

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

Departamento de Ciência do Solo

Relatório Final Referente as Atividades de Estágio de Pós - Doutorado

Mineralogia da Fração Argila no Mapeamento de Zonas de Manejo

Autora: Dr^a Deise Cristina Santos Nogueira

Supervisor: Dr^o Marcilio Vieira Martins Filho

**Projeto Financiado pelo CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO
E TECNOLÓGICO (CNPq) – Processo nº 351424/2022-9**

Câmpus – Jaboticabal

2025

Clay Fraction Mineralogy for Mapping Management Zones

Deise Cristina Santos Nogueira ^{1*}, Marcilio Vieira Martins Filho ^a

^{1*} Corresponding author. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Unesp/Jaboticabal - SP, Brasil.

E-mail: deise17nogueira@hotmail.com

Abstract:

Soil provide various ecosystem services that are essential for human development, such as food provision, climate regulation, carbon storage, and erosion control. However, their ecosystem functions exhibit spatial variability as they are related to the interaction of soil formation factors and processes. To capture the spatial variability of agricultural soils, it is necessary to use techniques such as geostatistics, which capture soil variability and aid in the development of management zones, thus ensuring sustainable soil use. This study aimed to determine the clay fraction mineralogy of soils in the state of Minas Gerais for mapping specific management zones. The results demonstrate that magnetic susceptibility showed variability within each agricultural area, making it possible to map four specific management zones based on this variability. It was observed that phosphorus and CEC levels vary within each magnetic susceptibility class. Regarding soil erodibility, the magnetic susceptibility classes indicated that there is variability in soil suitability for erodibility, as three classes of soil erodibility aptitude were formed from the observed magnetic susceptibility classes. Magnetic susceptibility reflects the presence of iron oxides in the soil and can be used to map specific management zones for more accurate use of agricultural inputs and sustainable practices aimed at soil conservation and its ecosystem functions.

Keywords: magnetic susceptibility, coffee, production environment, farm inputs.

Clay Fraction Mineralogy for Mapping Management Zones

Deise Cristina Santos Nogueira ^{1*}, Marcilio Vieira Martins Filho ^a

^{1*} Corresponding author. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Unesp/Jaboticabal - SP, Brasil.

E-mail: deise17nogueira@hotmail.com

Abstract:

Soil provide various ecosystem services that are essential for human development, such as food provision, climate regulation, carbon storage, and erosion control. However, their ecosystem functions exhibit spatial variability as they are related to the interaction of soil formation factors and processes. To capture the spatial variability of agricultural soils, it is necessary to use techniques such as geostatistics, which capture soil variability and aid in the development of management zones, thus ensuring sustainable soil use. This study aimed to determine the clay fraction mineralogy of soils in the state of Minas Gerais for mapping specific management zones. The results demonstrate that magnetic susceptibility showed variability within each agricultural area, making it possible to map four specific management zones based on this variability. It was observed that phosphorus and CEC levels vary within each magnetic susceptibility class. Regarding soil erodibility, the magnetic susceptibility classes indicated that there is variability in soil suitability for erodibility, as three classes of soil erodibility aptitude were formed from the observed magnetic susceptibility classes. Magnetic susceptibility reflects the presence of iron oxides in the soil and can be used to map specific management zones for more accurate use of agricultural inputs and sustainable practices aimed at soil conservation and its ecosystem functions.

Keywords: magnetic susceptibility, coffee, production environment, farm inputs.

The interaction between soil formation factors directly impacts its spatial variability, resulting in different behaviors of its physical and chemical attributes. The variability of soil attributes, when not properly studied and identified, can lead to decisions that may affect soil management practices, resulting in changes to soil health. Identifying the variability of soil attributes is related to the environmental functions that soil performs, which are essential for humanity, including: water and food supply, climate regulation, and carbon storage (Dominatti et al., 2014). It is estimated that these ecosystem services provided by soil have a value of approximately USD 11.4 trillion (McBratney et al., 2017). Soil erosion is considered a global problem (Lal et al., 2001; Panagos et al., 2019) because it degrades the soil, threatening food security as it compromises the soil's ecosystem functions for humanity.

One of the characteristics of the soil that impacts its ecosystem functions, as well as its vulnerability to erosion, is the mineralogical composition of the clay fraction (Santos et al., 2013; Barbosa et al., 2019). In the literature, several authors have reported the influence of these minerals on the behavior of soil attributes (Ketrot et al., 2013; Bonetti et al., 2017; Leal et al., 2015; Nogueira et al., 2020; Zhang et al., 2022). Magnetic susceptibility is a soil characteristic that indicates the presence of iron oxides in the soil (Santos et al., 2013), and its characterization is performed by sensors in a quick and ecologically safe manner, as it does not require the use of reagents. In this context, the present study aimed to characterize the soil using magnetic susceptibility and identify management zones to assess the variability of erosion and chemical attributes in coffee-growing areas in the Minas Gerais region.

Material e Métodos

2.1. Caracterização das áreas de estudo e amostragem

Foram mapeadas duas áreas de estudo, a área de estudo 1 está localizada na região do Cerrado Mineiro e apresenta aproximadamente 50 hectares, com altitude variando entre 1.050 e 1.260 metros. A geologia da área é representada pelas rochas do Complexo Alcalinos Serra Negra, Grupo Canastra - Formação Chapada dos Pilões (com presença de ortoquartzito, quartzosericita, filito, mica, quartzito, formação ferrífera) e Ccberturas detríticas e/ou lateríticas indiferenciadas. Nessa região predominam Latossolos e Argissolos.

A área de estudo 2 está localizada na região do Sul de Minas e possui aproximadamente 270 hectares e altitude variando entre 900 e 1.200 metros. A geologia é caracterizada pelas rochas do Complexo Varginha-Guaxupé com rochas litofácies granulito basal e do Grupo Andrelândia, Subgrupo Serra do Turvo, Formação Arantina e Litofácies granulito com quartzito e anfibolito (Figura 1). Os principais solos de ocorrência também são Latossolos e Argissolos, com possibilidade de Neossolos.



Figura 1. Regiões produtoras de café e localização das áreas piloto: Área 1 – Cerrado Mineiro, latitude -18.938455°, longitude -46.994090°; Área 2 – Sul de Minas Gerais, latitude -21.360905°, longitude -46.152683°.

Os talhões escolhidos dentro das áreas pilotos são similares em altitude, solo, face de exposição, com mesma variedade (Catuaí), cafezal com aproximadamente 10 anos e espaçamento de 2,5 x 0,7 m. As duas áreas pilotos estão dentro da mesma faixa de variação de fatores edafoclimáticos, incluindo variação de altitude (Figura 2).

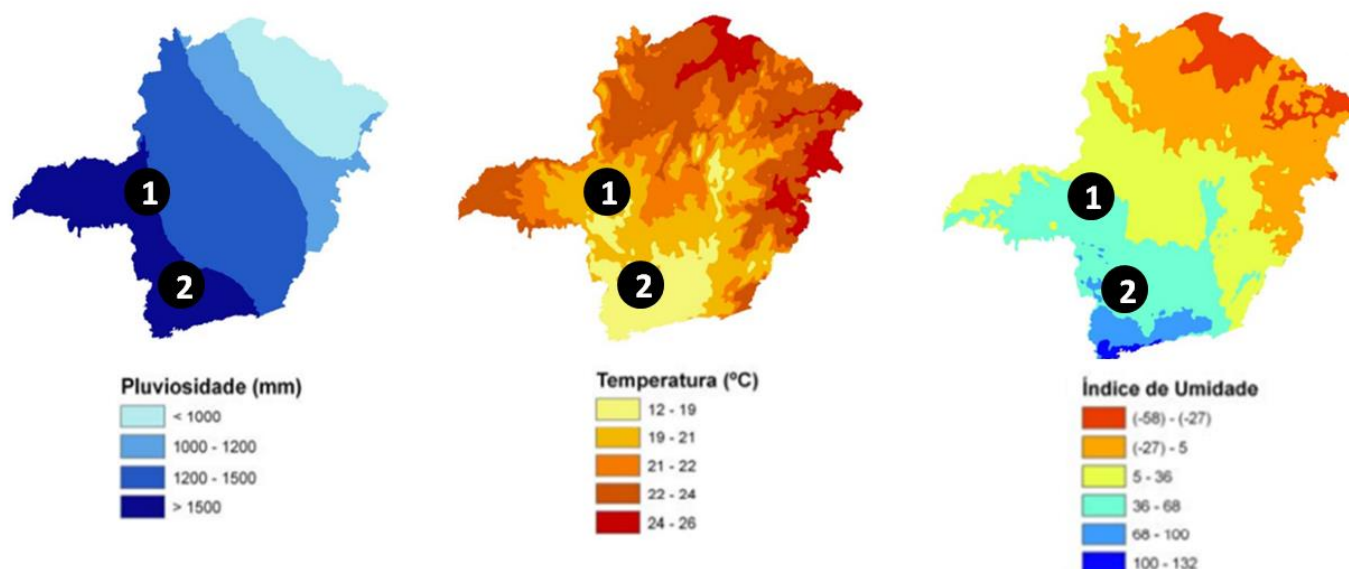


Figura 2. Mapas da série história entre 1961 e 1990 para o Estado de Minas Gerais adaptado de SCOLFORO et al. (2007).

Foram coletadas amostras de solo na densidade de 1 ponto por hectare, na profundidade de 0,0-0,2 m. No total foram o coletadas amostras em 50 pontos na área de estudo 1 e 270 pontos na área de estudo 2. A partir dessas amostras foram realizadas análises químicas, granulométrica e suscetibilidade magnética do solo. Após a elaboração dos mapas de magnetismo do solo, foi realizada amostragem estratificada da planta por classe magnética. Foram selecionados locais de amostragem estratificada (DINKINS e JONESSOIL, 2008) para realização de análises mais complexas e demoradas que não se enquadram na rotina de análise convencional (Figura 3). O método de amostragem estratificada só é eficaz quando se conhece a variabilidade real do campo de cada compartimento (geológico, forma do terreno, tipo de solo e outros), bem como seus limites (FRANZEN et al., 2006; FLEMING et al., 2000).

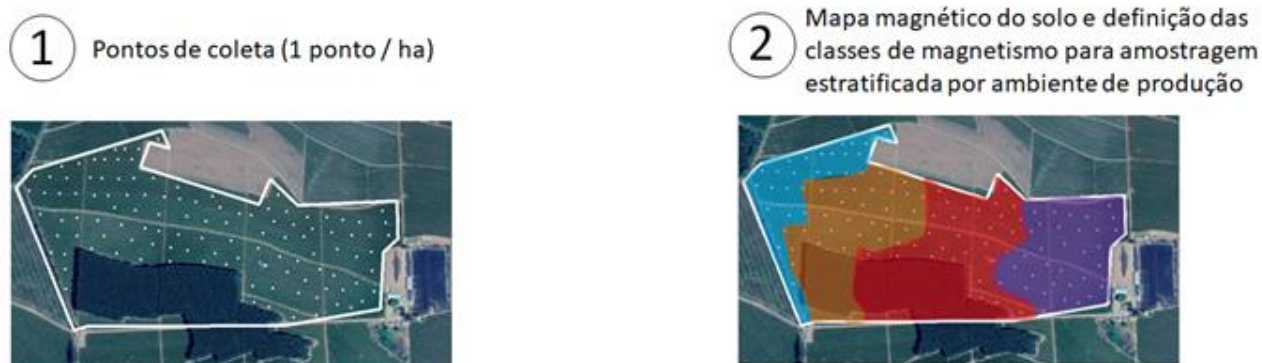


Figura 3. Esquema do planejamento amostral para coleta de solo nas áreas de estudo.

2.2. Análises químicas do solo

O teor de argila foi determinado pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, seguindo metodologia preconizada pela EMBRAPA (1997). Cálcio, magnésio, potássio e o fósforo disponível foram extraídos utilizando-se o método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001). A acidez trocável (Al³⁺) foi determinada seguindo a metodologia de RAIJ e ZULLO (1977), e a matéria orgânica segundo EMBRAPA (1997). O fósforo adsorvido foi avaliado segundo método proposto por FASSBENDER & IGUE (1967). O PCZ (Ponto de Carga Zero, onde CTC=CTA), foi determinado segundo RAIJ & PEECH (1972).

A determinação dos teores de ferro relativo à totalidade dos óxidos de ferro pedogenéticos extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato (Fed) seguiu a metodologia de MEHRA e JACKSON (1960). A determinação dos teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (Feo) relativos aos óxidos de ferro pedogenéticos de baixa cristalinidade seguirá a metodologia citada por CAMARGO et al. (1986) adaptado de SCHWERTMANN (1973). Os teores de hematita, goethita, caulinita e gibbsita foram estimados por espectroscopia de reflectância difusa (ERD) no espectrômetro da Perkin Elmer Lambda 950 UV/Vis/NIR seguindo metodologia proposta por TORRENT & BARRÓN (2008) para hematita e goethita e FERNANDES (2017) para caulinita e gibbsita.

A suscetibilidade magnética (SM) foi determinada na TFSA (terra fina seca ao ar) utilizando equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação

foi feita em baixa frequência (0,47 kHz) (DEARING, 1994; COSTA et al., 1999). A presença de minerais pedogenéticos foi determinada a partir da diferença entre SM medida na baixa e alta frequência, sendo o resultado expresso em percentagem de variação da SM ($\chi_{FD}\%$) (DEARING, 1994).

2.3. Análises Estatísticas

A variabilidade espacial foi determinada por meio do cálculo e modelagem do variograma experimental, com base na teoria das variáveis regionalizadas e nos princípios da hipótese intrínseca (DEUTSCH E JOURNEL, 1998). A interpolação dos valores dos atributos do solo será realizada com a utilização da simulação sequencial gaussiana (SSG). As técnicas de simulação, além de possibilitar a avaliação das incertezas das estimativas, também apresentam-se como alternativa à suavização característica dos mapas interpolados pelas variações da krigagem (GRUNWALD et al., 2007).

3.Resultados e Discussão

Na Figura 4 são apresentados os mapas de variabilidade espacial do magnetismo do solo e resultados dos cenários de incerteza. Os limites dos mapas de variabilidade foram delineados por meio de modelagem matemática utilizando técnica de interpolação. Esse procedimento diminuí a subjetividade implícita nos mapas tradicionais de solos.

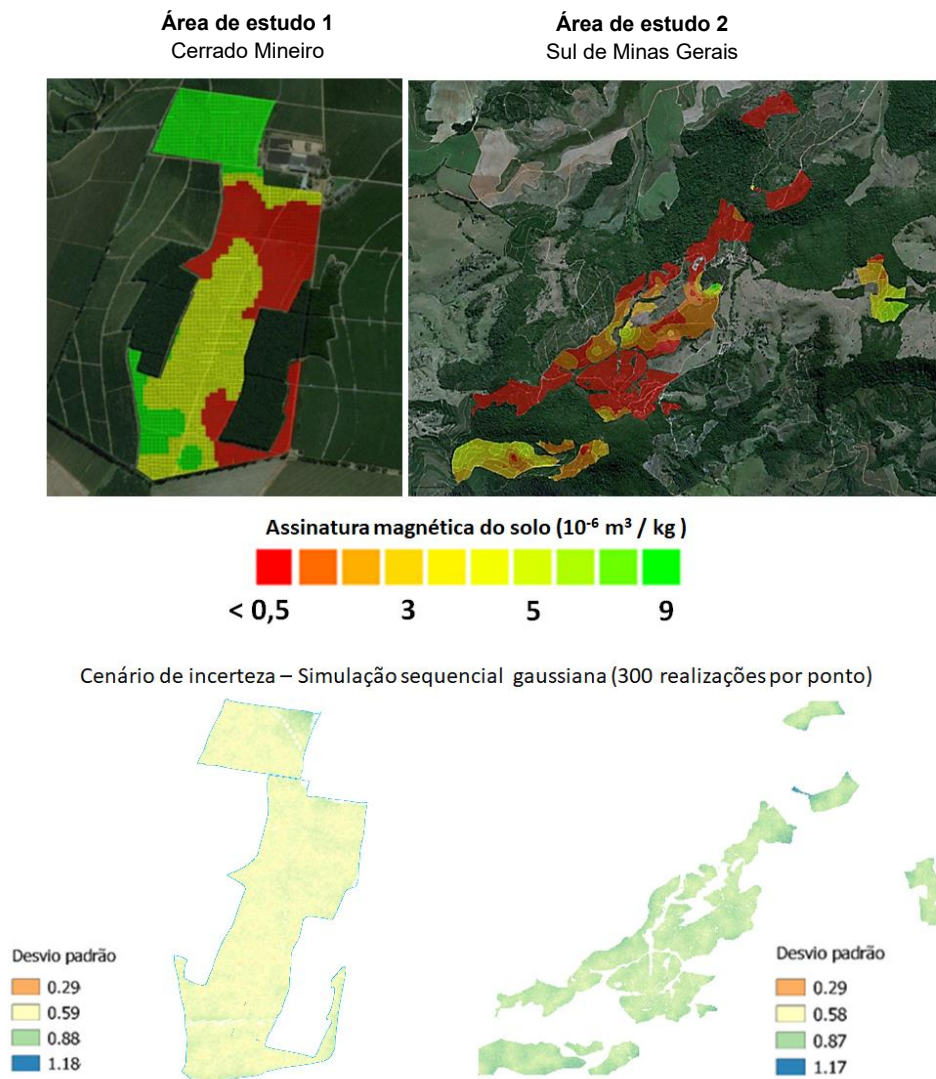


Figura 4. Mapa da magnetismo do solo na camada superficial (Área de estudo 1 – $n = 50$; Área de estudo 2 – $n = 270$) e cenários de incerteza calculados com base na simulação sequencial gaussiana de 300 simulações por ponto (Área de estudo 1 total de 15 mil simulações e Área de estudo 2 total de 81 mil simulações).

Os valores médios de suscetibilidade magnética (SM) variaram de 0,5 a $9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{kg}$. A variação da SM ($\chi_{FD}\%$) em ambas as áreas foi da ordem de 10 à 16%. Esse padrão de leitura está associado a presença de minerais pedogenéticos como a maghemita e a ferridrita ferrimagnética (DEARING, 1994; XIA et al., 2007; MICHEL et al., 2010; TORRENT et al., 2010). A área de estudo 1 no Cerrado Mineiro possui cerca de 34% da área na classe magnética abaixo de 2, enquanto a área de estudo 2 no Sul de Minas, possui cerca de 86% na classe menor do que 2. Foi observada baixa variação dos atributos do solo estudados em subsuperfície ($< 10\%$).

De acordo com a variabilidade do magnetismo do solo observado nas áreas de estudo foram delimitadas zonas de manejo. A definição de classes magnéticas associadas a zonas de manejo já tem sido utilizada para balizar a elaboração de mapas temáticos para potencial de emissão de gases (BARRIOS et al., 2012; LEAL et al., 2015), conservação do solo e da água (SANTOS et al., 2013; BARBOSA, 2014), uso racional de fertilizantes (CAMARGO et al., 2014), descarte de resíduos e aproveitamento de água residuária (PELUCO et al., 2013), planejamento amostral (SIQUEIRA et al., 2015; TEIXEIRA, 2015), modelos de pedogeomorfogênese (VASCONCELOS et al. 2013) e potencial de produtividade de culturas agrícolas como cana-de-açúcar (MARQUES et al., 2014; SANCHEZ NETO, 2015; CATELA et al., 2023), citros (SIQUEIRA et al., 2010a; CORTEZ et al., 2011) e café (SANCHEZ et al., 2012; POLLO ET AL., 2017; CARMO, 2014).

3.2. Diagnóstico do solo por zona de manejo: mineralogia da fração argila

Os valores de SM estão relacionados ao teor de ferro total (Fe_2O_3) do solo, da rocha (CURI, 1983; SANTANA, 1984; RESENDE et al 1988) e da forma do ferro no ambiente pedogenético (DEARING, 1994) que poder ser oxidado ou reduzido.

Apesar de não apresentarem sinal magnético significativo, minerais como hematita (Hm), goethita (Gt), caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) são pedomarcadores da presença de outros minerais ferrimagnéticos pedogenéticos como maghemita e ferridrita ferrimagnética. Dessa forma, o sinal magnético é representativo de um sistema complexo da matriz mineralógica do solo. Em ambas as áreas de estudo, os menores valores de SM estão relacionados a ambientes de formação mais propícios à Gt

Os valores médios da relação $\text{Fe}_o / \text{Fe}_d$ ($< 0,07$) indicam a predominância de óxidos de ferro cristalinos. O aumento da relação nas classes de magnetismo do solo mais elevadas, sem grandes incrementos de ferro total, confirma a presença de ferridrita ferrimagnética e maghemita. Dessa maneira, complementar aos resultados de SM (< 10) e $\chi_{\text{FD}}\%$ ($>10\%$), pode-se complementar a compreensão do ambiente pedogenético de minerais pedogenéticos com menor precisão.

Tabela 1. Apresentação dos valores referentes a mineralogia das áreas de estudo na profundidade de 0,0-0,2 m.

Classe magnética do Solo	Hm (%)	Gt(%)	Ct/(Ct+Gb)	Fe ₂ O ₃ (%)	Feo/Fed	PCZ
Área de Estudo 1						
<2	0,7	2,7	0,82	3,3	0,025	5,1
Entre 2-3	0,8	2,6	0,82	3,5	0,025	5,2
Entre 3-5	0,9	2,5	0,81	4,0	0,025	5,3
Entre 5-7	1,0	2,4	0,79	4,7	0,026	5,5
Entre 7-10	1,2	2,2	0,78	5,3	0,026	5,6
Área de Estudo 2						
<2	0,7	2,8	0,83	2,9	0,019	4,6
Entre 2-3	0,8	2,7	0,82	3,5	0,025	5,2
Entre 3-5	0,9	2,5	0,80	4,1	0,025	5,4
Entre 5-7	1,0	2,4	0,80	4,5	0,026	5,5
Entre 7-10	1,3	2,1	0,77	5,6	0,026	5,6

N=25, Hm – Hematita, Gt – Goethita, Ct – Caulinita, Gb – Gibssita, Fed – Ferro Ditionito, Feo – Ferro Oxalato, PCZ – Ponto de carga zero (CTC = CTA)

Normalmente a Gb pode originar-se a partir de uma gama considerável de materiais de origem, embora quantidades maiores deste mineral têm sido constatadas em rochas mais ricas em ferro (MONIZ, 1967; RESENDE, 1976). Esta tendência, de acordo com RESENDE (1976), parece relacionar-se com um ou ambos dos seguintes fatos: 1) as rochas ricas em ferro são originalmente pobres em sílica, favorecendo a formação de Gb em detrimento da caulinita; 2) óxidos de ferro livre absorveriam a sílica não permitindo ou reduzindo sua capacidade de combinar-se com o alumínio para formar Ct. A maior ocorrência de Ct nos ambientes de classes magnéticas menores confirma o ambiente de formação preferencial para esse mineral e a relação existem entre os diferentes minerais que compõem a matriz do solo.

A dinâmica da qualidade das argilas está diretamente relacionada aos fatores e processos de formação do solo, bem como respostas agronômicas. No solo, o balanço das cargas elétricas pode ser negativo (CTC), positivo (CTA) ou nulo (PCZ). Observa-se que o balanço entre CTC e CTA acompanha as classes magnéticas representativas de minerais pH dependentes e de carga fixa, como é o caso de ¼ das cargas da Ct. Para alcançar o PCZ os solos da classe magnética <2 requer naturalmente por conta da sua composição mineralógica, em média cerca de 5 t / ha de calcário (PRNT 100%) à menos do que os solos da classe magnética entre 7-10.

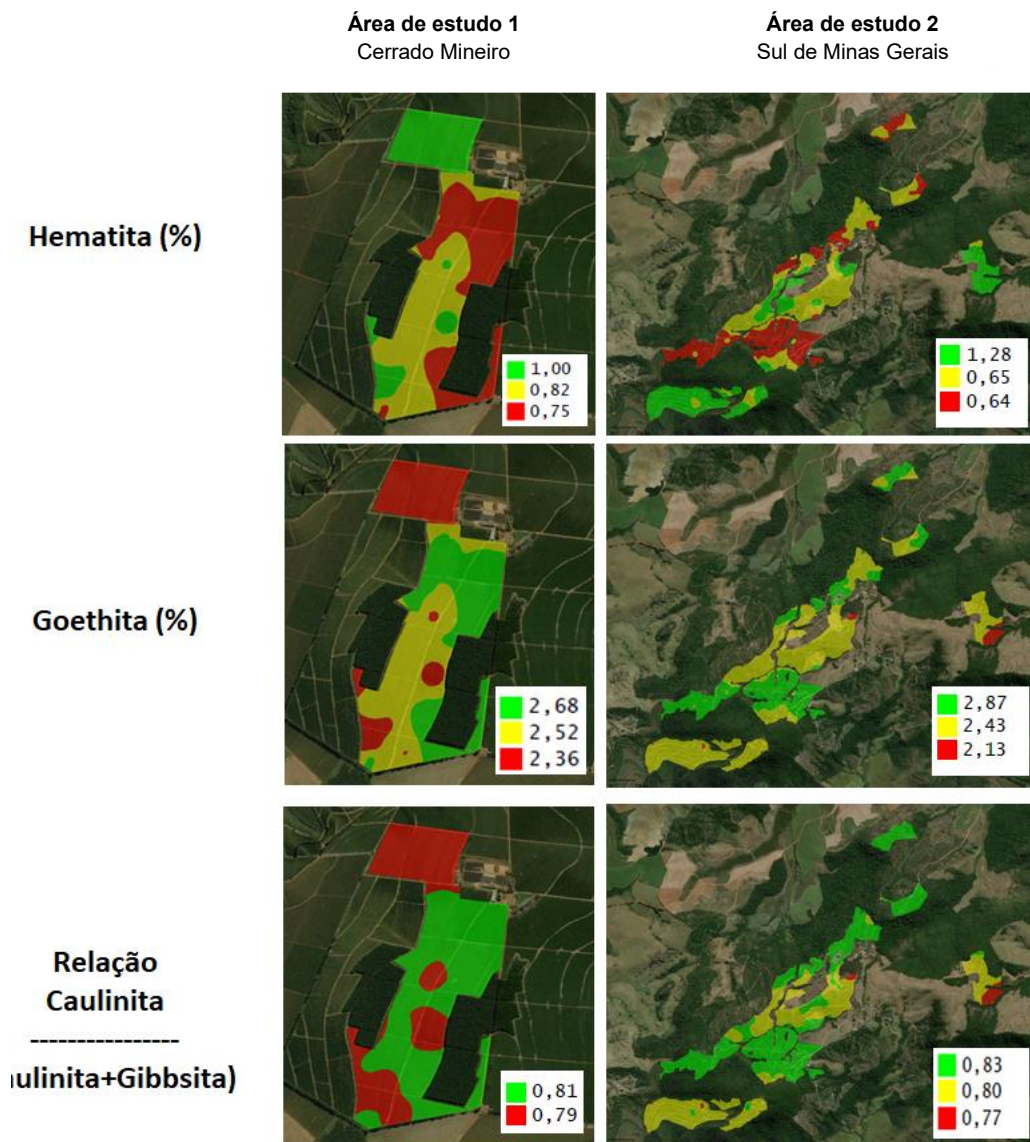


Figura 5. Mapas da variabilidade dos minerais presentes na fração argila das áreas de estudo.

A variação dos minerais da fração argila sugerem a neoformação de partículas em diferentes locais da paisagem. O relevo é um importante indicador da performance de cafés especiais e condiciona diferentes ambientes para tipos de argila em uma mesma classe textural. Em relevo mais planos e de maior altitude, por exemplo, prevalece ambiente de formação mais oxídico. Em solos de origem arenítica, esses ambientes tendem a ter maior SM, devido a presença de maghemita (ferrimagnética) que pode oxidar-se parcialmente em hematita (antiferromagnética) conforme o ambiente vai se tornando mais oxídico.

Conforme o processo de evolução do relevo vai se intensificando os topos planos vão se tornando cada vez mais convexas e os vales deixam de ser côncavos intensos para

mais suaves. Durante este processo a maior radiação solar incidente sobre as encostas voltadas para norte as tornam relativamente mais quentes e mais secas (maior evapotranspiração) do que aquelas voltadas para sul. Devido ao maior potencial redox e temperatura do solo mais elevada ocorre à intensificação da mineralização da matéria orgânica, originando maior disponibilidade de Fe^{3+} e favorecendo a desidratação da ferridrita (KÄMPF & SCHWERTMANN, 1983). Conforme a ferridrita vai se cristalizando ela passa a apresenta forte comportamento magnético sendo chamada de ferridrita ferrimagnética (MICHEL et al., 2010).

A gibbsita e as formas de ferro em solos tropicais são preferencialmente controladas pela posição na paisagem e variação das condições hídricas ao longo das pedossequências (VASCONCELOS et al., 2013). As leituras de SM e $\chi_{\text{FD}}\%$ mostraram-se úteis na identificação dos ambientes redox que influência na forma de ferro. A neoformação de gibbsita e caulinita, outros dois minerais da fração argila abundantes nos solos tropicais também podem ser explicados pelo modelo de evolução da paisagem com base no magnetismo do solo. O domínio de formas cristalinas de ferro sobre as amorfas e a presença de gibbsita está relacionado aos ambientes bem drenados, típicos de evolução de Latossolos (KÄMPF et al., 1988; KER, 1998), com maiores valores de SM e $\chi_{\text{FD}}\%$. Em oposição, solos com formas amorfas de ferro dominantes sobre as cristalinas e a elevada proporção de caulinita sobre gibbsita representam ambientes mal drenados, relacionados com solos hidromórficos (KÄMPF et al., 2009) e menores valores de SM e $\chi_{\text{FD}}\%$.

3.3. Diagnóstico do solo por zona de manejo: fertilidade do solo

Os solos da área de estudo 1, na região do Cerrado Mineiro, apresentaram teor de argila variando de 26 a 43%, correspondendo à 2 (duas) classes texturais: média (teor de argila entre 25 a 35%) e argilosa (entre 35 a 60%). Na área de estudo 2, na região do Sul de Minas, o teor de argila variou de 10 à 45%, correspondendo à 3(três) classes texturais: arenosa (<15% argila), média (15 e 35% de argila) e argilosa (35-60% de argila).

Tabela 2. Resultados dos atributos químicos do solo na profundidade de 0,0-0,2 m.

Classes magnéticas do solo	Teor de Argila (%)	M.O (%)	P _{DISP} (mg/dm ³)	P _{ADS} (mg/dm ³)	Ca (mmolc/dm ³)	K (mmolc/dm ³)	Mg (mmolc/dm ³)	H+Al (mmolc/dm ³)	CTC (mmolc/dm ³)
Área de Estudo 1									
<2	25,7	4,7	101,3	391,4	55,4	2,1	14,9	39,0	111,4
Entre 2-3	30,2	4,9	90,5	429,5	57,5	2,1	15,1	43,7	118,4
Entre 3-5	35,1	4,3	60,3	471,7	45,1	2,2	14,4	41,2	103,0
Entre 5-7	40,1	4,3	58,8	514,4	43,3	2,0	15,5	41,5	102,3
Entre 7-10	43,2	3,9	71,3	541,2	30,9	2,0	11,3	49,8	93,9
Área de Estudo 2									
<2	9,7	2,8	99,9	253,8	34,5	3,9	12,3	37,5	88,2
Entre 2-3	29,8	3,0	77,7	426,5	43,0	4,7	15,0	36,3	99,0
Entre 3-5	36,6	4,0	142,0	484,3	35,2	1,9	12,0	55,6	104,7
Entre 5-7	38,8	4,1	156,0	503,7	59,5	5,6	18,0	33,0	116,1
Entre 7-10	44,7	3,2	136,0	554,5	27,0	3,5	9,0	25,0	64,5

Área 1 (n=50); Área 2 (n=270), M.O: de matéria orgânica (M.O), P_{DISP}: teor de fósforo disponível, P_{ADS}: teor de fósforo adsorvido, Ca: teor de cálcio, k; teor de potássio, Mg: teor de magnésio, H+Al: acidez potencial do solo, CTC: capacidade de troca catiônica

O fósforo no solo auxilia no crescimento e produtividade do cafeeiro, uma vez que esse nutriente afeta a absorção de outros nutrientes que são essenciais para o desenvolvimento e crescimento do cafeeiro (Nurcholis et al.,2024), ainda, a deficiência de fósforo pode ocasionar redução de 30-40% na produtividade das culturas (Malhotra et al., 2018). Solos brasileiros, apresentam alta fixação de fosforo devido a adsorção dos mesmos pelos óxidos de ferro presentes na fração argila (Novais e Smith, 1999).

Na área de estudo 2, foi observado aumento nos teores de fósforo adsorvido com o aumento das classes magnéticas, no entanto, os valores de fosforo disponível aumentaram com o aumento da classe magnética. BARBIERI et al. (2009) encontrou potencial de adsorção de fósforo variando de 461 a 539 mg kg⁻¹ em uma área classificada como textura média, porém com teor de argila variando de 19% a 23% (textura média), ferro total menor que 5% e SM menor do que 4. Esta relação é importante, porque os principais minerais dos solos tropicais responsáveis pela dinâmica de cargas e processo de adsorção estão na fração argila.

A capacidade de troca catiônica do solo (CTC) é um importante parâmetro relacionado a fertilidade do solo; pois esta influencia a retenção de nutrientes, pH do solo, retenção de contaminantes além de influenciar a estabilidade da estrutura do solo ,disponibilidade de nutrientes (Enang et al., 2022). Ainda, o teor de matéria orgânica do solo, o teor e a composição da fração argila são fatores que impactam na CTC do solo (Costa et al., 2020; Enang et al., 2022). Observa-se que a CTC reduz com o aumento das classes magnéticas e teor de argila na área de estudo 1. Esse comportamento não foi observado na área de estudo 2. Entre o teor de argila e a CTC do solo existe uma grande

variação que é atribuída a CTC dos minerais que compõe a fração argila (Seybold et al, 2005). Em solo com textura arenosa houve correlação positiva entre CTC e SM segundo estudos conduzidos por Veirana et al., 2024.

O potencial de acidez do solo ($H+Al$), é um parâmetro utilizado no cálculo da necessidade de calagem do solo, sendo assim, observa-se que os seus valores apresentam variação dentro das zonas de manejo, evidenciando a importância do mapeamento dos atributos do solo como textura e mineralogia para o uso mais assertivo dos insumos agrícolas tais como o calcário para correção do pH do solo e cujo cálculo está diretamente relacionado ao parâmetro $H+Al$.

A influência dos óxidos de ferro na variabilidade dos parâmetros $H+Al$ e CTC do solo observadas nas duas áreas de estudo e dentro de cada zona de manejo pode ser atribuída a área superficial dessa nanopartícula natural, visto que, os óxidos de ferro apresentam alta área superficial específica com sítios ativos disponíveis para adsorção de materiais (Tao et al., 2023). No entanto, esses autores afirmam que essa habilidade de adsorção dos óxidos de ferro é influenciada pelo pH do solo.

No que diz respeito à produtividade, quando analisados individualmente os valores das bases são considerados adequados. As doses de Mg em cafeeiros devem estar entre 8 e 12 $mmol\cdot dm^{-3}$ (Favarin et al., 2013), ainda, os teores de K no solo não devem superar os de Mg (Raij 2011).

Esses resultados demonstram a importância do mapeamento dos minerais da fração argila para definição de zonas de manejo em áreas que até então são consideradas homogêneas. Observa-se uma variação nos teores das bases dentro de cada classe magnética (zona de manejo) ressaltando a importância desses mapeamentos visando a redução nos custos de produção visto que o uso de insumos agrícolas será empregado de maneira mais assertiva e consequentemente a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis.

3.4 DIAGNÓSTICO DO SOLO POR ZONA DE MANEJO: APTIDÃO DO SOLO AO RISCO DE EROSAO HÍDRICA

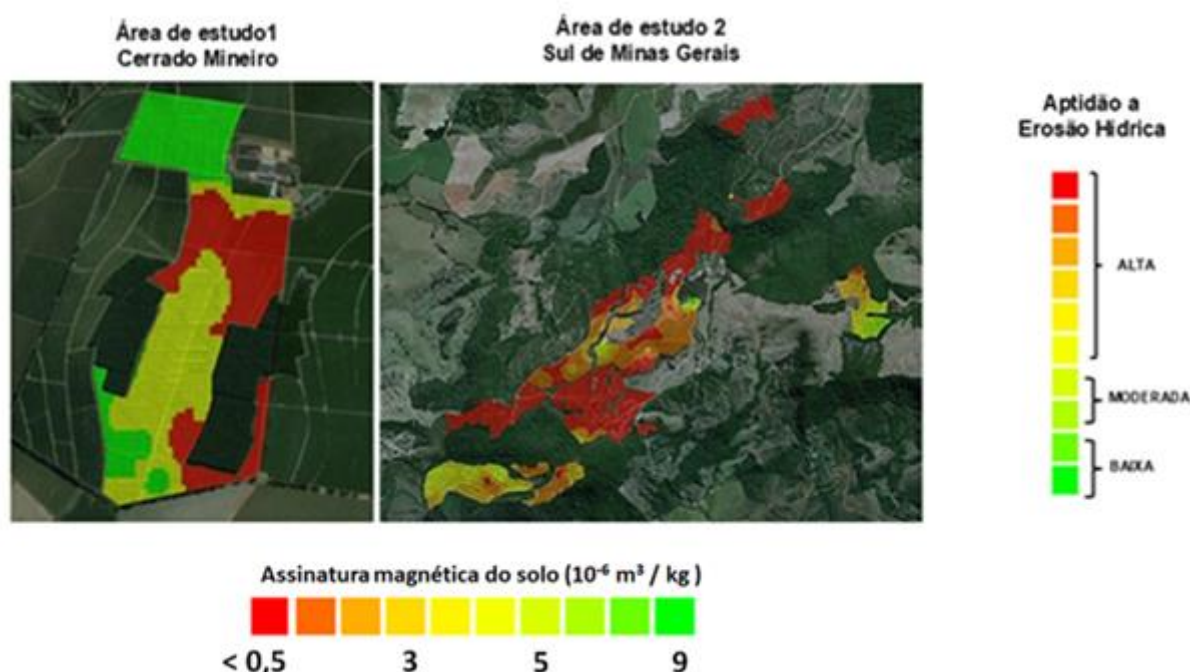


Figura 6. Mapa de aptidão do solo ao risco de erosão de acordo com as classes de susceptibilidade magnética das áreas de estudo

Estima-se que até 2050, cerca de 75 bilhões de toneladas de solo serão perdidas devido ao processo de erosão ocasionando uma redução de 10% na produção agrícola mundial (FAO, 2022).

Diversos são os fatores relacionados ao processo erosivo do solo, dentre eles a mineralogia que compõe a fração argila dos solos. A composição mineralógica do solo relaciona-se ao comportamento de vários atributos do solo que impactam no seu potencial erosivo e essa relação já foi retratada em diversos trabalhos científicos tais como a compactação (Nogueira et al., 2020) e estabilidade dos agregados do solo (Yan et al., 2019; Chen et al., 2022).

No presente estudo observou-se que a aptidão do solo aos processos erosivos varia de acordo com a classe magnética do solo como demonstrado na Figura 6. Assim áreas onde os solos apresentaram maiores valores magnéticos apresentam menor vulnerabilidade aos processos erosivos; em contrapartida, áreas onde os valores

magnéticos foram menores exigem maiores cuidados com o solo visto que são mais vulneráveis aos processos erosivos.

Estudos conduzidos por Barbosa et al., 2019, observaram que solos com maiores valores de SM apresentaram menor vulnerabilidade aos processos erosivos; esses autores afirmam que esse resultado está relacionado a ação cimentante promovida pelos óxidos de ferro na melhoria da estabilidade de agregados. Nesse mesmo estudo, foi observado que a SM e os fatores interligados a erodibilidade do solo apresentaram forte dependência espacial, onde áreas no mapa com solos mais magnéticos apresentaram menores taxas de erodibilidade.

Os resultados apresentados demonstram a necessidade de entender a variabilidade dos solos agrícolas, visto que, em uma área considerada homogênea há grande variação no comportamento do solo exigindo soluções mais pontuais em relação a essas características.

No que concerne a maior susceptibilidade a processos erosivos, cabe ressaltar que nas áreas onde a vulnerabilidade a esse processo é maior deve-se realizar o planejamento de um manejo que vise a proteção desse solo, seja esse pela adoção de plantas de cobertura para aumentar a proteção do solo contra o impacto das chuvas assim como aumentar os teores de matéria orgânica do solo para promover a melhoria de sua agregação reduzindo os riscos de perda de solo ocasionado pelo processo erosivo.

4. Conclusão

A susceptibilidade magnética do solo é um norteador sobre a saúde do solo, visto que pelo seu mapeamento é possível identificar a heterogeneidade do solo e gerar zonas de manejo para orientar sobre o uso mais assertivo de insumos agrícolas assim como na adoção de práticas agrícolas que visem a conservação do solo e aumento da sua sustentabilidade.

5. REFERÊNCIAS

- BARBIERI, D. M, MARQUES JÚNIOR, J., ALLEONI, R.F; L., GARBUIO, F.J; CAMARGO, L.A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 819-826, 2009.
- BARBOSA, R. S. Erodibilidade de Latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa. 2014. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.
- BARBOSA, R. S., MARQUES JÚNIOR, J., BARRÓN, V., MARTINS FILHO, M. V., SIQUEIRA, D. S., PELUCO, R. G., CAMARGO, L. A., SILVA, L. S. Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 78, 2019.
- BARRIOS, M. R.; MARQUES JR., J.; PANOSSO, A. R.; SIQUEIRA, D. S.; SCALA JR., N. L. Magnetic susceptibility to identify landscape segment son a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1073-1082, 2012.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; BAHIA, A. SANTOS R. DE S. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agrícola**, v. 71, p. 244-256, 2014.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, L.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física dos solos do Instituto Agrônômico de Campinas. Campinas: Instituto Agrônômico, 1986, 96 p.
- CARMO, D. A. B. Cor do solo na caracterização de áreas específicas de manejo para cultura do café. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.
- CATELAN, M. G. Planejamento varietal de cana-de-açúcar utilizando suscetibilidade magnética do solo. Dissertação (mestrado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2019.
- CHEN, J., SONG, D., LIU, D., SUN, J., WANG, X., ZHOU, W., LIANG, G. Soil Aggregation Shaped the Distribution and Interaction of Bacterial-Fungal Community Based on a 38-Year Fertilization Experiment in China. **Frontiers in Microbiology**, v.13, 2022.
- CORTEZ, L. A. ; MARQUES JR., J. ; PELUCO, R. G. ; TEIXEIRA, D. B. ; SIQUEIRA, D. S. . Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. Energia na Agricultura (UNESP. Botucatú. CD-Rom), v. 26, p. 60-79, 2011.

COSTA, A. C. S. ET AL. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clays Minerals**, v. 4, p. 466-473, 1999.

COSTA, A. C. S., JUNIOR, I. G. DE S., CANTON, L. C., GIL, L. G., FIGUEIREDO, R. Contribution of the chemical and mineralogical properties of sandy-loam tropical soils to the cation exchange capacity. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v.44, p.1–18, 2020.

CURI, N. Lithosequence and toposequence of oxisols from Goiás and Minas Gerais, Brazil. 1983. 158 f. Tesis (Ph.D.). West Lafayette, Purdue University, 1983.

DE ANDRADE BONETTI, J., ANGHINONI, I., DE MORAES, M. T., FINK, J. R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil and Tillage Research**, vol. 174, pp. 104–112, 2017.

DEARING, J.A. Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994, 104 p.

DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A.G. GSLIB: Geostatistical Software Library: and User's Guide, second ed. Oxford University Press, New York, 1998. 369 p.

DINKINS, D. P.; JONESSOIL, C. Sampling Strategies. Agriculture and Natural Resources (Fertilizers). (2008). MT200803AG New 4/08. Disponível em: <<http://msuextension.org/publications/AgandNaturalResources/MT200803AG.pdf>>

DOMINATI, E., MACKAY, A., GREEN, S., PATTERSON, M. A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: a case study of pastoral agriculture in New Zealand. *Ecol. Econ.* v.100, p.119–129, 2014.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997, 212p.

ENANG, R. K., KIPS, P. A., YERIMA, B. P. K., KOME, G. K., VAN RANST, E. Pedotransfer functions for cation exchange capacity estimation in highly weathered soils of the tropical highlands of NW Cameroon. **Geoderma Regional**, v.29, 2022.

FASSBENDER, H.; IGUE, Y. Comparación de radiométricos y colorimétricos em estudos sobre retenção y transformación de fosfatos em el suelo. Turrialba: **Revista Interamericana de Ciências Agrícolas**, v.17, p.284-287, 1967.

FAVARIN, J. L., NETO, A. P., TEZOTTO, T., MARTINS, P. O., PAULO, P., & TEIXEIRA, C. (n.d.). Correção do magnésio no solo é essencial ao cafeeiro. *Fertilidade e Nutrição*.

FERNANDES, K. L. Estimativa da caulinita e gibbsita por técnicas de difração de raios e espectroscopia de reflectância difusa dos solos do Planalto Ocidental Paulista. Dissertação (mestrado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017.

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, p. 201-215, 2000.

FRANZEN, D. W., NANNA, T.; NORVELL, W. A. A Survey of Soil Attributes in North Dakota by Landscape Position. **Agronomy Journal**, 98, p. 1015-1022, 2006.

GRUNWALD, S.; REDDY, K.R.; PRENGER, J.P.; FISHER, M.M. Modeling of the spatial variability of biogeochemical soil properties in a freshwater ecosystem. **Ecological Model**, v. 201, p. 521-535, 2007.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J.J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. (Eds.), *Química e Mineralogia de Solos, Parte I – Conceitos Básicos*. Viçosa (MG): SBCS, 2009. cap. 5, p. 333-380.

KETROT, D., SUDDHIPRAKARN, A., KHEORUENROMNE, I., SINGH, B. Interactive effects of iron oxides and organic matter on charge properties of red soils in Thailand. **Soil Research**, 51(3), 222–231, 2013.

LAL R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation Development**, v.12, p.519–539, 2001.

LEAL, F.T.; FRANÇA, A.B.C.; SIQUEIRA, D.S., TEIXEIRA, D.B. MARQUES JÚNIOR, J.; LA SCALA JÚNIOR, N. Characterization of potential CO₂ emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, p. 535-539, 2016.

MALHOTRA H, SHARMA S, PANDEY R. In *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance* Springer Singapore; pp. 171–190, 2018.

MARQUES JÚNIOR, JOSÉ ; SIQUEIRA, D. S. ; Camargo, L. A. ; Teixeira, D. B. ; Barrón, V. ; Torrent, J. . Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma** (Amsterdam), v. 219-220, p. 63-71, 2014.

MATIAS, S. S. R.; Marques Jr., J.; Siqueira, D.S.; Pereira, G. T. Modelos de paisagem e susceptibilidade magnética na identificação e caracterização do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical** (Online), v. 43, p. 93-103, 2013.

MCBRATNEY, A.B., MORGAN, C.L.S., JARRETT, L.E., 2017. The value of soil's contributions to ecosystem services. In: Field, D.J., Morgan, C.L.S., McBratney, A.B. (Eds.), **Global Soil Security**. Springer International Publishing, Cham.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removed from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, New York, 7:1317-327, 1960.

MENDOZA VEIRANA, G. M., GRISON, H., VERHEGGE, J., CORNELIS, W., DE SMEDT, P. (2024). **Exploring the link between cation exchange capacity and magnetic susceptibility**.

MICHEL, F.M.; BARRÓN, V.J.; TORRENT, J.; MORALES, M.P.; SERNA, C.J.; BOILYE, J.F.; LIU, Q.S.; AMBROSINIG, A.; CISMASU, A.C.; BROWN, G.E. Ordered ferrimagnetic form of ferrihydrite reveals links between structure, composition and magnetism. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 107 (2010), pp. 2787–2792.

MONIZ, A.C. Quantitative mineralogical analysis of Brazilian soils derived from basic rocks and slate. Madison, University of Wisconsin, 1967. 74p. (Tese M.S.).

NOGUEIRA, D. C. S.; FERNANDES, C.; SOUZA, L. C.; CAMARGO, L. A. FERRAUDO, A. S. Effects of clay fraction mineralogy on physical attributes of a yellow Ultisol treated with chiseling. **Engenharia Agrícola** v. 40, p. 433-442, 2020.

NOVAIS, R.F; SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NURCHOLIS, O., AULIYA NUGROHO, G., PUJO NUGROHO, R. M. Y. A., PRAYOGO, C., KURNIAWAN, S. Trees and Soil Management Impacts on Soil Nutrient and Coffee Production in Coffee-Based Agroforestry. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2024.

PANAGOS, P., BORRELLI, P., & ROBINSON, D. (2020). FAO calls for actions to reduce global soil erosion. In **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change** (Vol. 25, Issue 5, pp. 789–790). Springer

PELUCO, R.G.; MARQUES JUNIOR, J.; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T.; BARBOSA, R.S.; TEIXEIRA, D.D.B.; ADAME, C.R.; CORTEZ, L.A. Suscetibilidade magnética do solo na estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, 661-672, 2013.

PELUCO, R. G.; MARQUES JÚNIOR, JOSÉ; SIQUEIRA, D. S. ; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S. ; TEIXEIRA, D. B . Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (Online), v. 50, p. 259-266, 2015.

POLLO, G. Z.; MARQUES JÚNIOR, J.; Siqueira, D.S. GOMES, S. Suscetibilidade magnética, atributos do solo e da planta na discriminação de áreas de manejo na cultura do café. Suscetibilidade magnética, atributos do solo e da planta na discriminação de áreas de manejo na cultura do café. 1ed.: Novas Edições Acadêmicas, 2017, p. 1-68.

RAIJ, B. van & PEECH, M. Eletrochemical properties of some Brazilian soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 36: 587-593, 1972.

RAIJ, B. VAN, ZULLO, M. A. T. Métodos de análises de solo. Campinas: Instituto Agrônomo, 16p. (Circular, 63), 1977.

RAIJ, B. VAN. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo, 285p., 2001.

RAIJ, B. VAN.; PEECH, M. Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.36, p.587-593, 1972.

RESENDE, M. Minerology, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil. Purdue, 1976. Thesis (PhD.) - Purdue University.

RESENDE, M.; SANTANA, D. P.; REZENDE, S. B. Susceptibilidade magnética em Latossolo do sudeste e sul do Brasil. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA. 3, 1988, Rio de Janeiro: Anais..., Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS/SBCS, 1988, p 233–258.

SANCHEZ NETO, V. Produção e qualidade da cana-de-açúcar em diferentes formas da paisagem. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2015.

SANCHEZ, M. G. B. ; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A. ; PEREIRA, G. T. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture**, v.14, p. 201-214-14, 2012.

SANTANA, D. P. Soil formation in a toposequence of oxisols from Patos de Minas Region, Minas Gerais State, Brazil. 1984. 129 f. Thesis (Ph.D), West Lafayette, Purdue University, 1984.

SANTOS, H. L.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R. ; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Erosion factors and magnetic susceptibility in different compartments of a slope in Gilbués-PI, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 33, p. 64-74, 2013.

SCHWERTMANN U. Use of oxalate for Fe extraction from soils. Canadian **Journal of Soil Science**. v.53, p.244-246, 1973.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. **Soil Science**, Baltimore, v. 139, n. 4, p. 344-350, 1985.

SEYBOLD, C. A., GROSSMAN, R. B., REINSCH, T. G. Predicting Cation Exchange Capacity for Soil Survey Using Linear Models. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, 2005.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R. ; BARRÓN, V. ; TORRENT, J. ; BAFFA, O. ; OLIVEIRA, L. C. . Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, v. 26, p. 425-431, 2010.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JUNIOR, J.; TEIXEIRA, D. B. ; MATIAS, S. S. R. ; CAMARGO, L. A. ; PEREIRA, G. T. . Magnetic susceptibility for characterizing areas with different potentials for sugarcane production. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (Online), v. 51, p. 1349-1358, 2016.

SIQUEIRA, D.S.; MARQUES, J. ; PEREIRA, G.T. ; BARBOSA, R.S. ; TEIXEIRA, D.B. ; PELUCO, R.G. . Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. **Geoderma**, v. 232-234, p. 172-182, 2014.

SIQUEIRA, D.S.; MARQUES, J. ; PEREIRA, G.T. ; TEIXEIRA, D.B. ; VASCONCELOS, V. ; CARVALHO JÚNIOR, O.A. ; MARTINS, E.S. . Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena**, v. 135, p. 149-162, 2015.

TAO, Z., ZHOU, Q., ZHENG, T., MO, F., OUYANG, S. Iron oxide nanoparticles in the soil environment: Adsorption, transformation, and environmental risk. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 459, 2023.

TEIXEIRA, D. B. Suscetibilidade magnética e análise de incertezas em mapeamento de solo. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2015.

TEIXEIRA, D.B.; MARQUES JR, J.; SIQUEIRA, D. S.;VASCONCELOS, V. ; CARVALHO, OSMAR A. ; MARTINS, É. S. ; Pereira, G. T. . Sample planning for quantifying and mapping magnetic susceptibility, clay content, and base saturation using auxiliary information. **Geoderma**, v. 305, p. 208-218, 2017.

TEIXEIRA, D.B.; MARQUES, J.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V. ; CARVALHO, O. A. ; MARTINS, ÉDER S. ; PEREIRA, G. T. . Mapping units based on spatial uncertainty of magnetic susceptibility and clay content. **CATENA**, v. 164, p. 79-87, 2018.

TORRENT, J.; LIU, Q.S.; BARRÓN, V. Magnetic minerals in Calcic Luvisols (Chromic) developed in a warm Mediterranean region of Spain: origin and paleoenvironmental significance. **Geoderma**, 154 (2010), pp. 465–472.

VASCONCELOS, V. ; MARTINS, E. S. ; CARVALHO JR, O. A. ; MARQUES JR, J. ; SIQUEIRA, D. S. ; COUTO JR, A. F. ; GUIMARAES, R. F. ; GOMES, R. A. T. ; REATTO, A. . Modelo de Evolução Pedogeomorfológica da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, p. 197-212, 2013.

XIA, D.; MING, J.; XIUMING, L.; FAHU, C.; JIANYING, M.; HUI, Z.; XUNMING, W.; HAITAO, W. A preliminary study on the magnetic signatures of modern soil in Central Asia. **Frontiers of Earth Science in China**, Beijing, v.1, p. 275-283, 2007.

YANG, C., LIU, N., ZHANG, Y. Soil aggregates regulate the impact of soil bacterial and fungal communities on soil respiration. **Geoderma**, v.337, 444–452, 2019.

ZHANG, X., LIU, X., KONG, L., & CHEN, C. Role of free iron oxides in the physicochemical and mechanical properties of natural clay. **Engineering Geology**, 303, 2022.