



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Variabilidade espacial dos micronutrientes, granulometria e susceptibilidade magnética do solo em área de bananeira com e sem incorporação de calcário

Alex Pinto de Matos¹, Sammy Sidney Rocha Matias², Jacqueline Sousa Paes Landim³, Thaís Paula Martins Nunes³

¹Drem Agronomia pela Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG, Campus Uvaranas - Av. General Carlos Cavalcanti, 4748, CEP 84030-900 - Uvaranas, Ponta Grossa-PR, Brasil. E-mail: alex-pinto-1@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-1958-6449>); ²Prof. Dr. da Universidade Estadual do Piauí – UESPI/Campus Dep. Jesualdo Cavalcanti Barros, Corrente-PI, Brasil. E-mail: ymmsa2001@yahoo.com.br (<https://orcid.org/0000-0002-5729-3284>); ³Doutoranda em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Cinobelina Elvas, Endereço: BR 135, Planalto Horizonte, s/n, Bom Jesus – PI, CEP: 64900-000. E-mail: agrolandim_jacqueline93@outlook.com (<https://orcid.org/0009-0006-7843-4935>); thays-paulla@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-5729-3284>).

Artigo recebido em 14/05/2024 e aceito em 20/06/2024

RESUMO

A susceptibilidade magnética do solo vem sendo utilizada como um pedoindicador, associado aos atributos químicos e físicos do solo como alternativa para determinação da variação da paisagem, fato que pode auxiliar no planejamento da amostragem. Objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de calcário em área de produção de banana, com a variabilidade espacial dos micronutrientes, Cu, Fe, Mn e Zn, granulometria e sua relação com a susceptibilidade magnética do solo no Cerrado piauiense. Em um pomar de bananeiras, foram coletadas 42 amostras de solo na profundidade de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, com um grid de 30 x 35 m. Os atributos avaliados foram a susceptibilidade magnética, micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) e frações granulométricas do solo (argila, areia e silte). Foi realizada análise descritiva e geoestatística dos dados e correlação de Pearson para resumir, sumarizar e explorar o comportamento dos dados. A susceptibilidade magnética correlacionou-se com mais de 80% das variáveis nas duas profundidades e áreas com e sem incorporação de calcário. Os mapas de variabilidade mostram claramente a distribuição e concentração dos nutrientes no solo, permitindo intervenções nas operações de fertilização da área, possibilitando aplicação de insumos em taxas variadas visando sua homogeneização.

Palavras-chave: Calcário, Agricultura de precisão, Magnetização, Geoestatística, *Musa spp.*

Spatial variability of micronutrients, granulometry and magnetic susceptibility of soil *Musa* area with and without limestone incorporation

ABSTRACT

The magnetic susceptibility of the soil has been used as a pedoyand, associated with the chemical and physical attributes of the soil as an alternative to determine the landscape variation, a fact that can help in sampling planning. It was aimed to evaluate the effect of limestone application in banana production area, with the spatial variability of micronutrients, Cu, Fe, MN and Zn, granulometry and its relationship with the magnetic susceptibility of the soil in the Piaui Cerrado. In a banana orchard, 42 soil samples were collected at a depth of 0.00-0.20 and 0.20-0.40 m, with a grid of 30 x 35 m. The assessed attributes were magnetic susceptibility, micronutrients (Cu, Fe, Mn and Zn) and soil granulometric fractions (clay, sand and silt). Descriptive and geostatistical analysis of the data and correlation of Pearson was performed to summarize, summarize and explore data behavior. Magnetic susceptibility correlated with more than 80% of the variables in both depths and areas with and without limestone incorporation. Maps of variability clearly show the distribution and concentration of nutrients in the soil, allowing interventions in fertilization operations of the area, enabling application of inputs at varying rates aiming at their homogenization.

Keywords: Limestone, Precision Agriculture, Magnetization, Geostatistics, *Musa spp.*

Introdução

A dinâmica dos solos do Cerrado em especial do Estado do Piauí, vem demonstrando que a implantação de uma agricultura sem conhecimento prévio dos atributos químicos,

físicos, biológicos e até mineralógicos do solo, influencia na produção dessa região quando comparada as demais regiões de Cerrado do Brasil.

O conhecimento da variabilidade dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo é de

suma importância pois exercem grande influência no processo produtivo das culturas, a região de Cerrado piauiense sofre com a variação da sua produção agrícola, devido a implantação de áreas agrícolas sem levar em consideração o conhecimento da variabilidade e dinâmica do solo. De acordo com Matias et al. (2015b), apesar dos solos do Cerrado piauiense serem predominantemente classificados como Latossolos, isso não garante que tenham características químicas e físicas iguais em toda a sua extensão, devendo assim ser levado em consideração a variabilidade espacial do solo, adotando manejos de acordo com a variação e necessidade desses solos, e quando possível aplicando os nutrientes a taxa variável.

Os solos do Cerrado piauiense, apresentam uma baixa fertilidade natural, marcada pela presença de alumínio. Desta forma no intuito de aumentar a fertilidade dessas áreas e ainda otimizar o sistema produtivo é feita a aplicação de calcário para correção de acidez dessas áreas (Matos et al., 2022). Segundo Caires et al. (2015), a aplicação de calcário na superfície em solos brasileiros tem indicado aumentos de pH e dos teores de Ca e Mg trocáveis e redução do Al trocável até camadas de 20-40 cm, no entanto Conyers et al. (2003) ressalta que o aumento do pH, bases trocáveis e a dinâmica de disponibilidade dos nutrientes do solo depende da dose e do tipo de calcário aplicado, forma de aplicação, e ainda das propriedades físicas (teores de argila e porosidade), matéria orgânica do solo e regime hídrico de cada região. A forma da aplicação do calcário interfere na dinâmica dos nutrientes no solo, conseqüentemente, no aumento do pH, que é fator primordial para disponibilidade dos nutrientes.

Dentre esses nutrientes, destaca-se os micronutrientes, que são elementos essenciais ao crescimento e desenvolvimento da cultura, porém requeridos em menores quantidades pelas plantas quando comparados aos macronutrientes (Cantwell-Jones et al., 2022). Além disso, a disponibilidade de cobre (Cu), o ferro (Fe), o manganês (Mn) e o zinco (Zn) pode ser influenciada pela aplicação de fertilizantes, assim como práticas de cultivo que incorporam resíduos de culturas no solo (Wei et al., 2006) o que requer atenção especial.

As formas como os micronutrientes estão disponíveis, para serem absorvidos pelas plantas, pode estar associado a composição do material de origem e as formas de adubação do solo. Segundo

Qiang et al. (2011) a disponibilidade de micronutrientes no solo é afetada pelo pH, condições redox e teor de matéria orgânica.

Apesar da importância dos micronutrientes para cultura, a implantação da coleta do solo via a técnica da geoestatística, levando em conta a disponibilidade espacial na área, pode ser inviável, decorrente do número de amostras e demanda pela cultura destes nutrientes. Para amenizar essa forma, diversos autores (Santos et al., 2013, Matias et al., 2015a, Barrios et al., 2017, Barros et al., 2022) vêm utilizando a susceptibilidade magnética como um pedoindicador, associando aos atributos químicos e físicos do solo. A susceptibilidade magnética reflete a magnetização ou sua ausência do solo, que é oriundo do material de origem.

Segundo Matos et al. (2022 e 2023), o emprego da técnica da geoestatística associado à susceptibilidade magnética demonstrou-se eficiente na identificação da correlação com os atributos químicos e granulométricos. Ainda foi eficiente na identificação de zonas de manejo específica, podendo auxiliar no planejamento das áreas e na amostragem.

Neste sentido, a ausência ou poucas informações sobre a variabilidade espacial dos micronutrientes, susceptibilidade magnética e atributos físicos do solo no Cerrado piauiense e sua relação com aplicação de calcário, motivou a implantação deste estudo. O presente trabalho teve como objetivo, avaliar o efeito da aplicação de calcário em área de produção de banana, com a variabilidade espacial dos micronutrientes, Cu, Fe, Mn e Zn, granulometria e sua relação com a susceptibilidade magnética do solo no Cerrado piauiense.

Material e métodos

Caracterização da área de estudos e amostragem

O trabalho foi realizado em um pomar de banana localizado no município de Cristino Castro, Estado do Piauí, com altitude de 223 m e coordenadas geográficas latitude Sul 8° 49' e longitude oeste 44° 13' (Figura 1). A área de estudo está localizada em uma região de transição entre Cerrado e Caatinga. O clima, segundo a classificação de Koppen (1936) é do tipo Aw, com estação seca no inverno e verão quente e chuvoso, com temperatura média de 27 °C e precipitação média anual acumulada de 900 mm.

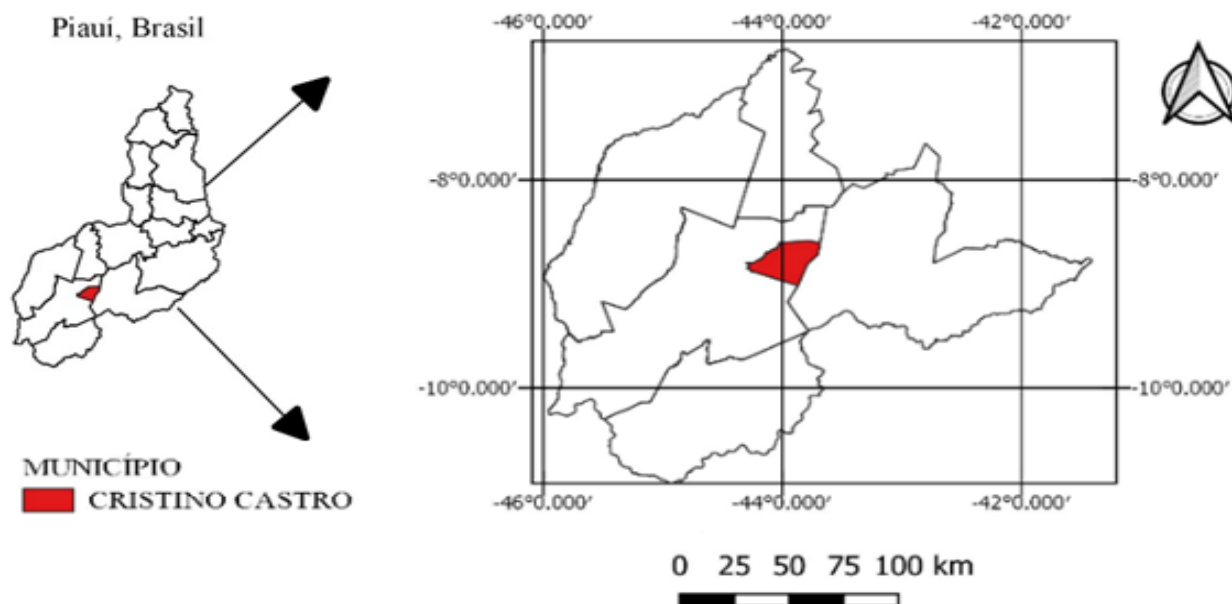


Figura 1. Localização do município de Cristino Castro. Fonte: Autores, adaptado de Matos et al. (2023).

As amostras de solos foram coletadas em uma área de 5 ha, implantada com pomar de bananeira com as espécies *Musa sapientum* e *Musa acuminata* com plantio em fileiras simples com espaçamento de 3 m entre plantas e 5 m entre linhas irrigadas por aspersão há dois anos.

A área experimental foi subdividida em duas subáreas diferenciadas devido o modo de aplicação de calcário. Em uma subárea com 2,5 ha, foi aplicado 4 t ha⁻¹ de calcário dolomítico nas linhas de plantio sem incorporação. Na segunda subárea também com 2,5 ha, foi realizada aplicação de 4 t ha⁻¹ do mesmo calcário em área total e posteriormente incorporado ao solo. Para suprir a necessidade de nutrientes, mensalmente, foram aplicados 50 kg ha⁻¹ do formulado 20-00-20 por meio da fertirrigação. Ainda foi realizada a aplicação de 0,2 kg de superfosfato simples e 0,2 kg de fosfato monoamônico por cova.

Em toda área de estudo foram demarcados 42 pontos devidamente georreferenciados com malha amostral de 35x30 m onde, em cada subárea foram retiradas 21 (pontos) amostras de solos compostas. A amostragem foi realizada nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, totalizando 84 amostras nas duas áreas e profundidades. Cada amostra composta foi resultante de cinco amostras simples distanciadas a 0,50 m da planta mãe. Após a coleta, as amostras de solos foram encaminhadas ao laboratório, onde foram secas ao ar e peneirada em malha de 2 mm. Em seguida, foi determinado os micronutrientes,

cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) conforme metodologia proposta por Teixeira et al. (2017).

A granulometria da argila, areia e silte, foram determinados pelo método da pipeta, utilizando NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica em baixa velocidade por 16 h (Teixeira et al., 2017).

Para a determinação da susceptibilidade magnética (SM), pesou-se 10 g de solo (TFSA) de cada amostra, colocou-se em um recipiente e depois se procedeu a leitura por meio do aparelho Bartington MS2 em baixa frequência, os valores das leituras obtidas foram submetidos a equação 01, definida por Dearing (1999):

$$SM = L / (10 \times PA) \quad \text{Equação 01}$$

Em que:

SM é o valor de susceptibilidade magnética (10⁻⁶ m³ kg⁻¹);

L é a leitura obtida do aparelho;

PA é o peso da amostra (g).

Os dados dos atributos foram analisados por meio da estatística descritiva, por meio das medidas de localização, coeficiente de variação (CV) e de tendência central analisando a assimetria e curtose, valores máximo, mínimo e amplitude com o software Minitab®. Para verificar a normalidade dos atributos avaliados foi realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov. O CV foi classificado conforme Warrick & Nielsen (1980),

onde os valores de CV abaixo de 12% são considerados baixos, os valores entre 12% e 60% são considerados médios, e valores acima de 60% são classificados como alto.

Foi realizada a correlação linear de Pearson nos atributos do solo estudados. As correlações entre as variáveis analisadas pela correlação de Pearson ($p < 0,05$) foram determinadas, adotando-se a classificação proposta por Figueiredo Filho & Silva Júnior (2009) como fraca ($0,1 > r \leq 0,3$), moderada ($0,4 > r \leq 0,6$) e forte ($0,7 > r \leq 1,0$). Assim, uma boa correlação linear entre duas variáveis deve ter um coeficiente de correlação com valores pelo menos acima de +0,60 (correlação positiva), ou abaixo de -0,60 (correlação negativa).

Foram ajustados os semivariogramas com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca para analisar a dependência espacial dos atributos. Para os ajustes dos semivariogramas utilizou-se o programa GS⁺® na qual foram testados os esféricos, exponencial e ou gaussiano para verificar os que melhor se ajustavam. A escolha dos modelos foi realizada

observando-se a soma do quadrado dos resíduos (SQR), o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de correlação, obtido pela técnica da validação cruzada (CRVC). A variabilidade espacial dos atributos do solo foi mapeada pelo método de interpolação por krigagem. Conforme modelos ajustados desta forma foi realizado a predição de cada atributo em zonas não amostradas utilizando o programa Surfer®.

Para cada atributo avaliado foram determinados o alcance e o grau da dependência espacial (GDE). O GDE foi classificado com base na razão entre o efeito pepita e o patamar, por meio da fórmula matemática $(C_0/C_0+C_1) \cdot 100$ conforme Cambardella et al. (1994), em que os valores inferiores a 25% são considerados forte, valores entre 25% e 75% são considerados dependência moderada e valores superior a 75% são considerados dependência fraca.

Nos mapas da distribuição espacial dos atributos químicos do solo os teores foram interpretados segundo a descrição da Tabela 1.

Tabela 1. Interpretação dos resultados de análise de micronutrientes no solo para a cultura da bananeira

Variáveis	Classificação Agrônômica			
	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto
B ⁽¹⁾ mg kg ⁻¹	≤ 0,15	0,16 – 0,35	0,36 – 0,60	> 0,60
Cu ⁽²⁾ mg dm ⁻³	≤ 1,0	1,1 – 3,0	3,1 – 6,0	> 6,0
Fe ⁽²⁾ mg dm ⁻³	≤ 30	31 - 50	51 - 100	> 100
Mn ⁽²⁾ mg dm ⁻³	≤ 5	5 - 8	9 - 12	> 12
Zn ⁽¹⁾ mg dm ⁻³	≤ 0,4	0,5 – 0,9	1,0 – 1,5	> 1,5

⁽¹⁾Alvarez V. et al. (1999); ⁽²⁾Moreira et al. (2005)

Resultados e discussão

Analizando os dados descritos na Tabela 2, observa-se que a maioria dos atributos químicos estudados em ambas as profundidades, não apresentaram ajuste de distribuição normal, ou seja, os dados não mostram valores de média e mediana semelhantes. Essa distribuição anormal foi mais frequente na área em que houve a incorporação do corretivo, indicando que a perturbação pode alterar ou modificar a distribuição dos atributos químicos do solo.

Importante destacar que a normalidade permite identificar o tipo de distribuição dos dados. No entanto, segundo Isaaks & Srivastava (1989) a normalidade dos dados não é uma exigência da

geoestatística, o que permite a análise de forma detalhada da variabilidade dos atributos do solo bem como a possibilidade de verificar como ocorre essa variabilidade no espaço.

Os atributos físicos, entretanto, aprestaram tendência de distribuição normal em ambas as áreas na profundidade de 0,00-0,20 m, isso porque, geralmente, esses atributos não apresentam variações abruptas no espaço o que mantém os valores de média e mediana mais próximos (Tabela 2).

Importante destacar que alguns atributos químicos como os micronutrientes Zn, Cu, Mn, e Fe, apresentaram seus valores médios distintos quando comparado as duas formas de aplicação em

ambas as profundidades, esse mesmo comportamento foi observado para os teores de silte e SM principalmente na profundidade de 0,00-0,20 m (Tabela 2).

Em relação ao coeficiente de variação (CV), 53% dos dados foram classificados com CV moderado, variando entre 12 e 60%, enquanto 47%

dos dados apresentam alto coeficiente de variação, conforme a classificação de Warrick & Nielsen (1980). Segundo Matias et al. (2015b), a alta variabilidade dos atributos químicos está associada as interações dos processos de formação do solo e das práticas de manejo, como, a aplicação de corretivos e fertilizantes.

Tabela 2. Análise descritiva dos micronutrientes, granulométrico e susceptibilidade magnética do solo em área com e sem incorporação de calcário, em duas profundidades.

Atributos	Áreas	Méd	Med	Min.	Máx	Coeficientes			N
						Ass	Curt	CV (%)	
Profundidade de 0,00-0,20 m									
Cu	I	0,75	0,10	0,0	11,88	20,35	4,48	338,19	21
	NI	0,25	0,23	0,0	0,55	-0,42	0,29	58,55	21
Fe	I	68,6	49,7	19,6	235,6	3,24	1,90	81,45	21
	NI	129,1	115,5	46,0	275,5	-0,43	0,77	54,48	21
Mn	I	89,6	66,5	20,1	309,1	3,79	1,86	78,20	21
	NI	48,99	57,01	5,46	82,58	-0,83	-0,66	50,31	21
Zn	I	5,78	2,62	0,68	48,60	16,48	3,93	178,88	21
	NI	1,10	0,88	0,22	3,11	2,05	1,49	67,66	21
Argila	I	72,52	71,00	41,00	133,00	1,18	1,16	34,87	21
	NI	92,19	96,00	55,00	117,00	-0,95	-0,51	20,92	21
Areia	I	862,4	871,0	697,0	954,0	0,63	-0,88	8,42	21
	NI	803,4	789,0	697,0	900,0	-0,65	0,05	7,03	21
Silte	I	64,9	65,0	2,00	170,0	-0,20	0,56	77,11	21
	NI	104,48	106,00	41,00	186,00	-0,57	0,14	39,58	21
SM	I	14,90	15,00	1,00	35,00	-0,92	0,43	75,46	21
	NI	26,38	34,00	1,00	48,00	-1,35	-0,40	56,54	21
Profundidade de 0,20-0,40 m									
Cu	I	0,28	0,0	0,0	1,59	2,20	1,79	171,96	21
	NI	0,41	0,38	0,0	1,13	-0,06	0,71	77,27	21
Fe	I	71,7	51,3	17,5	205,1	0,35	1,28	85,66	21
	NI	107,82	103,33	44,05	202,95	-0,51	0,51	42,10	21
Mn	I	45,13	26,95	7,29	143,00	0,57	1,35	92,62	21
	NI	41,70	42,56	1,15	93,65	-0,19	-0,11	57,93	21
Zn	I	0,99	0,57	0,02	3,49	1,46	1,54	105,18	21
	NI	0,53	0,43	0,01	1,95	4,99	1,86	79,47	21
Argila	I	87,7	77,0	41,0	237,0	4,22	2,04	55,02	21
	NI	139,3	136,0	48,0	398,0	9,91	2,61	49,89	21

Areia	I	823,8	831,0	506,0	945,0	3,13	-1,67	13,07	21
	NI	743,0	725,0	591,0	950,0	1,33	0,78	10,69	21
Silte	I	88,5	82,0	14,0	257,0	1,84	1,26	69,17	21
	NI	118,0	136,0	2,00	205,0	1,27	-0,95	41,27	21
SM	I	18,05	17,00	2,00	80,00	5,94	2,15	101,54	21
	NI	37,67	43,00	2,00	68,00	-1,44	-0,29	55,08	21

N = Número de amostras, I = Incorporação de calcário, NI = Não incorporação de calcário, CV: Coeficiente de Variação; Méd = média, Med: mediana, Max = valores máximos, Mín = valores mínimos, Ass: Assimetria; Curt: Curtose.

Fonte: Autores (2023).

A variabilidade dos atributos do solo também pode ser influenciada ou definida pela amplitude entre os valores mínimos e máximos bem como a frequência em que os valores ocorrem. Conforme os dados demonstrados na Tabela 2, é possível observar que os atributos na qual apresentaram CV considerado alto, a amplitude foi bem mais elevada quando comparada com as variáveis com CV baixo, resultado semelhantes também foram observados nos estudos de Ramos et al. (2021) ao avaliar a susceptibilidade magnética na caracterização da variabilidade espacial de atributos do solo em solos subtropicais.

Os resultados da análise também mostram que o tipo de manejo influenciou consideravelmente a variabilidade dos micronutrientes analisados e na SM, na qual a área em que houve incorporação do corretivo, ou seja, onde houve revolvimento do solo, apresentou coeficientes de variação mais elevados quando comparado com a área sem revolvimento. Isso pode ser explicado porque, além de incorporar o calcário no solo, o revolvimento pode melhorar a capacidade de infiltração, assim como favorecer aos processos erosivos do solo, podendo ocasionar perdas de nutrientes (Biddoccu et al., 2020). Taghdis et al. (2021), relataram correlação negativa entre a SM e carbonato de cálcio, o que poderia explicar a redução dos valores médios desse atributo na área incorporada.

Entretanto, os valores médios dos micronutrientes, com exceção do Fe, foram mais elevados quando houve incorporação, levando a inferir que a calagem favoreceu para melhor disponibilidade desses nutrientes quando incorporado.

A curtose é outro parâmetro que deve ser analisado em um estudo de variabilidade espacial pois indicam a concentração dos valores de um conjunto de dados em relação às medidas de

tendência central em uma distribuição de frequências conhecida. Oliveira et al. (2021), destacam que os valores de curtose, como de assimetria, devem ser preferencialmente zero, no entanto valores de curtose que oscilem entre +2 e -2 são aceitos. De forma geral, os valores de curtose oscilaram entre os intervalos (+2 e -2), com exceção de Cu e Zn na área onde houve incorporação de calcário e argila para as áreas com e sem incorporação e silte para área onde foi incorporado calcário confirmando que o tipo de manejo pode influenciar na distribuição de atributos químicos do solo.

A estatística descritiva reflete um conjunto de variáveis ou parâmetros matemáticos que serve para validar os resultados obtidos em determinados estudos. Em estudos de variabilidade espacial a estatística univariada representada pela média, mediana, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo, assimetria e curtose, serve para estimar e verificar a existência de tendência central e a dispersão dos dados (Tabela 2).

Na Figura 2, é demonstrado a correlação de Pearson dos micronutrientes, granulometria e susceptibilidade magnética do solo, nas duas profundidades (0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m) em área com e sem incorporação de calcário. Verifica-se interação positiva e significativa para a maioria das variáveis ao nível $p < 0,01$, $p < 0,05$ e $p < 0,001$ de probabilidade, em ambas as profundidades e tipo de manejo adotado para calagem. Pode-se observar correlação positiva e significativa entre as variáveis na profundidade de 0,00-0,20 m, na área com calcário incorporado entre o Cu e Fe a nível de $p < 0,05$, e uma forte correlação entre Cu e Zn a nível de $p < 0,001$. O Fe correlacionou-se positivamente com as variáveis Zn e Argila, a nível de $p < 0,05$, no tocante a correlação entre Fe e argila pode-se enfatizar que os óxidos de ferro

principalmente hematita e goethita são comuns de serem encontrados na fração argila.

A argila apresentou forte correlação com silte e SM e forte correlação negativa com areia ($0,7 > e \leq 1,0$). A correlação da argila com a SM pode ser explicada em conjunto a correlação positiva entre Fe e argila, onde segundo Siqueira et al. (2010) os óxidos de ferro hematita e goethita são os óxidos de ferro mais comuns na fração argila de solos brasileiros, e estes possuem SM a níveis detectáveis, atrelado a essa afirmativa é pertinente enfatizar a correlação negativa e forte entre areia e SM ao nível de $p < 0,001$ obtida nesse estudo, Fontes et al. (1996) afirma que o comportamento magnético é mais evidente em solos cuja fração

argila é maior. Isso ocorre porque, na fração areia, a magnetita, é oxidada diretamente em hematita, enquanto na fração argila a magnetita é oxidada em maghemita.

O Mn apresentou uma forte correlação com a argila, silte e SM e negativa com areia, a nível de $p < 0,001$. Analisando a área de calcário não incorporado e as correlações na profundidade de 0,00-0,20 m, observa-se que Cu se correlacionou com e Fe, Mn, argila, silte e SM de forma positiva e negativa com areia, a nível de $p < 0,001$, e ainda apresentou correlação positiva com o Zn a nível de $p < 0,05$.

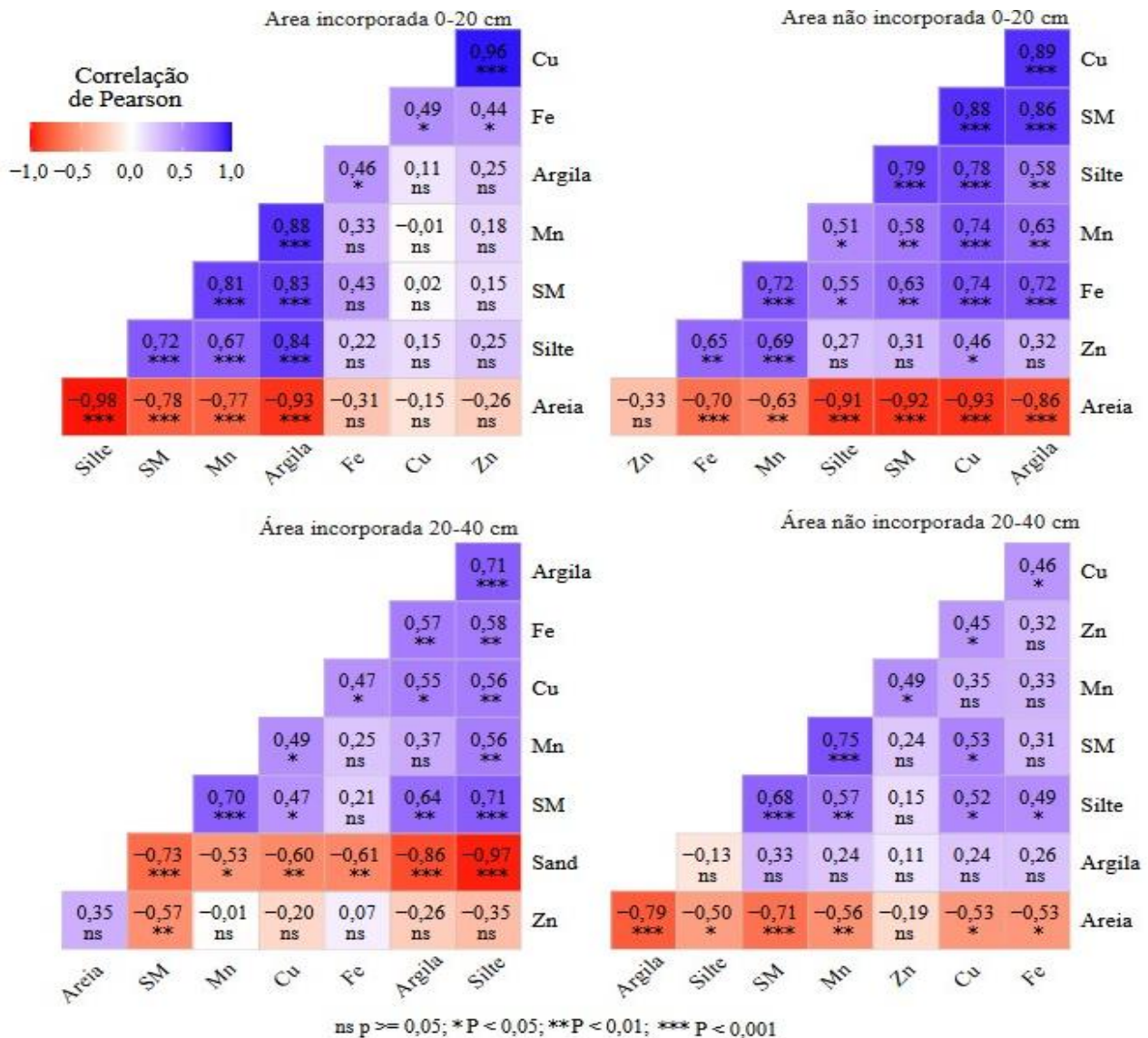


Figura 2. Correlação linear de Pearson entre os micronutrientes, granulometria e susceptibilidade magnética do solo em área com e sem incorporação de calcário, em duas profundidades.

Fonte: Autores (2023).

O Fe correlacionou-se positivamente com as variáveis argila, silte, Cu, Mn, Zn e SM e de forma negativa com areia. Importante destacar que o manejo da calagem também influenciou na expressão da SM no solo, uma vez que a correlação observada entre Fe e SM na área com calcário não incorporado não foi observada na área em que houve revolvimento do solo. O Mn com silte, argila, SM e Cu de forma positiva e negativa com areia. A argila apresentou correlação positiva com Fe, Mn, silte, SM e Cu e correlação forte e negativa com a areia ($0,7 > e \leq 1,0$). Areia apresentou correlação negativa e forte com todas as variáveis estudadas, com exceção do Zn onde não houve correlação significativa, enquanto o silte apresentou uma forte correlação positiva com SM.

Como demonstra a Figura 2, na profundidade de 0,20-0,40 m, com calcário incorporado, verifica-se que o Cu se correlacionou de forma positiva com Fe, Mn, argila, silte, SM e correlacionou-se negativamente com areia de forma forte, a nível de $p < 0,01$. O Fe apresentou correlação positiva com silte, argila e Cu e negativa com areia, a nível de $p < 0,01$. Mn correlacionou-se de forma positiva com silte, Cu e SM e negativa com Areia, a nível de $p < 0,05$.

A argila apresentou correlação positiva com Cu e SM e de forma negativa e forte com a areia ($0,7 > e \leq 1,0$). O silte correlacionou-se de forma positiva e forte com SM. A areia apresentou correlação negativa com todas as variáveis estudadas, com exceção do Zn onde não houve correlação significativa, da mesma forma como foi observada na área de não incorporação de calcário na profundidade de 0,00-0,20 m e incorporação de calcário na profundidade de 0,20-0,40 m.

Na área com calcário não incorporado na profundidade de 0,20-0,40 m, as correlações foram as seguintes, Cu com Fe, Zn, silte e SM de forma positiva e negativa com areia. O Fe com as variáveis silte e Cu e com areia de forma negativa. O Mn com Zn, silte e SM de forma positiva e negativa com areia. Argila com areia de forma negativa e forte ($0,7 > e \leq 1,0$).

A areia apresentou correlação negativa com todas as variáveis exceto com Zn onde não existe correlação significativa, de forma geral nas duas formas de aplicação de calcário e nas duas profundidades a variável areia apresenta nenhuma correlação com as demais variáveis ou uma correlação negativa, esses resultados podem estar relacionados ao menor conteúdo de minerais ferrimagnéticos na fração areia.

O silte apresentou correlação forte e positiva com SM. De acordo com Torrent et al. (2010) os principais minerais com expressão magnética estão na fração argila (maghemita e feridrita ferrimagnética) e silte (magnetita). De acordo com Matias et al. (2015b) e Barros et al. (2022) as correlações, quando negativa, evidencia que os resultados exercem uma posição inversamente proporcional, ou seja, quando a variável aumenta, os atributos tendem a decrescer, e a positiva, quando uma aumenta a outra variável segue a mesma tendência.

A susceptibilidade magnética (SM) por ser uma variável dependente e relacionada com o material de origem e os minerais presente nas frações granulométricas, sua relação com essas variáveis confirmam a característica da SM como um pedoindicador de variáveis (Santos et al., 2013, Matias et al., 2015a; Barrios et al., 2017, Barros et al., 2022). Além disso, a SM, obteve resultado de correlações com 80% das variáveis analisadas, nas duas situações e profundidades, isso indica, que o calcário por ser um elemento de pouca mobilidade e utilizado mais para correção de acidez do solo, não interfere no valor e consequentemente na correlação da SM com os demais elementos, pois a SM é uma variável relacionada com o material de origem.

De forma geral, a correlação positiva dos nutrientes com a SM e Fe e argila pode ser explicada pela natureza eletroquímica dos componentes envolvidos. O Fe apresenta forte propriedades magnéticas. Em solos tropicais é comum encontrar grandes quantidades de Fe nos minerais óxidos de ferro que compõe boa parte das argilas desses solos, tal característica faz com que solos tropicais possam apresentar magnetização espontânea (Souza Junior et al., 2010).

As argilas são consideradas um dos principais colóides do solo, por apresentar cargas em suas superfícies, são responsáveis pela troca catiônica e em alguns casos a depender do tipo de argilas, ocorrem troca aniônica, por isso, são nessas partículas que os nutrientes do solo ficam retidos, o que certamente pode explicar a existência de correlação entres esses três parâmetros e os micronutrientes em ambos os contextos de manejo de calagem.

De acordo com Mello et al. (2020), ao avaliar a SM, e sua relação com processos naturais e atributos do solo na pedosfera em ambiente tropical, também observaram que a SM apresentou boa correlação com a textura do solo, CTC e teor de ferro. Cervil et al. (2014) e Ramos et al. (2021),

relataram que maiores concentrações de micronutrientes se correlacionaram diretamente com a SM, os resultados aqui apresentados confirmam a interação entres esses atributos.

Os resultados da análise geoestatística demonstram que todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial (Tabela 3). O

modelo gaussiano ajustou-se para a maioria das variáveis. Bernardi et al. (2016), demonstraram que os modelos, gaussiano e esférico descrevem melhor o comportamento dos atributos químicos do solo. Macedo Neto et al. (2020), destacaram os modelos exponencial e gaussiano com maior frequência para as variáveis de fertilidade do solo.

Tabela 3. Modelos e parâmetros de semivariogramas dos micronutrientes, granulometria e susceptibilidade magnética do solo em área com e sem incorporação de calcário, em duas profundidades.

Variáveis	Áreas	Modelos	C ₀	C ₀ + C ₁	GDE	Alcance (m)	R ²	CRVC	
								b	a
Profundidade de 0,00-0,20 m									
Cu	I	Gaussiano	0,0197	0,1694	11,63	115,35	0,98	1,19	-0,06
	NI	Gaussiano	0,00178	0,02066	8,62	42,43	0,99	-8,33	2,28
Fe	I	Esférico	1	1201	0,08	127,9	0,6	0,62	20,81
	NI	Exponencial	870	5461	15,93	57	0,15	-4,89	736,19
Mn	I	Esférico	10	6408	0,16	87,3	0,7	1,04	-0,45
	NI	Gaussiano	1	516,1	0,19	62	0,53	0,21	39,67
Zn	I	Gaussiano	1,162	2,916	39,85	167,83	0,69	1,17	-0,45
	NI	Gaussiano	0,01	0,46	2,17	64,6	0,99	-5,26	6,39
Argila	I	Esférico	0,9	239,5	0,38	147,8	0,62	1,15	-9,22
	NI	Gaussiano	1	464,5	0,22	78,63	0,9	-5,79	619,93
Areia	I	Gaussiano	110	2305	4,77	91,62	0,95	4,77	-3354,54
	NI	Gaussiano	10	4302	0,23	84,87	0,88	-5,14	4951,5
Silte	I	Gaussiano	61	2594	2,35	138,39	0,99	1,8	-40,43
	NI	Gaussiano	1	2914	0,03	96,47	0,92	-2,56	369,11
SM	I	Gaussiano	0,1	150,1	0,07	98,9	0,97	3,84	-39,91
	NI	Gaussiano	0,1	240,7	0,04	74,99	0,83	-2,99	107,13
Profundidade de 0,20-0,40 m									
Cu	I	Gaussiano	0,00001	0,02052	0,05	70,49	0,65	-15,91	1,19
	NI	Esférico	0,0373	0,1156	32,27	87,5	0,9	0,79	0,08
Fe	I	Gaussiano	1	2775	0,04	106,17	0,92	0,73	16,76
	NI	Esférico	1	1468	0,07	83,8	0,98	0,69	30,12
Mn	I	Gaussiano	36	476,3	7,56	119,16	0,94	-0,45	39,08
	NI	Esférico	31	692,2	4,48	78,9	0,61	1,11	-4,62
Zn	I	Gaussiano	0,0001	0,783	0,01	105,3	0,87	-0,31	0,98
	NI	Exponencial	0,0514	0,2438	21,08	134,7	0,86	0,55	0,23
Argila	I	Gaussiano	1	514,9	0,19	69,62	0,97	-9,4	733,14
	NI	Gaussiano	10	8594	0,12	83,13	0,93	-13,63	2089,48
Areia	I	Gaussiano	10	21120	0,05	123,66	0,94	0,85	117,15
	NI	Esférico	10	9485	0,11	97,7	0,99	1,07	-48,83
Silte	I	Gaussiano	423	2956	14,31	286,82	0,8	1,09	-4,21

	NI	Gaussiano	1	2496	0,04	68,06	0,71	-12,48	1645,64
SM	I	Esférico	0,1	197,1	0,05	114	0,96	0,86	2,27
	NI	Gaussiano	1	616,9	0,16	88,68	0,9	-2,28	125,55

I = Incorporação de calcário, NI = Não incorporação de calcário; EPP = Efeito pepita puro; C_0 = Efeito pepita; C_0+C_1 = Patamar; GDE = Grau de dependência espacial; R^2 = Coeficiente de determinação do modelo; CRVC = Coeficiente de regressão da validação cruzada; a = Intercepto; b = Coeficiente angular.

Fonte: Autores (2023).

O grau de dependência espacial (GDE), indica quanto uma variável ou ponto está interligada com outro. Na Tabela 3, todas as variáveis foram classificadas, com um GDE forte com exceção do Zn na área de calcário incorporado e Cu na área de calcário não incorporado, que apresentaram grau de dependência espacial moderado de acordo com Cambardella et al. (1994). A forte dependência espacial assinala que o modelo foi suficiente para detectar a variabilidade existente no local, indicando que os atributos do solo não estão dispostos no espaço de forma aleatória e que esses atributos são influenciados por fatores intrínsecos do solo, como material de origem, mineralogia, relevo, organismos e tempo (Vogado et al., 2020; Oliveira et al., 2021). Esse resultado indica que a incorporação de calcário pode não ter influenciado a variação dos valores e sim, o comportamento do elemento no solo, quanto a sua mobilidade.

Avaliando os valores do alcance ajustados aos modelos dos semivariogramas é notável que os resultados desse estudo demonstram que o revolvimento do solo afetou significativamente os valores de alcance da maioria das variáveis. Na área onde o calcário não foi incorporado foram observados valores de alcance mais elevados quando comparado com os valores da área não incorporada. Com destaque para os parâmetros obtidos para o cobre (Cu) e silte que apresentaram maior e o menor alcance nas áreas sem e com incorporação de calcário respectivamente. O alcance é de fundamental importância para a interpretação dos semivariogramas, ou seja, o alcance leva ao entendimento sobre a distância máxima em que um ponto amostral sofre interferência do outro ponto em uma variável qualquer, ou seja, quando maior o alcance, mais homogênea é a distribuição da variável na área de estudo (Vogado et al., 2020).

Em relação ao coeficiente de determinação (R^2), houve uma variação de 0,15 a 0,99%. O menor valor foi obtido na variável Fe em área de não incorporação de calcário que possui ajuste de modelo exponencial. Isso indica que existe valores assintota nos teores de Fe (Tabela 2). O R^2 expõe em porcentagem do quanto da variação dos valores estimados da semivariância é explicada pelos modelos, assim, mostrando que o semivariograma atende aos requisitos de interpolação espacial (Oliveira et al., 2021).

Com base nos resultados obtidos nos semivariogramas, foram confeccionados os mapas de distribuição espacial da susceptibilidade magnética, micronutrientes e granulometria do solo em área com e sem incorporação de calcário (Figuras 3 e 4). Os mapas de variabilidade espacial servem como indicativo do comportamento e distribuição das variáveis analisadas, auxiliando na tomada de decisão do manejo, mas adequando para o local, evitando assim o desperdício.

Na profundidade de 0,00-0,20 m da área do calcário incorporado (Figura 3), os valores de Cu, variaram de 0 a 1 mg dm⁻³, cerca de 80% do da área, havia uma concentração de elemento considerada muito baixa conforme os valores de referência na Tabela 1, proposto por Moreira et al. (2005), indicando a necessidade da aplicação de fertilizantes a base de Cu nessas áreas. Essa mesma observação foi verificada na profundidade de 0,20-0,40 m.

O Cu é um elemento necessário para o bom desenvolvimento da planta, uma vez que participa da síntese de clorofila e produção de enzimas na planta, segundo Khurana et al. (2006) o excesso e a deficiência desse micronutriente reduz a área foliar, e consequentemente interfere na síntese de proteínas e metabolismo de carboidratos da planta.

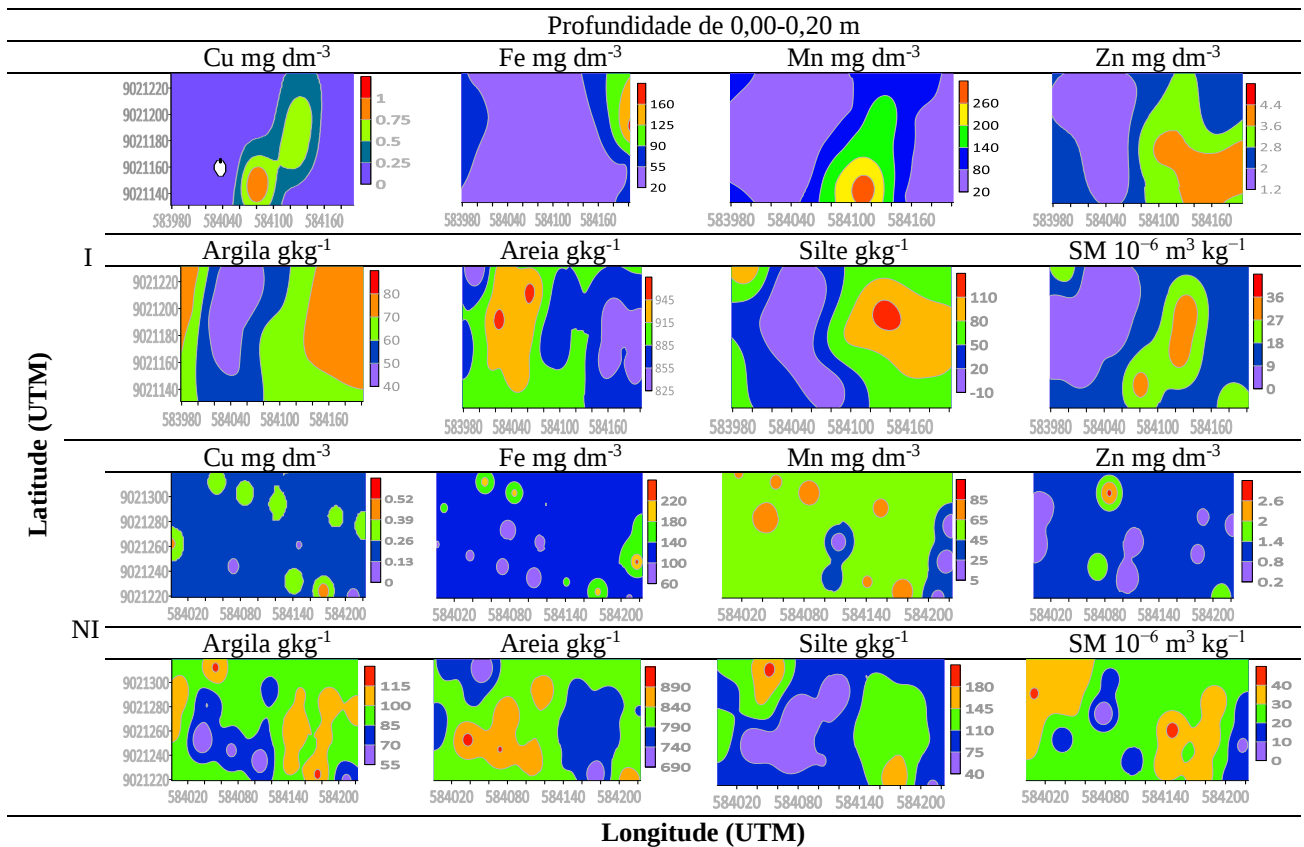


Figura 3. Distribuição espacial dos micronutrientes, granulometria e susceptibilidade magnética do solo em área com (I) e sem incorporação (NI) de cálcio na profundidade de 0,00-0,20 m. Fonte: Autores (2023).

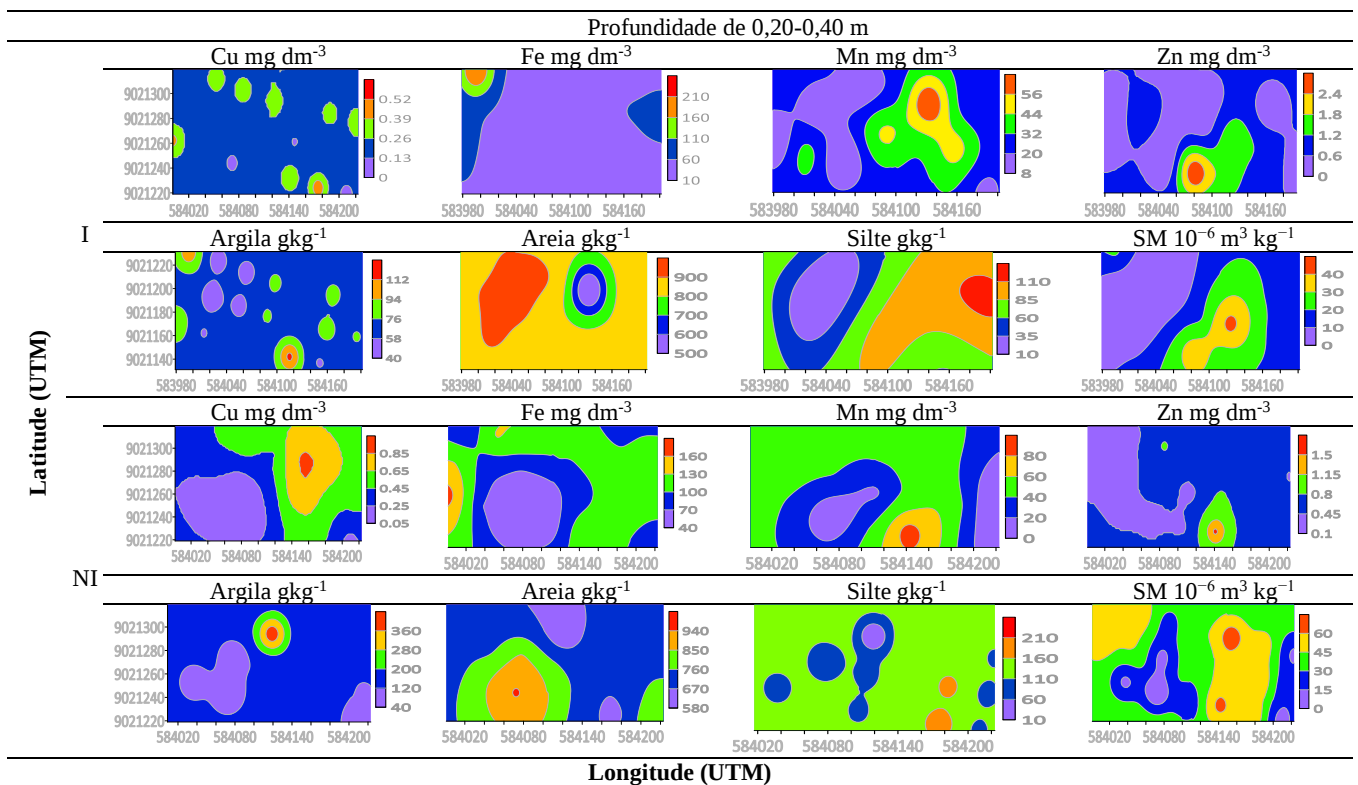


Figura 4. Distribuição espacial dos micronutrientes, granulometria e susceptibilidade magnética do solo em área com (I) e sem incorporação (NI) de cálcio na profundidade de 0,20-0,40 m. Fonte: Autores (2023).

O ferro apresentou valores considerados muito baixos ($\leq 30 \text{ mg dm}^{-3}$) nas duas profundidades na área com calcário incorporado, em cerca de 70%. A deficiência do ferro na bananeira pode ocasionar cloroso nas folhas mais novas, no entanto segundo Souza et al. (2016), a exigência da bananeira quanto a esse micronutriente é muito pequena.

Os teores de manganês foram considerados altos, nas duas profundidades, diferindo dos resultados do Cu e ferro. He et al. (2021) afirmam que o manganês tem função no processo enzimático da bananeira e fotossintético, no entanto em condições de solos ácidos o manganês pode chegar a níveis tóxicos à cultura (Santos et al., 2017).

Os valores de zinco, conforme as classes de interpretação proposta na Tabela 1, foram considerados altos em 70% da área com incorporação de calcário na profundidade de 0,00-0,20 m (Figura 3), esse mesmo resultado não foi verificado na profundidade de 0,20-0,40 m, sendo verificado que apenas 15% da área estava classificada como alta. De acordo com Sagardoy et al. (2009) o zinco é responsável pelo crescimento dos tecidos das plantas e ainda é ativador estomático, o seu valor acima do ideal pode ocasionar a diminuição no número e no tamanho das raízes laterais, assim como redução da atividade mitótica.

Analisando a granulometria da área nas duas profundidades e nas duas formas de aplicação de calcário (Tabela 2), o solo foi classificado como de textura arenosa, indicando uma facilidade em lixiviação ou perda dos nutrientes, decorrente da falta de ligações entre as cargas do solo e o elemento. Essa pode ser uma possível causa das variações dos elementos estudados, considerando que eram realizadas irrigações periodicamente na área, podendo potencializar essas perdas.

Os valores de susceptibilidade magnética na área com incorporação de calcário e nas duas profundidades, foram considerados valores baixos, em virtude da granulometria da área, porém são indicativos de presença de minerais férrico no local. Esse resultado confirma a ocorrência da correlação obtida na Figura 2. Fontes et al. (1996) e Siqueira et al. (2010) confirmam que valores mais elevados de SM estão associados à presença de minerais férricos da fração argila. Apesar desse resultado, esses valores ainda são superiores aos obtidos por Barros et al. (2022) e Matos et al. (2023), em área com características semelhante, o

que pode indicar interferência do manejo nos atributos no solo.

Ao avaliar os valores dos atributos, cobre, ferro, manganês, zinco, granulométrica, argila, areia, silte e da susceptibilidade magnética, na área com calcário não incorporado, observou-se que esses atributos apresentaram variação e classificação quando comparado com a área com calcário incorporado, porém, com valores mais baixos.

Os mapas de SM apresentaram um grau de similaridade com os parâmetros argila e ferro nas duas profundidades. Entretanto, a maior semelhança foi observada na profundidade de 0,20-0,40 m e na área em que o calcário não foi incorporado. Essa semelhança não foi observada entre SM e areia, esses resultados apoiam as fortes correlações observadas entre os parâmetros apresentados na Figura 2.

Além disso, é importante destacar que a similaridade entre os mapas, confirmam o que a SM é um parâmetro que pode ser usado para identificação de áreas de manejo específico, auxiliando, na técnica da agricultura de precisão (Barros et al., 2022). Catelan et al. (2022), ao avaliar a produtividade e qualidade da cana-de-açúcar, utilizando a susceptibilidade magnética do solo, relataram que a SM pode ser uma ferramenta eficaz para identificar áreas com diferentes potenciais de produtividade e qualidade de cana-de-açúcar, podendo ser utilizado inclusive para alocação de variedades no campo.

Apesar da boa correlação e similaridade dos mapas dos atributos químicos e físico e SM, vale ressaltar que outras variáveis não apresentaram o mesmo comportamento, por isso é importante entender o histórico de manejo da área, uma vez que o tipo de manejo, em especial o revolvimento do solo, pode interferir em algum grau na relação entre os parâmetros do solo e a SM, a depender da intensidade e frequência, afirmação está confirmada por Ayoubi et al. (2020).

Segundo Bouhlassa & Bouhsane (2019), os valores médios de susceptibilidade magnética diminuíram na ordem de área florestada, área de pastagem e área cultivada respectivamente confirmando os dados apresentados nessa pesquisa em que atributos do solo podem apresentar variação conforme manejo de cultivo.

Conclusões

1. A forma de incorporação do calcário tem influência positiva, principalmente na profundidade de 0,00-0,20 m.
2. O Diagnóstico dos micronutrientes do solo, demonstra deficiência nas duas situações, incorporado e não incorporado do cobre e ferro e excesso do manganês e zinco.
3. Todas as variáveis apresentam variabilidade espacial com grau de dependência espacial considerados fortes a moderados.
4. Os mapas de variabilidade mostram claramente a distribuição e concentração dos micronutrientes no solo, permitindo intervenções nas operações de fertilização da área, possibilitando aplicação de insumos em taxas variadas visando sua homogeneização.
5. A susceptibilidade magnética refletiu o material de origem e granulometria da área, sendo verificado valores maiores em área com calcário incorporado.

Referências

- Alvarez, V. V. H., Novais, R. R., Barros, N. F. DE., Cantarutti, R. B., Lopes, A. S. (1999). *Interpretação dos resultados das análises de solos*. In: Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas gerais: 5ª aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p. 25-32 p.
- Ayoubi, S., Moazzeni Dehaghani, S. (2020). Identifying impacts of land use change on soil redistribution at different slope positions using magnetic susceptibility. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 13, p. 1-11.
- Barrios, M. R., Marques Junior, J., Matias, S. S. R., Panosso, A. R., Siqueira, D. S., Scala Junior, N. (2017). Magnetic susceptibility as indicator of soil quality in sugarcane fields. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 30, n. 2, p. 287 – 295. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n203rc>
- Barros, B. A. A., Matias, S. S. R., Nogueira, M. S., Lins, R. C., Oliveira, F. F., Tavares Filho, G. S. (2022). Spatialization of chemical attributes, penetration resistance and magnetic susceptibility of the soil in a Cerrado área. *Revista Brasileira de Ciências Agraria*, v.17, n.4, p.e2186. <https://doi.org/10.5039/agraria.v17i4a2186>
- Bernardi, A. D. C., Bettiol, G. M., Ferreira, R. D. P., Santos, K. E. L., Rabello, L. M., Inamasu, R. Y. (2016). Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. *Precision Agriculture*, v. 17, n. 6, p. 737-752. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9446-9>
- Biddoccu, M., Guzman, G., Capello, G., Thielke, T., Strauss, P., Winter, S., Gomez, J. A. (2020). Evaluation of soil erosion risk and identification of soil cover and management factor (C) for RUSLE in European vineyards with different soil management. *International Soil and Water Conservation Research*. v. 8, n. 4, p. 337-353.
- Bouhlassa, S., Bouhsane, N. (2019). Assessment of areal water and tillage erosion using magnetic susceptibility: the approach and its application in Moroccan watershed. *Environmental Science and Pollution Research*. v. 26, p. 25452-25466.
- Caires, E. F., Haliski, A., Bini, A. R., Scharr, D. A. (2015). Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. *European Journal of Agronomy*, v. 66, p. 41-53.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Novak, J. M., Turco, R. F. and Konopka, A. E. (1994). Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p.1501-1511. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995050800050033x>
- Cantwell-jones, A., Ball, J., Collar, D., Diazgranados, M., Douglas, R., Forest, F., Hawkins, J., howes, M.J.R., Ulian, T, Vaitla, B., Pironon, S. (2022). Global plant diversity as a reservoir of micronutrients for humanity. *Nature Plantas*, 8 pp. 225-232. <https://doi.org/10.1038/s41477-022-01100-6>
- Catelan, M. G., Marques, J., Siqueira, D. S., Gomes, R. P., Bahia, A. S. R. D. S. (2021). Sugarcane yield and quality using soil magnetic susceptibility. *Scientia Agrícola*. v. 79, n. 4, p. e20200329.
- Cervil, E. C., Costa, A. C. S., Souza Junior, I. G. (2014). Magnetic susceptibility and the spatial variability of heavy metals in soils developed on basalt. *Journal of Applied Geophysics*, v. 111, p. 377-383.
- Conyers, M. K., Heenan, D. P., McGhie, W. J. Poile, G. P. (2003). Amelioration of acidity with time by limestone under contrasting tillage. *Soil and Tillage Research*, v.72, p.85-94. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(03\)00064-3](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(03)00064-3)

- Dearing, J. A. (1999). Environmental magnetic susceptibility: using the Bartington MS2 system. 2.ed. *Kenilworth: Chi Publishing*, 54 p.
- Figueiredo Filho, D.B., Silva Júnior J.A. (2009). Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, v.18, n.º.1, 115-146p.
- Fontes, M. P. F., Weed, S. B. (1996). Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. *Geoderma*, Amsterdam, v. 72, n. 1-2, p. 37-51. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(96\)00010-9](https://doi.org/10.1016/0016-7061(96)00010-9)
- He, J., Rössner, N., Hoang, M. T., Alejandro, S., Peiter, E. (2021). Transport, functions, and interaction of calcium and manganese in plant organellar compartments. *Plant Physiology*, v. 187, n. 4, p. 1940-1972.
- Isaaks E. H., Srivastava, R. M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- Khurana, N., Singh, M. V., Chatterjee, C. (2006). O estresse no cobre altera a fisiologia e deteriora a qualidade das sementes da colza. *Journal of Plant Nutrition*. Nova Iorque, v. 29, p. 93-101. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-059>
- Köppen, W. (1936). Das geographische system der klimate. *Berlin: Gebrüder Borntraeger*, p. 1-44.
- Macedo Neto, A. A. L, Farias, P. R. S., Matos, G. S. B. DE, Silva, G. B. DA., Santos, A. V. F. Dos. Anhê, B. B. (2020). Diagnosis and spatial variability of soil fertility and crop production in a teak area in eastern Pará state. *Cerne*, v. 26, n. 1, p. 37-47. <https://doi.org/10.1590/01047760202026012683>
- Matias, S. S. R., Marques Junior, J., Pereira, G. T., Siqueira, D. S. (2015a). Ferramentas matemáticas, suscetibilidade magnética e modelos de paisagem aplicados na delimitação de áreas de manejo específico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.39, p.968-980. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140638>
- Matias, S. S. R., Nóbrega, J. C. A, Nóbrega, R. S. A, Andrade, F. R, Baptistel, A. C. (2015b). Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. *Revista Agro@ambiente*, v. 9. p. 137-148, <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v9i1.2036>
- Matos, A. P., Matias, S. S. R., Nóbrega, J. C. A., Nunes, M. P. T. (2022). Spatial distribution of soil attributes and macronutrients in banana leaves under the application of limestone. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza-CE, v. 53. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220047>
- Matos, A. P., Matias, S. S. R., Nunes, R. K. L., Moraes, E. M., Tavares Filho, G. S. (2023). Soil management of limed areas cultivated with banana identified by magnetic susceptibility. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 70, n. 4, p. 17-24. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202370040004>
- Mello, D. C., Demattê, J. A., Silvero, N. E., Di Raimo, L. A., Poppiel, R. R., Mello, F. A., Rizzo, R. (2020). Suscetibilidade magnética do solo e sua relação com processos naturais e atributos do solo na pedosfera, em ambiente tropical. *Geoderma*, v. 114364. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114364>
- Moreira, A., Arruda, M. R., Pereira, J. C. R., Gasparotto, L., Pereira, M. C. N. (2005). Recomendação de adubação e calagem para bananeira no Estado do Amazonas (1 aproximação). *Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental*, (Embrapa Amazônia Ocidental. Documentos, 37).
- Oliveira, B. A., Campos, L. P., Matias, S. S. R., Silva, T. S. S., Gualberto, A. V. S. (2021). Spatiality of soil chemical attributes in a banana cultivation area in west Bahia. *Revista Caatinga*, v. 34, n. 1, p. 177-188. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n118rc>
- Qiang, L., Jiheng, Z., Yiyang, Z., Wenfang, T., Zhengyan, Z., Yan, X., Xiaoying L. (2011). Study on Spatial distribution of soil available microelement in Qujing Tobacco Farming Area, China. *Procedia Environmental Science*, v.10, p. 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.032>
- Ramos, P. V., Dalmolin, R. S. D., Bueno, J. M. M., Marques Junior, J., Siqueira, D. S., Teixeira, D. B. (2021). Suscetibilidade magnética na caracterização da variabilidade espacial de atributos do solo em solos subtropicais. *Revista Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 43. <https://doi.org/10.5902/2179460X41394>
- Sagardoy, R., Morales, F., López-millán, A. F., Abadía, A., Abadía, J. (2009). Effects of zinc toxicity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics. *Plant Biology*, v. 11, n.

- 3, p. 339-350. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2008.00153.x>
- Santos, E. F., Santini, J. M. K., Paixão, A. P., Furlani Júnior, E., Lavres Junior, J., Campos, M., Reis, A. R. (2017). Physiological highlights of manganese toxicity symptoms in soybean plants: Mn toxicity responses. *Plant physiology and biochemistry*, v. 113, p. 6-19.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Oliveira, J. B., Coelho, M. R., Lumberras, J. F., Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 356 p.
- Santos, H. L., Marques Junior, J., Matias, S. S. R., Siqueira, D. S., Martins Filho, M. V. Erosion factors and magnetic susceptibility in different compartments of a slope in Gilbués - PI, Brazil. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.33, n.1, p.64-74. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000100008>
- Siqueira, D. S., Marques Junior, J., Matias, S. S. R.; Barrón, V., Torrent, J., Baffa, O., Oliveira, L. C. de (2010). Correlation of Predicting the properties of Brazilian Haplustalfs from magnetic susceptibility measurements. *Soil Use and Management*, Oxford, v. 26, n. 4, p. 425-431. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x>.
- Souza Junior, I. G. D., Costa, A. C. S. D., Vilar, C. C., Hoepers, A. (2010). Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. *Ciência Rural*, 40, 513-519. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010000300003>
- Souza, B. P. D., Silva, E. D. B., Cruz, M., DO Céu, M. D., Amorim, E. P., Donato, S. L. R. (2016). Deficiências de micronutrientes no estado nutricional de mudas de bananeira prata. *Revista Brasileira de Fruticultura*. Jaboticabal - SP, v. 23, n. 3: e-884. <https://doi.org/10.1590/0100-29452016884>
- Taghdis, S., Farpoor, M. H., Fekri, M., Mahmoodabadi, M. (2021). Vertical distribution of magnetic susceptibility as affected by pedoenviromental factors along an arid and semi-arid transect, Fars Province, Iran. *Studia Geophysica et Geodaetica*. v. 65, p. 86-103.
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solos*. 3.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p.573.
- Torrent, J., Liu, Q. S., Barrón, V. (2010). Magnetic minerals in Calcic Luvisols (Chromic) developed in a warm Mediterranean region of Spain: Origin and paleoenvironmental significance. *Geoderma*, v. 154, p. 465-472. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.020>
- Vogado, R. F. Souza, H. A., Matias, S. S. R. (2020). Spatial variability of carbon and nitrogen stocks in integrated management systems and pasture in a cerrado region. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 11, e67291110220. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10220>
- Warrick, A. W., Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. Ed. *Applications of soil physics*. New York: Academic, p. 319-344.
- Wei, X., Hao, M., Shao, M., Gale, W. J. (2006). Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. *Soil and Tillage Research*, 91, 120-130.