os relacionados a processos bioquímicos (CAMBARDELLA *et al.*, 1994) e menos ainda sobre os padrões de variabilidade das emissões de CO₂ do solo e de seus fatores condicionantes (FANG *et al.*, 1998; LA SCALA JR. *et al.*, 2000; RAYMENT; JARVIS, 2000; D'ANDRÉA *et al.*, 2009; D'ANDRÉA *et al.*, 2010).

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a estrutura da variabilidade espacial de curta escala das emissões de CO_2 de um Latossolo Vermelho Distroférrico típico da região de Lavras, MG, coberto por povoamento de Eucalyptus sp., e identificar atributos do solo ou fatores do ambiente mais estreitamente relacionados ao processo (D'ANDRÉA *et al.*, 2009; D'ANDRÉA *et al.*, 2010), sob a hipótese de que a variação espacial do CO_2 esteja relacionada principalmente aos fatores bióticos do ambiente.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área de estudo

O trabalho foi realizado em um povoamento florestal localizado no *campus* da Universidade Federal de Lavras, MG, num Latossolo Vermelho Distroférrico típico, textura muito argilosa. Foi selecionada área com povoamento misto de eucalipto (Teste de Procedência de *Eucalyptus* sp.), plantado em janeiro de 1975, no espaçamento 3×2 m.

Na área do povoamento foi selecionada, ao acaso, uma área retangular de 15×35 m, na qual foram delimitados 32 pontos dispostos sobre um eixo cartesiano, espaçados numa grade regular pela distância de cinco metros em direções perpendiculares, chamadas convencionalmente de X e Y. Apesar de esse número de pontos estar distante do ideal para a verificação de dependência espacial, sua adoção levou em consideração o aspecto operacional e a viabilidade dos recursos disponíveis para a realização do trabalho. Todas as medições realizadas em campo e as amostragens para determinação em laboratório de atributos químicos, físicos e biológicos do solo foram tomadas seguindo a localização dos pontos da grade.

No povoamento de eucalipto, foi feito um mapeamento das árvores segundo o seu posicionamento em relação à grade regular. Além da localização no terreno, as árvores foram caracterizadas com relação ao seu tamanho, sendo tomadas medidas da circunferência à altura do peito, que foram transformadas, posteriormente, em diâmetro à altura do peito (DAP). Para fins de caracterização, as árvores foram classificadas nas seguintes categorias: com diâmetro pequeno (DAP < 0,2 m), médio (DAP 0,2-0,4 m) e grande (DAP > 0,4 m).

Medição do fluxo de gases do solo

As medições dos fluxos de CO_2 e vapor d'água do solo foram feitas nos dias 5 e 6 de fevereiro de 2004, com leituras iniciadas às 14:00 horas. Foi utilizado um analisador de gás por absorção na faixa do infravermelho, modelo *ADC LCA-4* (*Analytical Development Company Bioscientific Ltd, Hoddesdon, England*), portátil, acoplado a uma campânula cilíndrica de polietileno (modelo *ADC Soil Hood*, do mesmo fabricante) com área superficial de 98,5 cm² e volume de 926 mL, equipada com miniventilador para mistura interna do ar. O analisador por infravermelho foi operado no modo diferencial, com fluxo de ar nas tubulações de entrada e saída da campânula de 240 µmol.s⁻¹, mantido por meio de um sistema de bombeamento presente no interior do equipamento.

Todo o material que estava sobre o solo em cada ponto da grade foi cuidadosamente removido imediatamente antes das medições, e a campânula foi ligeiramente pressionada sobre a superfície do solo, a fim de melhorar o selamento da interface campânula–solo e evitar perdas ou enriquecimento lateral de CO_2 , possibilidade levantada por Reicosky *et al.* (1997). Os fluxos de CO_2 e de vapor d'água do solo foram calculados por meio da diferença entre a concentração dos gases no ar que entra na campânula e dos que dela saem, após ter sido atingido um estado de equilíbrio dinâmico (MOSIER, 1990; FIELD *et al.*, 1992). O intervalo de leitura adotado foi de 3 a 4 minutos decorrido desde a inserção da campânula no solo até a estabilização do valor medido, de acordo com testes preliminares.

Medição da temperatura e umidade do solo

Em cada ponto da grade, a temperatura do solo foi medida com um termômetro de bulbo de mercúrio, posicionado a 12 cm de profundidade, e a umidade média do solo na faixa de 0–12 cm foi determinada com um reflectômetro de domínio no tempo (TDR, modelo *Field Scout TDR 300 Soil Moisture Meter, Spectrum Technologies, IL, USA*). A calibração das leituras do TDR foi feita a partir de dados de umidade gravimétrica (determinada pelo método padrão de estufa) e densidade do solo (BLAKE; HARTGE, 1986), coletados na área. Os resultados foram convertidos em umidade em base volume e, em seguida, submetidos à análise de regressão linear simples com os valores de umidade feitas no campo com o equipamento, com expressão final dos resultados em cm³ 100 cm⁻³ de solo, a partir deste ponto referido como % vol.

Coleta e preparo das amostras de solos

Cerca de três meses antes da medição das emissões de CO_2 do solo foi feita uma coleta do material orgânico à superfície do solo (serapilheira), ao lado de cada ponto da grade, com o uso de um esquadro de madeira com dimensões $0.5 \times 0.5 \times 0.1$ m. Foi considerado "horizonte orgânico" (HO₀) o resíduo orgânico superficial fresco ou em estado parcial de decomposição, composto por folhas e pequenos galhos ainda não incorporados ao solo. O material orgânico localizado abaixo do HO₀ e imediatamente acima do primeiro horizonte mineral do solo foi identificado como "horizonte orgânico d" do solo (HO_d) e amostrado segundo o mesmo procedimento anteriormente descrito.

Na semana seguinte às medições dos fluxos de gases do solo (em fevereiro de 2004), foram coletadas amostras de solo em cada ponto da grade, para a realização de análises químicas e físicas (fração terra fina, < 2 mm). A avaliação da biomassa microbiana foi realizada em amostras passadas em peneira de 4 mm para a retirada de raízes e outros resíduos orgânicos visíveis, como restos de animais e vegetais. Depois de armazenadas por 10 dias em câmara fria a 4 °C, as amostras foram incubadas no escuro, à temperatura ambiente, por uma semana, para estabilização da atividade microbiana, sendo então realizadas as análises de laboratório. Para as análises de porosidade total e densidade do solo, foram coletadas amostras indeformadas em 16 pontos da grade, espaçados pela distância de 5 m na direção Y e 10 m na direção X, com o uso do amostrador de Uhland, em cilindros com dimensões médias de 8,26 cm de altura por 6,96 cm de diâmetro interno. Todas as amostragens foram feitas na faixa de profundidade do 0-10 cm.

Análises de laboratório

Os componentes do complexo sortivo do solo foram determinados de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (1997), e o carbono orgânico total por oxidação a quente com dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal, segundo método modificado de Walkley; Black (1934). A determinação do teor de carbono da biomassa microbiana foi feita pelo método da fumigação-extração (VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987), com uso de K_2SO_4 0,5 mol.L⁻¹ como extrator, oxidação a quente com $K_2Cr_2O_7$ 0,0667 mol.L⁻¹ + H_2SO_4 : H_3PO_4 (2:1) e titulação com (NH₄)₂Fe(SO₄)₂.6H₂O 0,0333 mol.L⁻¹. Foi utilizado o fator 0,26 para conversão do carbono extraído a carbono da biomassa microbiana (FEIGL *et al.*, 1995).

A porosidade total do solo foi determinada a partir da massa de água retida após saturação e de valores de densidade do solo, obtidos em amostras com estrutura indeformada (BLAKE; HARTGE, 1986), sendo expressa em % vol. A biomassa da serapilheira (HO_o e HO_d) foi estimada pelo método gravimétrico de estufa (65 °C por 72 h), com resultados expressos em termos de massa de matéria seca por unidade de área.

Análise estatística

A análise da variabilidade espacial dos atributos estudados foi verificada por meio das ferramentas da geoestatística, utilizando-se o programa GS + Professional Edition Versão 5.0.3 Beta (Gamma Design Software, MI, USA), com geração de semivariogramas, ajuste de modelos teóricos, estimação de dados em pontos não amostrados e construção de mapa de isolinhas.

Apesar de limitações existentes no uso da validação cruzada como ferramenta quantitativa, considerada tendenciosa e otimista, seu emprego é o mais apropriado na situação do presente estudo, dado o número reduzido de pontos amostrais disponíveis (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; VOLTZ; WEBSTER, 1990). A fim de facilitar a apresentação dos resultados e a comparação da estrutura da variabilidade espacial dos diversos atributos avaliados, foram construídos semivariogramas com valores relativizados ao seu patamar, o que foi obtido por meio da divisão dos coeficientes do modelo matemático ajustado e das variâncias em cada classe de distância de separação pelo valor de C+Co (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

A partir dos modelos gerados e dentro dos limites máximos de distância da grade delimitada no campo, foram feitas estimativas dos fluxos de CO₂ do solo por meio de interpolação por krigagem pontual normal, assumindo-se que os valores em pontos não medidos são realizações da mesma função estacionária aleatória (TRANGMAR *et al.*, 1985; VOLTZ; WEBSTER, 1990; SOARES, 2000). Nesse procedimento, foram utilizados 16 pontos vizinhos, ponderados pela distância e pelo grau de autocorrelação definido pelo modelo do semivariograma, respeitando-se o alcance da dependência espacial. Os valores obtidos foram utilizados na construção de um mapa de isolinhas, a representação gráfica da distribuição espacial do atributo em estudo.

Em complemento às análises descritivas dos dados georreferenciados, foi calculado o número mínimo necessário para a obtenção de amostras representativas para cada um dos atributos avaliados nos sistemas florestais, dentro de um determinado limite de tolerância para os desvios em torno da média, com o uso da seguinte expressão (CLINE, 1944):

$N = [(t_{5\%} \times DP)/E]^2$,

em que N: número de amostras; $t_{5\%}$: estatística t de Student ao nível de significância $\alpha = 5\%$ (n = 32 observações, exceto para porosidade total e densidade do solo, em que n = 16); DP: desvio padrão dos dados; E: erro tolerado em torno da média (foram utilizados valores de E para 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de desvio em relação à média).

Adicionalmente, foram conduzidas análises de correlação linear simples entre o fluxo de CO_2 do solo e os demais atributos, a fim de se verificar o seu grau de associação, com os coeficientes de correlação (R) obtidos tendo sido submetidos ao teste t. Os valores do fluxo de CO_2 do solo foram, ainda, submetidos a análise de regressão linear múltipla com acréscimo sequencial de variáveis, em função de atributos relacionados ao ambiente, à fertilidade, à estrutura e à matéria orgânica do solo. Os testes t e F foram utilizados, respectivamente, para a verificação da significância dos parâmetros do modelo multivariado ajustado e do coeficiente de determinação (R^2).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas descritivas para os atributos avaliados no povoamento de eucalipto são apresentadas na tabela 1. Uma elevada heterogeneidade do fluxo de CO_2 do solo tem sido frequentemente encontrada em

trabalhos de campo sobre variabilidade espacial conduzidos em ambientes florestais (LONGDOZ *et al.*, 2000; RAYMENT; JARVIS, 2000), algumas vezes com coeficiente de variação bastante semelhante aos do presente estudo. No entanto, Yim *et al.* (2003) reportaram uma variabilidade menor para o fluxo de CO₂ do solo em 50 pontos localizados numa área de 30×30 m de uma floresta temperada, apesar de os autores terem utilizado um método de avaliação distinto do empregado neste trabalho.

A variabilidade dos atributos no campo influencia aspectos práticos importantes, como o esquema experimental de amostragem e o ponto relevante para a obtenção de estimativas confiáveis das emissões médias de CO_2 do solo em diferentes ecossistemas terrestres. Nesse sentido, considerando diversos níveis de tolerância para os desvios em torno da média, foi calculado o número mínimo de amostras representativas dos atributos em estudo (Tabela 2).

No sentido de verificar o grau de associação linear do fluxo de CO_2 do solo com os demais atributos avaliados, foram efetuadas análises de correlação simples (Tabela 3), sendo que o teor de alumínio trocável foi o atributo mais estreitamente associado às emissões de CO_2 , em termos individuais (R = 0,47, P < 0,01, n = 32). Apesar disso, é pouco provável que esse atributo possa explicar de maneira adequada as variações observadas no fluxo de CO_2 do solo, sendo mais razoável supor que estejam apenas associados sem que haja relação de causa e efeito entre ambos, uma vez que os teores de alumínio variaram entre 1,9 e 2,9 cmol_c dm⁻³ (Tabela 1), relativamente pouco, mas suficiente para caracterizar uma condição de solo sempre muito ácido.

- Tabela 1. Estatísticas descritivas para taxa de emissão de CO₂ do solo (FCO₂), evaporação de água (E), temperatura (T), umidade (U), teor de alumínio trocável (Al), pH, soma de bases (SB), porosidade total (PT), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (CO), carbono da biomassa microbiana (Cmic) e biomassa da serapilheira (HO₀ e HO_d), em área de floresta de eucalipto.
- Table 1. Descriptive statistical for soil CO₂ emission ratio (FCO₂) water evaporation (E), temperature (T), moisture (U), exchangeable aluminum (Al), pH, bases sum (SB), total porosity (PT), bulk density (Ds), organic carbon (CO), microbial biomass carbon (Cmic) and litter biomass (HO_o and HO_d), in eucalyptus forest area.

Estatística	FCO ₂	Е	Т	U	Al	pН	SB	РТ	Ds	СО	Cmic	HOo	HOd
n [†]	32	32	32	32	32	32	32	16	16	32	32	32	32
Mínimo	0,32	11,02	20,0	24,4	1,9	3,9	0,4	44,5	0,9	18,0	0	9,20	15,2
Máximo	2,68	22,03	23,6	36,4	2,9	4,5	0,9	60,3	1,2	26,7	1038	25,60	96,4
Média	0,95	17,67	22,2	28,4	2,4	4,3	0,6	56,3	1,1	22,4	411	17,07	54,1
DP ⁺⁺	0,58	2,69	0,55	2,67	0,24	0,16	0,15	4,02	0,10	2,32	284,1	3,53	18,7
CV ^{†††}	60,4	15,2	2,5	9,4	10,3	3,6	25,4	7,1	9,1	10,4	69,1	20,7	34,6
Assimetria	1,27	-0,87	-1,53	0,99	0,22	-0,63	0,33	-1,55	-0,29	-0,01	0,24	0,15	0,21
Curtose	1,01	0,38	7,54	1,05	-0,80	-0,13	-0,88	2,52	-1,16	-0,45	-0,61	0,13	0,04

Unidades: FCO_2 , $E(g.m^2.h^{-1})$; $T(^{\circ}C)$; U, PT(% vol); Al, $SB(cmol_c.dm^{-3})$; $Ds(kg.dm^{-3})$; $CO(g.kg^{-1})$; $Cmic(\mu g.g^{-1})$; HO_{o} , $HO_{d}(Mg.ha^{-1})$. † número de observações; ††desvio padrão; †††coeficiente de variação (%).

Também foi verificada uma correlação positiva do fluxo de CO_2 com a temperatura do solo, e negativa com a umidade e com a densidade do solo (Tabela 3). Nesse caso, é possível que teores mais elevados de água no solo dificultem a movimentação do CO_2 nos poros (EDWARDS, 1975), embora, nas condições do presente estudo, a umidade não tenha atingido valores considerados limitantes para a aeração do solo. Nessa situação, os efeitos do teor de água sobre as emissões de CO_2 do solo não são muito claros (FANG; MONCRIEFF, 2001).

Diversos estudos apontam relações diretas entre o teor de carbono orgânico total ou da biomassa microbiana e as emissões de gás carbônico do solo. Correlações significativas foram verificadas entre os fluxos de CO₂ de um solo descoberto e o teor de carbono orgânico (LA SCALA JR. *et al.*, 2000) e, em florestas de coníferas, o carbono microbiano foi apontado como um dos fatores mais altamente correlacionados com as emissões de CO₂ do solo (XU; QI, 2001; SCOTT-DENTON *et al.*, 2003). Apesar disso, no presente estudo, entre os atributos relacionados à matéria orgânica do solo, apenas a biomassa da fração menos decomposta da serapilheira de eucalipto (HO₀) apresentou correlação significativa com o fluxo de CO₂ (Tabela 3).

Tabela 2. Número mínimo de amostras para a obtenção de estimativas representativas para atributos avaliados em povoamento de eucalipto, num Latossolo Vermelho Distroférrico típico da região de Lavras, MG, considerando o nível de significância $\alpha = 5\%$ e diversas porcentagens de desvios em torno da média.

Table 2. Minimum number of samples for obtaining representative estimative for evaluated attributes on eucalyptus manmade forest in a typic Dystroferric Red Latosol (Oxisol) from Lavras region, MG, considering the significance level $\alpha = 5\%$ and diverse percentages of deviations around the average.

Atributo			Amostras		
110110400	5%	10%	15%	20%	25%
FCO ₂	620	155	69	39	25
E	39	10	4	2	2
Т	1	1	1	1	1
U	15	4	2	1	1
Al	17	4	2	1	1
рН	2	1	1	1	1
SB	104	26	12	7	4
PT	9	2	1	1	1
Ds	15	4	2	1	1
CO	18	4	2	1	1
Cmic	794	198	88	50	32
HO _o	71	18	8	4	3
HO_d	200	50	22	12	8

 FCO_2 : fluxo de CO_2 do solo; E: taxa de evaporação de água do solo; T: temperatura do solo; U: umidade do solo; Al: teor de alumínio trocável; SB: soma de bases; PT: porosidade total; Ds: densidade do solo; CO: carbono orgânico; Cmic: carbono da biomassa microbiana; HO₀, HO₄: biomassa da fração da serapilheira menos decomposta e mais decomposta, respectivamente.

Tabela 3. Coeficientes de correlação (R) entre o fluxo de CO₂ do solo e atributos do solo e do ambiente, em povoamento de eucalipto, num Latossolo Vermelho Distroférrico típico da região de Lavras, MG.

Table 3. Correlation (R) coefficients between soil CO₂ flux and soil and environment attributes on eucalyptus manmade forest in a typic Dystroferric Red Latosol from Lavras, MG.

21 21		
Atributo	R	
E	$-0,06^{NS}$	
Т	0,31 *	
U	-0,32 *	
Al	0,47 **	
рН	0,14 ^{NS}	
SB	0,15 ^{NS}	
CO	0,27 ^{NS}	
Cmic	-0,12 ^{NS}	
РТ	0,36 ^{NS}	
Ds	-0,43 *	
HO _o	0,37 *	
HO _d	-0,08 ^{NS}	

^{NS}: não significativo; * e **: significativo a 5% e 1% pelo teste t. E: taxa de evaporação de água do solo; T: temperatura do solo; U: umidade do solo; Al: teor de alumínio trocável; SB: soma de bases; CO: carbono orgânico: Cmic: carbono da biomassa microbiana; PT: porosidade total; Ds: densidade do solo; HO_o, HO_d: biomassa da fração da serapilheira menos e mais decomposta, respectivamente. (n = 16 para PT, Ds; n = 32 para os demais atributos).

Buscando-se compreender a influência das plantas no processo de emissão de CO_2 do solo, as árvores do povoamento de eucalipto foram classificadas em função do diâmetro à altura do peito (DAP) e mapeadas segundo sua posição no terreno (Figura 1-a). Àquelas próximas de qualquer ponto de leitura na grade regular traçada no campo em até 1,5 m, foram atribuídos valores que variaram de acordo com seu

diâmetro: *3* para árvores com DAP > 0,4 m, 2 para DAP 0,2–0,4 m e *1* para DAP < 0,2 m. Árvores cuja distância ao ponto de medição mais próximo excedeu 1,5 m receberam o valor *0*, independentemente do DAP (Figura 1-b). Por fim, cada ponto da grade foi relacionado a um número correspondente ao somatório dos valores atribuídos às árvores mais próximas (Figura 1-c). Análises de correlação linear simples efetuadas entre esses números e os fluxos de CO_2 indicaram que as emissões de gás carbônico do solo estão significativamente associadas com a posição e o diâmetro das árvores de eucalipto (R = 0,55, P < 0,01, n = 32). Nesse sentido, os maiores fluxos ocorreram nos locais com presença de mais árvores ou com árvores maiores, e, ao contrário, nas clareiras ou áreas com árvores de diâmetro muito reduzido, houve pequena emissão de CO_2 do solo.



- Figura 1. Distribuição espacial das árvores no povoamento de eucalipto. (a) localização das árvores segundo o diâmetro à altura do peito (DAP); (b) valores atribuídos às árvores em função do DAP e da posição relativa aos pontos da grade regular; (c) valores atribuídos aos pontos da grade regular em função das árvores mais próximas.
- Figure 1. Spatial distribution of trees on eucalyptus manmade forest. (a) placement of trees according to diameter at breast height (DAP); (b) values attributed to trees as a function of DAP and relative position to points of regular grid; (c) values attributed to points of regular grid as a function of neighboring trees.

Comparando-se a posição dos locais de medições na grade do povoamento de eucalipto aos valores de emissão de gás carbônico a eles associados, é possível verificar que os pontos que não possuíam em sua proximidade nenhuma árvore com DAP mínimo de 0,2 m apresentaram um fluxo de

 CO_2 sempre menor do que a média obtida na grade inteira (que foi de 0,95 g.m⁻².h⁻¹, Tabela 1), variando entre 0,37 e 0,86 g.m⁻².h⁻¹, valores considerados baixos.

A fim de se verificar a influência conjunta dos atributos avaliados sobre as emissões de CO_2 do solo, foram conduzidas análises de regressão linear múltipla com acréscimo sequencial de variáveis, utilizando-se fatores relacionados ao ambiente (evaporação de água, temperatura e umidade do solo e presença das árvores), à fertilidade do solo (teor de alumínio, pH e soma de bases), à estrutura (porosidade total e densidade do solo) e à matéria orgânica do solo (teor de carbono orgânico total, carbono da biomassa microbiana e serapilheira) (Tabela 4). No povoamento de eucalipto, os atributos do ambiente explicaram cerca de 39% das variações do fluxo de CO_2 , grande parte (21% do total) por influência do efeito isolado das árvores presentes no terreno (Tabela 5). O mesmo pode ser dito com relação aos teores de alumínio, que contribuíram com a maior parte do ajuste do modelo do fluxo de CO_2 do solo em função de variáveis relacionadas à fertilidade do solo. Enquanto os atributos da estrutura do solo contribuíram pouco para explicar a variabilidade das emissões de CO_2 , a fração menos decomposta da serapilheira (HO_o) foi, nesse sentido, o mais importante atributo relacionado à matéria orgânica do solo.

Tabela 4. Equações obtidas por regressão linear múltipla com acréscimo sequencial de variáveis para fluxo de CO_2 do solo (Y, em g.m⁻².h⁻¹) em função de atributos relacionados ao ambiente, à fertilidade, à estrutura e à matéria orgânica do solo, em povoamento de eucalipto (EUC).

Table 4. Obtained equations by multiple linear regressions with sequential additions of variables for soil CO_2 flux (Y, in g.m⁻².h⁻¹) as a function of attributes related to environmental, soil fertility, structure and organic matter on eucalyptus manmade forest (EUC).

Modelo	Aodelo Equação			
Ambiente	$Y = -3,99 + 0,01 E + 0,25 T - 0,04 U + 0,19^{**} Arv$	0,39	0,01	32
Fertilidade	Y = -3,07 + 0,03 Al + 0,96 pH + 0,62 SB	0,09	NS	32
Estrutura	Y = 2,08 + 0,02 PT - 1,91 Ds	0,19	0,25	16
MOS	$Y = -2,05 + 0,08^{*}CO - 1 \times 10^{-4}Cmic + 0,07^{*}HO_{o} + 2 \times 10^{-3}HO_{d}$	0,24	0,11	32

E: evaporação de água $(g.m^{-2}.h^{-1})$; T: temperatura do solo (°C); U: umidade do solo (% vol); Arv: árvores no povoamento de eucalipto; Al: teor de alumínio trocável (cmol_c.dm⁻³); SB: soma de bases (cmol_c.dm⁻³); PT: porosidade total (% vol); Ds: densidade do solo (kg.dm⁻³); CO: carbono orgânico (g.kg⁻¹): Cmic: carbono da biomassa microbiana (μ g.g⁻¹); HO_o, HO_d: biomassa da fração menos e mais decomposta da serrapilheira (Mg ha⁻¹), respectivamente. MOS: orgânica do solo. * e **: significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste t. [†]NS: não significativo (valor de F < 1).

A biomassa da serrapilheira foi apontada como um bom indicador da quantidade de matéria orgânica fresca em sistemas florestais (LONGDOZ *et al.*, 2000). Por sua vez, a espessura da camada orgânica foi considerada como um dos melhores fatores para predizer a liberação de CO₂ do solo (SCOTT-DENTON *et al.*, 2003). De fato, no presente estudo, quando a serapilheira (HO₀), o teor de carbono orgânico (CO) e as árvores do povoamento de eucalipto (Arv) foram incluídos num único modelo de regressão, a equação obtida apresentou ajuste significativo (FCO₂ = $-1,75 + 0,07^*CO + 0,05^*HO_0 + 0,20^{**}Arv, R^2 = 0,45, P < 0,01$). Isso indica que, dentro dos limites impostos pelas condições existentes neste trabalho, em áreas com teor de carbono orgânico do solo semelhante, o fluxo de CO₂ será maior onde houver maior quantidade de serapilheira depositada na superfície e maior população de árvores, indicando a participação de fatores bióticos no processo. Scott-Denton *et al.* (2003), trabalhando em região de situação climática muito diferente, explicou cerca de 50% das variações do fluxo de CO₂ do solo (percentual próximo aos 45% indicados pelo coeficiente de determinação do modelo acima), em uma floresta subalpina, por meio de um modelo multivariado composto por seis variáveis relacionadas aos compartimentos de carbono do solo, entre as quais a biomassa do sistema radicular e a espessura e a umidade da serapilheira.

A dificuldade encontrada ao se tentar estabelecer relações diretas entre os atributos do solo e os fluxos de CO_2 é um indício da natureza complexa do fenômeno. Neste trabalho, não existiram condições

ambientais limitantes, ao contrário de diversos estudos realizados em regiões temperadas, principalmente sobre variações temporais, nos quais a temperatura ou a umidade foi indicada como o fator mais influente nas emissões de CO₂ do solo (LONGDOZ *et al.*, 2000; RAYMENT; JARVIS, 2000; YIM *et al.*, 2003; SCHWENDENMANN *et al.*, 2003; SCOTT-DENTON *et al.*, 2003). Além disso, os fatores que afetam o fluxo de CO₂ do solo estão, com frequência, fortemente inter-relacionados, covariando com a matéria orgânica e a respiração do sistema radicular das plantas (XU; QI, 2001). Como as emissões de CO₂ refletem diferentes fenômenos no solo (respiração de raízes, atividade de microrganismos e a própria difusão física do CO₂), é bem provável que não haja um único determinante do processo (SCHWENDENMANN *et al.*, 2003).

- Tabela 5. Coeficientes de determinação (\mathbb{R}^2) da regressão linear obtidos com o acréscimo sequencial de variáveis para o fluxo de CO_2 do solo em função de atributos relacionados ao ambiente, à fertilidade, à estrutura e à matéria orgânica do solo (MOS), em povoamento de eucalipto.
- Table 5. Determination (\mathbb{R}^2) coefficients of the linear regression obtained with the sequential addition of variables for the soil CO₂ flux as a function of attributes related to environmental, soil fertility, structure and organic matter (MOS) on eucalyptus manmade forest.

Modelo	Variável	\mathbf{R}^2	Efeito isolado
Ambiente	E	0,00	0,00
	Т	0,10	0,10
	U	0,18	0,08
	Arv	0,39	0,21
		0.22	0.22
Fertilidade	Al	0,22	0,22
	pH	0,27	0,05
	SB	0,27	0,00
Estrutura	РТ	0.13	0.13
Listitutulu	Ds	0,19	0,06
MOS	СО	0,07	0,07
	Cmic	0,08	0,01
	HO _o	0,23	0,15
	HO_d	0,24	0,01

E: evaporação de água; T: temperatura do solo; U: umidade do solo; Arv: árvores no povoamento de eucalipto; Al: teor de alumínio trocável; SB: soma de bases; PT: porosidade total; Ds: densidade do solo; CO: carbono orgânico; Cmic: carbono da biomassa microbiana; HO_0 , HO_d : biomassa da fração menos e mais decomposta da serapilheira, respectivamente.

A estrutura da distribuição espacial das emissões de CO_2 do solo foi comparada com a dos demais atributos por meio de análises geoestatísticas. Para facilitar a comparação entre os diversos atributos avaliados, foram construídos variogramas com valores no eixo das ordenadas relativizados ao patamar determinado pelo modelo matemático ajustado (Co+C).

O povoamento de eucalipto apresentou padrão de variabilidade espacialmente estruturada para o FCO₂, assim como a maior parte dos atributos avaliados nesse ambiente, embora os variogramas para PT e Ds também tenham indicado ausência de dependência espacial (Figuras 2 a 4).

Os semivariogramas foram ajustados, principalmente, a modelos esféricos, encontrados com frequência em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo (CAMBARDELLA *et al.*, 1994; LA SCALA JR. *et al.*, 2000; CARVALHO *et al.*, 2003). Dentre os variogramas com modelo linear, aqueles relativos a PT e Ds mostraram grande dispersão dos pontos em relação à curva ajustada (Figura 2), indicando que as medições realizadas em 16 locais da grade regular delimitada no campo não foram suficientes para uma determinação precisa da estrutura de variabilidade espacial desses atributos.



- Figura 2. Semivariogramas relativizados para fluxo de CO₂ do solo (FCO₂), evaporação de água (E), temperatura (T), umidade (U), porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds), em área com povoamento de eucalipto. Co: efeito pepita; Co+C: patamar; A: alcance; * D, d: maior e menor distância entre pontos amostrados.
- Figure 2. Semivariograms relativelized for soil CO₂ flux (FCO₂), water evaporation (E), temperature (T), moisture (U), total porosity (PT) and bulk density (Ds), in area with eucalyptus settlement. Co: lump effect; Co+C: platform; A: reaches; * D, d: higher and smaller distance between sampling points.

Neste estudo, apenas para T e pH não houve correlação significativa na validação cruzada, sendo o melhor ajuste dos pontos obtido para o fluxo de CO_2 do solo, sugerindo que o modelo matemático escolhido descreve adequadamente a variabilidade espacial desse atributo no campo (Figuras 5 a 7). As variações de pH e soma de bases (SB) foram quase que inteiramente influenciadas pela posição dos pontos no espaço, com forte GDE. No povoamento de eucalipto, para todos os atributos com dependência espacial, predominou o componente da variabilidade espacialmente estruturada, já que a contribuição de Co foi de, no máximo, 22% do total, no caso do teor de alumínio do solo.

O valor do alcance indicado nos semivariogramas define a distância de separação a partir da qual as amostras de um determinado atributo são consideradas independentes, apresentando variação aleatória (TRANGMAR *et al.*, 1985).

No povoamento de eucalipto, a dependência espacial do fluxo de CO_2 foi mais contínua no espaço, ocorrendo até cerca de 20 m (Figura 2). Nesse ecossistema, leituras tomadas em pontos separados por distâncias menores do que esse alcance não devem ser utilizadas para cálculos da taxa média de emissão de CO_2 , por estarem correlacionadas espacialmente. No presente trabalho, na maior parte das vezes, foi verificado um comportamento espacial semelhante para atributos relacionados, com relação à distribuição espacial dos atributos de fertilidade (Al, pH e SB) e daqueles associados à matéria orgânica do solo (CO, Cmic, HO₀ e HO_d) (Figura 3 e 4).



Figura 3. Semivariogramas relativizados para teor de alumínio trocável (Al), pH, soma de bases (SB), carbono orgânico (CO) e carbono da biomassa microbiana (Cmic), em povoamento de eucalipto. Co: efeito pepita; Co+C: patamar; A: alcance.

Figure 3. Semivariograms relativelized for amount of exchangeable aluminum (Al), pH, bases sum (SB), organic carbon (CO) e microbial biomass carbon (Cmic), in eucalyptus manmade forest. Co: lump effect; Co+C: platform; A: reaches.

FLORESTA, Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 407-422, abr./jun. 2011. D'Andréa, A. F.; *et al.*

A partir do modelo ajustado para o semivariograma do fluxo de CO_2 , foi construído um mapa de superfície mostrando a distribuição espacial do atributo na grade delimitada no campo (Figura 8), sendo possível observar uma grande faixa clara na porção central do terreno, relativa a locais de baixa emissão de CO_2 do solo. Nos extremos da área, por outro lado, houve uma tendência de ocorrer um fluxo de CO_2 do solo mais elevado, principalmente em pontos com maior proximidade de árvores com diâmetro grande, conforme indicado na figura 1.



Figura 4. Semivariogramas relativizados para biomassa da serapilheira na fração menos (HO_o) e mais decomposta (HO_d), em povoamento de eucalipto. Co: efeito pepita; Co+C: patamar; A: alcance.

Figure 4. Semivariograms relativelized for litter biomass on lesser (HO_o) and more decomposed (HO_d) fraction in eucalyptus manmade forest. Co: lump effect; Co+C: platform; A: reaches.



- Figura 5. Gráficos de validação cruzada para o fluxo de CO₂ do solo (FCO₂), taxa de evaporação de água (E), temperatura (T) e umidade do solo (U), num Latossolo com povoamento de eucalipto. Curva cheia: regressão linear; a: intercepto; b: coeficiente angular; R: coeficiente de correlação. Curva pontilhada: relação 1:1. ^{NS} e **: não significativo e significativo a 1%, pelo teste t.
- Figure 5. Crossed validation graphs for soil flux (FCO₂), water evaporation ratio (E), temperature (T) and moisture (U), in Latosol (Oxisol) with eucalyptus manmade forest. Full curve: linear regression; a: intercept; b: angular coefficient; R: correlation coefficient. Dotted curve: 1:1 ratio. ^{NS} e **: non-significative and significative at 1% by test t.



- Figura 6. Gráficos de validação cruzada para teor de alumínio trocável (Al), pH e soma de bases (SB), num Latossolo com povoamento de eucalipto. Curva cheia: regressão linear; a: intercepto; b: coeficiente angular; R: coeficiente de correlação. Curva pontilhada: relação 1:1. ^{NS} e *: não significativo e significativo a 5%, pelo teste t.
- Figure 6. Crossed validation graphs for amount of exchangeable aluminum (Al), pH and bases sum (SB), in Latosol (Oxisol) with eucalyptus manmade forest. Full curve: linear regression; a: intercept; b: angular coefficient; R: correlation coefficient. Dotted curve: 1:1 ratio. ^{NS} e **: non-significative and significative at 5% by test t.



FLORESTA, Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 407-422, abr./jun. 2011. D'Andréa, A. F.; *et al.*



- Figura 7. Gráficos de validação cruzada para teor de carbono orgânico total (CO), teor de carbono da biomassa microbiana (Cmic) e biomassa da serapilheira menos decomposta (HO_o) e mais decomposta (HO_d), num Latossolo com povoamento de eucalipto. Curva cheia: regressão linear; a: intercepto; b: coeficiente angular; R: coeficiente de correlação. Curva pontilhada: relação 1:1. * e **: significativo a 5% e 1%, pelo teste t.
- Figure 7. Crossed validation graphs for amount of organic carbon (CO), amount microbial biomass carbon (Cmic) and litter biomass on lesser (HO_o) and more decomposed (HO_d), in Latosol (Oxisol) with eucalyptus manmade forest. Full curve: linear regression; a: intercept; b: angular coefficient; R: correlation coefficient. Dotted curve: 1:1 ratio. * e **: significant at 5% and 1%, by test t.



- Figura 8. Mapa de isolinhas com a distribuição espacial do fluxo de CO₂ do solo (FCO₂) na grade regular delimitada no povoamento de eucalipto, num Latossolo Vermelho Distroférrico típico de Lavras, MG.
- Figure 8. Isolines map with the spatial distribution of soil CO₂ flux (FCO₂) on regular grid delimited on eucalyptus manmade forest in typic Dystroferric Red Latosol (Oxisol) from Lavras, MG.

CONCLUSÕES

As emissões de gás carbônico do solo em povoamento de eucalipto manejado nas condições do presente estudo são um fenômeno de natureza complexa, não sendo possível identificar um único atributo do solo ou do ambiente que, isoladamente, explique sua variação no espaço. No entanto, parte da sua variabilidade pode ser explicada pelo efeito conjunto do teor de carbono orgânico do solo, da biomassa da serapilheira e da presença de árvores no terreno, indicativo da participação de fatores bióticos no processo.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, V. V. H.; GUARÇONI, M. Variabilidade horizontal da fertilidade do solo de uma unidade de amostragem em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 297 - 310, 2003.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.). Methods of soil analysis. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v. 1, p. 363 - 375.

BROWN, S.; LUGO, A. E. Biomass of tropical forests. A new estimate based on forest volumes. **Science**, Washington, v. 223, n. 4642, p. 1290 - 1293, 1984.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501 - 1511, 1994.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade especial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 695 - 703, 2003.

CLINE, M. G. Principles of soil sampling. Soil Science, Baltimore, v. 58, n. 4, p. 275 - 288, 1944.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FREITAS, D. A. F.; ROSCOE, R.; GUIMARÃES, P. T. G. Variações de curto prazo nas emissões de CO_2 do solo em diferentes sistemas de manejo do cafeeiro. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 2314 - 2317, 2009.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; SILVA, C. A. Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO₂ do solo em floresta nativa. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 1, p. 85 - 92, 2010.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, Washington, v. 263, n. 1/2, p. 185 - 190, 1994.

DUIKER, S. W.; LAL, R. Carbon budget study using CO_2 flux measurements from a no till system in central Ohio. Soil and Tillage Research, Wallington, v. 54, n. 1/2, p. 21 - 30, 2000.

EDWARDS, N. T. Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 39, n. 2, p. 361 - 365, 1975.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo.** Brasília: EMBRAPA-SPI; EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, n. 2, p. 135 - 146, 1998.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, p. 155 - 165, 2001.

FEIGL, B. J.; SPARLING, G. P.; ROSS, D. J.; CERRI, C. C. Soil microbial biomass in Amazonian soils: evaluation of methods and estimates of pool sizes. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 27, n. 11, p. 1467 - 1472, 1995.

FIELD, C. B.; BALL, J. T.; BERRY, J. A. Photosynthesis: principles and field techniques. In: PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. (ed.). **Plant physiological ecology**. London: Chapman & Hall, 1992. Cap. 11, p. 209 - 253.

GÄRDENÄS, A. I. Soil respiration fluxes measured along a hydrological gradient in a Norway spruce stand in south Sweden (Skogaby). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 221, n. 2, p. 273 - 280, 2000.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. Applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

LA SCALA JR., N.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459 - 1462, 2000.

LIRA, A. C. S. de; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. de. Respiração do solo sob eucalipto e cerradão. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 56, p. 15 - 28, 1999.

LONGDOZ, B.; YERNAUX, M.; AUBINET, M. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. **Global Change Biology**, Oxford, v. 6, n. 11, p. 907 - 917, 2000.

MOSIER, A. R. Gas flux measurements techniques with special reference to techniques suitable for measurements over large ecologically uniform areas. In: BOUWMAN, A. F. Soils and the greenhouse effect. Wageningen: John Willey & Sons, 1990. Cap. 13, p. 289 - 301.

RAYMENT, M. B.; JARVIS, P. G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 1, p. 35 - 45, 2000.

REICOSKY, D. C.; DUGAS, W. A.; TORBERT, H. A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. **Soil and Tillage Research**, Wallingford, v. 41, n. 1/2, p. 105 - 118, 1997.

RUSSELL, C. A.; VORONEY, R. P. Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest. I. Relationship to environmental variables and estimates of C respired. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 78, n. 2, p. 301 - 310, 1998.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 111 - 128, 2003.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 85 - 91, 2000.

SCOTT-DENTON, L. E.; SPARKS, K. L.; MONSON, R. K. Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high-elevation, subalpine forest. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 35, n. 4, p. 525 - 534, 2003.

SOARES, A. Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente. Lisboa: IST Press, 2000. 206 p.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. In: BRADY, N. C. (ed.). Advances in agronomy. New York: Academic Press, 1985. v. 38, p. 45 - 94, 1985.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology Biochemistry, Oxford, v. 19, n. 6, p. 703 - 707, 1987.

VOLTZ, M.; WEBSTER, R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. **Journal of Soil Science**, London, v. 41, n. 3, p. 473 - 490, 1990.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, n. 1, p. 29 - 38, 1934.

XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, n. 4, p. 667 - 677, 2001.

YIM, M. H.; JOO, S. J.; SHUTOU, K.; NAKANE, K. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: estimation of the number of sampling points required. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 175, n. 1/3, p. 585 - 588, 2003.