

Artigos

Variabilidade espacial da biomassa e atividade microbiana do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta

Spatial variability of biomass and soil microbial activity under crop-livestock-forest integration system

Paulino Taveira de Souza¹, Tatiane Carla Silva¹, Maria Júlia Betiolo Troleis¹,
Karla Nascimento Sena¹, Anne Caroline Rocha Silva¹,
Talles Eduardo Borges dos Santos¹, Rafael Montanari¹

¹Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, SP, Brasil

¹Universidade Estadual de Goiás, Ipameri, GO, Brasil

RESUMO

A qualidade do solo refere-se à avaliação das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e tem sido um assunto explorado dentro das linhas de pesquisas agronômicas em decorrência de ações antrópicas que, muitas vezes, causam degradação. Objetivou-se pesquisar, entre os atributos físicos e biológicos estudados, aqueles que melhor expliquem, linear e espacialmente, a variabilidade do solo cultivado com soja na estação chuvosa e em pousio na estação seca no sistema agrossilvipastoril. O trabalho foi conduzido no ano agrícola 2015/2016, em Ipameri, Goiás. Analisaram-se as distribuições espaciais e as correlações entre alguns atributos indicadores da qualidade do solo: carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração microbiana do solo (C-CO₂), quociente metabólico (qCO₂) e umidade do solo (UG), na profundidade de 0,00-0,10 m, nos períodos de chuva e seca. Instalou-se no local, uma malha geoestatística, onde foram coletados 52 pontos. Foi realizada a análise descritiva dos dados, a fim de obter correlações lineares, simples e múltiplas, entre os atributos. Os semivariogramas foram modelados a fim de obter as respectivas krigagens e validações cruzadas. Estabeleceram-se as co-krigagens de interesse. Os atributos microbiológicos do solo foram bons indicadores de zonas de manejo específico, apresentando maior dependência espacial no período chuvoso. O qCO₂ apresentou relação direta com C-CO₂ no período chuvoso, enquanto CBM apresentou relação inversamente proporcional tanto no período chuvoso, como no seco. O qCO₂ foi o atributo que melhor representou, linear e espacialmente, a variabilidade do solo sob o sistema ILPF, refletindo as zonas de maior eficiência do uso do substrato pelos organismos do solo.

Palavras-chave: Geoestatística; Qualidade do solo; Carbono da biomassa microbiana; Microrganismos do solo

ABSTRACT

Soil quality refers to the assessment of the chemical, physical and biological properties of the soil and has been a subject explored within the lines of agronomic research because of anthropic actions that often cause degradation. The objective was to research, among the studied physical and biological attributes, those that best explain, linearly and spatially, the variability of the soil cultivated with soybeans in the rainy season and fallow in the dry season in the agrosilvopastoral system. The work was carried out in the 2015/2016 agricultural year, in Ipameri, Goiás. The spatial distributions and correlations between some soil quality indicator attributes were analyzed: microbial biomass carbon (CBM), soil microbial respiration ($C-CO_2$), metabolic quotient (qCO_2) and soil moisture (UG), at a depth of 0.00-0.10 m, during periods of rain and drought. A geostatistical grid was installed, where 52 points were collected. Descriptive analysis of the data was carried out to obtain linear, simple and multiple correlations between the attributes. The semivariograms were modeled to obtain the respective krigings and cross-validations. The co-krigages of interest were established. The microbiological attributes of the soil were good indicators of specific management zones, showing greater spatial dependence in the rainy season. qCO_2 was directly related to $C-CO_2$ in the rainy season, while CBM was inversely proportional in both rainy and dry periods. The qCO_2 was the attribute that best represented, linearly and spatially, the variability of the soil under the ILPF system, reflecting the zones of greatest efficiency in the use of the substrate by soil organisms.

Keywords: Geoestatistics; Soil quality; Microbial biomass carbon; Soil microorganisms

1 INTRODUÇÃO

O solo sob cobertura vegetal natural, quando convertido em áreas agricultáveis, passa por mudanças drásticas, as quais podem interferir em sua qualidade. Esta é facilmente influenciada por sistemas de manejo, de modo que o uso inadequado do solo afeta negativamente os processos ecológicos (VINHAL-FREITAS *et al.* 2017). Nesse contexto, o sistema integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) favorece a qualidade do solo, pois a manutenção de resíduos vegetais é constante, possibilitando melhorias nas condições físico-químicas e biológicas, incorporação de matéria orgânica, além de aumentar a ciclagem e eficiência de utilização dos nutrientes (ALVARENGA *et al.* 2010).

A qualidade natural do solo depende da dinâmica da matéria orgânica e da ciclagem de nutrientes, ambos processos catalisados por microrganismos (ALCANTARA NETO, 2011). Estes são considerados a parte viva da matéria orgânica, responsáveis pela disponibilidade e qualidade dos nutrientes, os quais desempenham função chave em diversos processos importantes do solo como decomposição, mineralização e

ciclagem, além de representar um importante reservatório de nutrientes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), sendo a camada superficial do solo a área de maior atividade da biomassa microbiana devido à proximidade e à disponibilidade do substrato (resíduos vegetais) (SOUZA *et al.* 2006).

Os principais parâmetros microbiológicos utilizados como indicadores da qualidade do solo incluem a respiração microbiana do solo ($C-CO_2$), o carbono da biomassa microbiana (CBM) e o quociente metabólico (qCO_2), utilizados como indicadores da qualidade do solo (VINHAL-FREITAS *et al.* 2017; MAHARJAN *et al.* 2017).

A biomassa microbiana reflete estresses gerados no sistema solo que afetam a densidade, a diversidade e a atividade das populações microbianas do solo (VINHAL-FREITAS *et al.* 2017; MAHARJAN *et al.* 2017), de modo que o desenvolvimento microbiano é estimulado pela redução na acidez, aumento no carbono orgânico (deposição de material vegetal) e teor de umidade do solo (GUANGMING *et al.* 2017).

A respiração microbiana do solo é um dos mais antigos parâmetros para quantificar a atividade microbiana, uma vez que representa a oxidação da matéria orgânica por organismos aeróbios do solo, que utilizam O_2 comoceptor final de elétrons até CO_2 (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Em associação com a respiração microbiana, podemos obter o qCO_2 pela razão entre a respiração microbiana por unidade de carbono da biomassa microbiana do solo e tempo, sendo utilizado para verificar a eficiência do uso do substrato pelos organismos do solo (ANDERSON; DOMSCH, 1993). Como existe uma relação inversa entre o CBM e o qCO_2 , maiores valores de CBM ocorrem na presença de elevados teores de carbono, reduzindo a atividade metabólica (INSAM, 1991).

Os atributos do solo desempenham importante papel no desenvolvimento das plantas; assim, a variabilidade espacial dos seus valores deve ser conhecida com o intuito de reduzir os vieses de amostragem e de manejo, pois o solo apresenta grande variabilidade, vertical e/ou horizontal (GAZOLA *et al.* 2017). Manejos conservacionistas, como a integração lavoura-pecuária-floresta, criam diferentes condições ambientais

daquelas encontradas no preparo convencional (resultante dos efeitos dos resíduos vegetais superficiais e da reduzida movimentação do solo). Para se realizar recomendações de práticas de manejo, torna-se imprescindível o mapeamento desses atributos (CORRÊA *et al.* 2014).

A estatística descritiva aborda a variação das características do solo dentro das unidades amostrais, de modo que estas não se correlacionam, afirmando, assim, que a média das amostras é o melhor estimador das características de solo, na unidade amostral. Incrementos tecnológicos na agropecuária demonstram a relevância em mensurar as variações espacial e temporal em propriedades que almejem o aumento de produtividade das culturas, com o intuito de otimizar o aproveitamento de recursos e diminuir custos, criando as zonas específicas de manejo, assim, faz-se o uso da geoestatística (LIMA *et al.* 2017).

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou pesquisar, entre os atributos microbiológicos e físico estudados, aqueles que melhor representem, linear e espacialmente, a variabilidade do solo sob o sistema ILPF no período de chuva e seca.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na fazenda experimental da Universidade Estadual de Goiás, Campus Ipameri, geograficamente localizada a 17°43'07" de latitude sul e longitude oeste de 48°08'42", altitude média de 781 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é tropical semiúmido (Aw), constando temperatura média de 21,9°C, umidade relativa do ar entre 58% a 81% e, aproximadamente, 1.447 mm de precipitação anual, com uma maior concentração de chuvas nos meses de outubro a março. O solo da área onde foram feitas as amostragens é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico inserido no bioma cerrado.

A área de estudo possui renques do híbrido de *Eucalyptus grandis* "GG100" dispostos em fileiras duplas (3 m x 2 m x 17m), com 65 meses de idade, na qual foram escolhidos dois renques com a dimensão de 21 x 90 m em uma malha amostral com

grade regular composta por células de 3 x 7,5 m, totalizando 52 pontos de amostragem na camada de 0,00-0,10 m, sendo todos os pontos georreferenciados.

Na estação chuvosa, a soja foi semeada, mecanicamente, no dia 21 de novembro de 2015. Utilizou-se a cultivar Monsoy 7739 IPRO, ciclo médio, com espaçamento de 0,40 m na entrelinha, e densidade de 12 plantas por metro linear. As sementes receberam tratamento com fungicidas, na dose de 100 ml 100 kg⁻¹, e o inoculante, na dose 1g kg⁻¹, de semente. A adubação química básica realizada no sulco de semeadura foi calculada de acordo com as características químicas do solo e levando em consideração as recomendações de Alvarez *et al.* (1999), sendo constituída do formulado NPK 02-28-18, na dose de 300 kg ha⁻¹. Para o controle de doenças, foi utilizado 0,3 L ha⁻¹ de Azoxistrobina + Ciproconazol no florescimento, e, para controle de pragas, foram utilizados óleo mineral e Imidacloprid + Beta-Ciflutrina (0,5 e 0,75 L h⁻¹, respectivamente) conforme avaliação periódica por meio da batida de pano. Após a colheita da soja, a área foi deixada em pousio durante o período seco até o mês de agosto de 2016.

As coletas do solo foram realizadas com o auxílio de um trado tipo holandês na camada superficial (0,00-0,10 m), no dia 21 de janeiro de 2016, na época chuvosa durante o florescimento da soja e no dia 15 julho de 2016, na época seca, quando a área estava em pousio. As amostras coletadas foram mantidas em caixas de isopor e resfriadas durante o transporte até o laboratório de solos da Universidade Estadual de Goiás, Campus de Ipameri, onde foram homogeneizadas, passadas por uma peneira de malha 4 mm, sendo uma parte retirada para análises de umidade e o restante armazenado em geladeira a uma temperatura de 7 ± 3°C até o dia seguinte, iniciando-se as análises microbiológicas.

O CBM foi obtido pelo método da irradiação-extração (MENDONÇA; MATOS, 2005). Essa técnica utiliza energia eletromagnética (micro-ondas), através da transferência de energia e temperatura, para causar um rompimento celular com liberação dos compostos intracelulares. A energia necessária para promover a lise

bacteriana é de $800 \text{ J s}^{-1} \text{ g}^{-1}$, solo em base seca, antes da realização da extração. A calibração do aparelho de micro-ondas foi realizada utilizando um volume conhecido de água e, em seguida, foi preestabelecido o tempo de irradiação para a elevação da temperatura no interior do micro-ondas. Por fim, a extração foi realizada com sulfato de potássio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$; a oxidação, com dicromato de potássio $0,066 \text{ mol L}^{-1}$; e a titulação, com sulfato ferroso amoniacal $0,033 \text{ mol L}^{-1}$ (ISLAM; WEIL, 1998).

A avaliação da respiração microbiana (C-CO_2) foi realizada juntamente com a avaliação do CBM, sendo estimada pela quantidade de CO_2 liberado do solo não fumigado, durante sete dias de incubação. Os dados da respiração microbiana foram expressos em $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg de solo}^{-1}$. O $q\text{CO}_2$ foi calculado pela razão entre C-CO_2 liberado e o CBM (ANDERSON; DOMSCH, 1993), sendo expresso em $(\text{mg C-CO}_2 \text{ mg C-BM}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}) \cdot 10^3$, conforme as Equações (1) e (2) a seguir:

$$q\text{CO}_2 = \text{RM}/\text{CBM} \quad (1)$$

$$\text{C} - \text{CO}_2 \text{ liberado} = \text{TRM}/h \quad (2)$$

Em que: $q\text{CO}_2$ = quociente metabólico ($\text{mg C-CO}_2 \cdot \text{mg C-BM}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) $\cdot 10^3$; TRM = taxa de respiração microbiana ($\text{mg C-CO}_2 \cdot \text{kg de solo}^{-1}$); C-CO_2 liberado = atividade microbiana ($\text{mg C-CO}_2 \cdot \text{kg de solo}^{-1} \text{ h}^{-1}$); H = horas de incubação para a determinação da respiração microbiana; CBM = carbono da biomassa microbiana (mg C-BM kg^{-1} de solo seco).

Para a determinação da umidade gravimétrica do solo (UG), foi usado o método termogravimétrico, conforme Embrapa (2009), que consiste em pesar a massa de solo úmido e, em seguida, secá-lo em estufa a $105 - 110^\circ\text{C}$ por 24 horas, e, após esses passos, determinar sua massa seca, conforme Equação (3):

$$\theta = \text{MSU} - \text{MSS}/\text{MSS} \quad (3)$$

Em que: UG = Umidade Gravimétrica (g g^{-1}); MSU = Massa de Solo Úmida (g); MSS = Massa de Solo Seco (g).

Para cada atributo analisado, foi realizada a análise descritiva auxiliada pela estatística clássica. O software SAS (SCHLOTZHAVER; LITTEL, 1997) foi utilizado para calcular a média, mediana, moda, valores mínimo e máximo, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria. Foram identificados os outliers (dados discrepantes), conforme identificação do gráfico de ramos e folhas, executando sua substituição pelo valor médio dos circunvizinhos. Também foi efetuada a análise da distribuição de frequência por meio do teste de Shapiro e Wilk (1965), com 1% probabilidade de erro.

O ajuste geoespacial foi executado com o auxílio do programa GS⁺ 7.0 (ROBERTSON, 1998). A análise inicial dos dados comprovou que, para alguns atributos, a tendência foi retirada. Utilizando o método do refinamento da mediana desses atributos, conforme proposto por Silva *et al.* (2003):

$$V = VO - (ML + MC) + MG \quad (4)$$

Em que: NV representou o novo valor residual do atributo do qual foi retirada a tendência; VO o valor original do atributo do qual foi retirada a tendência; ML e MC representam, respectivamente, os valores da mediana da linha e da coluna nas quais estava o atributo; MG representou a mediana geral dos atributos contidos na malha amostral.

Assim, calculou-se novamente o semivariograma com os resíduos obtidos desse procedimento. O ajuste do semivariograma efetuado por meio da validação cruzada, de acordo com Robertson (1998), permitiu determinar os parâmetros de ajuste do semivariograma experimental: efeito pepita (C_0), variância estrutural (C_1) e alcance (a). O grau de dependência espacial (GD), também estudado por Montanari *et al.* (2010), onde valores $\leq 25\%$ indicam grau de dependência espacial fraco; de 25% - 75% indicam grau de dependência espacial moderado; e $> 75\%$ indicam grau de dependência espacial forte entre amostras - Equação (5):

$$GD = \left[\left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) \right] * 100 \quad (5)$$

O método de *krigagem* foi utilizado para estimar valores nos locais não

amostrados por ser um estimador linear não enviesado. Após determinados os valores para os locais não amostrados, com a ajuda da técnica de *krigagem*, construíram-se os mapas de isolinhas utilizando-se o programa GS⁺(Robertson 1998), que emprega os mesmos valores estimados por meio da técnica de *krigagem* para determinação e localização das isolinhas. Dessa maneira, os mapas representam linhas bem definidas e embasadas em um algoritmo de regressão linear, conforme descrito por Carvalho e Assad (2002) e Siqueira *et al.* (2008).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, observam-se os valores das medidas descritivas dos atributos microbiológicos do solo sob ILPF em duas estações, chuvosa (soja) e seca (pousio). A análise de normalidade na estação chuvosa apresentou distribuição de frequência normal (p -valor = 0,250) apenas para o atributo UG. Já na estação seca, os atributos que apresentaram distribuição de frequência normal foram C-CO₂ (p -valor = 0,7205) e UG (p -valor = 0,369). A normalidade não é uma exigência da geoestatística, sendo conveniente que o gráfico de distribuição de frequência não apresente caudas muito alongadas, podendo comprometer as análises (CRESSIE, 1991).

Ao avaliar a variabilidade dos atributos microbiológicos, foi utilizado o coeficiente de variação (CV). Segundo Landim (2003), o CV fornece uma medida relativa da precisão do experimento, sendo bastante útil na dispersão dos dados. Os valores de CV na estação chuvosa foram menores (variando entre 8,4 e 39,2) quando comparados com a estação seca, mas apresentaram distribuição de frequência normal apenas para UG. Mesmo apresentando os maiores valores de CV (variando entre 109,3 e 7,1), quando comparados com a estação chuvosa, os atributos C-CO₂ e UG na estação seca apresentaram distribuição normal.

Em relação à assimetria, na estação chuvosa, os valores variaram entre -0,2 e 1,1; sendo que, para os atributos CBM e UG, essa tende à esquerda, já para q CO₂ e C-CO₂ a assimetria tende à direita. Na estação seca, todos os atributos estudados

tiveram assimetria tendendo para a direita e os valores variaram entre 0,3 e 1,9. Os coeficientes de curtose ficaram entre -0,5 e 3,8 para a estação chuvosa. Já na estação seca, por sua vez, esses valores variaram entre -0,2 e 2,6.

Tabela 1 – Análise descritiva da atividade microbiana e umidade gravimétrica de um solo sob integração-lavoura-pecuária-floresta

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas									Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Pr<w		DF
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria			
	Estação chuvosa (Soja)										
CBM	365,4	375,5	101,6	561,8	106,1	29,0	-0,5	-0,2	0,0092	IN	
C-CO ₂	1,5	1,5	0,8	2,2	0,3	18,2	3,8	0,2	0,0001	IN	
qCO ₂	4,5	4,0	1,2	9,1	1,8	39,2	0,3	1,1	0,0001	IN	
UG	0,21	0,21	0,2	0,2	0,02	8,4	0,9	-0,5	0,2500	NO	
Estação seca (Pousio)											
CBM	217,6	188,2	18,8	752,8	180,5	82,9	0,8	1,1	0,0001	IN	
C-CO ₂	1,4	1,4	0,7	2,3	0,4	25,7	-0,2	0,3	0,7205	NO	
qCO ₂	15,1	8,4	1,2	63,8	16,5	109,3	2,6	1,9	0,0001	IN	
UG	0,14	0,14	0,12	0,17	0,01	7,1	1,8	0,4	0,3696	NO	

Fonte: Autores (2016)

Em que: ^(a)CBM = carbono da biomassa microbiana (mg C-BM kg⁻¹ de solo); CCO₂ = carbono da atividade microbiana (mg C-BM kg⁻¹ h⁻¹); qCO₂ = quociente microbiano ((mg C-BM.kg⁻¹ h⁻¹) 10⁻³); Ug = umidade gravimétrica (g g⁻¹); DF = distribuição de frequência, sendo NO e IN respectivamente do tipo normal e indeterminada.

Dessa forma, a distribuição de frequência do tipo normal obtida para os referidos atributos, assim como as magnitudes dos coeficientes de assimetria e de curtose, ficou, no geral, em concordância com dados análogos observados por Corrêa *et al.* (2015). Nesse estudo, ao trabalharem com sistema silvipastoril em uma malha amostral com 72 pontos amostrais correlacionados com atributos de um Neossolo Quartzarênico em Mato Grosso do Sul, encontram-se valores de assimetria variando entre -0,689 a 0,839 e curtose entre -0,720 a 1,134. Montanari *et al.* (2015), estudando a variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região de

transição Cerrado-Pantanal-MS, em uma grade amostral com 51 pontos amostrais em um Planossolo, verificaram valores de assimetria variando de -0,553 a 0,926 e curtose de -0,471 a 2,612.

Quando uma variável estatística qualquer possuir distribuição de frequência do tipo normal, a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média; em contrapartida, será representada pela mediana, ou pela média geométrica, caso seja do tipo lognormal (DALCHIAVON *et al.* 2017). Na estação chuvosa, para o atributo UG, a média foi de 0,21; a mediana para CBM, C-CO₂ e qCO₂ foram, respectivamente, 375,5; 1,5 e 4,0. Na estação seca, a média para C-CO₂ e UG foi 217,6 e 0,14, respectivamente; já a mediana para CBM e qCO₂ foi de 188,2 e 8,4.

Por meio da matriz de correlação (Tabela 2), é possível observar que, tanto na estação chuvosa como na seca, os atributos qCO₂ e CBM apresentam correlação inversamente proporcional, enquanto qCO₂ e C-CO₂ apresentaram correlação positiva na estação chuvosa, ou seja, à medida que CBM aumenta, o qCO₂ reduz, evidenciando a melhor eficiência da microfauna no uso do substrato.

Tabela 2 – Matriz de correlação linear simples entre os atributos microbiológicos e umidade do solo

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)		
	CBM	C-CO ₂	qCO ₂
Estação chuvosa (Soja)			
C-CO ₂	0,019	-	-
qCO ₂	-0,691**	0,485**	-
UG	-0,164	0,083	0,147
Estação seca (Pousio)			
C-CO ₂	0,104	-	-
qCO ₂	-0,633**	0,184	-
UG	0,207	0,043	-0,211

Fonte: Autores (2016)

Em que: ^(a)CBM = carbono da biomassa microbiana (mg C-BM kg⁻¹ de solo); C-CO₂ = carbono da atividade microbiana (mg C-BM kg⁻¹ h⁻¹); qCO₂ = quociente microbiano ((mg C-BM kg⁻¹ h⁻¹) 10⁻³); UG = umidade gravimétrica (g g⁻¹); DF = distribuição de frequência, sendo NO e IN, respectivamente, do tipo normal e indeterminada; ^(b)* Significativo a 5%, ** Significativo a 1%.

Em contrapartida, à medida que o C-CO₂ aumenta, o quociente metabólico também aumenta, sugerindo que, na estação chuvosa, o plantio de soja provavelmente incorpora carbono orgânico no solo, o que proporciona um incremento maior na atividade metabólica dos microrganismos do que incorporação de carbono nos tecidos microbianos. No entanto, Carbonell-Bojollo *et al.* (2012) relatam que a emissão de CO₂ nem sempre está correlacionada com o carbono orgânico do solo e o aumento da emissão de CO₂ está associado ao estoque de carbono do solo, que é complexo, podendo envolver *feedbacks* positivos e negativos, necessitando de mais estudos entre o fluxo de CO₂ e a dinâmica do carbono do solo (SONG *et al.*, 2013). No estudo realizado por Xu e Qi (2001), a emissão de CO₂ apresentou correlação significativa e positiva com a biomassa microbiana, a biomassa das raízes, o nitrogênio, a matéria orgânica e o teor de magnésio.

As correlações entre as medidas de qCO_2 e CBM foram significativas ao nível de 1% de probabilidade, e variaram de -0,633 a -0,691, entre as estações chuvosa e seca, respectivamente. Observou-se correlação significativa a 1% entre as medidas qCO_2 e C-CO₂ na estação chuvosa (Tabela 2).

Colman *et al.* (2013), avaliando a qualidade do solo em diferentes sistemas de ILPF, observaram que a respiração microbiana (C-CO₂) e o CBM foram influenciados pelos sistemas de manejo avaliados. O carbono da biomassa microbiana é positivamente relacionado com a liberação de CO₂, ou seja, a atividade microbiana está associada à quantidade de microrganismos (CATTELAN; VIDOR, 1990).

Em relação ao CBM, Alvarenga e Noce (2005) afirmaram que o acúmulo de palhada e raízes proporcionado pela pastagem tende a aumentar a matéria orgânica do solo, e, conseqüentemente, aumentar a quantidade de carbono disponível para os microrganismos. Essa elevada taxa é desejável, uma vez que a decomposição dos resíduos orgânicos irá disponibilizar nutrientes às plantas. Segundo Lourente *et al.* (2011), a biomassa microbiana foi mais eficiente durante o verão, ou seja, houve menos perda de CO₂ por unidade de biomassa e redução nos valores de qCO_2 , assim como observado neste trabalho.

Tabela 3 – Análise geoestatística da atividade microbiana e umidade em um solo sob interação-lavoura-pecuária-floresta

Atributo ^{s(a)}	Parâmetros										
	Modelo ^(b)	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe*	A	b	r
Seca (Pousio)											
CBM	esf (35)	1,3x10 ⁻⁴	2,802x10 ⁴	20,0	0,589	1,0x10 ⁴	50,9	M	62,9	0,711	0,12
C-CO ₂	esf (34)	4,9x10 ⁻²	1,396x10 ¹	13,5	0,518	2,6x10 ⁻³	63,9	AL	0,67	0,538	0,05
qCO ₂	esf (37)	6,4x10 ¹	2,792x10 ²	26,6	0,429	4,9x10 ⁵	77,0	AL	5,43	0,593	0,096
UG	esf (37)	4,6x10 ⁻⁵	9,800x10 ⁻⁵	14,9	0,340	2,5x10 ⁻⁹	53,1	M	0,04	0,068	0,16
Chuva (Soja)											
CBM	exp (35)	7,2x10 ¹	9,300x10 ³	7,5	0,258	2,1x10 ⁷	92,4	MA	158,7	0,553	0,032
C-CO ₂	-	7,5x10 ⁻²	-	-	-	-	-	-	-	-	-
qCO ₂	exp (37)	5,0x10 ⁻¹	3,319x10 ²	8,7	0,625	5,110 ¹	84,7	MA	2,910	0,371	0,015
UG	exp (35)	1,8x10 ⁻⁵	2,900x10 ⁻⁴	7,5	0,134	3,6x10 ⁻⁸	94,1	MA	0,040	0,802	0,114
Y (h) cruzado - Seca											
qCO ₂ =f(CBM)	gau (37)	-4,0x10 ²	-2,055x10 ³	15,6	0,714	8,0x10 ⁶	77,8	AL	2,180	0,826	0,313
Y (h) cruzado - Chuva											
qCO ₂ =f(CBM)	esf (34)	2,3x10 ⁷	1,786x10 ⁸	11,3	0,265	2,2x10 ⁴	87,0	MA	0,610	0,882	0,184

Fonte: Autores (2016)

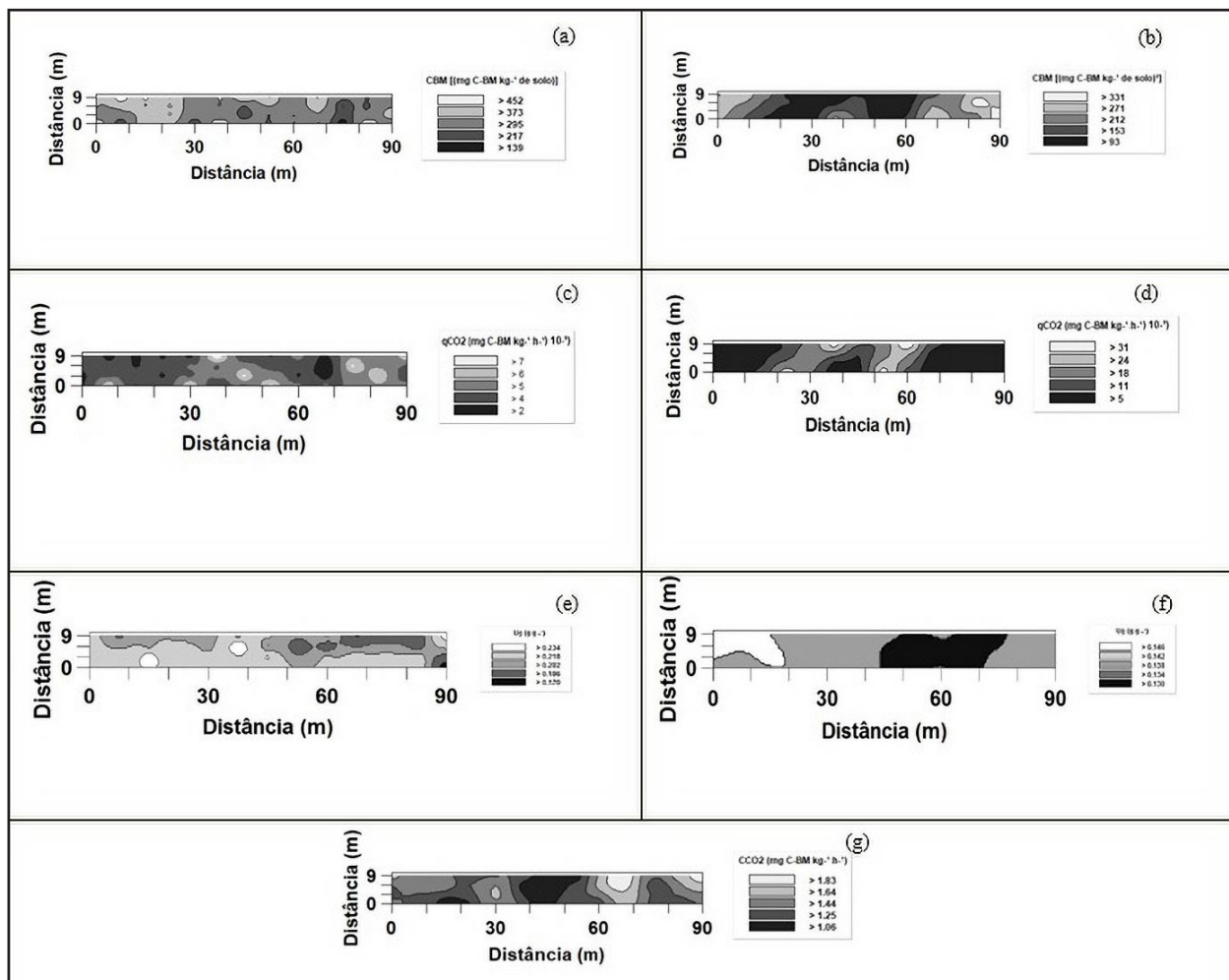
Em que: ^(a)CBM = carbono da biomassa microbiana (mg C-BM kg⁻¹ de solo); C-CO₂ = carbono da atividade microbiana (mg C-BM kg⁻¹ h⁻¹); qCO₂ = quociente microbiano ((mg C-BM kg⁻¹ h⁻¹) 10⁻³); UG = umidade gravimétrica (g g⁻¹); ^(b)ADE = M = média; A = alta; MA = muito alta.

No período chuvoso, as variáveis analisadas apresentaram maior dependência espacial do que no período seco, bem como menores valores de alcance, corroborados pela umidade gravimétrica da área. A umidade e a temperatura do solo são os fatores que mais influenciam a emissão de CO₂, sendo que a umidade do solo nem sempre apresenta os mesmos padrões de variabilidade espacial e temporal (LOURENTE *et al.*, 2011). No geral, a umidade do solo é negativamente correlacionada com a emissão de CO₂ em estudo da variabilidade espacial e positivamente em variabilidade temporal (XU; QI, 2001; EPRON *et al.*, 2006; KOSUGI *et al.*, 2007; LA SCALA *et al.*, 2010).

Na comparação inicial do mapa de krigagem simples, período seco, os atributos CBM, qCO₂, C-CO₂ e UG apresentaram elevada semelhança espacial entre si, confirmando a importância da umidade para esses atributos quando em pousio. Dessa

forma, nas figuras 2 b, d, f, g, constatou-se que, nos sítios onde ocorreram os maiores valores de CBM e UG, houve menores valores de C-CO₂ e qCO₂, consequentemente. Entretanto, para o período chuvoso, esse fato não ocorreu de forma evidente, apenas em pontos específicos, como a região centro-oeste dos mapas.

Figura 1 – Mapas de krigagem dos atributos



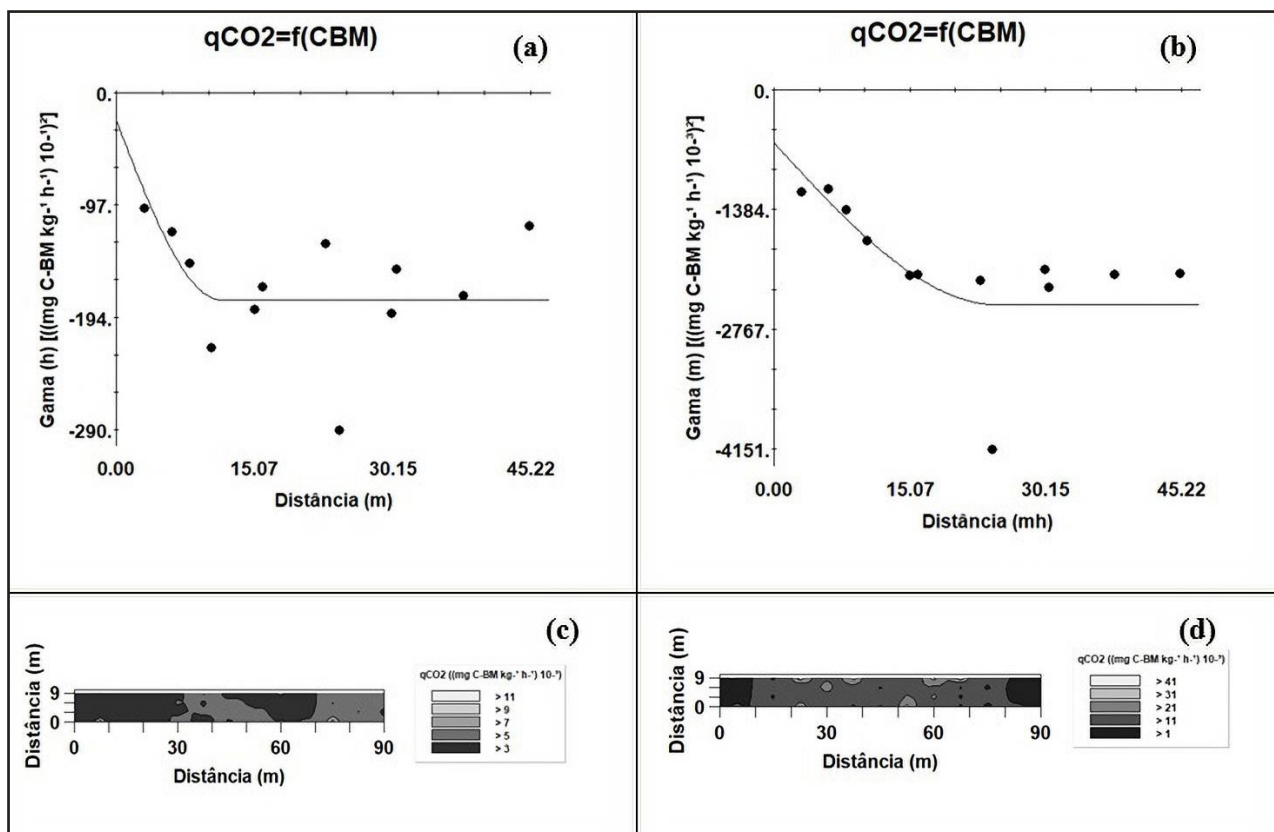
Fonte: Autores (2016)

Em que: (CBM = Carbono da biomassa microbiana (mg C-BM kg⁻¹de solo); C-CO₂ = Carbono da atividade microbiana (mg C-BM kg⁻¹ h⁻¹); qCO₂ = Quociente microbiano ((mg C-BM g⁻¹ h⁻¹) 10⁻³); UG = Umidade gravimétrica (g g⁻¹); letras: a, c, e, análises período chuvoso, b, d, f, g, período seca.

Nas figuras 3a e 3b, estão contidos os semivariogramas cruzados e, nas figuras 3c e 3d, estão contidos os mapas de co-krigagem entre os atributos que apresentaram dependência espacial entre si. Atestando a inter-relação espacial CBM, foi confirmado

que apenas a qCO_2 resultou co-krigagem, evidenciando que 71,4% no período chuvoso e 26,5% no período seco da variabilidade espacial do CBM no sistema ILPF foram explicadas pela variabilidade espacial da qCO_2 .

Figura 2 – Mapas de co-krigagem do atributo $qCO_2 =$ Quociente microbiano ($mg\ C-BM \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1} \cdot 10^{-3}$). (a) e (c) - análises do período chuvoso; (b) e (d) - período seco



Fonte: Autores (2016)

4 CONCLUSÕES

Os atributos da atividade microbiológica do solo foram bons indicadores de zonas de manejo específico para qualidade do solo.

O qCO_2 foi a variável microbiológica que melhor representou, linear e espacialmente, a variabilidade do solo sob o sistema ILPF, refletindo as zonas de maior eficiência do uso do substrato pelos organismos do solo.

Os atributos apresentaram maior dependência espacial no período chuvoso.

No período chuvoso, ocorreu menor variabilidade dos dados em relação ao período seco.

O $q\text{CO}_2$ apresentou relação direta com C-CO_2 no período chuvoso, enquanto CBM apresentou relação inversamente proporcional, tanto no período chuvoso como no seco.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA NETO, F.; LEITE, L. F. C.; ARNHOLD, E.; MACIEL, G. A.; CARNEIRO, R. F. V. Compartimentos de carbono em Latossolo Vermelho sob cultivo de eucalipto e fitofisionomias de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 849-856, 2011.

ALVARENGA, R. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, M. C. M.; VILELA, L. Sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: condicionamento do solo e intensificação da produção de lavouras. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 257, p. 59-67, jul./ago. 2010.

ALVARENGA, R. C.; NOCE, M. A. **Integração lavoura-pecuária**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 16 p. Documentos, 47.

ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO_2 ($q\text{CO}_2$) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.

CARBONELL, R.; REPULLO, M. A.; RODRIGUEZ-LIZANA, A.; ORDONEZ-FERNANDEZ, R. Influence of soil and climate conditions on CO_2 emissions from agricultural soils. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 223, n. 6, p. 3425-3435, 2012.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. **Comparação de interpoladores espaciais univariados para precipitação pluvial anual no Estado de São Paulo**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2002. (Embrapa Informática Agropecuária. Comunicado Técnico, 33).

CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo em função de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, n. 2, p. 133-142, 1990.

COLMAN, B. A.; SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M. Indicadores microbiológicos para avaliação da qualidade do solo em diferentes sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO*, 34., 2013, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/966925/1/CBCSCOLMANINDICADORES.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2018.

CORRÊA, A. R.; MONTANARI, R.; LAURA, V. A.; MELOTTO, A. M.; SILVA, E. N. S.; PELLIN, D. M. P.; PELLIN, D. M. P.; SANTOS, A. S. Aspects of the silvopastoral system correlated with properties of a Typic Quartzipsamment (entisol) in Mato Grosso do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 438-447, 2015.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley & Sons, 1991. 900 p.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 541-552, abr. 2012.

DALCHIAVON, F. C.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M. Production and quality of *Urochloa decumbens* (stapf) r.d. webster forage co-related to the physical and chemical properties of the soil. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 64, n. 3, p. 315-326, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. **Manual de métodos de análise do solo**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2009. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; ROUPSARD, O.; MOUVONDY, W.; MABIALA, A.; SAINT-ANDRÉ, L.; JOFFRE, R.; JOURDAN, C.; BONNEFOND, J. M.; BERBIEGER, P.; HAMEL, O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a *Eucalyptus* plantation in Congo. **Forest, Ecology and Management**, Amsterdam, v. 202, p. 149-160, 2004.

EPRON, D.; BOSC, A.; BONAL, D.; FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 22, n. 5, p. 565-574, 2006.

GAZOLA, R. N.; LOVERA, L. H.; CELESTRINO, T. S.; DINALLI, R. P.; MONTANARI, R.; QUEIROZ, H. A. Variabilidade espacial das concentrações de nutrientes foliares da soja correlacionadas com atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 64, n. 4, p. 441-449, 2017.

GUANGMING, L.; ZHANG, X.; XIUPING, W.; SHAO, H. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 237, p. 274-279, 2017.

INSAM, H.; MITCHELL, C. C.; DORMAAR, J. F. Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three ultisols. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 23, n.5, p. 459-464, 1991.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 27, n. 4, p. 408-416, 1998.

KOSUGI, Y.; ITOH, M.; NOGUCHI, S.; MITANI, T. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 147, p. 35-47, 2007.

LA SCALA JÚNIOR, N.; MENDONÇA, E. S.; SOUZA, J. V.; PANOSSO, A. R.; SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R. Spatial and temporal variability in soil CO₂ e C emissions and relation to soil temperature at King George Island, maritime Antarctica. **National Institute of Polar Research**, Tokyo, v. 4, n. 3, p. 479-487, Dec. 2010.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2003. 253 p.

LIMA, E. S.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R.; OLIVEIRA, S. R. M.; LOVERA, L. H.; FARHATE, C. V. V. Classification of the initial development of *eucalyptus* using data mining techniques. **CERNE**, Lavras, v. 23, n. 2, p. 201-208, Apr./June, 2017.

LOURENTE, E. R. P.; MERCANTE, F. M.; ALOVISI, A. M. T.; GOMES, C. F.; GASPARINI, A. S.; NUNES, C. M. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 20-28, jan./mar. 2011.

MAHARJAN, M.; SANAULLAH, M.; RAZAVI, B.; KUZYAKOV, Y. Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 113, p. 22-28, 2017.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo; métodos de análises**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 107 p.

MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; DALCHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1811-1822, nov./dez. 2010.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006. 626 p.

ROBERTSON, G.P. **GS+: Geostatistics for the environmental sciences** (version 5.1 for windows). Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.

SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. **SAS system for elementary statical analysis**. 2. ed. Cary: SAS, 1997. 441 p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysys of vari-ance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, nov./dez. 2003.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 203-11, 2008.

SONG, Z.; KIMBERLEY, M. O.; YUAN, H.; JIANG, H.; ZHOU, G.; WANG, H. Soil CO₂ flux dynamics in the two main plantation forest types in subtropical China. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 444, p. 363-368, 2013.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; SILVA, C. A.; BUZETTI, S. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob Cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá, v. 28, n. 3, p. 323-329, 2006.

TAVANTI, R. F. R.; MONTANARI, R.; PANOSO, A. R.; FREDDI, O. S.; PAZ-GONZÁLEZ, A. Pedotransfer function to estimate the soil structural "S" index and spatial variability in an Oxisol within a livestock farming system. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 34-44, 2020.

VINHAL-FREITAS, I. C.; CORREA, G. F.; WENDLING, B.; BOBULSKÁ, L.; FERREIRA, A. S. Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. **Ecological Indicators**, [s.l.], v. 74, p. 182-190, 2017.

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, p. 667-677, 2001.

Contribuição de Autoria

1 – Paulino Taveira de Souza

Engenheiro Agrônomo, Me., Doutorando em Agronomia

<https://orcid.org/0000-0003-4998-3602> • paulinoagro@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Visualização de dados, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

2 – Tatiane Carla Silva

Engenheira Agrônoma, Ma., Doutoranda em Agronomia

<https://orcid.org/0000-0002-5317-9388> • tcs.agronomia@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

3 – Maria Júlia Betiolo Troleis

Engenheira Agrônoma, Ma., Doutoranda em Agronomia

<https://orcid.org/0000-0002-6402-0401> • julia_troleis@hotmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Visualização de dados, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

4 – Karla Nascimento Sena

Engenheira Agrônoma, Ma., Doutoranda em Agronomia

<https://orcid.org/0000-0003-0437-8425> • karlla_senna@hotmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Visualização de dados, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

5 – Anne Caroline Rocha Silva

Engenheira Agrônoma, Ma., Doutoranda em Agronomia

<https://orcid.org/0000-0003-1481-1560> • anne.rocha@unesp.br

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Visualização de dados, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

6 – Talles Eduardo Borges dos Santos

Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0003-4221-2012> • tallesunesp@yahoo.com.br

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Visualização de dados, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

7 – Rafael Montanari

Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0002-3557-2362> • r.montanari@unesp.br

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Visualização de dados, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição, Supervisão, Validação

Como citar este artigo

Souza, P. T.; Silva, T. C.; Troleis, M. J. B., Sena, K. N.; Silva, A. C. R.; Santos, T. E. B.; Montanari, R. Variabilidade espacial da biomassa e atividade microbiana do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 31, n. 4, p. 1949-1967, 2021. DOI 10.5902/1980509861902. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509861902>.