

Distribuição espacial da emissão de CO₂ e atributos do solo sob campo nativo na região de Humaitá, Amazonas
Bruno Campos Mantovanelli, Milton Cesar Costa Campos, Leandro Coutinho Alho, Paula Caroline dos Santos Silva, Diogo André Pinheiro Silva, José Maurício da Cunha, Douglas Marcelo Pinheiro Silva, Marcelo Dayron Rodrigues Soares

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA EMISSÃO DE CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO SOB CAMPO NATIVO NA REGIÃO DE HUMAITÁ, AMAZONAS

Spatial distribution of CO₂ emissions and soil properties under native pasture in Humaitá region, Amazonas

Bruno Campos Mantovanelli

brunomantovanelli21@gmail.com

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil

Milton Cesar Costa Campos

mcesarsolos@gmail.com

Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, Amazonas, Brasil

Leandro Coutinho Alho

leandro_alho@yahoo.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Lábrea, Amazonas, Brasil

Paula Caroline dos Santos Silva

paulinh_ac@hotmail.com

Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, Amazonas, Brasil

Diogo André Pinheiro Silva

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

andredioogo@hotmail.com

José Maurício da Cunha

maujmc@gmail.com

Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, Amazonas, Brasil

Douglas Marcelo Pinheiro Silva

dougllamarcelo@gmail.com

Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, Amazonas, Brasil

Marcelo Dayron Rodrigues Soares

marcelo.dayron@gmail.com

Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, Amazonas, Brasil

Artigo recebido em 07/03/2014 e aceito para publicação em 07/06/2016

RESUMO: Atualmente compreender os fatores que influenciam as emissões de CO₂ em ambientes amazônicos vem sendo discutidos com mais intensidade, devido o acelerado aumento nas variações climáticas (temperatura e precipitação) as quais influenciam nas trocas entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera. Diante do

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320160207>

exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição espacial da emissão de CO₂ e atributos do solo sob campo nativo na região de Humaitá, Amazonas. Foi delimitada uma malha amostral de 70 m x 70 m com 64 pontos regularmente espaçados a uma distância de 10 m e georreferenciados. Amostras de solos foram coletadas em cada ponto da malha nas camadas de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m, para determinação dos atributos físicos do solo e do carbono orgânico, totalizando 128 amostras de solo. Nos pontos de cruzamento da malha foram avaliadas a emissão de CO₂, a temperatura e a umidade do solo, utilizando o sistema LI-6400. As emissões de CO₂ na área de campo nativo nas condições do presente estudo são fenômenos de natureza complexa, não sendo possível identificar um único atributo do solo ou do ambiente que explique sua variação no espaço, indicando assim que uma dificuldade ao estabelecer relações entre os atributos do solo e emissão de CO₂ ocorre devido à complexidade do fenômeno.

Palavras-chave: ambientes amazônicos; carbono orgânico; estoque de carbono.

ABSTRACT: Currently understand the factors that influence the emissions of CO₂ in the Amazonian environment has been discussed more intensively, because the rapid increase in climatic variations (temperature and precipitation) which influence the exchanges between terrestrial ecosystems and the atmosphere. Given the above, the objective of this study was to evaluate the spatial distribution of CO₂ emissions and soil properties under native pasture in Humaitá region, Amazonas. A sampling grid of 70 m x 70 m with 64 points regularly spaced at a distance of 10 m and georeferenced was delimited. Soil samples were collected at each grid point in layers of 0.00 to 0.05 m and 0.05-0.10 m for determination of soil physical properties and organic carbon, 128 soil samples. At the crossing points in the morning they were evaluated CO₂, temperature and soil moisture, using the LI-6400 system. CO₂ emissions in native pasture area in the present study conditions are complex nature of phenomena, it is not possible to identify a single soil attribute or the environment to explain the variation in space, thus indicating that a difficulty in establishing relationships between attributes soil and CO₂ emission is due to the complexity of the phenomenon.

Keywords: Amazon environments; organic carbon; carbon storage.

INTRODUÇÃO

A região sul do Amazonas apresenta como característica marcante a ocorrência de campos naturais. Essa vegetação é constituída por várias formações campestres que se alternam com a floresta e distribuem-se em forma de mosaicos ao longo de uma área que se estende até o norte do estado de Rondônia, estimada em 3.418 km². Destes, cerca de 630 km² estão no município de Humaitá, Amazonas, constituindo os chamados “Campos de Puciari-Humaitá” (Braun e Ramos, 1959).

A compreensão dos fatores que influenciam no efluxo de CO₂ em ambientes amazônicos vem sendo discutidos na proporção em que ocorre o acelerado aumento nas variações em parâmetros climáticos (temperatura e precipitação) as quais influenciam nas trocas entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera. Pode-se afirmar que cerca de 76% a 84% do efluxo de CO₂ em ambientes Amazônicos são representados por emissões advindas do solo, sendo este um dos

fatores que representam globalmente uma grande fração para a atmosfera (RAICH et al., 2002; PINTO JÚNIOR et al., 2009). Os solos em ambiente tropicais normalmente apresentam umidade e temperatura elevadas, ofertando assim condições bastante propícias para a produção e evolução de CO₂, pois favorecem a decomposição da matéria orgânica, a respiração das raízes e a respiração microbiana, aumentando o efluxo de CO₂ do solo para a atmosfera (DIAS, 2006).

O efluxo de CO₂ do solo é resultado da interação dos processos de produção do gás no interior do solo e do transporte desse gás para a atmosfera. Portanto, o efluxo de CO₂ (FCO₂) é dependente de uma série de fatores inerentes ao solo, tais como temperatura, umidade (Ryu et al., 2009), teor de carbono orgânico (Kemmitt et al., 2008) e os atributos físicos (densidade e porosidade do solo), principalmente por serem responsáveis pela oxigenação do solo e pelo transporte do gás para a atmosfera (JASSAL et al., 2004).

O estudo da variabilidade espacial por meio

da geoestatística possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem e, assim, permitindo indicar alternativas de uso, além de permitir melhor compreensão da variabilidade dos atributos do solo e sua influência no ambiente (SILVA NETO et al., 2012). Porém, a variabilidade espacial não se restringe apenas aos atributos do solo, ocorrendo também sob o efluxo de CO₂ (D'ANDREA et al., 2010).

Vários estudos de variabilidade têm sido conduzidos no Brasil com registro de uma grande variação das médias mensais do efluxo de CO₂ do solo. Segundo LA SCALA JÚNIOR et al. (2000), em áreas de florestas com mata nativa e eucalipto, foi verificado o aumento dos efluxos de CO₂ nos meses mais quentes do ano (de outubro a fevereiro), sendo atribuído às condições favoráveis à atividade dos microrganismos do solo e a precipitação pluviométrica que causaram interferências nos padrões de efluxo de CO₂ do solo. Além disso, de acordo com ADACHI (2009), a respiração do solo apresenta grandes variações no tempo e no espaço dentro de um ecossistema

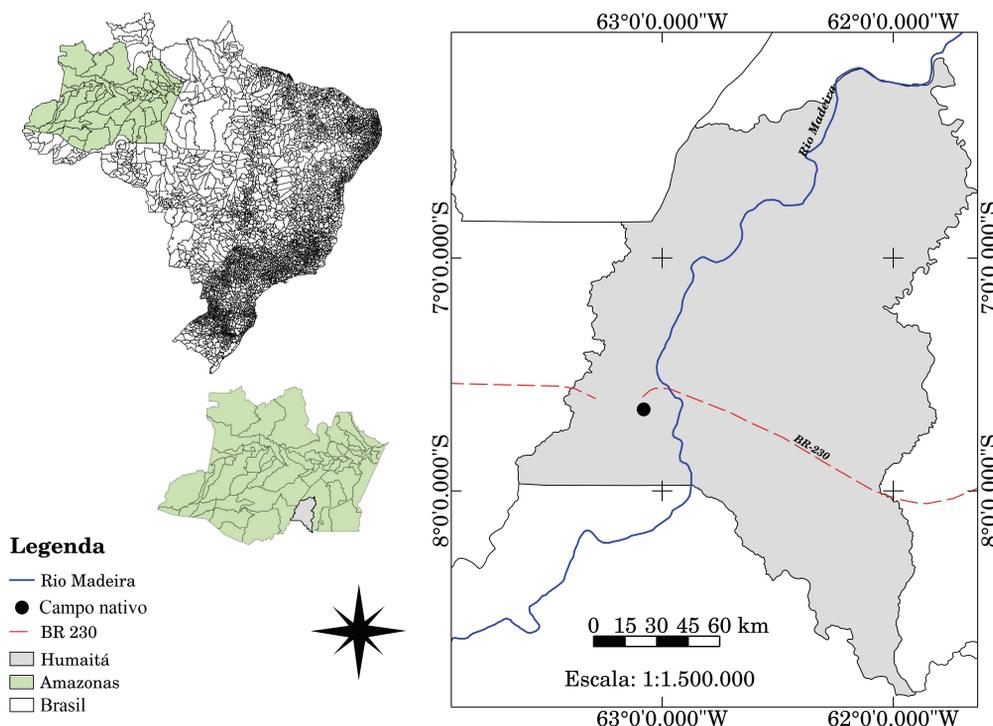
natural e antropofizado.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho identificar a distribuição espacial da emissão de CO₂ e atributos físicos do solo e do carbono orgânico sob campo nativo na região de Humaitá, Amazonas.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo situa-se no município de Humaitá, sul do Estado do Amazonas, as margens da BR 230, sob as coordenadas geográficas de 7° 30' 24" S e 63° 04' 56" W (Figura 1), em área do 54º Batalhão de Infantaria de Selva do Exército, distando 6 km da sede do município de Humaitá-Am. A zona climática da região, segundo a classificação de Köppen, pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração, com precipitação média anual variando entre 2.250 e 2.750 mm e, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho. As médias anuais de temperatura variam em torno de 25 °C e 27 °C e, a umidade relativa do ar varia entre 85% e 90%.

Figura 1 - Mapa de localização da área de campo nativo na região de Humaitá, AM.



Org. dos autores

A região é formada geologicamente a partir de aluviões indiferenciados, que são cronologicamente oriundos do Holoceno. Com relação à vegetação, a área de estudo compreende duas tipologias vegetais bem distintas, sendo que a região dos campos naturais, conhecidos como “Campos de Puciari-Humaitá”, inclui várias formações campestres, onde a vegetação que prevalece é a gramíneo-lenhosa baixa da família Poaceae (BRAUN E RAMOS, 1959). A área de estudo apresenta relevo aproximado ao do tipo “tabuleiro”, com desníveis muito pequenos e, bordos ligeiramente abaulados. Essas terras mais altas constituem os divisores topográficos de água entre os rios da região. O desnível dessas zonas elevadas, relativamente ao vale dos igarapés é da ordem de 15 a 29 metros. O solo da área em estudo foi classificado como Cambissolo Háplico Alítico plíntico (EMBRAPA, 2013).

Foi escolhida uma área de campo alto devido sua maior representatividade na área de estudo (CAMPOS et al., 2012a). Foi demarcada uma malha amostral nas dimensões de 70 x 70 m, com espaçamento regular entre os pontos de 10 m, totalizando 64 pontos amostrais. Os pontos de cruzamento da malha foram georreferenciados com aparelho de GPS modelo GPSMAP 76CSx, marca GARMIN, com precisão de 10 m para a construção do modelo digital de elevação (MDE). Amostras de solos foram coletadas em estrutura preservada nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m, para avaliar os atributos físicos do solo, utilizando-se de anéis volumétricos.

A macroporosidade (MaP) foi determinada a partir da mesa de tensão, utilizando-se amostras de solos em anéis volumétricos saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura do anel. Em adição, as amostras saturadas foram acondicionadas na mesa de tensão e aplicada uma tensão de 1 KPa para retirada de água dos macroporos. A microporosidade (MiP) foi determinada a partir da aplicação de uma tensão de 6 KPa. A porosidade total (PT) foi determinada a partir da soma da macroporosidade e microporosidade. A partir das amostras de solos em anéis volumétricos, os solos foram levados a estufa a 105°C para a determinação da densidade do solo (Ds) (EMBRAPA, 2011). O carbono total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yeomans e Bremner

(1988). A matéria orgânica, por sua vez, foi estimada com base no carbono orgânico. O estoque de carbono (Est C) foi calculado pela expressão (Weldkamp, 1994), (Equação 1).

$$\text{Est. C} = \text{CO} \times \text{Ds} \times e \quad (1)$$

Em que:

Est C = estoque de carbono orgânico (Mg ha⁻¹);

CO = teor de carbono orgânico total (g kg⁻¹);

Ds = densidade do solo (kg dm⁻³); e = espessura da camada (cm).

As medições do fluxo de CO₂, temperatura e umidade foram realizadas durante quatro dias consecutivos, sempre no período da manhã (entre 8:00 e 10:00), obtendo-se, ao final, um valor médio para cada ponto amostral da malha.

O FCO₂ foi registrado utilizando-se de um sistema portátil da companhia LI-COR (LI-8100), Nebraska EUA. Em seu modo de medição, o sistema monitora as mudanças na concentração de CO₂ dentro da câmara, por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho (IRGA). A câmara para solos tem um volume interno de 854,2 cm³, com área de contato de 83,7 cm², e foi colocada sobre colares de PCV previamente inseridos no solo, a uma profundidade de 3 cm em cada um dos pontos amostrais. Uma vez a câmara fechada, o modo de medida levou 1 min 30 s, em cada ponto, para a determinação de FCO₂, em que a concentração de CO₂ dentro da câmara foi determinada a cada 2 s 30.

A temperatura do solo (T_{solo}) foi monitorada por um sensor de temperatura (termistor portátil), parte integrante do sistema do LI-8100, inserido na camada de 0-12 cm de profundidade. A umidade do solo (U_{solo}) também foi medida em todos os pontos, utilizando-se de um sistema portátil TDR-Campbel® (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Australia), que avaliou a umidade disponível do solo (% volume) na camada de 0-12 cm.

Após obtenção dos dados, foram realizadas as análises exploratórias, calculando-se a média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose. O coeficiente de variação (CV) foi calculado com base no critério de Warrick e Nielsen (1980) que

classifica o CV como baixo <12%, médio de 12% a 24% e alto >24%. Para a hipótese de normalidade, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov. Para a caracterização da variabilidade espacial, utilizou-se a análise geoestatística. Sob a teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela equação (2):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

Em que:

(h) é o valor da semivariância para uma distância h;
N(h), o número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;

Z(x_i), o valor do atributo Z na posição x_i;

Z(x_i+h), o valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\gamma(h)$ são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (efeito pepita, C_0 ; variância estrutural, C_1 ; patamar, $C_0 + C_1$; e alcance, a). O efeito pepita é o valor da semivariância para uma distância maior do que zero e menor do que a menor distância de amostragem e representa o componente da variação ao acaso; o patamar é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante; e o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando a distância além da qual as amostras não são correlacionadas (TRANGMAR et al., 1985).

Na determinação da existência ou não da dependência espacial (DE), utilizou-se o exame de semivariogramas, por meio do programa GS+ (ROBERTSON, 1998). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o melhor coeficiente de determinação (R^2). Para analisar o grau da dependência espacial (GDE) dos atributos em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados dependência espacial forte os semivariogramas que têm efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderada quando está entre 25% e 75% e fraca quando for maior que 75%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios para macroporosidade (MaP), microporosidade (MiP), porosidade total (PT), densidade do solo (Ds), estudados na área de campo nativo são apresentados (Tabela 1). Constatou-se que a área de campo natural apresentou Ds de 1,37 e 1,49 Mg m^{-3} , respectivamente, nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m (Tabela 1). Possivelmente o material constituinte do solo, o uso e o tipo de cobertura vegetal influenciam nos valores de Ds. Por outro lado, os elevados valores de Ds em condições naturais podem estar associados a uma compactação pedogenética (adensamento), no qual a translocação de argila pode influenciar neste processo (BICALHO, 2011).

Os valores médios de macroporosidade do solo foram de 0,08 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na camada superficial, reduzindo para 0,06 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ na profundidade subsequente (Tabela 1). Valores de MaP menores que 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, imprimem inadequada aeração para atender a necessidade do sistema radicular e as atividades dos microrganismos do solo (ASSIS e LANÇAS, 2005). A MiP apresentou-se praticamente estável nas duas camadas avaliadas, com variação dos valores médios de 0,36 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para 0,35 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Para a camada avaliada de 0,03 m referente ao FCO_2 , observa-se um valor médio de 5,02 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para a área de campo nativo (Tabela 2). Pinto Júnior et al. (2009), em estudo em floresta de transição Amazônia e cerrado obteve FCO_2 de 5,48 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, sendo este valor ligeiramente superior ao estimado neste trabalho. Esta variação se deve provavelmente a resultados de estudos de uma área de transição entre a zona de floresta e o cerrado. Outra discordância em relação ao trabalho realizado por Pinto Júnior et al. (2009) deve-se provavelmente ao fato de que os autores utilizaram outro equipamento para as medições no caso o (EGM), enquanto, que o presente estudo utilizou-se o LI-COR 8100 para mensurar o FCO_2 do solo, e pode ser ter interferência de fatores como temperatura do ar e do solo e umidade do solo e do ar.

A partir da análise de estatística descritiva, observou-se que média e mediana das variáveis estudadas apresentaram valores próximos, indicando assim simetria nos dados, ocorrendo um distanciamento para a MaP na profundidade de 0,05-0,10 m

e o FCO_2 (Tabelas 1 e 2). Os valores da média são diferentes aos encontrados para mediana, sendo este indicativo de que as medidas de tendência central são dominadas por valores atípicos na distribuição dos dados (CAMBARDELLA et al., 1994).

Os coeficientes de assimetria e curtose indicam se a distribuição dos dados de uma variável está próxima à distribuição normal (coeficientes iguais à zero). Neste trabalho as variáveis apresentaram valores positivos e negativos, mas não apresentaram altos valores para os coeficientes de assimetria e curtose (Tabelas 1 e 2). A partir do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, observou-se também que somente a Ds na profundidade de 0,0-0,05 m e FCO_2 apresentaram normalidade na distribuição, enquanto que as demais variáveis estudadas nas duas profundidades amostradas não apresentaram normalidade. A normalidade dos dados não é uma exigência da geoes-

tatística, ainda que seja conveniente que a distribuição de frequências não apresente caudas muito alongadas, com coeficiente de assimetria deve ser próximo a zero e que os semivariogramas apresentem patamares bem definidos, de forma a não comprometer as análises (CAMBARDELLA et al., 1994).

Segundo o critério de classificação de Warrick e Nielsen (1980), para o coeficiente de variação (CV) observou-se que as variáveis analisadas variaram de baixa a alta variações para os dados obtidos. Os atributos MiP, PT e Ds, além de CO e Est.C, Tsolo e Usolo (Tabela 1 e 2) foram classificados com baixas variações em sua distribuição, enquanto que a MaP (Tabela 1) apresentou alta variações dos dados em todas as profundidades, corroborando assim com trabalho realizado por Aquino et al. (2014), em estudos dos atributos físicos do solo em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos físicos do solo, carbono orgânico e estoque de carbono nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m, em área de campo nativo na região de Humaitá-AM.

Estatística Descritiva	MaP	MiP	PT	Ds	CO	Est.C
	-----m ³ m ⁻³ -----			g cm ³	g kg ⁻¹	Mg ha ⁻¹
	----- 0,00 – 0,05 m -----					
Média	0,08	0,36	0,44	1,37	29,65	20,28
Mediana	0,08	0,36	0,44	1,37	29,68	20,17
¹ DP	3,73	2,27	3,20	0,08	2,00	1,39
² CV (%)	45,60	6,24	7,19	5,64	6,73	6,84
Assimetria	0,22	- 0,10	0,11	- 0,12	- 0,11	0,03
Curtose	- 0,85	- 0,43	- 0,23	- 0,87	0,92	0,13
³ d	0,07 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,05*	0,07 ^{ns}	0,07 ^{ns}
	----- 0,05 – 0,10 m -----					
Média	0,05	0,35	0,40	1,49	26,51	19,78
Mediana	0,05	0,35	0,40	1,49	26,65	19,35
¹ DP	2,85	2,22	3,06	0,07	2,04	1,85
² CV (%)	49,70	6,34	7,52	5,07	7,69	9,35
Assimetria	1,21	- 0,15	-0,35	- 0,21	0,06	0,48
Curtose	1,19	0,21	1,40	- 0,30	- 0,71	- 0,28
³ d	0,16 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,11 ^{ns}

Org. dos autores

Macroporosidade do solo (MaP); Microporosidade do solo (MiP); Porosidade Total (PT); Carbono Orgânico (CO); Estoque de carbono (Est.C); ⁽¹⁾DP = Desvio padrão; ⁽²⁾CV = Coeficiente de variação (%);

⁽³⁾d = teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov; * significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

Tabela 2. Estatística descritiva para as variáveis de fluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo em área de campo nativo na região de Humaitá- AM.

Estatística Descritiva	FCO ₂	Tsolo	Usolo
	μmol m ⁻² s ⁻¹	C°	%
Média	5,02	30,6	19,8
Mediana	4,95	30,6	20,0
DP ¹	0,83	0,48	1,49
C.V. ²	16,53	1,59	7,56
Curtose	-0,42	1,05	1,21
Assimetria	0,36	0,90	-0,78
d ³	0,05*	0,09 ^{ns}	0,06 ^{ns}

Org. dos autores

Fluxo de CO₂ (FCO₂), Temperatura do solo (Tsolo), Umidade do solo (Usolo), ¹DP = Desvio padrão; ²CV = Coeficiente de variação; ³d = Teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade.

A predominância de baixas variações dos dados, evidencia a baixa heterogeneidade das variáveis na área de campo nativo (Tabelas 1 e 2), com exceção, a macroporosidade que apresentou CV alto, estando em concordância com os resultados obtidos por Schafrath et al. (2008), em estudos de áreas cultivadas sob sistema de plantio direto, em que afirmaram que a medida estatística CV possibilita comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes, porém não permite analisar a variabilidade

espacial dos atributos do solo nem seu padrão espacial.

Apenas a PT e Ds na profundidade de 0,05-0,10 m não apresentaram estrutura de dependência espacial (Tabela 3 e 4), neste caso, encontram-se com distribuição aleatória (efeito pepita puro) para distâncias maiores que a menor distância de amostragem, que foi de 10 m, distribuindo-se de forma independente no espaço, indicando que a distância de amostragem não foi capaz de exibir toda a variância dos dados (CARVALHO et al. 2011).

Tabela 3. Modelos e parâmetros dos semivariogramas dos atributos físicos, carbono orgânico e estoque de carbono nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m em área de campo nativo na região de Humaitá, AM.

Parâmetros	MaP	MiP	PT	Ds	CO	Est.C
----- 0,00 – 0,05 m -----						
Modelo	Esf.	Esf.	Esf.	Exp.	Esf.	Exp.
C ₀	2,7	0,53	0,20	0,0009	1,62	0,20
C ₀ +C ₁	12,4	2,96	6,87	0,0054	3,43	1,49
a (m)	20	20	15	22	46	30
R ²	0,97	0,97	0,96	0,97	0,98	0,92
GDE %	21,8	17,9	2,9	16,7	47	13
VC	0,73	0,66	0,69	0,60	0,78	0,67
----- 0,05 – 0,10 m -----						
Modelo	Esf.	Esf.	Lin.	Lin.	Esf.	Exp.
C ₀	0,91	0,8	-	-	2,17	0,16
C ₀ +C ₁	4,7	4,7	-	-	4,54	1,56
a (m)	20	26	-	-	46	26
R ²	0,89	0,83	-	-	0,91	0,91
GDE %	19,4	17,0	EPP	EPP	48	10
VC	0,78	0,77	-	-	0,99	0,79

Org. dos autores

Macroporosidade do solo (MaP); Microporosidade do solo (MiP); Porosidade Total (PT); Carbono orgânico (CO); Estoque de carbono (Est. C); C_0 : Efeito Pepita; C_0+C_1 : Patamar; a (m): Alcance (metros); R^2 : Coeficiente de determinação; Esf.: esférico; Exp.: exponencial.

Os dados dos atributos estudados foram submetidos à aplicação de semivariograma, com a finalidade de avaliar sua dependência espacial (Tabelas 03 e 04). O modelo de semivariograma esférico foi o que predominou na área de estudo juntamente com o modelo exponencial, sendo que este último ajustou-se apenas as variáveis de Ds na profundidade de 0,00-0,05 m, Est.C nas duas profundidade avaliadas e a Usolo, estando assim em concordância com Neves Neto et al. (2013), indicando tais modelos são os mais comuns aos atributos físicos do solo. Todas as modelagens realizadas apresentaram um valor de R^2 superior a 0,90 e validação cruzada com valores mínimo de 0,63 e máximo 0,99.

As variáveis estudadas apresentaram grau de dependência de dependência espacial (GDE) entre forte e moderado (Tabelas 3 e 4). Assim, sobre esta perspectiva, pode-se afirmar que a distância adotada da separação das amostras contribuiu para os baixos percentuais de GDE da área de campo natural. A forte dependência espacial das características do solo, são atribuídas aos fatores intrínsecos, tais como material de origem, clima e relevo que interfere nos processos físicos e químicos e a atividade biológica (CAMBARDELLA et al. 1994).

O alcance é uma medida importante no planejamento e na avaliação experimental, auxiliando na definição de procedimento de amostragem (MCBRATNEY e WEBSTER 1986). Os menores valores de alcance foram observados para o PT na profundidade de 0,00-0,05 m com intervalo de 15 m, indicando assim que esta variável apresenta distribuição dos valores de dependência espacial menos prolongada ao longo da área de estudo (Tabelas 3 e 4). Os índices de alcance de dependência espacial para as variáveis analisadas variaram de 15 m a 47 m estes valores podem ser atribuídos às constantes variações nas formas do relevo das áreas dos campos naturais de acordo com Campos et al. (2012b), com mudanças repentinas de formas côncavas e convexas ao longo da paisagem.

Por outro lado, os maiores valores de alcance foram observados para a variável CO (47 m e 46 m), respectivamente, nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m (Tabelas 3 e 4). Os valores de alcance podem influenciar na qualidade das estimativas, uma vez que ele determina o número de valores usados na interpolação, utilizando valores de alcances maiores, tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representem melhor a realidade (CORÁ et al. 2004).

Tabela 4. Modelos e parâmetros dos semivariogramas para as variáveis de efluxo de CO_2 , temperatura e umidade do solo em uma área de campo nativo na região de Humaitá - AM.

Parâmetros	FCO_2	Tsolo	Usolo
Modelo	Esf.	Esf.	Exp.
C_0	0,05	0,005	0,085
C_0+C_1	0,68	0,065	0,906
a (m)	25	21	36
R^2	0,99	0,94	0,95
GDE %	7	7	9
VC	0,43	0,99	0,79

Org. dos autores

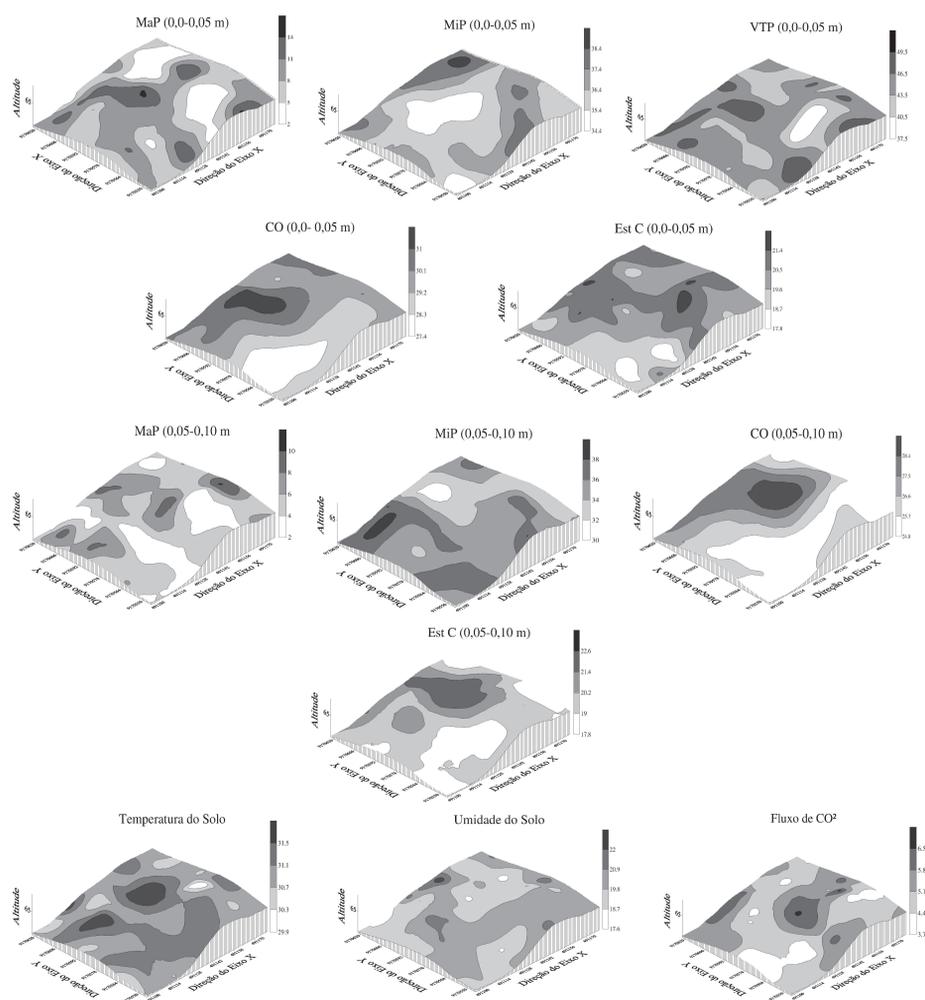
Fluxo de CO_2 (FCO_2); Temperatura do solo (Tsolo); Umidade do solo (Usolo); C_0 : Efeito Pepita; C_0+C_1 : Patamar; a: Alcance (m); R^2 : Coeficiente de determinação; Esf.: esférico; Exp.: exponencial.

A dificuldade encontrada ao se tentar estabelecer relações diretas entre os atributos do solo e os fluxos de CO_2 é um indicio da natureza complexa deste fenômeno, sendo que as análises devem ser realizadas por períodos mais longos. Observando os mapas gerados após a interpolação dos dados pelas técnicas de krigagem, pode-se fazer uma melhor inferência a partir dos dados obtidos, e assim compreender melhor a relação entre atributos físicos do solo e a emissão de CO_2 (Figura 2).

Com o aumento da profundidade e consequente decréscimo do volume de macroporos de $0,08 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, é provável que a microporosidade para camadas mais profundas exerça papéis relevantes

tanto para manutenção da umidade do solo como para a difusão do efluxo de CO_2 nas áreas de campos naturais. Quando se considera o valor de efluxo de CO_2 , nota-se que na estrutura espacial da área em estudo, houve uma possível relação espacial com os atributos CO e Est.C (Figura 2). Essas relações são verificadas nos mapas de krigagem, nas áreas que ocorrem maior incidência desses atributos. Observa-se maior efluxo de CO_2 . A partir dos mapas de krigagem de temperatura e umidade do solo, verifica-se que na região central, em que as temperaturas são mais elevadas é coincidente com a região de maior efluxo CO_2 , evidenciando uma possível correlação destes atributos.

Figura 2. Mapas de krigagem das variáveis macroporosidade, microporosidade, volume total de poros; carbono orgânico total, estoque de carbono, temperatura do solo, umidade do solo e fluxo de CO_2 em área de campo nativo na região de Humaitá, Amazonas.



Org. dos autores

Altos valores de macroporosidade do solo, segundo Davidson et al. (2000) facilita a difusão do CO₂ do solo, esse comportamento pode ser observado por meio dos mapas de efluxo de CO₂ e macroporosidade na profundidade de 0,00-0,05 m, em que houve regiões coincidentes de maior fluxo de CO₂ e maior volume de macroporosidade. Por outro lado, a umidade distribuiu-se mais uniformemente na área de estudo. Em concordância com a temperatura, estes resultados corroboram com os encontrados por Panoso et al. (2008), que verificaram maior temperatura e menor umidade nas regiões de maior emissão de CO₂. Apesar de o efluxo de CO₂ do solo ser uma variável dependente da temperatura e da umidade do solo quanto a sua variabilidade temporal, vários autores afirmam que a contribuição desses fatores não é tão grande quando se analisa a variabilidade espacial de tal emissão (TEDESCHI et al., 2006).

CONCLUSÕES

O efluxo de CO₂ na área de campo nativo por ser de natureza complexa não foi possível identificar um único atributo do solo ou do ambiente que explique sua variação no espaço, indicando assim que sejam realizados mais estudos para a melhor quantificação deste fenômeno em áreas de campo nativo, a fim de se melhor compreender as variações em um espaço amostral maior.

Os modelos de semivariogramas esférico e exponencial ajustados aos atributos do solo são justificados pelos baixos valores de CV, indicando assim a baixa heterogeneidade destas variáveis na área de estudo.

A confecção dos mapas de krigagem, para cada atributo, permitiu visualizar a sua distribuição espacial na área, fato que não ocorre quando se utiliza somente análise da estatística clássica, destacando assim a importância das ferramentas geoestatísticas nas predições das variações de variáveis no ambiente de estudo.

REFERÊNCIAS

ADACHI, M. Spatial and temporal variation in soil respiration in a seasonally dry tropical forest, Thailand. *Journal of Tropical Ecology*, pp.531-539, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S026646740999006X>

AQUINO, R. E.; et al. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, pp.397-406, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000200004>

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, pp.515-522, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000400004>

BICALHO, I. M. Estudo da densidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo. *Enciclopédia Biosfera*. pp.1-9, 2011.

BRAUN, E. H. G.; RAMOS, J. R. A. Estudo agroecológico dos campos Puciari-Humaitá (Estado do Amazonas e Território Federal de Rondônia). *Revista Brasileira de Geografia*, pp.443-497, 1959.

CAMBARDELLA, C. A.; et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. *Soil Science Society American Journal*, pp.1501-1511, 1994. DOI: [10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x](http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x)

CAMPOS, M. C. C.; et al. Toposequência de solos na transição campos naturais-floresta na região de Humaitá, Amazonas. *Acta Amazônica*, pp.387-398, 2012a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672012000300001>

CAMPOS, M. C. C.; et al. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. *Revista Agro@ambiente On-line*, pp.09-16, 2012b. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v6i1.689>

CARVALHO, L. A.; et al. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. *Agriambi*, pp.940-949, 2011.

- CORÁ, J. E.; et al. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, pp.1013-1021, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000600010>
- COSTA, F. S.; et al. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. *Ciência Rural*, pp.693-700, 2006.
- D'ANDRÉA, A. F.; et al. Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO₂ do solo em floresta nativa. *Pesquisa Florestal Brasileira*, pp.85-92, 2010. DOI: 10.4336/2010.pfb.30.62.85
- DAVIDSON, E. A.; et al. Effects of soil water content on soil respiration in forest and cattle pasture of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, pp.53-69, 2000. DOI: 10.1023/A:1006204113917
- DIAS, M. A. F. S. Meteorologia, desmatamento e queimadas na Amazônia: uma síntese de resultados do LBA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, pp.190-199, 2006.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, 2011.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. 2013. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3.ed. revisada e ampliada. Brasília. 2013.
- JANSSENS, I. A.; et al. Assessing forest soil CO₂ efflux: situ comparison of four techniques. *Tree Physiology*, pp.23-32, 2000. DOI: 10.1093/treephys/20.1.23
- JASSAL, R. S.; et al. A Model of the production and transport of CO₂ in soil: predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor. *Agricultural and Forest Meteorology*, pp.219-236, 2004. DOI: 10.1016/j.agrformet.2004.01.013
- KEMMITT, S. J.; et al. Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass – a new perspective. *Soil Biology & Biochemistry*, pp.61-73, 2008. DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.06.021
- LA SCALA JÚNIOR, N.; et al. Shortterm temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biology and Biochemistry*, pp.1459-1462, 2000. DOI: 10.1016/S0038-0717(00)00051-1
- MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, pp.617-639, 1986. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1986.tb00392.x
- NEVES NETO, D. N.; et al. Análise espacial de atributos do solo e cobertura vegetal em diferentes condições de pastagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, pp.995-1004, 2013.
- PANOSSO, A. R.; et al. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em dois sistemas de manejo. *Revista de Engenharia Agrícola*, pp.227-236, 2008.
- PINTO JÚNIOR, O. B.; et al. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. *Acta Amazônica*, pp.813-822, 2009.
- RAICH, J. W.; POTTER, C. S.; BHAGAWATI, D. Interannual variability in global soil respiration. *Global Change Biology*, pp.800-812, 2002.
- ROBERTSON, G. P. *GS+ Geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide*. Plainwell, Gamma Design Software. 1998
- RYU, S.; et al. Prescribed burning and mechanical thinning effects on belowground conditions and soil respiration in a mixedconifer forest, California. *Forest Ecology and Management*, pp.1324-1332, 2009. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.11.033
- SCHAFFRATH, V. R.; et al. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, pp.1369-1377, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000400001

SILVA NETO, S. P.; et al. Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de capim-marandu. *Bioscience Journal*, pp.41-53, 2012.

TEDESCHI, V.; et al. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. *Global Change Biology*, pp.110-121, 2006. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.01081.x

TRANGMAR, B. B; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances Agronomy*, pp.45-93, 1985.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). *Applications of soil physics*. pp.319-344, 1980.

WELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, pp.175-180, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communication Soil Science Plant*, 19:1467-1476, 1988. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00103628809368027>