

Variabilidade espacial de atributos do solo e da vegetação em sistemas integrados de produção¹

Spatial variability of soil and vegetation attributes in integrated production systems

Nicolle Laurenti¹, Josiane Rodrigues², Edilson da Silva Guimarães³, José Ricardo Macedo Pezzopane⁴, Alberto Carlos de Campos Bernardi⁵

¹ Mestre em Agricultura e Ambiente (CCA / UFSCar), Engenheira Agrônoma, BemAgro S.A., Ribeirão Preto (SP), Brasil, nicollelaurenti2@gmail.com

² Doutora em Ciências, Professora, Centro de Ciências Agrárias (CCA), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras (SP), Brasil, josirodrigues@ufscar.br

³ Mestre em Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria, Supervisor do Núcleo de Tecnologia da Informação, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, edilson.guimaraes@embrapa.br

⁴ Doutor em Física do Ambiente Agrícola, Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, jose.pezzopane@embrapa.br

⁵ Doutor em Agronomia, Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br

RESUMO

O fornecimento balanceado de nutrientes é fator-chave para a intensificação dos sistemas agropecuários e, nesse sentido, as ferramentas de agricultura de precisão podem ser utilizadas a fim de permitir a identificação de zonas homogêneas e heterogêneas em uma determinada área e, conseqüentemente, possibilitando definir estratégias de manejo mais eficientes. O objetivo do trabalho foi estudar a variabilidade espacial de atributos do solo e da vegetação em sistemas integrados de produção pecuária com o componente arbóreo, utilizando para isso o processo de interpolação espacial pelo Inverso da distância ponderada. O trabalho foi realizado numa área que compreende um sistema de integração pecuária-floresta (IPF) e um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP. Os atributos do solo avaliados, em 2021, foram: matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), areia, argila (atributos avaliados nas profundidades 0-0,2 m e 0,2-0,4 m), resistividade elétrica (RE) (avaliada nas profundidades 0-0,5 m, 0-1,0 m e 0-2,0 m), e os atributos da vegetação foram: altura, diâmetro à altura do peito (DAP) e volume de árvores de eucalipto, sendo que os atributos da vegetação foram avaliados em abril de 2021 e abril de 2022. Os resultados indicaram que os valores dos parâmetros de fertilidade do solo foram adequados ao desenvolvimento da cultura e apresentaram baixa variabilidade espacial. As análises de solo indicaram baixa acidez, altos teores de matéria orgânica, teores médios de fósforo, potássio e capacidade de troca catiônica e altos teores de cálcio, magnésio e saturação por base. Entretanto, foram observados locais com maior variabilidade espacial para cálcio, refletindo variabilidade na capacidade de troca catiônica e saturação por base. A granulometria e a resistividade elétrica do solo apresentaram baixa variabilidade espacial na camada superficial. Mesmo sem diferenças nas propriedades do solo, houve diferença de 15% no maior volume de madeira no sistema IPF em comparação ao ILPF.

Palavras-chave: agricultura sustentável; interpolação espacial; sistemas integrados.

ABSTRACT

The balanced supply of nutrients is a critical factor for the intensification of farming systems; therefore, precision agriculture tools can be used to identify homogeneous and heterogeneous zones in each area and, consequently, enable the definition of management strategies more efficiently. This work aimed to study the spatial variability of soil and vegetation attributes in an area comprising an integrated livestock-forest (ILF) and an integrated

¹ Adaptação do trabalho: LAURENTI, N.; PEZZOPANE, J. R. M.; GUIMARAES, E. S.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, J. Spatial variability of soil and vegetation properties in integrated production systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 28, n. 10, e280481, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p3-9>.

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000048>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

crop-livestock-forest (ICLF) system of Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP, using the Inverse Distance Weight (IDW) interpolation. We evaluated the soil organic matter (MO), cation exchange capacity (CEC), sand, clay (attributes evaluated at depths 0-0.2 and 0.2-0.4 m), electrical resistivity (ER) (evaluated at depths 0-0.5, 0-1.0 and 0-2.0 m) and the vegetation height, diameter at breast height (DBH) and volume of eucalyptus trees (attributes evaluated in April/2021 and April/2022). The results indicated that the values for soil fertility parameters were suitable for crop development and presented low spatial variability. Soil analyses indicated low acidity, high levels of organic matter, average cation exchange capacity, phosphorus and potassium contents, high base saturation, and calcium and magnesium levels. However, locations with greater spatial variability for calcium were observed, reflecting cation exchange capacity and base saturation variability. Soil granulometry and electrical resistivity had a low spatial variability at the surface layer. Even without differences in the soil properties, there was a difference of 15% in the larger wood volume in the ILF and ICLF systems.

Keywords: sustainable agriculture; spatial interpolation; integrated systems.

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais a humanidade se depara com desafios cada vez maiores para a produção de alimentos e produtos de forma compatível com a disponibilidade de recursos naturais, e por esse motivo são grandes os apelos para que se difunda em todo o mundo o conceito de agricultura sustentável. De acordo com esse conceito, os agroecossistemas do século XXI devem ser capazes de maximizar a quantidade de produtos agrícolas de alta qualidade e conservar os recursos naturais do sistema (Balbino et al., 2012) e, nesse sentido, os sistemas integrados surgem como uma estratégia de produção sustentável (Muller et al., 2015).

Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) caracterizam-se por agregar atividades agrícolas, pecuárias e florestais numa mesma área, e buscam efeitos de sinergia entre os componentes do agroecossistema, contemplando a preservação ambiental, a valorização do homem e a viabilidade econômica da atividade agropecuária (Balbino et al., 2012).

No que diz respeito às características do solo e da vegetação dos sistemas produtivos, de forma particular aqui os sistemas integrados, elas podem variar espacialmente dentro de um mesmo talhão até a escala regional em função de fatores intrínsecos, como os de formação do solo, e extrínsecos, como as práticas de manejo, adubação e rotação de culturas (Cambardella; Karlen, 1999). Dessa forma, a compreensão da variabilidade no espaço e tempo das propriedades edáficas e dos vegetais, nos diferentes sistemas, possui potencial para contribuir com o aumento da produtividade e qualidade, economia de insumos e redução do impacto ambiental.

Dentro desse contexto, a obtenção e o processamento de informações georreferenciadas de atributos do solo e da vegetação na área de estudo são importantes pois possibilitam, por meio de procedimento de interpolação espacial, gerar mapas relacionados aos siste-

mas de produção agrícola, o que constitui um aspecto de inquestionável importância, uma vez que os mapas gerados amparam tecnicamente as decisões estratégicas, permitindo observar os pontos mais complexos da área em estudo, comparando-os com o sistema de manejo adotado, seus efeitos ambientais e a produtividade das diferentes culturas (Grego et al., 2014).

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho é estudar a variabilidade espacial de atributos do solo e da vegetação numa área cultivada com um sistema de integração pecuária-floresta (IPF) e por um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), utilizando o processo de interpolação pelo inverso da distância ponderada. Com isso, pretende-se contribuir para com as tomadas de decisões que serão feitas sobre essa área, visando definir estratégias de manejo mais eficientes, em especial o uso racional de insumos e a preservação ambiental, assim também como enfatizar os benefícios dos sistemas integrados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em uma área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil (21°57'S, 47°51'W, 860 m de altitude). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com textura argilosa média (Calderano Filho et al., 1998), e o seu clima é tropical (classificação de Köppen: Cwa), com duas estações bem definidas, sendo ela seca de abril a setembro, com temperatura média de 19,9 °C e precipitação média de 250 mm, e úmida de outubro a março, com temperatura média de 23,0 °C e média de precipitação de 1.100 mm (Pezzopane et al., 2021).

Eucalyptus urograndis clone GG100, plantadas em 2011 (espaçamento de 15 m x 2 m), desbastadas em 2016 (espaçamento de 15 m x 4 m) e desbastadas novamente em 2019 (espaçamento de 30 m x 4 m).

A área de estudo compreende um sistema que inclui (Pezzopane et al., 2019): i) sistema de Integração pecuária-floresta (IPF) composto de pastagem de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã, arborizada com árvores de *Eucalyptus urograndis* clone GG100, plantadas em 2011 (espaçamento de 15 m x 2 m), desbastadas em 2016 (espaçamento de 15 m x 4 m) e desbastadas novamente em 2019 (espaçamento de 30 m x 4 m); integração de lavoura-pecuária-floresta (ILPF), na mesma configuração do sistema anterior com renovação de 1/3 da área de pastagem com o plantio da cultura de milho até o ano de 2018 (Figura 1). As pastagens são manejadas em sistema rotacionado com sete dias de pastejo e 35 dias de repouso em épocas de chuvas e secas.

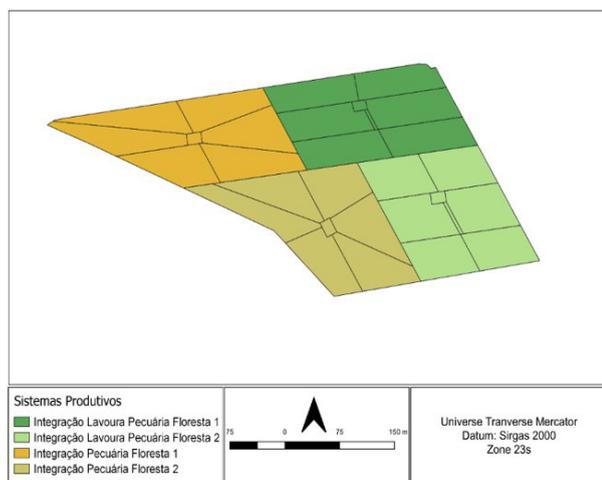


Figura 1. Área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF1 e ILPF2) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF1 e IPF2) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil.

Para a análise dos atributos do solo foi feita uma amostragem no período seco (agosto/2021) em cada piquete da área de estudo (cada piquete de 0,5 ha), totalizando 24 amostras georreferenciadas. Para isso foi utilizado o procedimento de amostragem por zonas homogêneas (Fleming et al., 2000). Neste estudo, cada piquete foi considerado uma unidade homogênea de manejo, como descrito por Bernardi et al. (2017). As amostragens em cada piquete foram realizadas em duas profundidades: 0-0,2 m e 0,2-0,4 m. Em cada piquete foram coletas seis subamostras para compor uma amostra composta georreferenciada pelo centroide do piquete (Figura 2). As variáveis analisadas na área de estudo foram: i) atributos do solo – matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), areia, argila e resistividade elétrica (RE); ii) atributos da vegetação – altura, diâmetro à altura do peito (DAP – diâmetro do tronco à altura de 1,30 m) e volume de árvores de eucalipto.

As análises dos atributos do solo foram realizadas a partir dos métodos de análise física de solos do Instituto Agronômico de Campinas (Maria et al., 2021) e a partir dos métodos de análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais do Instituto Agronômico de Campinas (Van Raij et al., 2001).

Por sua vez, as medidas de resistividade elétrica do solo foram obtidas com o sensor comercial ARP system® (Geocarta, Paris, França) (Figura 3), em três diferentes profundidades, sendo elas: 0-0,5 m, 0-1,0 m e 0-2,0 m. A coleta foi realizada em outubro de 2021, a cada 0,1 m, com velocidade aproximada de 6 m/s, sendo os dados de resistividade registrados para cada profundidade, com as respectivas coordenadas de cada ponto amostrado. No total, para cada profundi-

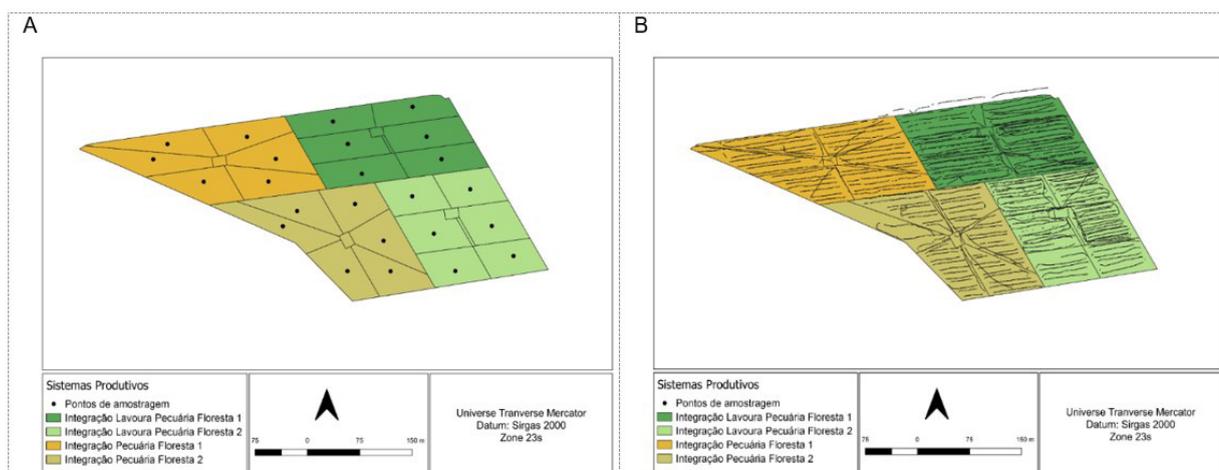


Figura 2. Pontos de amostragem para estudo de atributos (A) e para a resistividade elétrica (B) do solo em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil.



Figura 3. Sensor comercial ARP system® coletando medidas de resistividade elétrica do solo.

dade, foram coletados aproximadamente 480 mil dados georreferenciados (Figura 2).

Por fim, as medições de altura e DAP dos eucaliptos foram realizadas nos meses de abril de 2021 e abril de 2022, em quinze árvores por piquete da área experimental, tendo sido utilizados os mesmos centroides considerados nas análises de solo. Os dados de altura dos eucaliptos foram obtidos utilizando-se de um hipsômetro digital Haglof®, que se baseia no princípio trigonométrico, a partir da relação entre ângulo e distância (Figura 4A), e os dados de DAP dos eucaliptos foram coletados com o auxílio de uma fita métrica (Figura 4B). O volume das árvores, por sua vez, foi obtido a partir do modelo de Schumacher-Hall (Pezzopane et al., 2021), sendo o logaritmo do volume obtido por meio do modelo $\ln V = -10,2101 + 1,6808 * \ln(\text{DAP}) + 1,2910 * \ln(\text{Altura})$.

Todos os atributos analisados foram submetidos inicialmente a uma análise exploratória. Nessa etapa, primeiramente foram identificados os *outliers* presentes nos dados e, após a retirada de tais pontos do conjunto, procedeu-se com o cálculo das seguintes medidas estatísticas: média, desvio padrão, mínimo, máximo, coeficiente de variação e as medidas de curtose e assimetria.

Finalizada a análise exploratória, seguiu-se com o processo de interpolação espacial de cada um dos atributos, utilizando-se para isso a interpolação pelo inverso da distância ponderada (*Inverse Distance Weight*

– IDW) (WATSON; PHILIP, 1985). No método, a ponderação é atribuída de acordo com a distância entre o ponto no qual se quer prever a característica de interesse e os pontos amostrados. Dessa forma, pontos que estão mais distantes têm peso menor e influenciam menos na previsão, enquanto pontos que estão mais próximos têm peso maior e, portanto, têm maior influência na previsão. Esse cálculo é realizado utilizando-se da equação descrita por Mello et al. (2003):

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \times z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)},$$

em que z_p é o valor da variável a ser interpolado, z_i é o valor da variável do i -ésimo ponto amostrado, d_i corresponde à distância euclidiana entre o ponto a ser interpolado e o i -ésimo ponto amostrado, p é o valor do expoente a ser considerado no processo de interpolação, e n representa o número de pontos amostrados.

O expoente p , utilizado no processo de interpolação, atribui alguns efeitos nos resultados e, portanto, sua escolha foi realizada segundo o processo de validação cruzada, tendo por base o menor valor da raiz quadrada do erro médio (*Root Mean Square Error – RMSE*), a qual é comumente utilizada para expressar a acurácia dos resultados numéricos (Hallak; Pereira Filho, 2011).



Figura 4. Medição de altura de árvore de eucalipto na área de estudo utilizando o hipsômetro (A) e do diâmetro à altura do peito (DAP) (B) de árvore de eucalipto na área de estudo.

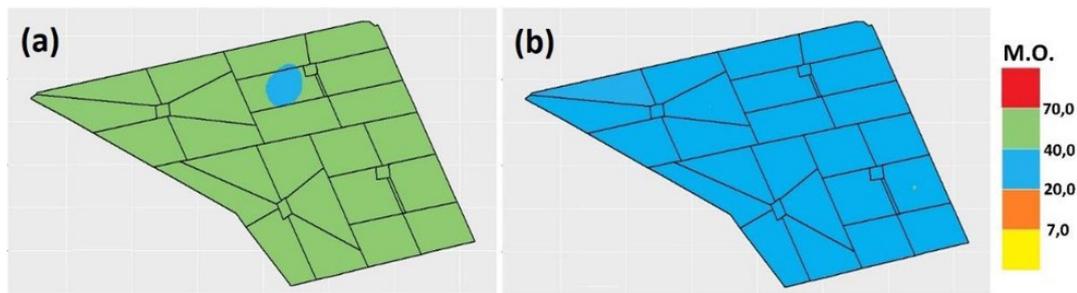


Figura 5. Variabilidade espacial de matéria orgânica (MO) (g dm^{-3}) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela - muito baixa; laranja - baixa; azul - média; verde - alta; vermelha - muito alta.

Todas as análises foram desenvolvidas utilizando o software estatístico R (R Core Team, 2021).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medidas descritivas associadas a cada um dos atributos do solo e da vegetação estão apresentadas nas Tabelas de 1 a 3. Tendo-se finalizada a análise exploratória, seguiu-se com a interpolação IDW para cada atributo. Os mapas gerados pelo processo estão apresentados nas Figuras de 6 a 11.

Analisando os mapas de MO gerados pelo processo de interpolação, observou-se que, na superfície, a menos de uma pequena região no sistema ILPF, em que os valores se enquadraram no intervalo classificado como médio, os valores obtidos para esse atributo podem ser classificados como altos. A média de MO na superfície foi igual a $48,69 \text{ g dm}^{-3}$, a qual se enquadra dentro da faixa considerada alta para esse parâmetro (Tabela 1). Já na subsuperfície, não houve variabilidade espacial para esse atributo, e todos os valores interpolados se classificaram dentro da faixa média (Figura 6), com uma média de MO de $31,36 \text{ g dm}^{-3}$ (Tabela 1).

De acordo com Stockmann et al. (2013), a MO do solo apresenta em média 58% de carbono orgânico e, segundo Torres et al. (2014), a quantidade de carbono orgânico do solo está diretamente associada à quantidade de material vegetal presente no solo. Além disso, de acordo com Freitas et al. (2020), o teor de MO também é influenciado pelos resíduos de animais aportados no solo. Dessa forma, a quantidade de MO na área de estudo pode ser justificada devido a maior diversificação e produção de resíduos vegetais e animais trazidas pelos sistemas integrados. Sobre o teor de MO ser superior na superfície, isso já era esperado, uma vez que há uma deposição maior de resíduos animais e vegetais na camada superficial do solo (Freitas et al., 2020).

Sobre a CTC, através dos mapas gerados pela interpolação, pode-se dizer que a capacidade de retenção de cátions do solo na área de estudo é de média a alta, sendo que na superfície houve maior retenção de cátions que na subsuperfície, sendo que nesta última não houve variabilidade espacial do atributo (Figura 7). De modo geral, considerando os dois sistemas produtivos, obteve-se um valor médio de CTC na superfície

Tabela 1. Estatística descritiva de atributos do solo (matéria orgânica – MO (g dm^{-3}), capacidade de troca catiônica – CTC (mmolc dm^{-3}), areia (g kg^{-1}) e argila (g kg^{-1}) em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil.

Medidas estatísticas	MO*	MO**	CTC*	CTC**	Areia*	Areia**	Argila*	Argila**
Média	48,69	31,36	83,77	63,00	551,00	560,42	339,70	391,58
Desvio padrão	5,71	5,08	9,81	2,87	24,37	25,31	22,66	34,63
Mínimo	37,50	25,00	64,50	58,00	492,00	504,00	297,00	308,00
Máximo	61,00	43,00	99,50	69,50	581,00	602,00	384,00	445,00
CV (%)	11,73	16,21	11,71	4,56	4,42	4,52	6,67	8,84
Curtose	2,84	2,85	2,33	2,30	3,10	2,58	2,26	2,63
Assimetria	0,29	0,70	-0,47	0,23	-0,89	-0,44	-0,17	-0,48

* Atributos avaliados na profundidade 0-0,2 m; ** Atributos avaliados na profundidade 0,2-0,4 m.

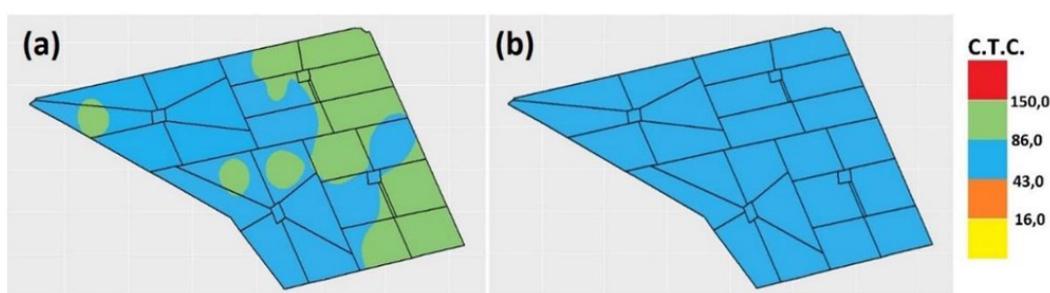


Figura 6. Variabilidade espacial da capacidade de troca catiônica (CTC) (mmolc dm^{-3}) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta.

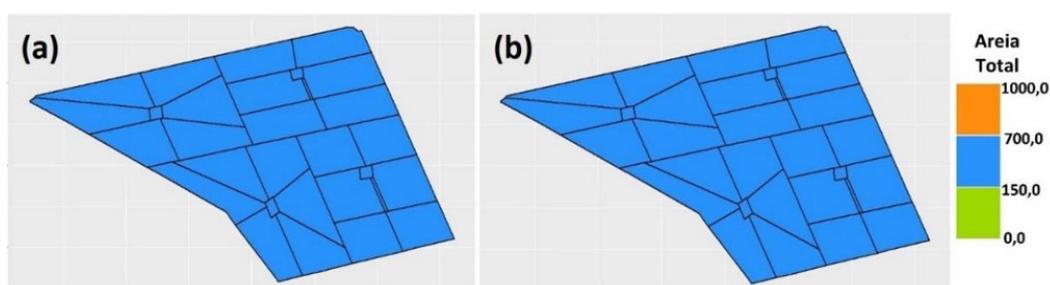


Figura 7. Variabilidade espacial da quantidade de areia (g kg^{-1}) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m.

igual a $83,77 \text{ mmolc dm}^{-3}$ e, na subsuperfície, um valor médio igual a $63,00 \text{ mmolc dm}^{-3}$ (Tabela 1).

Esse resultado está diretamente associado aos obtidos para o teor de MO na área. De acordo com Baldotto e Baldotto (2018), aumentos nos níveis de MO melhoram a fertilidade do solo, uma vez que promovem alterações nas suas propriedades, dentre elas a CTC. A respeito da variabilidade espacial obtida para esse atributo na superfície, verifica-se que os maiores teores de CTC foram obtidos, em sua maioria, nas

áreas correspondentes ao sistema ILPF, o que se justifica pelo fato de que nesse sistema há uma maior diversificação de resíduos vegetais devido ao fato de ele integrar todos os tipos de sistemas (lavoura-pecuária-floresta).

No que diz respeito à areia, notou-se que em ambas as profundidades a quantidade de areia no solo se manteve no intervalo de 150 a 700 g kg^{-1} , com uma média de $551,00 \text{ g kg}^{-1}$ na superfície e uma média de $560,42 \text{ g kg}^{-1}$ na subsuperfície (Tabela 1), o que mos-

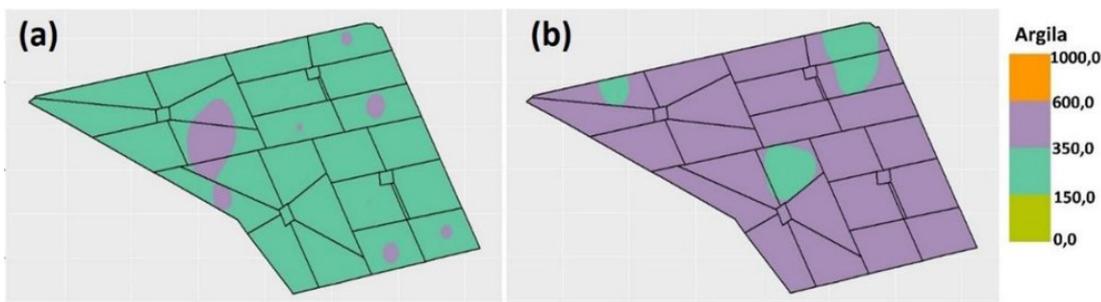


Figura 8. Variabilidade espacial da quantidade de argila (g kg^{-1}) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m.

tra que não houve variabilidade espacial do atributo na área em estudo (Figura 8), e que os valores obtidos em superfície não diferiram dos obtidos em subsuperfície. Já para a quantidade de argila, os valores obtidos na superfície foram inferiores aos obtidos na subsuperfície (Figura 9). Na profundidade 0-0,2 m, o teor de argila na maior parte da área esteve localizado no intervalo de 150 a 350 g kg^{-1} , com uma média de $339,70 \text{ g kg}^{-1}$ e, na profundidade 0,2-0,4 m, o teor de argila esteve, na maior parte da área, no intervalo de 350 a 600 g kg^{-1} , com uma média de $391,58 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 1). De forma geral, nas duas camadas do solo não foi observada diferença significativa entre os dois sistemas produtivos.

Nos mapas gerados pela interpolação espacial para a RE do solo, é possível notar que houve aumento da resistividade com o aumento da profundidade (Figura 10). Na camada mais superficial do solo, por exemplo, notou-se uma média de resistividade de $366,79 \Omega \text{ m}$, enquanto na camada mais profunda essa média foi de $930,00 \Omega \text{ m}$ (Tabela 2). Além disso, para esse atributo não foi observada uma diferença entre os sistemas ILPF e IPF, uma vez que a distribuição dos valores se manteve homogênea nos dois sistemas, para as três profundidades avaliadas.

Bernardi et al. (2019), ao estudarem a RE do solo em sistema agropecuário integrado, verificaram que ela diminui com o aumento da umidade, um padrão também observado por Samouëlian et al. (2005). Dessa forma, como as camadas superficiais detêm maior quantidade de água, isso impacta diretamente na menor resistividade dessa camada do solo. Os valores baixos da resistividade observados na superfície do solo em ambos os sistemas, dessa forma, podem ser justificados a uma maior umidade dessa camada do solo, o que, por sua vez, está associado à presença da vegetação nos sistemas (Fonseca et al., 2018).

Além disso, também é possível associar os valores baixos de RE na superfície do solo à valores menores de temperatura nos sistemas integrados, uma vez que

temperaturas baixas provocam menor evaporação da água do solo, impactando diretamente na condutividade elétrica, diminuindo assim a sua resistividade (Santos et al., 2020). A temperatura mais amena, por sua vez, também é justificada pela presença da vegetação nos sistemas.

Por fim, as características físicas do solo não impactaram na sua resistividade. Na área de estudo, a análise física possibilitou concluir a respeito da maior quantidade de argila na subsuperfície quando comparada à superfície, o que, de acordo com Becegato e Ferreira (2005), está associado a menores valores de RE. Entretanto, na área, notou-se um aumento de resistividade com o aumento da profundidade, ou seja, maiores quantidades de argila não levaram a menores valores de resistividade, o que pode estar sendo ocasionado pela baixa umidade nessa camada do solo.

Sobre os atributos da vegetação, observando os mapas de variabilidade espacial da altura dos eucaliptos (Figura 11), verifica-se que, no ano de 2021, as árvores tinham maior altura, de forma geral, no sistema ILPF. A diferença entre esse sistema e o IPF, entretanto, não foi significativa. Considerando a área como um todo, a altura média dos eucaliptos nesse período foi de $32,77 \text{ m}$ (Tabela 3). Já no ano de 2022, a diferença entre as alturas dos eucaliptos, nos dois sistemas, foi ainda menor, podendo-se considerar que a variável se distribuiu de maneira mais homogênea em toda a extensão dos sistemas, com uma média de altura de $34,04 \text{ m}$ (Tabela 3).

Em relação aos dados de DAP, no ano de 2021, o comportamento da variável também ocorreu de forma relativamente homogênea em toda a área, não havendo diferença significativa entre os dois sistemas, com uma média de DAP das árvores de $33,98 \text{ cm}$ (Tabela 3). Em 2022, entretanto, foi possível notar valores pouco menores de DAP no sistema ILPF, sendo a média de DAP dos eucaliptos para os dois sistemas integrados de $36,26 \text{ cm}$ (Figura 11 e Tabela 3).

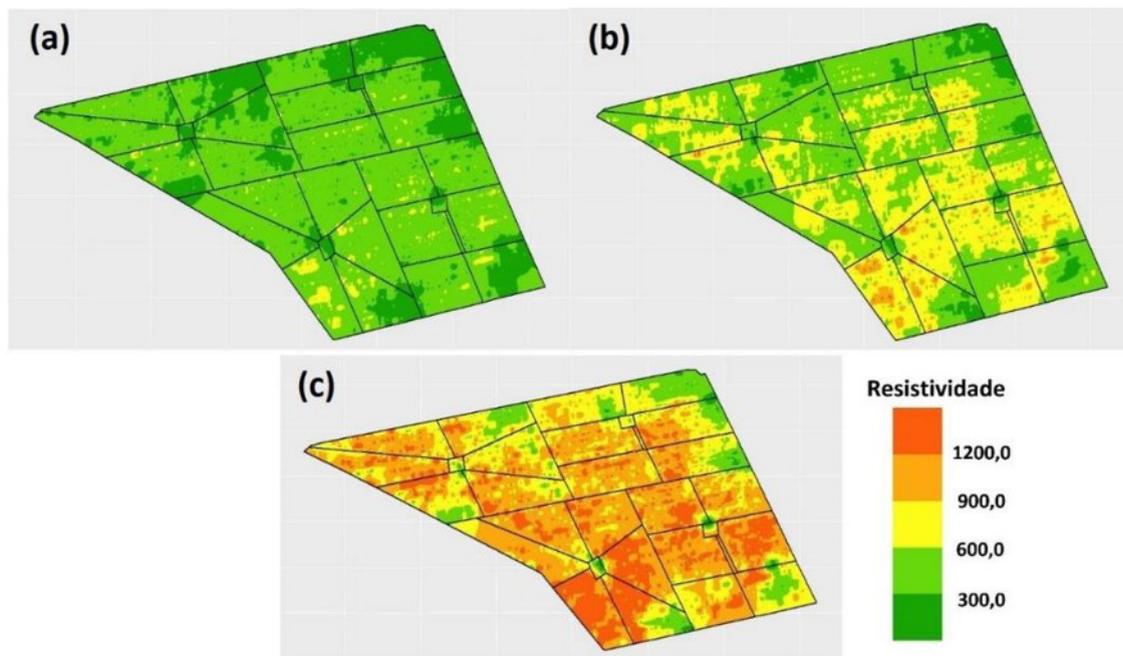


Figura 9. Variabilidade espacial da resistividade elétrica do solo (RE) (Ω m) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,5 m. (b) Profundidade 0-1,0 m. (c) Profundidade 0-2,0 m.

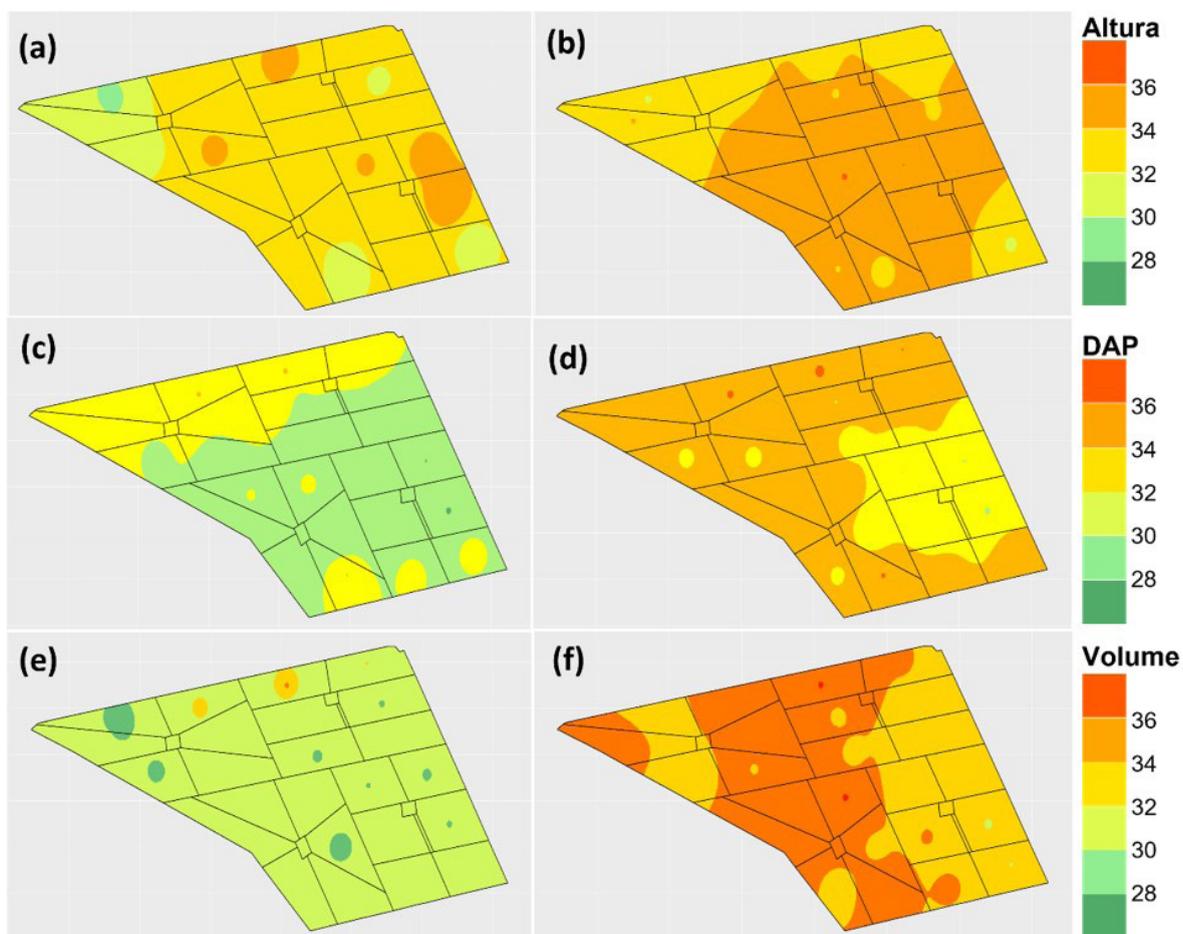


Figura 10. Variabilidade espacial da altura (m), do diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e do volume (m^3) de árvores de eucalipto na área de estudo. (a) Altura em abril/2021. (b) Altura em abril/2022. (c) DAP em abril/2021. (d) DAP em abril/2022. (e) Volume em abril/2021. (f) Volume em abril/2022.

Tabela 2. Estatística descritiva da resistividade elétrica do solo (RE) (Ω m) em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil.

Medidas estatísticas	RE (0-0,5 m)	RE (0-1,0 m)	RE (0-2,0 m)
Média	366,79	552,95	930,00
Desvio padrão	132,08	199,80	317,01
Mínimo	9,03	18,44	96,66
Máximo	727,74	1094,09	1782,50
CV (%)	36,01	36,13	34,09
Curtose	2,75	2,76	2,77
Assimetria	0,17	0,08	0,05

Tabela 3. Estatística descritiva de atributos da vegetação (altura (m), diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e volume (m³) de eucaliptos) do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e do sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil.

Medidas estatísticas	Abril/2021			Abril/2022		
	Altura	DAP	Volume	Altura	DAP	Volume
Média	32,77	33,98	1,25	34,03	36,29	1,46
Desvio padrão	1,60	1,65	0,11	1,81	1,84	0,11
Mínimo	29,20	31,00	1,10	29,70	32,90	1,24
Máximo	35,80	37,00	1,57	37,10	39,80	1,68
CV (%)	4,87	4,85	8,42	5,30	5,06	7,63
Curtose	2,69	2,30	5,32	2,88	2,26	2,51
Assimetria	-0,19	0,13	1,37	-0,49	0,03	0,09

Por fim, a partir dos mapas de variabilidade espacial dos dados de volume de eucaliptos na área de estudo (Figura 11) verificou-se que, em 2021, o volume médio das árvores foi de 1,25 m³ (Tabela 3), não havendo diferença entre os dois sistemas produtivos. Já em 2022, o volume médio dos eucaliptos aumentou para 1,46 m³ (Tabela 3), sendo que no IPF o volume das árvores foi pouco maior que no ILPF (Figura 11).

O *Eucalyptus urograndis* é o híbrido utilizado na área de estudo, sendo ele proveniente do cruzamento *E. grandis* x *E. urophylla* (Faria et al., 2013). É particularidade do *E. grandis* o crescimento em altura e do *E. urophylla* o crescimento em diâmetro, e essas duas qualidades juntas promovem melhorias no rendimento e uma madeira de boa qualidade (Brigatti et al., 1980). Além disso, as árvores oriundas do cruzamento dessas espécies tendem a crescer de forma mais homogênea nos dois parâmetros. O *E. urograndis* tem uma fácil adaptabilidade, e seus problemas referentes a fertilidade, compactação e acidez podem ser corrigidos através do manejo (Higa et al., 2000). Com o manejo feito na área de forma correta, o crescimento das árvores foi relativamente homogêneo, conforme já esperado.

4 CONCLUSÕES

Com relação aos atributos químicos do solo, observaram-se valores maiores de CTC no sistema ILPF, na camada superficial do solo. Na subsuperfície, entretanto, não foi observada diferença entre os sistemas produtivos. Já para a MO, foi verificada baixa variabilidade espacial, sendo que em uma pequena extensão do sistema ILPF os seus valores foram menores quando comparados ao sistema IPF. Para ambos os atributos químicos, notou-se diminuição dos valores obtidos com o aumento da profundidade.

Por sua vez, não foi observada diferença entre os sistemas com relação aos atributos quantidade de areia e quantidade de argila no solo. Notou-se, entretanto, que a argila aumentou com o aumento da profundidade, o que não ocorreu para a quantidade de areia, que se manteve a mesma nas duas camadas do solo.

Com relação à RE do solo, notou-se que ela cresceu com o aumento da profundidade, não havendo diferença significativa entre os dois sistemas produtivos.

Sobre os atributos da vegetação, verificou-se que, no ano de 2021, os maiores valores de altura de eucaliptos foram observados no sistema ILPF e, no ano de

2022, não se notou diferença entre os dois sistemas quanto a esse atributo. Já para os dados de DAP, em 2021, não houve diferença entre os sistemas produtivos e, em 2022, valores maiores de diâmetro das árvores foram observados no sistema IPF. E, por fim, sobre as medidas de volume, em 2022 os valores foram maiores que em 2021, sendo que no primeiro ano não houve diferença entre os dois sistemas produtivos e, no segundo, houve uma pequena diferença entre eles, sendo o volume das árvores pouco maior no sistema IPF. A diferença observada para os parâmetros de vegetação, entretanto, não foi significativa conforme as classes dos mapas, concluindo-se que, de modo geral, o crescimento tanto na altura, como no DAP e no volume foi relativamente homogêneo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Embrapa (Projetos Rede Pecus, Rede AP e Carne Carbono Neutro), à Fapesp (2023/02444-5 pelo suporte financeiro necessário à condução dos trabalhos experimentais). Esta pesquisa foi desenvolvida no âmbito do Projeto Rural Sustentável – Cerrado, fruto da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o governo do Reino Unido, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e a Rede ILPF e Embrapa.

REFERÊNCIAS

BALBINO, L. C.; KICHEL, A. N.; BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações. In: BUNGENSTAB, D. J. (ed.). **Sistemas de integração: a produção sustentável**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012.

BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Relationships between soil quality indicators, redox properties, and bioactivity of humic substances of soils under integrated farming, livestock, and forestry. **Revista Ceres**, v. 65, n. 4, p. 373-380, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1590/0034-737x201865040010>.

BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 371-405, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000400004>.

BERNARDI, A. C. C.; PITRAT, T.; RABELLO, L. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; MAZZUCO, G. G.; BETTIO, G. M. Diferenças na tomografia da resistividade elétrica do solo devido aos níveis de água em sistema agropecu-

ário integrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, n. e00774, 2019.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; MAZZUCO, G. G.; ESTEVES, S. N.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Spatial variability of soil fertility in an integrated crop livestock forest system. **Advances in Animal Biosciences: Precision Agriculture**, v. 8, n. 2, p. 590-593, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1017/S2040470017001145>.

BRIGATTI, R. A. M.; SILVA, A. P.; FREITAS, M. **Estudo comparativo do comportamento de alguns híbridos de Eucalyptus ssp.** IPEF: Piracicaba, 1980. (Circular Técnica, n. 123)

CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. D. S.; FONSECA, O. O. M.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP: levantamento semidetalhado, propriedade e potenciais.** Embrapa, CNPS: São Carlos, 1998.

CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, v. 1, n. 1, p. 5-14, 1999. DOI: <http://doi.org/10.1023/A:1009925919134>.

FARIA, J. R.; SILVA, J. F.; NERIS, K. P.; LOPES, F. L. R.; SILVA, M. C.; LISBOA, E. S.; RODRIGUES, J.; CENTENO, A. J.; LOPES, F. M. Desenvolvimento de eucalipto urograndis no município de corumbá-GO. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, Rio Verde, v. 17, n. 2, p. 09-27, 2013.

FLEMING, K. L.; WESTFALL, D. G.; WIENS, D. W.; BRODAHL, M. C. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. **Precision Agriculture**, v. 2, n. 2, p. 201-215, 2000. DOI: <http://doi.org/10.1023/A:1011481832064>.

FONSECA, R. R.; BARBOSA, K. S. S.; JESUS, K. E.; SILVA, L. M.; SOUSA, N. T. B.; SILVA, G. R.; PAULETTO, D.; OTAKE, M. Y. F. Densidade e umidade do solo em sistemas agroflore-restais. **Agroecossistemas**, v. 10, n. 2, p. 367-374, 2018. DOI: <http://doi.org/10.18542/ragros.v10i2.5171>.

FREITAS, I. C.; FRAZÃO, L. A.; FERREIRA, E. A.; CABRAL, C. M. Como os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta influenciam a dinâmica da matéria orgânica do solo? **Revista Vozes dos Vales**, v. 5, p. 1-13, 2020.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: **BERNARDI, A. C. C. et al. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.** Brasília, DF: Embrapa, p. 74-83, 2014.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0102-77862011000400009>.

HIGA, R. C. V.; MORA, A. L.; HIGA, A. R. **Plantio de eucalipto na pequena propriedade rural.** Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 31 p.

- MARIA, I. C.; COELHO, R. M.; ABREU, M. F.; CANTARELLA, H. **Métodos de análise física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2021. 33 p.
- MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 925-933, 2003. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500017>.
- MULLER, M. D.; MARTINS, C. E.; BRIGHENTI, A. M.; MORENZ, M. J. F.; ROCHA, W. S. D. da; SOUZA SOBRINHO, F. de; CALSAVARA, L. H. F.; ANDRADE, P. J. M.; MACHADO, A. F. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta como alternativa para produção pecuária leiteira sustentável em áreas declivosas. In: MARTINS, P.; PICCININI, G. A.; KRUG, E. E. B.; MARTINS, C. E.; LOPES, F. C. F. (eds.). **Sustentabilidade ambiental, social e econômica da cadeia produtiva do leite: desafios e perspectivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 39-49, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7>.
- PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350>.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 23 jan 2023.
- SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil & Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173-193, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>.
- SANTOS, V. H. N.; MORBACH, M. L.; TEIXEIRA, L. P. Fatores que afetam a resistividade elétrica do solo. **Revista Tecnológica da FATEC-PR**, v. 1, n. 11, 2020.
- STOCKMANN, U.; ADAMS, M. A.; CRAWFORDA, J. W.; FIELDA, D. J.; HENAKAARCHCHI, N.; JENKINS, M.; MINASNYA, B.; MCBRATNEYA, A. B.; COURCELLES, V. R.; SINGHA, K.; WHEELER, I.; ABBOTT, L.; ANGERS, D. A.; BALDOCK, J.; BIRDE, M.; BROOKES, P. C.; CHENUG, C.; JASTROWH, J. D.; LAL, R.; LEHMANN, J.; O'DONNELL, A. G.; PARTON, W. J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANN, M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 164, p. 80-99, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>.
- TORRES, C. M. M. E.; JACOVINE, L. A. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; BRIANEZI, D.; ALVES, E. B. B. M. Sistemas Agroflorestais no Brasil: Uma abordagem sobre a estocagem de carbono. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 235-244, 2014. DOI: <http://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.79.633>.
- VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.
- WATSON, D. F.; PHILIP, G. M. A refinement of inverse distance weighted interpolation. **Geoprocessing**, v. 2, p. 315-327, 1985.