

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

DANILO FERREIRA MENDES

**VARIABILIDADE ESPACIAL E RESPOSTA ESPECTRAL DE ATRIBUTOS
FÍSICOS E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS DE UM LATOSSOLO SOB
CAFEICULTURA NO CERRADO MINEIRO**

UBERLÂNDIA
2020

DANILO FERREIRA MENDES

**VARIABILIDADE ESPACIAL E RESPOSTA ESPECTRAL DE ATRIBUTOS
FÍSICOS E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS DE UM LATOSSOLO SOB
CAFEICULTURA NO CERRADO MINEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Fitotecnia, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador:

Prof. Dr. Beno Wendling

Coorientadora:

Prof^a. Dr^a. Cinara Xavier de Almeida

UBERLÂNDIA
2020

DANILO FERREIRA MENDES

**VARIABILIDADE ESPACIAL E RESPOSTA ESPECTRAL DE ATRIBUTOS
FÍSICOS E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS DE UM LATOSSOLO SOB
CAFEICULTURA NO CERRADO MINEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de
Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de
concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de
“Mestre”.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Beno Wendling (Orientador)

Prof. Dr. Ricardo Falqueto Jorge

Prof^a. Dr^a. Roberta Camargos de Oliveira

Eng^a. Agr^a. Dr^a. Suelen Martins de Oliveira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M538v Mendes, Danilo Ferreira, 1994
2020 Variabilidade espacial e resposta espectral de atributos físicos e
substâncias húmicas de um latossolo sob cafeicultura no Cerrado mineiro
[recurso eletrônico] / Danilo Ferreira Mendes. - 2020.

Orientador: Beno Wendling.
Coorientadora: Cinara Xavier de Almeida.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Agronomia.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3309>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Agronomia. 2. Café - Cultivo. 3. Física do solo. 4. Solos -
Fertilidade. I. Wendling, Beno, 1972, (Orient.). II. Almeida, Cinara Xavier
de, 1982, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa
de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU: 631

Angela Aparecida Vicentini Tzi Tziboy – CRB-6/947



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppga.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br

**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 010/2020 PPGAGRO				
Data:	Dezenove de fevereiro de dois mil e vinte	Hora de início:	13:30	Hora de encerramento:	15:30
Matrícula do Discente:	11812AGR005				
Nome do Discente:	Danilo Ferreira Mendes				
Título do Trabalho:	Variabilidade espacial e resposta espectral de atributos físicos e substâncias húmicas de um latossolo sob cafeicultura no cerrado mineiro				
Área de concentração:	Solos				
Linha de pesquisa:	Uso e Recuperação de Solos e Resíduos na Agricultura				

Reuniu-se na sala 207, bloco 1BCG, Campus Glória, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Ricardo Falqueto Jorge - UFU; Suelen Martins de Oliveira - UFU; Roberta Camargos de Oliveira - Pesquisadora; Beno Wendling - UFU orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Beno Wendling, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Beno Wendling, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/02/2020, às 15:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do



[Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.](#)



Documento assinado eletronicamente por **Suelen Martins de Oliveira, Engenheiro(a) Agrônomo(a)**, em 19/02/2020, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Falqueto Jorge, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/02/2020, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roberta Camargos de Oliveira, Usuário Externo**, em 19/02/2020, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1835182** e o código CRC **3530F967**.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Jeová e Cleides.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela vida e por todas as oportunidades concedidas.

Agradeço à minha família pelo incentivo e apoio.

Agradeço aos poucos colegas que contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído.

Agradeço ao Professor Beno pela orientação e pela confiança depositada no meu trabalho.

Agradeço ao Professor Edmar Isaías de Melo pela orientação durante as análises químicas, pelo companheirismo e disposição.

À minha coorientadora, Prof^a. Dr^a. Cinara, por quem tenho enorme admiração profissional e pessoal, agradeço imensamente por tudo o que fez e faz por mim, por todo apoio, ensinamentos, dedicação e paciência durante todos esses anos de pesquisa; juntamente com o Prof. Dr Ricardo Falqueto.

Agradeço aos membros da banca de avaliação pela aceitação do convite, disponibilidade e contribuições.

Deixo-lhes aqui o meu muito obrigado!

EPÍGRAFE

“Estude e não esmoreça, pois traz erguida a cabeça quem sempre cumpre o dever. A vida é luta e batalha, e nela só quem trabalha deve e merece vencer”

Rossandro klinjey

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 A cafeicultura no Cerrado Mineiro.....	2
2.2 Atributos físicos.....	2
2.3 Atributos químicos.....	3
2.4 Agricultura de precisão.....	3
2.5 Índice da Vegetação por diferença Normalizada (NDVI)	4
CAPÍTULO I – Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um latossolo vermelho sob cafeicultura na região do cerrado mineiro.....	7
1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Granulometria do solo.....	9
1.2 Agregação do solo	9
1.2 Densidade do solo e porosidade total	10
1.3 Resistência do solo à penetração.....	11
1.4 Compartimentos da Matéria orgânica.....	12
1.4.1 Ácido húmico	13
1.4.2 Ácido Fúlvico	13
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
2.1 Determinação da posição dos pontos das amostras de campo.....	14
2.2 Amostragem do solo.....	15
2.3 Análise granulométrica	15
2.4 Agregação do solo	15
2.5 Densidade do solo e porosidade total	16
2.6 Resistência do solo à penetração.....	16
2.7 Compartimentos da Matéria Orgânica.....	17
2.8 Produtividade	18
2.9 Análise estatística	18
2.10 Análise variográfica e krigagem	19
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20

3.1 Análise estatística	20
3.2 Análise de semivariograma	22
3.3 Distribuição espacial dos parâmetros físicos, químicos e produtividade	24
4 CONCLUSÕES.....	32
REFERÊNCIAS.....	34
CAPÍTULO II – Resposta espectral de atributos físicos de um latossolo vermelho sob cafeicultura na região do cerrado mineiro.....	
1 INTRODUÇÃO.....	42
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	43
2.1 Determinação da posição das amostras de campo.....	44
2.2 Amostragem do solo.....	44
2.3 Análise granulométrica	45
2.4 Agregação do solo	45
2.5 Densidade do solo e porosidade total	46
2.6 Resistência do solo à penetração.....	46
2.7 Aquisição e processamento da imagem multiespectral	47
2.8 Definição da imagem multiespectral	48
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4 CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS.....	55

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I

FIGURA 1. Croqui área de estudo Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG.....	14
FIGURA 2. Característica do penetrômetro de impacto utilizado.....	17
FIGURA 3. Distribuição espacial da granulometria do solo, sendo: argila, areia total e silte (g.kg ⁻¹) nas camadas de 0 - 0,1m e 0,1-0,2 m resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG.....	24
FIGURA 4. Distribuição espacial do diâmetro médio geométrico (mm) nas camadas 0 - 0,1m (4.a) e 0,1-0,2 m (4.b) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG.....	26
FIGURA 5. Distribuição espacial da densidade do solo (g/cm ³) na camada 0 - 0,1m (5.a) e 0,1-0,2 m (5.b) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG.....	27
FIGURA 6. Distribuição espacial da porosidade total (m ³ m ⁻³) na camada 0 - 0,1m (6.a) e 0,1-0,2 m (6.b) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG.....	28
FIGURA 7. Distribuição espacial da resistência do solo à penetração (Mpa) na camada 0-0,1m (7.a); 0,1-0,2 m (7.b) e (7.c) umidade gravimétrica 0-0,2 m (kg ¹ kg ⁻¹) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG.....	29
FIGURA 8. Distribuição espacial da fração carbono em ácido húmico na camada 0 - 0,1m (8.a) e 0,1-0,2 m (8.b) e distribuição espacial da fração do carbono em ácido fulvico na camada 0 - 0,1m (8.c) e 0,1-0,2 m (8.d) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG.....	31
FIGURA 9. Distribuição espacial da produtividade (sc há ⁻¹) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG.....	32

CAPITULO II

FIGURA 1. Croqui área de estudo Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG.....	44
FIGURA 2. Característica do penetrômetro de impacto utilizado.....	46
FIGURA 3. Correlograma entre os atributos físicos do solo: umidade gravimétrica (H), densidade do solo (Ds) porosidade total (Pt), Resistência do solo à penetração (Rs), agregados do solo (4-2; 2-1; 1-0,5; 0,5-0,25; <0,25 mm), Diâmetro médio geométrico (DMG), Diâmetro médio ponderado (DMP), Granulometria sendo: Teor de argila (Clay), Teor de silte (Silte) e Teor de areia total (Total sand) e a imagem espectral NDVI.....	51

FIGURA 4. Gráficos de regressão entre a Porosidade do solo (4.a) e Densidade do solo(4.b) e índice NDVI.....52

FIGURA 5. Mapa correlação da densidade do solo (5.a) e porosidade total (5.b) obtido a partir do modelo empírico de regressão linear.....53

LISTA DE TABELAS

CAPITULO I

TABELA 1. Estatística descritiva das variáveis: Granulometria do solo sendo: Argila em (g.kg^{-1}) Areia total (g.kg^{-1}) e Silte (g.kg^{-1}); Diâmetro médio geométrico (DMG, em mm) densidade do solo (D_s , em g/cm^3), Porosidade total (P_t , em m^3m^{-3}), Umidade gravimétrica (U , em $\text{kg}^1\text{kg}^{-1}$), Resistência do solo à penetração (RSP, em MPa), Fração carbono em ácido húmico (C-AH, em mg g^{-1} solo), Fração carbono em ácido fulvico (C-AF, em mg g^{-1} solo) em diferentes camadas (0-0,10 e 0,10-0,20 m) e Produtividade (sc há^{-1}) no ano agrícola de 2018/19.....20

TABELA 2. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para: : Granulometria do solo sendo: Argila em (g.kg^{-1}) ·Areia total (g.kg^{-1}) e Silte (g.kg^{-1}); Diâmetro médio geométrico (DMG, em mm) Densidade do solo (D_s , em g/cm^3), Porosidade total (P_t , em m^3m^{-3}), Umidade gravimétrica (U , em $\text{kg}^1\text{kg}^{-1}$), Resistência do solo à penetração (RSP, em MPa), Fração carbono em ácido húmico (C-AH, em mg g^{-1} solo), Fração carbono em ácido fúlvico (C-AF, em mg g^{-1} solo) em diferentes camadas (0-0,10 e 0,10-0,20 m) e Produtividade (sc há^{-1}) no ano agrícola de 2018/19.....22

MENDES, Danilo Ferreira. **Variabilidade espacial e resposta espectral de atributos físicos e substâncias húmicas de um latossolo sob cafeicultura no cerrado mineiro 2020.71f.** Dissertação (Mestrado em Agronomia Fitotecnia) – Universidade Federal de Uberlândia, 2020

RESUMO

Os atributos físicos e químicos do solo são fatores importantes a serem considerados no manejo da cultura do café, pois podem limitar a produtividade das lavouras cafeeiras. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi analisar a variabilidade espacial e a resposta espectral dos atributos físicos e químicos de um LATOSSOLO VERMELHO argiloso. O estudo foi realizado em uma área de 14 hectares cultivada com *Coffea arabica*. O solo da área foi amostrado nas camadas de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, em uma malha amostral de 112 pontos. Essas amostras foram utilizadas na determinação dos indicadores químicos (ácido húmico e ácido fúlvico) e indicadores físicos por meio de amostras indeformadas retiradas através de cilindros, as quais foram saturadas para determinação da porosidade total e da densidade do solo e amostras deformadas (agregados do solo e granulometria). Foram também realizadas leituras da resistência do solo à penetração, através de um penetrômetro de impacto. Conjuntamente foi determinada a produtividade da cultura. Para cada variável obtida foi realizado um estudo estatístico dos principais momentos através da estatística descritiva, visando caracterizar a distribuição probabilística e verificar a variabilidade dos dados. A metodologia geoestatística também foi utilizada com o objetivo de definir o modelo de variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo envolvidos neste estudo. A análise variográfica foi realizada através de semivariogramas. Para a confecção dos mapas foi utilizado o programa GS+. A resposta espectral foi feita através do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), correlacionando aos valores amostrados em campo. Todas as variáveis avaliadas possuem grau de dependência espacial forte e ou moderado. A densidade do solo e a porosidade total apresentaram correlação com a ferramenta NDVI. O uso da geoestatística e o índice da vegetação juntamente com os mapas gerados podem ser ferramentas úteis para auxiliar o produtor na tomada de decisões relacionadas ao manejo do solo em áreas com cultivo de cafeeiro.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.; física do solo, fertilidade do solo, geoestatística.

¹Orientador: Prof. Dr. Beno Wendling – UFU.

MENDES, Danilo Ferreira. **Spatial variability and spectral response of physical and chemical attributes of a red oxisol under coffee cultivation in the Cerrado region. 2020.** 71p. Dissertation (Master Program Agronomy/Crop Science) - Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2020.¹

ABSTRACT

The physical and chemical attributes of the soil are important factors to be considered in the management of coffee culture, as they can limit the productivity of coffee crops. Thus, the objective of the present study was to analyze the spatial variability and the spectral response of the physical and chemical attributes of a clayey RED LATOSOL. The study was carried out in an area of 14 hectares cultivated with *Coffea arabica*. The soil in the area was sampled in the 0 to 0.1 m and 0.1 to 0.2 m layers, in a 112-point sampling grid. These samples were used in the determination of chemical indicators (humic acid and fulvic acid) and physical indicators by means of undisturbed samples taken through cylinders, the which were saturated to determine total porosity and soil density and deformed samples (soil aggregates and granulometry). Readings of soil resistance to penetration were also performed, using an impact penetrometer. The productivity of the crop was jointly determined. For each variable obtained, a statistical study of the main moments was carried out through descriptive statistics, aiming to characterize the probabilistic distribution and verify the data variability. The geostatistical methodology was also used in order to define the spatial variability model of the physical and chemical attributes of the soil involved in this study. Variographic analysis was performed using semivariograms. To make the maps, the GS + program was used. The spectral response was made through the normalized difference vegetation index (NDVI), correlating with the values sampled in the field. The use of geostatistics and the vegetation index together with the generated maps can be useful tools to assist the producer in making decisions related to soil management in areas with coffee cultivation.

Keywords: *Coffea arabica* L.; soil physics, soil fertility, geostatistics.

¹Major Professor: Prof. Dr. Beno Wendling

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cafeicultura no Brasil é um ramo importante do agronegócio, pois é uma das culturas que mais movimentam a economia do país. Minas Gerais é o estado que possui a maior área destinada à cafeicultura no país. Dados de 2019 apontam que a área em produção é de 983.726 hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2019).

A região do Cerrado Mineiro possui um grande potencial para a atividade cafeeira, contendo solos propícios e clima favorável para o desenvolvimento da cultura, possibilita a produção de cafés de alta qualidade com certificação e competitividade no mercado.

No solo, existem diversas inter-relações entre os atributos físicos, químicos e biológicos que controlam os processos e os aspectos relacionados à sua variação no tempo e no espaço. Assim, qualquer alteração no solo pode alterar diretamente sua estrutura e sua atividade biológica e, consequentemente a fertilidade, com reflexos nos agroecossistemas (BROOKES, 1995).

Assim como os solos, o papel da agricultura de precisão nas atividades agrícolas tem se destacado nos últimos anos, cujo princípio de manejo está fundamentado na variabilidade espacial de atributos em estudo nos solos. A variabilidade espacial originou-se no início da década de 60, com o desenvolvimento da teoria das variáveis regionalizadas. O princípio fundamental da geoestatística é que a variabilidade de um atributo está associada ao espaço físico. Assim, considerando dois pontos genéricos e um dado atributo, por exemplo, textura do solo, existirá maior semelhança da textura do solo de um ponto em relação ao outro, quanto menor for a distância entre eles (ALBA, 2009).

O conhecimento da variação dos atributos físicos e químicos em uma área cultivada é importante para o levantamento e manejo do solo, planejamento de esquemas de amostragem e gerenciamento de práticas agrícolas (SILVA et al., 2010). Por isso, antes de tentar estabelecer qualquer relação desses atributos com a cultura, é importante avaliar a extensão e a intensidade da dependência espacial da sua variação, isoladamente ou em conjunto com outras variáveis (GANDAN et al., 2000) como por exemplo a densidade, a estrutura, a resistência do solo à penetração e a porosidade do solo.

A qualidade desses atributos propicia condições adequadas para o crescimento e o desenvolvimento das plantas e para a manutenção da diversidade de organismos que habitam o solo (DORAN; PARKIN, 1994), afetando diretamente a produtividade das culturas. Dessa forma, objetivou-se com o presente estudo analisar a variabilidade espacial dos atributos

químicos e físicos e correlacioná-los com imagens espectrais em um LATOSSOLO VERMELHO argiloso cultivado com cafeeiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cafeicultura no Cerrado Mineiro

O café (*Coffea arabica* L.) é uma das commodities agrícolas mais importantes do Brasil, sendo que nos dias atuais, é o quinto produto agrícola mais exportado do país. Na safra de 2019 a produção brasileira foi de 50,92 milhões de sacas beneficiadas, tornando o país o maior produtor e exportador mundial. Neste cenário, o estado de Minas Gerais tem um papel fundamental no fornecimento de café, pois é o maior produtor do país, contribuindo próximo a 60% de toda a produção nacional (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2019).

A área plantada do café arábica no país soma 1,74 milhão de hectares, o que corresponde a 80,7% da área existente com lavouras de café. Minas Gerais concentra a maior área com a espécie, 1,21 milhão de hectares, correspondendo a 69,6% da área ocupada com café arábica em âmbito nacional (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2019).

Na região do Cerrado Mineiro foram destinados aproximadamente 185,7 mil hectares para a produção de café. De modo geral, foram cerca de 4.591,9 milhões sacas de café colhidas com uma produtividade média de 24,73 scs/ha. (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2019).

2.2 Atributos físicos

Por atributos físicos entende-se um conjunto de caracteres que delineiam o comportamento da termodinâmica do solo como um todo. Dentre eles merecem destaque: a granulometria, agregação e densidade do solo, porosidade total e resistência do solo à penetração.

O uso intensivo das áreas agrícolas juntamente com um manejo inadequado propicia a degradação dos atributos físicos do solo, favorecendo em processos que diminuem o tamanho

de poros, aumentam a densidade e consequentemente impossibilitam o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas; o que acarreta em uma má qualidade física do solo.

Para Doran e Parkin (1994), um solo considerado de boa qualidade é aquele capaz de desempenhar funções em um ecossistema, como suportar plantas e animais, resistir à erosão e reduzir impactos negativos associados aos recursos água e ar, e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens. A preocupação com a qualidade do solo tem crescido à medida que o seu uso e mobilização intensiva possam redundar na diminuição da sua capacidade de manter uma produção biológica sustentável (CARVALHO et al., 2004),

Lima (2004) destaca que práticas de manejo do solo e das culturas ocasionam mudanças nos atributos físicos do solo, sendo essas mudanças permanentes ou temporárias. Por isso, o conhecimento da qualidade física de um solo é fundamental para a tomada de decisões quanto às práticas de manejo a serem adotadas.

2.3 Atributos químicos

Os atributos químicos relacionam-se com o comportamento do solo como um corpo que contém partículas carregadas eletricamente, as quais, por sua própria natureza, apresentam dinamismo no espaço e no tempo (MOTA, 2004). Os atributos químicos determinados foram os compartimentos da matéria orgânica: ácido húmico e ácido fúlvico.

As substâncias húmicas são compostas de ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina, principais componentes da matéria orgânica do solo (SILVA; MENDONÇA, 2007), ou ainda, as substâncias húmicas são produtos das transformações químicas e biológicas dos resíduos vegetais e animais, assim como da atividade da microflora do solo (Michel et al., 1996), sendo assim são agentes indispensáveis para a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

2.4 Agricultura de precisão

Para Gebbers e Adamchuk (2010), a agricultura de precisão pode ser definida como uma importante ferramenta para práticas agrícolas com o emprego da tecnologia de informação para o tratamento da variabilidade espacial.

Dessa forma, Corá et al. (2004), afirmam que o estudo da variabilidade espacial de atributos do solo possibilita a visualização de pontos homogêneos, o que viabiliza a utilização do sistema de agricultura de precisão. Mesmo em áreas de solos vistas como homogêneas, as características do solo podem apresentar amplas variações de valores, uma vez que o solo é produto da ação de diversos fatores de formação e varia continuamente na superfície (GONÇALVES et al., 2001).

A variabilidade espacial das propriedades do solo podem ser influenciadas por fatores intrínsecos como material de origem, relevo, clima, organismos, tempo e por fatores extrínsecos, normalmente devido as práticas de manejo do solo (CARVALHO et al., 2003). As análises dos mapas possibilitam constatar variações em diferentes pontos no campo, o que possibilita um manejo específico e localizado de acordo com suas necessidades, promovendo maior eficiência no uso de insumos. O estudo da variabilidade espacial de propriedades do solo tem grande importância para aumentar a eficiência do uso de fertilizantes e outros insumos nas lavouras.

2.5 Índice da Vegetação por diferença Normalizada (NDVI)

O Índice da Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um modelo resultante da combinação dos níveis de reflectância em imagens de satélites, proveniente da equação composta pelas respostas das bandas espectrais do vermelho e infravermelho.

De acordo com Moreira (2003), a região do visível, o qual se insere a banda 3, compreende toda radiação eletromagnética da faixa espectral de 400 a 700 nm. A maior parte desta radiação que incide sobre o dossel vegetativo é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes no mesófilo das folhas.

O sensoriamento remoto tem desempenhado um papel importante para o monitoramento de culturas agrícolas com o propósito de manejar de forma adequada as lavouras a fim de maximizar as operações em campo e aumentar a produtividade.

Como pode-se observar na literatura, as técnicas de sensoriamento remoto podem ser utilizadas para diversos objetivos, dentre eles a mais utilizada atualmente a identificação de patógenos e falhas de plantio. Nesse contexto, objetivou com este estudo correlacionar índices espectrais com atributos físicos em um LATOSSOLO VERMELHO argiloso cultivado com cafeeiro.

REFERÊNCIAS

- ALBA, J. M. F. **Uma nova chance para a Agricultura de precisão: a agricultura a variabilidade espacial**. 2009. Disponível em: <<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=22337&secao=ArtigosEspeciais>>. Acesso em: 31 jul. 2017
- BROOKES, P. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. **Biology and Fertility of Soils**, Berlim, v. 19, p. 269-279, 1995. DOI <https://doi.org/10.1007/BF00336094>. Acesso em: 10 fev. 2020
- CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R. P. da; FERNANDES, A. L. T. **Compactação do solo em cafeicultura irrigada**. Uberaba: Universidade de Uberaba, 2004. 44 p. (Boletim técnico, 3)
- CARVALHO, M.P. *et al.* Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n.4, p. 695-703, 2003. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400014>
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Acompanhamento da Safra Brasileira de Café**, Quarto Levantamento, Brasília, p. 1-48, dez. de 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em: 02 março. 2020.
- CORÁ, J.E. *et al.* Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600010>
- DORAN, J. W.; PARKING, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W., COLEMAN, D. C., BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (Special publication, 35). <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35>
- GANDAH, M. *et al.* Dynamics of spatial variability of millet growth and yields at three sites in Niger, West Africa and implications for precision agriculture research. **Agricultural Systems**, Essex, v. 63, p. 123-140, 2000. DOI [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(99\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(99)00076-1)
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, p. 828-31, 2010. DOI <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; MATA, J.D.V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, v. 23, n.5, p. 1149-1157, 2001

LIMA, C. L. R **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada.** 2004. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura de “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2004

MICHEL, K.; MARITXU, G.; RENÉ, B.J. & REVEL, J.C. **Influência de las substancias húmicas sobre las características bio-físico-químicas de los suelos. Consecuencias sobre la nutrición mineral de las plantas.** In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., Águas de Lindóia, 1996. Conferencias. Águas de Lindóia, EMBRAPA, 1996. CD-ROM

MOREIRA, MA. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de aplicação.** 2. ed., Viçosa/MG-UFV, 307p. 2003.

MOTA, J. C. A. **Caracterização física, química e mineralógica, como suporte para o manejo, dos principais solos explorados com a cultura do melão na chapada do apodi – rn.** 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 6, p. 275-374.

SILVA, S. A.; *et al.* Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 10-31, 2010. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100002>

CAPÍTULO I – Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um latossolo vermelho sob cafeicultura na região do cerrado mineiro

RESUMO

A cafeicultura no Brasil é um ramo importante do agronegócio, pois é uma das culturas que mais movimentam a economia do país, sendo a mesma responsável por cerca de um terço da produção mundial de café, dessa forma, o objetivo do presente estudo foi analisar a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos de um LATOSSOLO VERMELHO argiloso. O estudo foi realizado em uma área de 14 hectares cultivada com *Coffea arabica* L. As amostras de solo indeformadas foram coletadas nas camadas de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, com cilindros de 0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro ($53,16 \cdot 10^{-6} \text{m}^3$), as quais foram saturadas para a determinação da porosidade total e da densidade do solo e amostras deformadas para a determinação da agregação do solo e da granulometria juntamente com os atributos químicos (ácido húmico e ácido fúlvico). Realizou-se leituras da resistência do solo à penetração também nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, através de um penetrômetro de impacto. A amostragem do solo foi realizada em uma malha regular com 112 pontos distanciados de 25 x 50 metros. Conjuntamente a produtividade da cultura foi estimada. Para cada variável obtida foi realizado um estudo estatístico dos principais momentos através da estatística descritiva, visando caracterizar a distribuição probabilística e verificar a variabilidade dos dados. A metodologia geoestatística também foi utilizada com o objetivo de definir o modelo de variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo envolvidos neste estudo. A análise variográfica foi realizada através de semivariogramas. Constatou-se que a área em estudo apresentou dependência espacial forte e ou moderada para os atributos estudados ao longo da área, demonstrando desse modo que o manejo empregado pode alterar os atributos físicos e químicos do solo; e o uso da geoestatística juntamente com os mapas gerados podem ser ferramentas úteis para auxiliar o produtor na tomada de decisões relacionadas ao manejo do solo em áreas com cultivo de cafeeiro.

Palavras-chave: solo, dependência espacial, semivariograma, geoestatística

CHAPTER I - Spatial variability of physical and chemical attributes of a red oxisol under coffee cultivation in the Cerrado region of Minas Gerais

ABSTRACT

Coffee cultivation in Brazil is an important branch of agribusiness, as it is one of the cultures that most move the economy of the country, being responsible for about one third of the world coffee production, therefore, the objective of the present study was to analyze the spatial variability of the physical and chemical attributes of a clayey Red Latosol. The study was carried in an area of 14 hectares cultivated with *Coffea arabica* L. The undisturbed soil samples were collected in the 0 to 0.1 m and 0.1 to 0.2 m layers, with 0.03 m cylinders. height and 0.048 m in diameter (53.16.10-6m³), which were saturated for the determination of total porosity and soil density and deformed samples for the determination of soil aggregation and granulometry together with chemical attributes (humic acid and fulvic acid). Readings of soil resistance to penetration were also carried out in the 0-0.1 and 0.1-0.2 m layers, using an impact penetrometer. The soil sampling was carried in a regular grid with 112 points 25 x 50 meters apart. Together, the productivity of the crop was estimated. For each variable obtained, a statistical study of the main moments was carried out through descriptive statistics, aiming to characterize the probabilistic distribution and verify the data variability. The geostatistical methodology was also used in order to define the spatial variability model of the physical and chemical attributes of the soil involved in this study. Variographic analysis was performed using semivariograms. It was found that the study area had strong and / or moderate spatial dependence for the attributes studied throughout the area, thus demonstrating that the management used can alter the physical and chemical attributes of the soil; and the use of geostatistics together with the generated maps can be useful tools to assist the producer in making decisions related to soil management in areas with coffee cultivation.

Keyword: soil, spatial dependence, semivariogram, geostatistics

1 INTRODUÇÃO

1.1 Granulometria do solo

A granulometria do solo expressa as proporções relativas das diferentes partículas minerais menores que dois milímetros (areia, silte e argila), agrupadas por classes de tamanho em frações granulométricas, após a destruição dos agregados. Embora o termo granulometria seja também tratado por diversos autores como sendo sinônimo de textura, é mais coerente usar o primeiro termo uma vez que, no sentido mais restrito da palavra textura significa a sensação que tem o prospector ao fazer deslizar entre os dedos uma amostra de solo úmida. Neste sentido, textura passa a ser sinônimo de classe textural e não de distribuição de partículas por tamanho (CASANELLAS et al., 1999).

Ainda de acordo com (GAVANDE, 1972; BRADY, 1989) a textura do solo refere-se às proporções relativas das partículas de variados tamanhos que ocorrem em um determinado solo; auxiliando na determinação de maior ou menor capacidade de disponibilidade de nutrientes, água e ar para as plantas; evidenciando desse modo a importância desse atributo.

1.2 Agregação do solo

Quando as partículas primárias do solo se agrupam e a força que une tais partículas é maior que a força de união entre partículas adjacentes, fica caracterizada a formação dos agregados (FERREIRA, 2010).

De acordo com Bronick e Lal (2005), a agregação resulta do rearranjo de partículas, floculação e cimentação mediado pelo carbono orgânico do solo, biota, ponte iônica, argila e carbonatos, sendo o carbono, ao mesmo tempo, agente de ligação e núcleo na formação dos agregados.

Nos solos cultivados, os agregados são expostos, ficando sujeito à fragmentação, principalmente os macroagregados ($> 0,25$ mm), resultando em aumento na proporção relativa de microagregados ($< 0,25$ mm), quer pelo rápido umedecimento e pelo impacto de gota de chuva, quer pelo cisalhamento por implementos agrícolas. Os macroagregados consistem de partículas mantidas juntas principalmente pela rede de raízes e hifas no caso de solos com teores elevados de carbono (> 10 g kg⁻¹) e somente pela ação ligantes dos microrganismos e agentes

cimentantes produzidos por eles, em solos com baixos teores de carbono (TISDALL e OADES, 1982).

A movimentação do solo e o tráfego de máquinas e implementos agrícolas modifica o tamanho dos agregados do solo, com aumento da densidade, redução da porosidade total e aumento na proporção de poros pequenos em relação aos grandes, uma vez que os poros grandes são altamente afetados pelo manejo do solo (CINTRA, 1980; SILVA, 1980)

Para o monitoramento da qualidade do solo, de forma que possam ser sugeridas modificações nos sistemas de manejo de modo a evitar sua degradação, deve-se identificar e caracterizar os processos e propriedades que influenciam sua capacidade de produção e sustentabilidade (DORAN e PARKIN, 1994). A avaliação da estabilidade de agregados é de fundamental importância para o estudo da física do solo, uma vez que este atributo está diretamente correlacionado com a infiltração de água no solo e consequentemente com o processo erosivo.

1.2 Densidade do solo e porosidade total

A densidade do solo é definida como a massa por unidade de volume de solo seco. Esse volume inclui tanto partículas sólidas como o seu espaço poroso (BRADY; WEIL, 2013). Dessa forma, qualquer manifestação que possa influenciar a disposição das partículas do solo refletirá diretamente nos valores de densidade do mesmo (FERREIRA, 2010), tais como: teor de matéria orgânica, estrutura do solo (composição mineralógica), profundidade e práticas conservacionistas.

Goedert et al. (2002) relatam a falta de consenso entre pesquisadores sobre o nível crítico da densidade do solo, não apresentando um valor acima do qual o solo é considerado compactado. Assim, características originais de cada solo e as práticas de manejo empregadas, destacam entre vários outros fatores, sobre o estado de compactação do solo.

Ferreira e Dias Junior (2001) afirmam através de pesquisas realizadas com o intuito de demonstrar o efeito da compactação nos atributos físicos do solo, que a compactação aumenta a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração e diminui a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros.

O conhecimento do comportamento desses atributos pode indicar as condições do manejo na área, de tal forma que quando estes apresentarem alterações significativas pode afetar a produtividade e o desenvolvimento das plantas. Portanto, a determinação da densidade pode

servir de importante balizador na tomada de decisão quanto ao sistema de manejo do solo a ser adotado FERREIRA, 2010).

1.3 Resistência do solo à penetração

Entende-se por camada de solo compactada, a faixa de perfil que, devido à ação antrópica, em sua extensão superficial ou subsuperficial, apresenta, em virtude de uma carga de compressão mecânica, um valor de densidade maior que em seu estado natural, gerando uma diminuição em seu volume, causando um rearranjo do solo reduzindo a porosidade (CARVALHO FILHO; et al. 2004) e, conseqüentemente, também a qualidade do solo. Richart et al.(2005) ainda destacam a granulometria do solo no processo de compactação do solo, uma vez que a composição mineralógica da fração argila e o seu teor no solo atuam de forma a transmitir a pressão recebida para camadas mais profundas, acentuando a compactação do solo.

Qualitativamente, a resistência do solo é a capacidade do mesmo em suportar forças sem apresentar falhas, seja por ruptura, fragmentação ou fluxo. Em termos quantitativos, essa resistência pode ser definida como a máxima tensão que um solo pode suportar sem ocorrer falhas. A resistência do solo à penetração tem sido utilizada para identificar camadas compactadas e mudanças nas propriedades físicas do solo associadas aos seus horizontes (REICHERT et al., 2010).

Nesse sentido, a determinação da resistência do solo à penetração, diretamente no campo, apresenta algumas dificuldades, como a necessidade de determinação simultânea da umidade do solo, nas distintas camadas e locais de determinação. Sabe-se ainda, que existe uma elevada variabilidade espacial da resistência do solo à penetração devido à variação da umidade do solo. Quando houver presença de plantas, essa variação será ainda maior, principalmente nas camadas mais superficiais, justamente aquelas que apresentam as maiores alterações na estrutura (KLEIN, 2008).

Em solos compactados ocorre alteração da estrutura e, conseqüentemente, decréscimo da porosidade, da macroporosidade, da disponibilidade de água e nutrientes e da difusão de gases no solo (TAYLOR; BRAR, 1991); sendo que a limitação do crescimento das raízes afeta diretamente a absorção de nutrientes e de água. Segundo Hakansson et al. (1998), em solos compactados, o menor desenvolvimento do sistema radicular resulta em menor volume de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, menor absorção de água e nutrientes.

Dessa forma, o desenvolvimento da cafeicultura está relacionado com o uso intenso de máquinas agrícolas que podem causar compactação do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996;

LARSON; GUPTA, 1980), alterando o meio onde o sistema radicular se desenvolve (GYSI, 2001). O desenvolvimento do sistema radicular das plantas é influenciado por vários atributos físicos do solo, que governam diretamente a disponibilidade de água e nutrientes, as trocas gasosas e a resistência do solo à penetração. Contudo, devido às complexas interações que envolvem esses atributos, há dificuldade de determinar, de maneira isolada, os seus valores críticos que são limitantes ao crescimento e à produtividade das culturas (FREDDI et al., 2009).

Além disso, outro aspecto a ser considerado é que a área de trabalho para mecanização no cultivo do cafeeiro é restrita a pequenas faixas nas entrelinhas de plantio, o que obriga as máquinas a transitarem sempre no mesmo local (CARVALHO FILHO et al., 2004) e próximas da saia do cafeeiro, local onde se concentram as suas raízes ativas (GONTIJO et al., 2007), o que pode levar à compactação do solo.

A resistência à penetração varia com o tipo de solo e a espécie cultivada, e é altamente influenciada pela condição de umidade do solo. Portanto, vários autores recomendam que ela seja medida em umidades próximas à capacidade de campo (ALMEIDA et al., 2012), situação em que há uma correlação entre os seus valores, a densidade do solo e o crescimento e desenvolvimento radicular das plantas.

1.4 Compartimentos da Matéria orgânica

Componentes do solo, em especial as substâncias húmicas e as frações granulométricas, apresentam relação com propriedades físicas como a agregação, porosidade e retenção de água do solo (CARDUCCI et al., 2011; FONTANA et al., 2010; PASSOS et al., 2008).

Zech et al. (1997) descrevem que cerca de 10 a 15% da reserva total de carbono orgânico nos solos minerais é constituída por macromoléculas (proteínas e aminoácidos, carboidratos simples e complexos, resinas, ligninas e outras), e 85 a 90% pelas substâncias húmicas.

As substâncias húmicas são compostas de ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina, principais componentes da matéria orgânica do solo (SILVA; MENDONÇA, 2007).

A matéria orgânica presente no solo desempenha importante papel no desenvolvimento das plantas, dado a sua influência direta e indireta nos processos químicos, físicos e biológicos do solo, possuindo papel preponderante na formação e estabilização dos agregados. Os agregados são componentes da estrutura do solo, sendo, portanto, importantes na manutenção da porosidade e aeração favoráveis ao crescimento das plantas e dos microorganismos para a

infiltração de água e para a estabilidade necessária à prevenção da erosão (TISDALL e OADES, 1982; OADES, 1984).

Para entender como a matéria orgânica contribui como indicador da qualidade física do solo, bem como analisar a variabilidade espacial, é importante conhecer as principais frações e compartimentos da matéria orgânica e suas funções no solo.

1.4.1 Ácido húmico

Os ácidos húmicos constituem a maior fração das substâncias húmicas, trata-se de precipitados escuros, solúveis em ácidos minerais e solventes orgânicos. Tem elevado peso molecular, com origem na lignina, possuem alto teor de ácidos carboxílicos e significativas quantidades de nitrogênio; e menor capacidade de troca de cátions quando comparado ao ácido fúlvico (TAN, 1993).

De acordo com Primavesi (2017), o ácido húmico é o resultado de um processo oxidativo na existência de micronutrientes e cálcio, potássio, fósforo e outros, resultando em um material com valores consideráveis desses elementos adicionado ao nitrogênio fixado do ar, acontecendo no húmus em teores superiores quando comparados ao material vegetal original.

Conforme Primo et al. (2011), os ácidos húmicos apresentam solubilidade em meio básico e insolubilidade em meio ácido. Estabelecidos como elementos de tonalidade escura, constituída por macromoléculas de massa molecular relativamente elevada, elaboradas através de reações de síntese secundárias, por meio da utilização de substâncias residuais de plantas, animais e micro-organismos.

1.4.2 Ácido Fúlvico

Os ácidos fúlvicos são solúveis em água, soluções ácidas e alcalinas. Apesar de possuírem similaridade estrutural aos ácidos húmicos, apresentam menor peso molecular, maior quantidade de compostos fenólicos e de grupos carboxílicos e uma menor quantidade de estruturas aromáticas. Estas características lhes conferem melhor solubilidade em água, maior capacidade de troca catiônica e mobilidade no solo.

De acordo com Assunção et al. (2013) os ácidos fúlvicos são elaborados principalmente, pela associação de pequenas moléculas hidrofílicas que apresentam grupos funcionais ácidos, os quais mantêm seus constituintes solúveis em qualquer faixa de pH.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em área agrícola, próximo às coordenadas 18°42'28.9"S 47°33'27.0"W, em um LATOSSOLO VERMELHO argiloso (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2013). A área vem sendo cultivada com *Coffea arabica* L. nos últimos anos. Em janeiro de 2012 a lavoura foi renovada com plantio de café no espaçamento de 3,8 x 0,7 m. A partir de março de 2018 procedeu-se a caracterização da área de aproximadamente 14 ha, para definição da malha regular de amostragem com 112 pontos distanciados de 25 x 50 m (Figura 1).

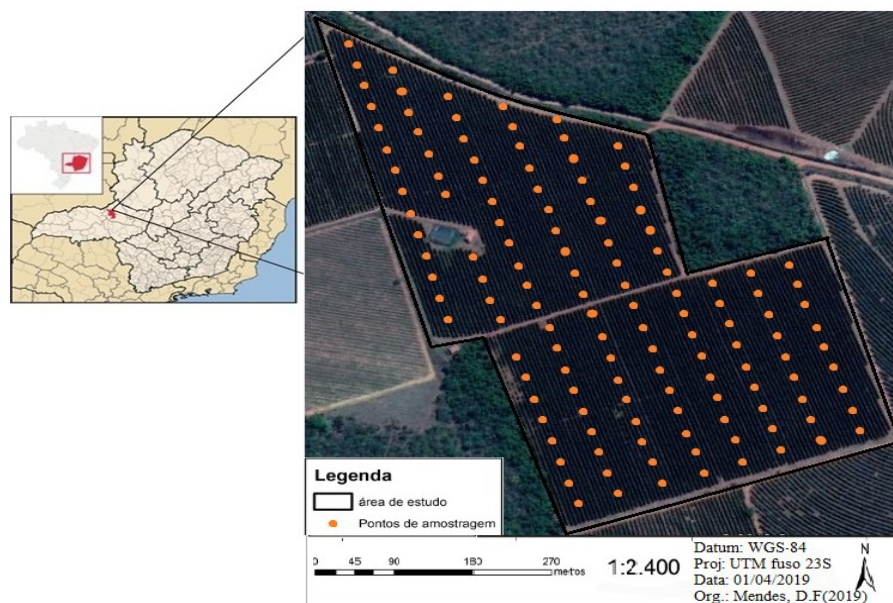


FIGURA 1. Croqui área de estudo Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG

2.1 Determinação da posição dos pontos das amostras de campo

Foi utilizado um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) do tipo Hipper de dupla frequência L1/L2 para a coleta das coordenadas dos pontos. Um dos receptores foi utilizado para servir de base no rastreo pelo GNSS, realizando um posicionamento relativo estático. Posteriormente, os dados foram processados no *software Topcon Tools 8.2.3*, adotando-se como estações de referência para o pós-processamento as estações de Uberlândia/MG e Rio Paranaíba/MG, da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC).

2.2 Amostragem do solo

O solo da área foi amostrado nas camadas de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, em todos os pontos da malha, contemplando os relevos diferenciados na paisagem. Essas amostras foram utilizadas na determinação dos indicadores físicos e químicos de qualidade do solo.

2.3 Análise granulométrica

A composição granulométrica foi determinada por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹), agitação lenta, durante 16 horas, e determinação do conteúdo de argila pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2011).

2.4 Agregação do solo

Para cada amostra, foi determinada a distribuição das classes de agregados por meio do tamisamento a úmido pelo método de Yoder (1936). O tamisamento a úmido foi realizado em um recipiente cilíndrico onde são colocados quatro jogos de peneiras. Cada conjunto no tamisador foi constituído por peneiras com malhas de 2,0 - 1,0 - 0,5 e 0,25 mm de abertura.

Foi quantificado o solo retido em cada peneira e, ainda, aquele que passou através da última peneira (< 0,25 mm), obtendo-se, assim, cinco classes de agregados, cujos diâmetros médios foram, respectivamente, 3,0 - 1,5 - 0,75 - 0,375 e 0,125 mm. As amostras de solo foram preparadas com peneira de 4 mm de abertura de malha.

O processo de tamisagem para cada amostra consistiu na separação de três subamostras de 50 g cada, duas para cada jogo de peneiras e uma para determinar a umidade e, assim, calcular o peso da amostra seca. Em cada jogo de peneiras, as amostras foram dispostas sobre a peneira de maior malha, contendo um papel de filtro para retenção da amostra até que ela fosse saturada por capilaridade, durante 4 minutos. A saturação por capilaridade foi obtida por meio da elevação do nível de água do tamisador até o umedecimento do papel de filtro. Depois de saturadas as amostras, retirou-se o papel com auxílio de uma pisseta com água. Em seguida, o tamisador foi acionado por 4 minutos, com movimento vertical de 32 oscilações por minuto. O solo retido em cada peneira foi transferido para cápsulas de alumínio com o auxílio de jatos de água de uma pisseta dirigidos ao fundo da peneira. As amostras foram levadas à estufa para secagem a 105 °C, sendo posteriormente pesadas. A menor classe de agregados foi constituída

pelo solo que passou pela peneira de 0,25 mm de abertura de malha, ficando disperso no tamisador, sendo determinada, subtraindo-se o somatório do peso das outras classes de agregados do peso total da amostra seca. Os resultados obtidos foram utilizados para o cálculo do diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG, em mm), da seguinte maneira (KEMPER; ROSENAU, 1986):

$$DMG = \exp \frac{\sum_{i=1}^n w_i \log(\bar{x}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

em que: w_i é o peso dos agregados em cada classe (g), \bar{x}_i é o diâmetro médio das classes (mm).

2.5 Densidade do solo e porosidade total

Também foram coletadas amostras indeformadas de solo, com cilindros de 0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro ($53,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$), nas camadas de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, que foram saturadas para determinação da porosidade total e da densidade do solo (EMBRAPA, 2011).

2.6 Resistência do solo à penetração

Determinou-se a resistência do solo à penetração nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, através de um penetrômetro de impacto (STOLF, 1991). O penetrômetro que foi utilizado apresenta as seguintes características: área da base do cone de $1,77 \times 10^{-4} \text{ m}^2$; altura de queda de 0,57 m; massa do êmbolo, ou seja, massa que provoca o impacto igual a 8,02 kg e massa dos demais componentes do penetrômetro, excluída a de impacto, igual a 8,37 kg, conforme representado na Figura 2. Simultaneamente a essas leituras determinou-se o conteúdo gravimétrico de água no solo (EMBRAPA, 2011). Para cada ponto amostrado realizou-se quatro repetições.

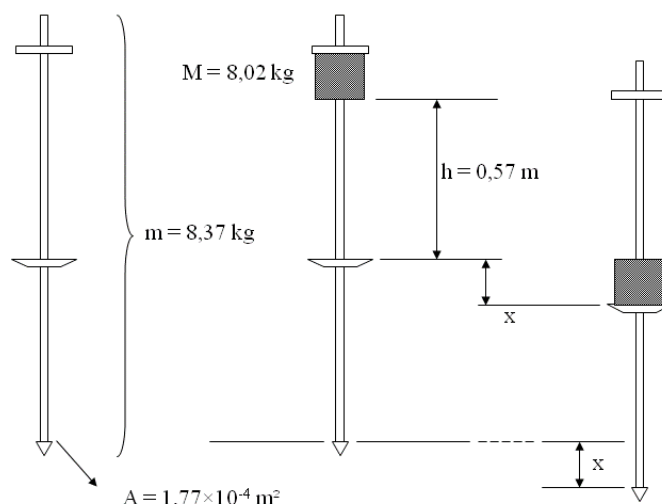


FIGURA 2. Características do penetrômetro de impacto utilizado.

2.7 Compartimentos da Matéria Orgânica

O fracionamento químico das substâncias húmicas foi realizado com base nas características de solubilidade diferencial, obtendo como produtos as seguintes frações: ácidos fúlvicos (AF) - solúveis em ácido e em álcali; ácidos húmicos (AH) - solúveis em álcali e insolúveis em ácido (SCHNITZER, 1982; MENDONÇA; MATOS, 2005).

A extração foi determinada segundo Embrapa (2003) com modificações. Utilizou-se 0,0625 g de TFSA, a qual passou em peneira de 0,3 mm e colocado em microtubo de 1,5 mL. Então foi adicionado 1,0 mL de solução de NaOH à 0,1 mol/L, agitado manualmente e deixado em repouso por 24 horas. Após o repouso, o conjunto de extração foi centrifugado a 5.000 g por 10 minutos, transferindo-se o sobrenadante para microtubo de mesma capacidade (1,5 mL) e reservando-o. O microtubo contendo o sobrenadante (AH e AF) recebeu 25 µL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) e deixado em repouso por 18 horas após o repouso a amostra foi novamente centrifugada a 5.000 g por 10 minutos. Resultou-se com a centrifugação o sobrenadante AF. e o precipitado (AH), onde foi transferido o sobrenadante para outro microtubo de volume de 1,5 mL sendo este o AF. No microtubo contendo o precipitado (AH) foi adicionado 1,0 mL de solução de NaOH 0,1 mol/L.

O carbono orgânico das frações (AF) e (AH) foi quantificado utilizando-se uma alíquota de 1 mL do extrato sendo este resultante do processo anterior, 1 mL de dicromato de potássio 0,042 mol L⁻¹ e 1 mL de H_2SO_4 concentrado onde foi colocada em tubo de ensaio de volume

de 10 mL. Posteriormente a amostra foi aquecida em bloco digestor pré-aquecido a 150°C durante 30 minutos.

Conjuntamente foi feita curva de calibração com diferentes concentrações de sacarose para a quantificação do carbono em cada compartimento da matéria orgânica. Para a leitura das amostras foi utilizado espectrofotômetro ajustado para comprimento de onda de 450 nm.

2.8 Produtividade

A produtividade foi obtida através da colheita manual de quatro plantas por meio da derriça manual dos grãos de café no pano, sendo posteriormente feita a abanação para retirada de galhos e folhas. Logo após, os grãos foram colocados no interior de um recipiente para determinação do peso total colhido. Da quantidade total de café verde colhido foi retirada uma amostra de 1 kg e levada para estufa a 65°C para secagem e beneficiamento.

2.9 Análise estatística

Para cada variável obtida realizou-se um estudo estatístico dos principais momentos através da estatística descritiva, visando caracterizar a distribuição probabilística e verificar a variabilidade dos dados. Os momentos estatísticos utilizados nessa metodologia são:

Média (μ):

$$\mu = \sum Z_i / n \quad (1)$$

Variância (σ^2):

$$\sigma^2 = \sum (Z_i - \mu)^2 / (n - 1) \quad (2)$$

Coefficiente de variação (C.V.):

$$C.V. = 100 \sigma / \mu \quad (3)$$

Coefficiente de assimetria (g_1):

$$g_1 = M_3 / (\sigma^2)^{1.5} \quad (4)$$

em que:

$$M_3 = \sum ((Z_i)^3 / n) - 3\mu \sum ((Z_i)^2 / n) + 2\mu^3 \quad (5)$$

Coefficiente de curtose (g_2):

$$g_2 = M_4/(\sigma^2)^2 \quad (6)$$

em que:

$$M_4 = \Sigma((Z_i)^4/n) - 4\mu \Sigma((Z_i)^3/n) + 6\mu^2 \Sigma((Z_i)^2/n) - 3\mu^4 \quad (7)$$

em que n é o número de amostras.

Também foram analisados os valores mínimos, máximo e amplitude dos dados observados. A metodologia geoestatística foi utilizada com o objetivo de definir o modelo de variabilidade espacial dos atributos físicos do solo envolvidos neste estudo.

2.10 Análise variográfica e krigagem

A análise variográfica foi realizada através dos semivariogramas. Para cada variável foram realizados os cálculos das semivariâncias. Logo em seguida elaborado um gráfico da semivariância $\gamma(h)$ *versus* distância (h); este gráfico foi utilizado para definir o modelo de semivariograma ajustado aos dados experimentais. O cálculo das semivariâncias e a escolha do modelo de semivariograma foram feitas através do software de geoestatística GS⁺ (ROBERTSON, 1998).

Após a definição do modelo de semivariograma realizou-se uma interpolação usando o método de krigagem. A estimativa por krigagem foi realizada de acordo com a equação:

$$Z^*(x) = \Sigma \lambda_i Z(x_i); \quad (8)$$

em que:

λ são os pesos de cada valor medido, Z é valor medido e Z^* é o valor estimado através do método de krigagem.

Os pesos λ que são obtidos através do método de multiplicadores de Lagrange, associados a equação de estimação e a exigência do método de que a esperança dos erros seja igual a zero e variância de estimação seja mínima, faz com que a variância de krigagem seja a menor variância entre todos os processos de interpolação.

Utilizou-se ainda, o semivariograma cruzado para permitir a verificação da correlação espacial entre os atributos avaliados.

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos semivariogramas foi utilizado o método de validação “*Jack-knifing*”, no qual analisados os valores de média e variância dos erros reduzidos

(SOUZA et al., 1997), os quais foram considerados os modelos: esférico, exponencial, linear e gaussiano.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise estatística

A análise estatística descritiva está representada na Tabela 1, onde observa-se que somente o conhecimento dos dados referentes aos valores mínimos, máximos e as médias não permitem o estudo das variações dos atributos, portanto, evidencia-se a necessidade da confecção de mapas e também de semivariogramas.

TABELA 1- Estatística descritiva das variáveis: Granulometria do solo sendo: Argila em (g.kg^{-1})¹) Areia total (g.kg^{-1}) e Silte (g.kg^{-1}); Diâmetro médio geométrico (DMG, em mm) densidade do solo (Ds, em g/cm^3), Porosidade total (Pt, em m^3m^{-3}), Umidade gravimétrica (U, em $\text{kg}^1\text{kg}^{-1}$), Resistência do solo à penetração (RSP, em MPa), Fração carbono em ácido húmico (C-AH, em mg g^{-1} solo), Fração carbono em ácido fulvico (C-AF, em mg g^{-1} solo) em diferentes camadas (0-0,10 e 0,10-0,20 m) e Produtividade (sc há^{-1}) no ano agrícola de 2018/19

Variável	Estatística descritiva							
	Min	Max	Amp	Méd	Me	As	CV	Curt
Argila 0-0,10m	247,0	684,0	437,0	457,8	464,5	0,204	14,40	1,30
Argila 0,10-0,20m	270,0	592,0	322,0	449,0	444,5	-0,28	10,66	2,63
Areia Total 0-0,10m	274,9	527,0	252,1	400,7	391,4	0,03	15,71	-0,76
Areia Total 0,10-0,20m	219,1	517,0	297,8	398,0	402,2	-0,40	15,47	-0,39
Silte 0-0,10m	26,6	438,0	411,4	141,4	141,0	1,23	40,68	5,35
Silte 0,10-0,20m	59,0	459,0	400,0	152,9	143,5	1,32	41,69	3,72
DMG 0-0,10m	0,99	1,39	0,39	1,20	1,20	0,007	7,69	-0,59
DMG 0,10-0,20m	0,92	1,30	0,38	1,11	1,11	0,23	7,21	-0,37
Ds 0-0,10m	0,99	1,48	0,48	1,28	1,28	-0,15	7,13	-0,02
Ds 0,10-0,20m	1,00	2,15	1,14	1,52	1,51	0,102	17,5	-0,58
Pt 0-0,10m	0,38	0,56	0,18	0,47	0,47	-0,04	6,93	0,79
Pt 0,10-0,20m	0,37	0,6	0,22	0,49	0,48	0,24	7,57	0,86

U 0-0,20m	0,10	0,55	0,45	0,26	0,25	0,43	25,9	7,07
RSP 0-0,10m	1,29	10,16	8,87	4,37	3,81	0,76	49,7	-0,32
RSP 0,10-0,20m	1,86	4,49	2,69	2,87	2,90	-0,19	19,6	0,33
C-AH 0-0,10m	1,39	4,74	3,35	2,57	2,44	0,60	26,69	0,09
C-AH 0,10-0,20m	0,70	5,16	4,45	2,03	1,85	0,71	36,94	3,19
C-AF 0-0,10m	1,94	5,35	3,40	2,89	2,84	0,39	13,77	12,04
C-AF 0,10-0,20m	1,64	4,11	2,46	2,80	2,80	-0,002	16,18	0,42
Produtividade	8,13	132,9	124,76	64,17	59,11	0,57	50,5	-0,23

Mín - Valor mínimo; Máx - Valor máximo; Méd - Média; Me - Mediana; As - Assimetria; CV - Coeficiente de variação; Curt – Curtose.

Adotando a classificação do coeficiente de variação (CV) proposto por Warrick e Nielsen (1980) onde seus limites são: de baixo para $CV < 12\%$; média de $12\% < CV < 60\%$ e alta para $CV > 60\%$, verificou-se que variáveis que apresentam CV baixo como a argila na camada inferior, o diâmetro médio geométrico em ambas as camadas, a densidade do solo na camada superior e a porosidade total em ambas as camadas, portanto, esses atributos são considerados homogêneos.

A produtividade, argila na camada superior, densidade do solo na camada inferior; areia total, silte, resistência do solo à penetração, bem como as frações de carbono em ácido húmico e fúlvico; todas essas apresentaram limites medianos de coeficiente de variação em ambas as camadas, sendo importante ressaltar que esses atributos têm maior heterogeneidade em relação aos demais. Os valores médios encontrados possuem pequena variação, o que é justificado pelos valores de assimetria onde os mesmos estão próximos à zero, exceto para o silte em ambas as camadas.

De acordo com WEBSTER (2001) valores de assimetria até 0,5 indicam distribuição normal. Neste estudo, a fração carbono em ácido húmico e silte ambos nas duas camadas, a resistência do solo à penetração na camada superior e produtividade não indicaram distribuição normal para o conjunto de dados analisados.

3.2 Análise de semivariograma

Por meio da análise dos dados geoestatística todos os atributos do solo em estudo apresentaram dependência espacial. Portanto, nenhuma variável apresentou distribuição aleatória no espaço de acordo com a Tabela 2.

TABELA 2 – Parâmetros dos semivariogramas ajustados para: : Granulometria do solo sendo: Argila em (g.kg^{-1}) ,Areia total (g.kg^{-1}) e Silte (g.kg^{-1}); Diâmetro médio geométrico (DMG, em mm) Densidade do solo (D_s , em g/cm^3), Porosidade total (P_t , em m^3m^{-3}), Umidade gravimétrica (U , em $\text{kg}^1\text{kg}^{-1}$), Resistência do solo à penetração (RSP, em MPa), Fração carbono em ácido húmico (C-AH, em mg g^{-1} solo), Fração carbono em ácido fúlvico (C-AF, em mg g^{-1} solo) em diferentes camadas (0-0,10 e 0,10-0,20 m) e Produtividade (sc há^{-1}) no ano agrícola de 2018/19

Variável	Parâmetros					
	Modelo	Co	Co + C1	$\text{Co}/(\text{Co}+\text{C1})^2$	a	r^2
Argila 0-0,10m	Esférico	670,0	4.817,0	13,90	182,10	0,918
Argila 0,10-0,20m	Esférico	287,0	1.109,0	25,87	58,10	0,521
Areia Total 0-0,10m	Exponencial	560,0	5.718,0	9,79	158,80	0,958
Areia Total 0,10-0,20m	Esférico	1.417,0	4.424,0	32,02	263,20	0,902
Silte 0-0,10m	Gaussiano	520,0	3.511,0	14,81	37,00	0,843
Silte 0,10-0,20m	Gaussiano	2.601,0	5.671,0	45,86	255,70	0,822
DMG 0-0,10m	Exponencial	0,00397	0,00998	39,78	106,4	0,889
DMG 0,10-0,20m	Exponencial	0,00062	0,00507	12,22	16,30	0,512
D_s 0-0,10m	Exponencial	0,00469	0,01108	42,32	187,60	0,874
D_s 0,10-0,20m	Exponencial	0,05390	0,10790	49,95	403,90	0,625
P_t 0-0,10m	Exponencial	0,00015	0,00113	13,27	39,20	0,831
P_t 0,10-0,20m	Exponencial	0,00078	0,00168	46,42	161,60	0,750
U 0-0,20m	Exponencial	0,00112	0,00225	49,77	189,10	0,838
RSP 0-0,10m	Exponencial	1,0100	5,8050	17,398	150,60	0,953
RSP 0,10-0,20m	Exponencial	0,09190	0,33980	27,04	209,80	0,969
C-AH 0-0,10m	Exponencial	0,28700	0,63700	45,05	268,70	0,864

C-AH 0,10-0,20m	Esférico	0,38600	0,79000	48,86	532,40	0,804
C-AF 0-0,10m	Exponencial	0,07140	0,14380	49,65	444,00	0,507
C-AF 0,10-0,20m	Exponencial	0,08290	0,16680	49,70	80,50	0,719
Produtividade	Gaussiano	392,00	1197,600	32,73	237,40	0,981

(1) Co = efeito pepita; Co+C1= patamar; (2) Grau de dependência espacial em percentagem, sendo classificado em: <25% = forte; entre 25 e 75 % = moderada e > 75% = fraca (Cambardella et al, 1994); a = alcance.

De acordo com a tabela 2 os atributos; argila em ambas as camadas, areia total, silte, porosidade total e resistência do solo à penetração nas camadas superiores, e diâmetro médio geométrico na camada inferior, apresentaram forte grau de dependência espacial; os demais atributos em estudo apresentaram grau de dependência espacial moderado, segundo Cambardella et al. (1994). Tais resultados indicam claramente que os pontos amostrados georreferenciados assemelham-se mais ao valor dos pontos vizinhos do que no resto do espaço amostral, demonstrando dessa forma a acurácia e a precisão dos dados.

Para todas as variáveis o efeito pepita foi superior à zero, indicando a variabilidade que não foi explicada considerando a distância de amostragem entre os pontos (MCBRATNEY; WEBSTER, 1986) e ou variações de pequena escala onde não foi detectada pela amostragem.

Os semivariogramas ajustados para os atributos foram o exponencial, gaussiano e esférico.

McBRATNEY; WEBSTER (1986) estudaram modelos de ajuste do semivariograma para as propriedades do solo e relataram que o modelo esférico é um dos mais encontrados. Este modelo é o mais ajustável para variáveis relacionadas às Ciências do Solo e é característico de variáveis que apresentam mudanças abruptas no espaço.

A variabilidade dos valores de alcance encontrados demonstra que para cada camada de solo e para cada atributo estudado há uma distância para amostragem. De acordo com os resultados, a fração carbono em ácido húmico, na camada inferior, apresentou a maior distância, de 532,40 metros; e a menor distância correspondeu ao diâmetro médio geométrico, com 16,30 metros na camada de 0,10-0,20m.

3.3 Distribuição espacial dos parâmetros físicos, químicos e produtividade

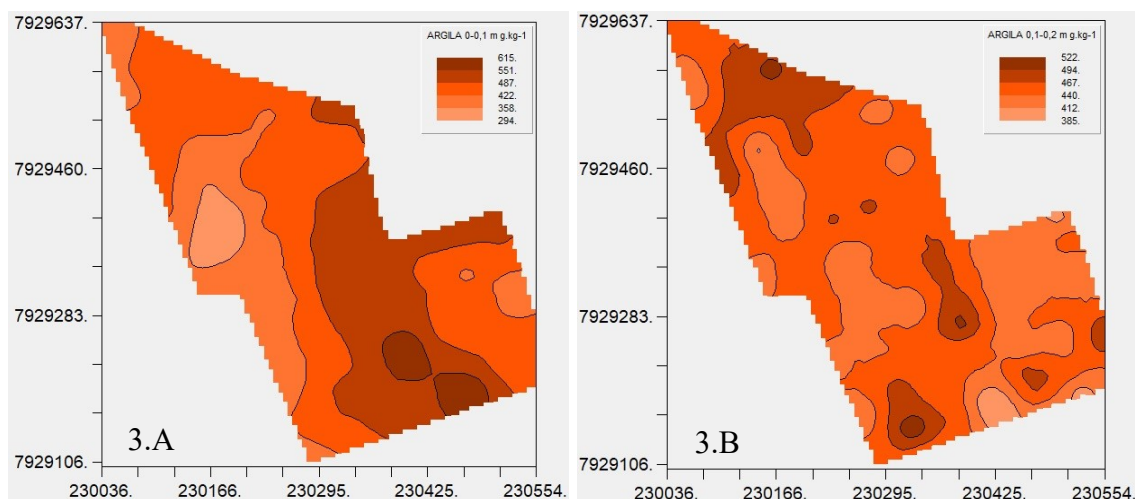
Na camada superficial, o teor de argila variou entre 294,0 a 615,0 g kg⁻¹ (Figura 3.A). Na camada subsuperficial, os teores médios de argila são relativamente superiores. Observou-se um aumento relativo nos teores de argila em profundidade; ressaltando também uma maior variabilidade ao longo da área.

Os mapas de areia total (Figuras 3.C e 3.D) informam que nas duas camadas há um padrão de distribuição onde os maiores valores se encontram concentrados do lado esquerdo da área. Na direção oeste da área, os valores são medianos com uma contribuição de valores baixos.

É importante ressaltar que a granulometria é afetada pelo relevo. Na área em estudo o relevo é uniforme. Ao avaliarem a textura em transeções, Miller et al. (1988), concluíram que esses atributos são afetados pela posição que o solo se encontra na paisagem, que possuem dependência espacial definida, e que tanto o manejo como erosão hídrica contribui para essa distribuição espacial.

Para o atributo silte (Figuras 3.E e 3.F), notou-se diferença entre o padrão de distribuição espacial, em ambas as profundidades, onde, na camada inferior há maiores concentrações de silte na direção direita da área. É possível afirmar que os valores mais baixos e medianos se encontram no topo da área.

A distribuição espacial dos valores da areia total na camada superior apresenta-se muito semelhante aos valores opostos da distribuição de porcentagem de argila; da mesma forma esse processo ocorre também nas frações areia total e silte na camada inferior.



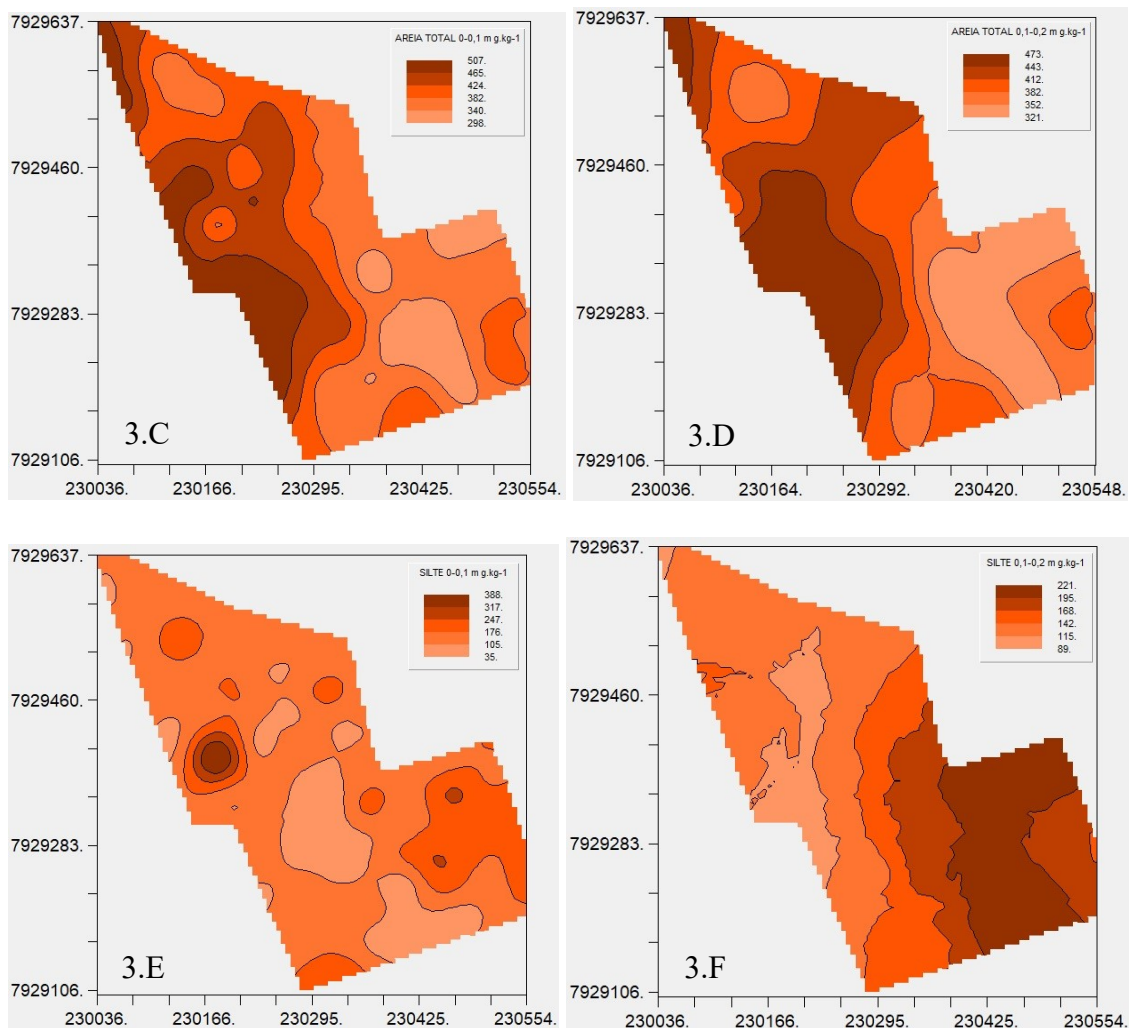


FIGURA 3 - Distribuição espacial da granulometria do solo, sendo: argila, areia total e silte (g.kg^{-1}) nas camadas de 0 - 0,1m e 0,1-0,2 m resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG

Ao examinar a figura 4.A percebe-se que os agregados de menor tamanho estão presentes no canto superior esquerdo e existe uma variação homogênea de altos valores do tamanho do agregado para a direção inferior esquerda. A figura 4.B demonstra alta heterogeneidade ao longo da área variando nos seus valores de diâmetro médio geométrico de 1 mm até 1,24 mm.

A distribuição espacial dos agregados de diferentes tamanhos não se deve ao acaso, mas, sim, foi resultante de processos naturais; como adensamento, intemperismo, organismos, relevo e práticas culturais.

Wendling et al. (2005) relataram que o cultivo do solo reduziu a estabilidade de agregados em água, quando se comparou os valores dos atributos anteriores ao desmatamento do mesmo, e que o sistema de semeadura direta aumentou os índices de agregação do solo em

relação ao cultivo convencional. Contudo, esses índices foram inferiores aos obtidos no solo sob mata nativa, deixando claro que o manejo do solo é um fator que deve ser levado em conta para uma melhor agregação do solo.

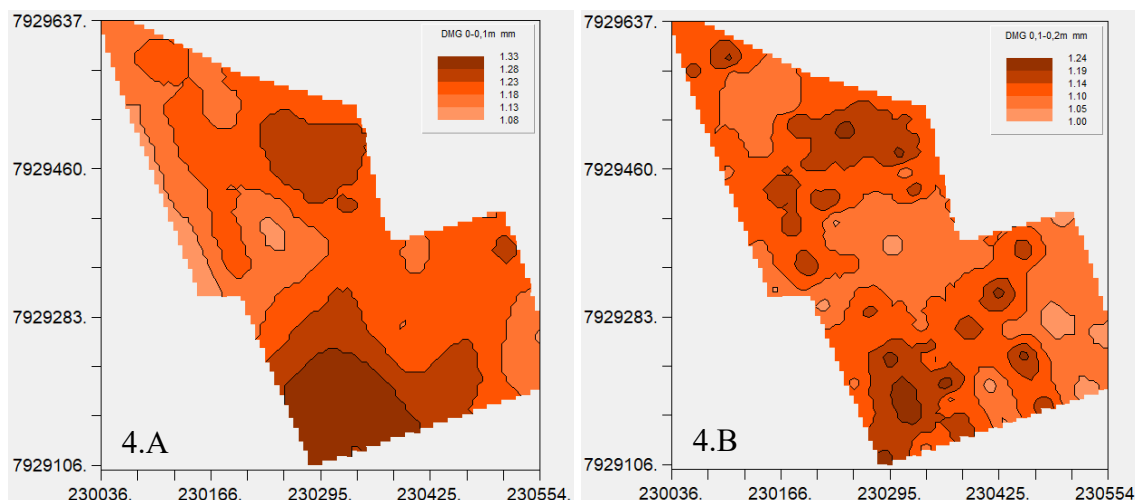


FIGURA 4 - Distribuição espacial do diâmetro médio geométrico (mm) nas camadas 0 - 0,1m (4.A) e 0,1-0,2 m (4.B) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG

De acordo com a Figura 5.A os menores valores de densidade na camada superior foram encontrados na parte inferior esquerda da área, sendo o menor valor igual à $1,16 \text{ g cm}^{-3}$; os maiores valores encontraram-se na parte superior e em faixas centrais longitudinais na área. A Figura 5.B apresentou comportamento contrário em relação a camada superior, ou seja, apresentou valores de densidade do solo maiores na parte inferior esquerda e menores valores na parte superior da área. Carvalho et al.(2013) avaliando a densidade do solo na cultura do café encontraram valores desse atributo variando entre $1,0$ a $1,16 \text{ g cm}^{-3}$, valores esses semelhantes aos encontrados neste estudo.

Almeida et al. (2014) relataram que a densidade do solo apresenta maiores valores em áreas que há menor mobilização do solo; o que no caso do cultivo do café é bem comum devido ser uma monocultura perene, onde a área em estudo apresentou somente o cultivo de plantas daninhas nas entrelinhas do cafeeiro, de tal modo que o solo fica exposto durante o período da colheita do café; fatores esses que contribuem para o aumento da densidade do solo.

É importante ressaltar a variação desse atributo (densidade do solo) com a mudança de textura de cada solo, o relevo da área bem como o manejo adotado. Goedert et al. (2002), relatam a falta de consenso entre pesquisadores sobre o nível crítico da densidade do solo, não apresentando um valor acima do qual o solo é considerado compactado.

Matiello et al. (2005), em estudo com mudas de cafeeiro arábica em vasos, notaram que as raízes foram capazes de ultrapassar camadas de solo com densidade de até $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$, enquanto que em solos com valores de densidade variando entre $1,20$ a $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ apenas algumas raízes conseguiram se desenvolver. Outros estudos também demonstraram que as raízes de café robusta não foram capazes de romper solos com densidade acima de $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ (MATIELLO et al., 2002 RENA; SILVEIRA, 2003).

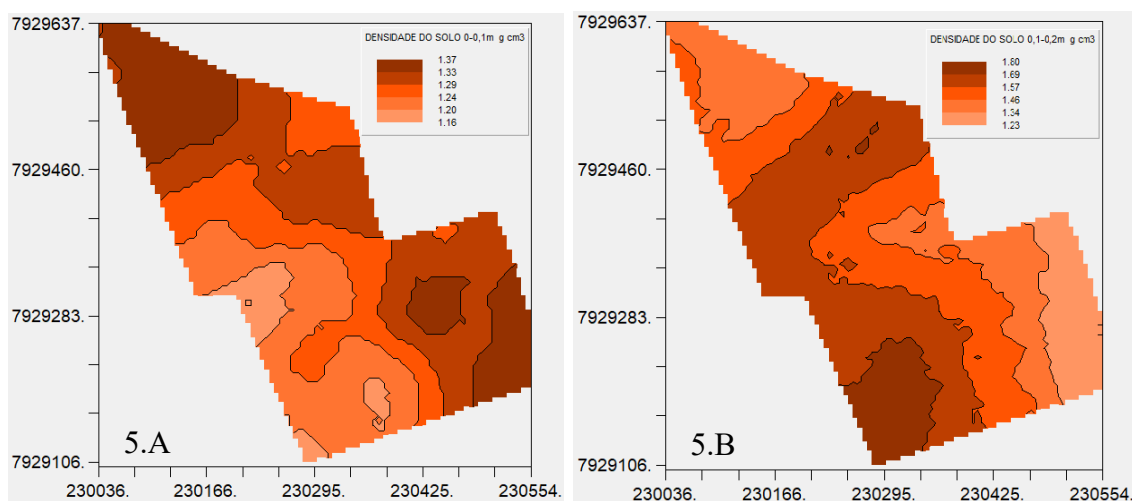


FIGURA 5 - Distribuição espacial da densidade do solo (g/cm^3) na camada 0 - 0,1m (5.A) e 0,1-0,2 m (5.B) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG

Para a porosidade total, os valores médios (Tabela 1), foram $0,47$ e $0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, para a camada superior e inferior. Nos mapas resultantes da Krigagem ordinária (Figura 6.A e 6.B) os valores se distribuíram de $0,54$ à $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Nota-se que na camada inferior, ou seja, na camada de 0,1-0,2 m, onde houve um aumento da densidade do solo ocorreu uma diminuição do espaço poroso. Isso resulta na expulsão de ar dos poros, causando um rearranjo das partículas, tornando o solo mais denso e consequente compactação do mesmo (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996).

Segundo Jorge (1985) e Camargo e Alleoni (1997) um solo ideal deve apresentar $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de volume de poros totais, sendo essa porcentagem muito variável, de solo para solo, onde fatores pedogenéticos e manejos culturais interferem significativamente.

Vomocil e Flocker (1996) e Kiehl (1979) consideram $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ como sendo o volume de macroporos que correspondem ao limite crítico necessário para manter as condições satisfatórias de trocas gasosas e drenagem. Assim, pelos resultados encontrados verificou-se condições favoráveis ao desenvolvimento da cultura do cafeeiro em grande parte da área.

Assim, apesar dos valores de densidade amostrados em alguns pontos estarem próximos ao limite crítico, os valores de porosidade tiveram um comportamento considerado bom para o desenvolvimento das plantas.

A raiz do cafeeiro é extremamente exigente em relação ao bom arejamento do solo e, portanto, dependente de sua estrutura, quantidade e relação de macroporos e microporos dos solos (GUIMARÃES, LOPES, 1986). Matiello et al. (2002) afirmam que solos excessivamente argilosos, sem cobertura, dificultam o desenvolvimento das raízes do cafeeiro; isso está relacionado com o impacto de gotas de chuvas sobre a superfície do solo, favorecendo a desagregação, remoção de partículas, contribuindo para a translocação de partículas e ocasionando o entupimento dos poros.

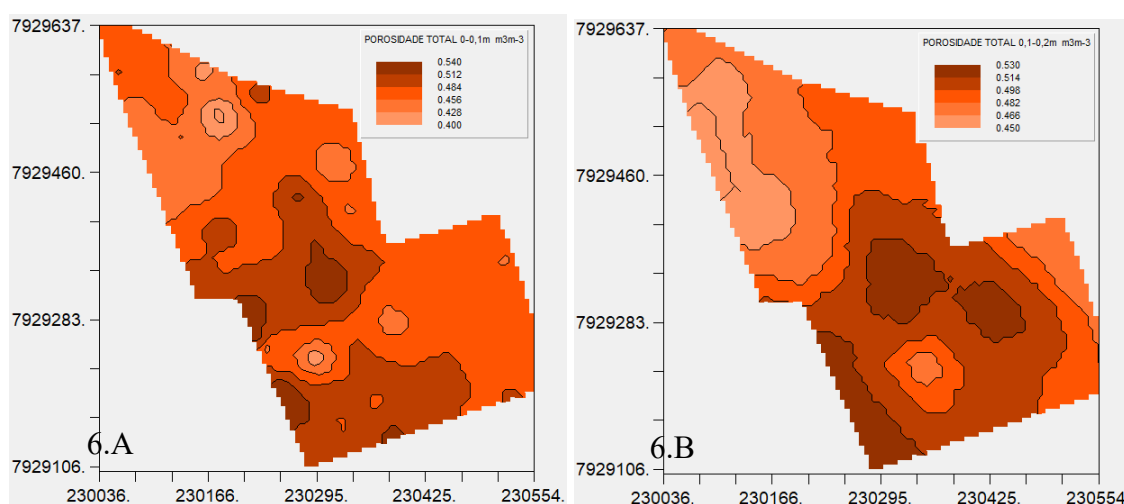


FIGURA 6 - Distribuição espacial da porosidade total (m^3m^{-3}) na camada 0 - 0,1m (6.a) e 0,1-0,2 m (6.b) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG

Para a resistência do solo à penetração, os valores médios encontrados na Tabela 1, foram 4,37 MPa e 2,87 MPa, valores esses encontrados na camada superior e inferior, respectivamente. Pelas Figuras 7.A e 7.B, pode-se observar que existe um padrão entre as camadas analisadas, ou seja, em ambas as camadas na parte esquerda da área há menores valores de resistência do solo à penetração e consequentemente nessas áreas há maior umidade do solo.

Os menores valores da resistência do solo à penetração encontrados, podem estar associados aos maiores valores de umidade, sendo estes valores inversamente proporcionáveis conforme afirmam Almeida et al. (2008), ou seja, a resistência do solo à penetração gera grande influência do conteúdo de água no solo.

Carmo et al. (2011) constataram que os valores de resistência do solo à penetração foram maiores na posição da linha de tráfego do maquinário agrícola quando comparada à projeção

da copa, para o cultivo de café mecanizado, e, quando comparado com o manejo do café adensado, café sem transito de máquinas e mata nativa, o cultivo mecanizado apresentou maior resistência do solo à penetração.

Segundo Rena e DaMatta (2002) a resistência do solo à penetração pode afetar, severamente, a expansão das raízes do cafeeiro, e o transporte de água e de assimilados específicos das raízes para a parte aérea. Esses autores afirmam que as raízes que são submetidas a grandes valores de resistência do solo à penetração se alongam menos, apresentam maior diâmetro em razão de procurarem caminhos de menor resistência e são bastante deformadas, provavelmente pela ação de etileno que são produzidos em maior quantidade sob tais condições.

Bergamin et al. (2010) encontraram alterações na resistência do solo submetido ao tráfego de máquinas, no sistema de semeadura direta até a camada de 0,10 m. Na área estudada verificou-se maior resistência do solo na camada superior. Na cultura do café o tráfego de máquinas ocorre próximo à projeção da copa do cafeeiro, região onde se localiza a maioria das raízes que absorvem água e nutrientes.

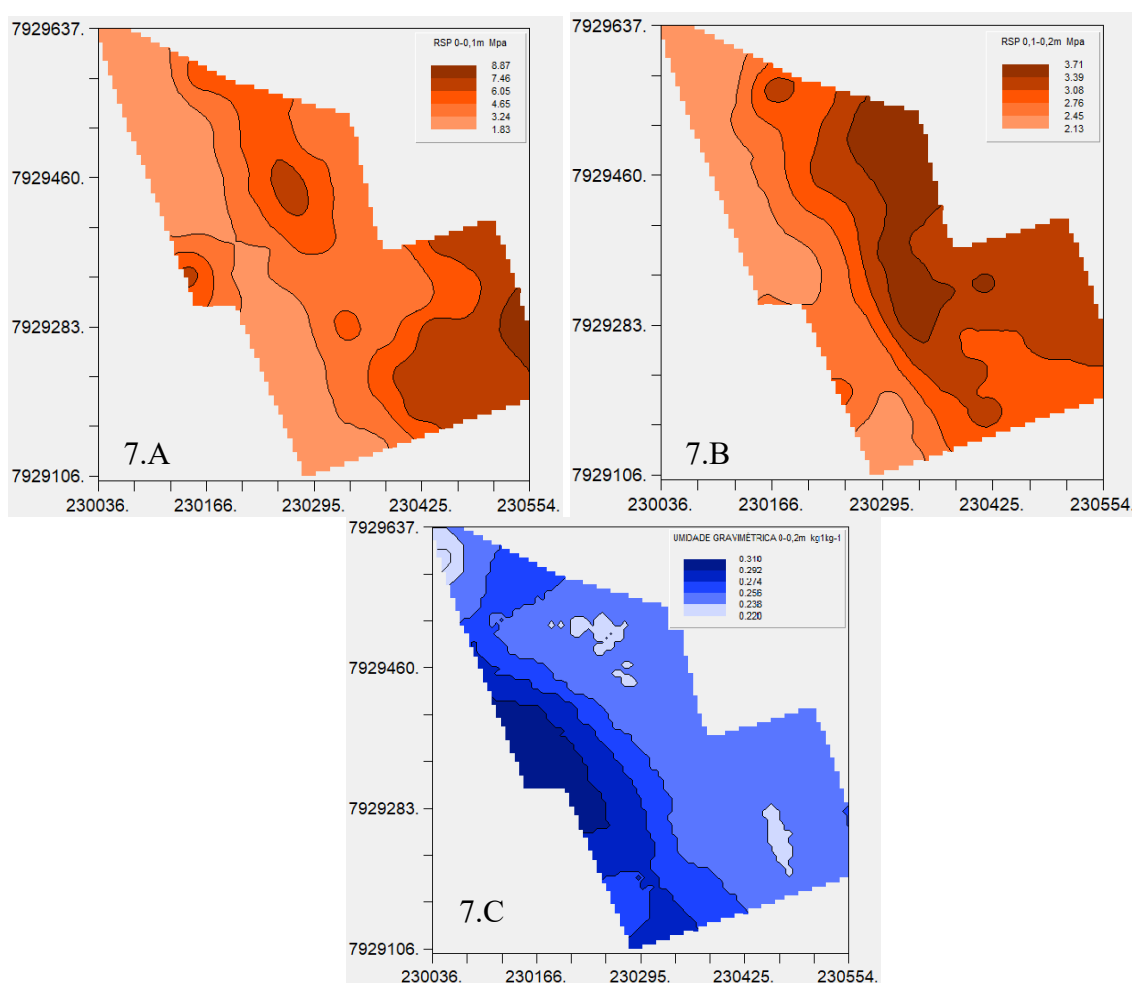


FIGURA 7 - Distribuição espacial da resistência do solo à penetração (Mpa) na camada 0-0,1 m (7.A); 0,1-0,2 m (7.B) e (7.C) umidade gravimétrica 0-0,2 m ($\text{kg}^1\text{kg}^{-1}$) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG

O C-FAF apresentou os maiores teores no solo comparado ao C-FAH, com variações de 1,64 a 5,35 mg g^{-1} e maior média na camada superior (2,845 mg g^{-1}). Valores contraditórios foram reportados por Favero et al. (2008) que observaram, baixos teores de FAF (0,99 g kg^{-1}) em uma área degradada comparada com o sistema agroflorestal e pastagem na região do Vale do Rio Doce, Minas Gerais.

Para o C-FAH, as variações nos teores, considerando-se as duas camadas, foram de 0,7 a 5,16 mg g^{-1} com a menor média (2,3 mg g^{-1}) de acordo com a Tabela 1.

Nos mapas de distribuição espacial gerados para as frações C-FAH; C-FAF, observou-se que há um padrão homogêneo quanto à distribuição; para carbono na fração do ácido húmico os maiores teores se concentraram no centro da área, já para ácido fúlvico os maiores teores se concentraram na parte inferior esquerda da área.

Notou-se o predomínio de valores máximos nos teores de C-AF na camada superior (5,35 mg g^{-1}), e valores máximos (5,16 mg g^{-1}) na camada inferior para C-AH, indicando maior suscetibilidade à decomposição da MOS; portanto os teores de C-AF diminuiram com o aumento da profundidade.

A razão C-AH/C-AF é utilizada como um indicador da qualidade do húmus, sendo que a faixa dos valores dessa relação para solos temperados varia de 0,7 a 2,5 (KONONOVA, 1982).

Em solos tropicais ocorre uma diminuição da intensidade dos processos de humificação (condensação e síntese) e, em consequência, a relação C-AH/C-AF é menor.

Os valores para a relação C-AH/C-AF foram de 0,88 para a camada superior e 0,725 para a camada inferior, indicando predomínio da fração ácidos fúlvicos sobre a fração ácido húmico, ou seja, menor condensação dos compostos húmicos (LEITE et al., 2003), demonstrando o menor grau de humificação da MOS.

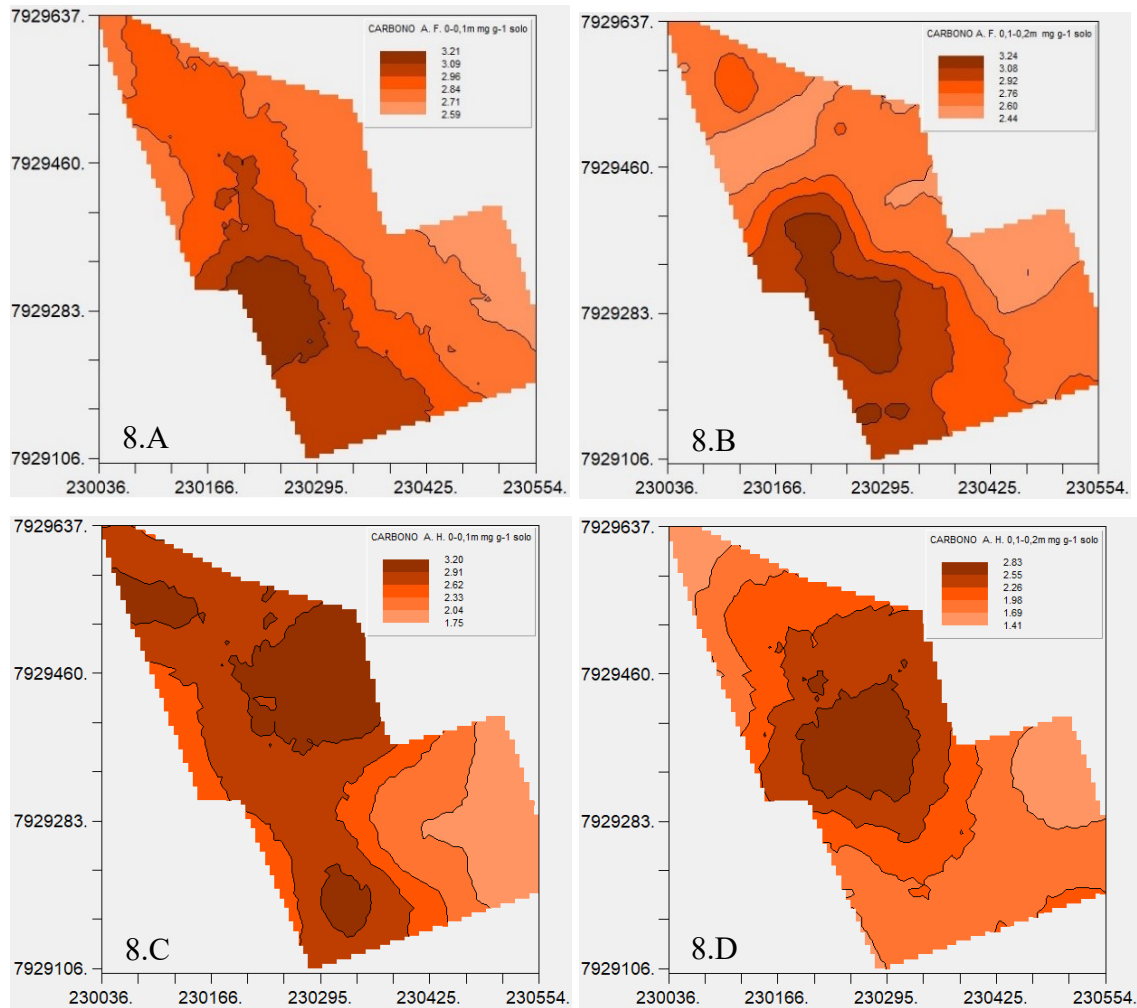


FIGURA 8 - Distribuição espacial da fração carbono em ácido húmico na camada 0 - 0,1m (8.A) e 0,1-0,2 m (8.B) e distribuição espacial da fração do carbono em ácido fulvico na camada 0 - 0,1m (8.C) e 0,1-0,2 m (8.D) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG

A distribuição da produtividade do cafeeiro variou de 41 até 124 sacas por hectare; sendo as maiores médias na parte superior esquerda da área.

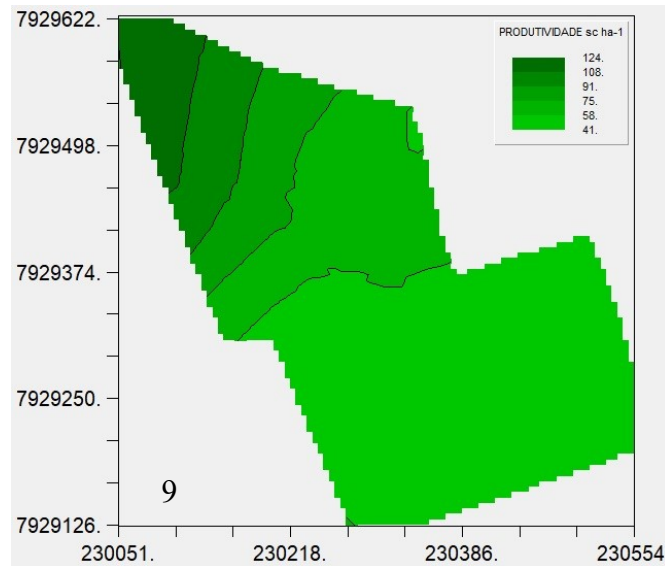


FIGURA 9 - Distribuição espacial da produtividade do cafeeiro (sc há⁻¹) resultante da krigagem ordinária. Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG

Todos os mapas confeccionados apresentaram amplitude nos seus valores, onde essa amplitude revela que apenas a observação de campo pode refletir em erros no manejo da cultura, deixando clara a importância do uso de ferramentas geoestatísticas. A análise dos semivariogramas, considerando os atributos físicos e químicos do solo e as condições de relevo, possibilitou não só verificar a variabilidade espacial dos indicadores de qualidade do solo, como também correlacionar à estrutura de variação dessas variáveis. Isto pode fornecer indicativos da qualidade do solo e propor alternativas de manejo nas condições de relevo estudadas, pois tal análise permite visualizar como está ocorrendo as suas variações de acordo com as diferenças na paisagem.

Dessa forma, os diversos atributos do solo comportaram de forma bastante diferenciada ao longo das áreas cultivadas, devido, entre outros fatores, às alterações provocadas pelo manejo agrícola (SILVA et al., 2010), tendo como fator relevante, a compactação do solo, referente às práticas agrícolas.

4 CONCLUSÕES

Utilizando somente a estatística descritiva, observa-se que os valores médios encontrados para as variáveis analisadas não representam a variação dos valores que podem ser encontrados em toda a área estudada.

Com a malha de amostragem proposta, foi possível criar os mapas temáticos para observação da distribuição espacial das variáveis na área experimental.

De acordo com a análise da variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos constatou-se que o uso da geoestatística e dos mapas podem ser ferramentas úteis para auxiliar na tomada de decisões relacionadas ao manejo do solo, em áreas com cultivo de cafeeiro, visando, sobretudo, a sustentabilidade dos solos agrícolas.

Constatou-se também que as variáveis avaliadas possuem grau de dependência espacial forte e ou moderado, demonstrando que essas variáveis ao longo da área não têm comportamentos aleatórios.

Desta forma o uso da geoestatística pode ser uma ferramenta importante para a maximização das práticas agrícolas e almejando maiores produtividades.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. X. *et al.* **Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 36, p. 1745-1755, 2012. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600008>
- ALMEIDA, C. X. *et al.* **Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 32, p. 2235-2243, 2008. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600003>
- ALMEIDA, C. X. *et al.* **Qualidade física de um Latossolo Vermelho, sob sistema de semeadura direta e cultivo convencional.** Bioscience Journal, v. 30, p. 1395-1411, 2014.
- AMENDOLA, D. F. **Caracterização da matéria orgânica do solo e sua influência nas propriedades físico-químicas no sistema Latossolo-Gleissolo.** Dissertação (Dissertação em Geociências e meio ambiente) – UNESP. Rio Claro, p. 45-466, 2017.
- ARGENTON, J. *et al.* Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 425-535, 2005 DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000300013>
- ASSUNÇÃO, A.W.A. *et al.* Formação de substâncias húmicas a partir da decomposição de oxycaryum cubense em condições aeróbia e anaeróbia. In: EMBRAPA. Encontro Brasileiro de substâncias húmicas. Brasília, 2013, p. 58-61
- BERGAMIN, A. C. *et al.* Compactação em um latossolo vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 681-691, maio/ jun. 2010.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3 Ed. Porto Alegre: Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686 p.
- CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58: 1501-1511, 1994. DOI <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- CAMARGO, O. A. de; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas.** Piracicaba: USP/ESALQ, 1997. 132p.
- CARMO, D. L. *et al.* Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com caféiro em três sistemas de manejo no Sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência**

do Solo, Viçosa v.35, p. 991-998 , 2011. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300033>

CARON, V.C.; GRAÇAS, J.P.; CASTRO, P.R.C. Condicionadores do solo: ácidos húmicos e fúlvicos. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) - Divisão de Biblioteca, **Série Produtor Rural**, n. 58, p. 46, 2015.

CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R.P.; FERNANDES, A.L. T. **Compactação do solo em cafeicultura irrigada**. Uberaba: UNIUBE, 2004. 44 p. (Boletim Técnico, 3).

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001100015>

CASANELLAS, J.P.; REGUERÍN, M.L.; LABURU, C.R. de. **Edafología para la agricultura y el medio ambiente**. 2.ed., Madrid: Mundi-Prensa, 1999. 849p.

DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p.175-182, 1996.

DIAS JÚNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 55–94.

DORAN, J. W.; PARKING, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W., COLEMAN, D. C., BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (Special publication, 35) DOI <https://doi.org/10.2136/sssaspepub35>

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2013. 353 p.

EMBRAPA. Embrapa solos. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília, 2009. 623 p

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2011. 230 p.

FAVERO, C.; Lovo, I. C.; Mendonça, E. S. Recuperação de área degradada com sistema agroflorestal no Vale do rio doce, Minas gerais. **Revista Árvore**, v.32, p.861-868, 2008. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000500011>

FERREIRA, M. M. ; DIAS JUNIOR, M.S. **Física do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 117 p.

FERREIRA, M. M.. Caracterização Física do Solo. In: LIER, Q. J. V. (Ed.). **Física do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.1-27, 2010.

FONTANA, A. *et al.* Caracterização de substâncias húmicas da camada superficial do solo sob diferentes coberturas vegetais. *Magistra*, 22:48-55, 2010

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em latossolo vermelho: II., intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, n. 4, p. 805-818, 2009. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400006>

GAVANDE, S. A. **Física de suelos: principios y aplicaciones**. Arco de Belém: Editorial Limusa-Wiley, 1972. 351p.

GOEDERT, W.J ; SCHERMACK, M,J.; FREITAS, F.C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v37, n.2, p.223-227, 2002. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000200015>

GONTIJO, I.; DIAS JUNIOR, M. S. de; OLIVEIRA, M. S. de; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; PIRES, B. S.; OLIVEIRA, C. A. de. Planejamento amostral da pressão de preconsolidação de um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1245-1254, nov./ 2007. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600003>

GUIMARÃES, P.T. G.; LOPES, A. S. Solos para o cafeeiro: características, propriedades e manejo. In: RENA, A. B. et al. (Ed). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e Fosfato, 1986. p 115-161

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic in Switzerland: field data and a critical state soil mechanics model approach. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 133-142, 2001. DOI [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00161-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00161-1)

HAKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDBERG, T. Long-term experiments with different depths of mouldboard ploughing in Sweden. *Soil and Tillage Research*, v.46, p.209-223, 1998. DOI [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00099-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00099-3)

JORGE, J. A. **Física e manejo dos solos tropicais**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. 328p.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Physical and mineralogical methods, p. 425-443. DOI <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. Passo Fundo: Ed. Universitária de Passo Fundo, 2008. 212 p.

KONONOVA, M.M. **Matéria orgânica del suelo: su naturaleza, propiedades y métodos de investigación**. Oikos-Tou. 1982 365p

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C. Estimating critical stress inunsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, p. 1127-1132, 1980

MATIELLO, J. B. *et al.* **Cultura de café no Brasil: novo manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFE, 2005, 438 p.

MATIELLO, J. B. *et al.* **Cultura do café no Brasil: novo manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFE, 2002. 387p.

MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science, Oxford*, v. 37, n. 3, p. 617-639, June 1986. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00392.x>

MILLER, M. P. ; SINGER, M. J. ; NIELSEN, D. R. Spatial variability of wheat yield and soil proprieties on complex hills. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.52, n.4, p.1133-1141, 1988. DOI <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200040045x>

OADES, J.M., Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, v 76, n.1/3, p 319-337,1984 DOI <https://doi.org/10.1007/BF02205590>

PRIMO, D. C.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, T. O. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. *Scientia Plena*, São Cristóvão, v. 7, n. 5, p. 1-13, 2011

REICHERT, J. M. *et al.* Mecânica do Solo. In: LIER, Q. J. V. (Ed.). **Física do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 29-102.

RENA, A. B. e DAMATTA, F. B. O sistema radicular do cafeeiro: morfologia e ecofisiologia. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.) **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa: UFV, 2002, p. 11-83.

RENA, A. B.; SILVEIRA, S. M. Fatores que afetam o desenvolvimento e a atividade do sistema radicular. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 29., 2003, Ribeirão Preto – SP, anais...Botucatu, 2003. Palestras.CD

RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. **Ciências Agrárias**, Teresina, v.26, n. 3, p. 321-344, jul 2005. DOI <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2005v26n3p321>

RIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: A agricultura em regiões tropicais**. São Paulo: Nobel, p. 115-116, 2017.

ROBERTSON, G. P. GS+. Geostatistics for the environmental sciences - GS+ User's Guide. Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152p.

SCHNITZER, M.; Khan, S.U. 1972. **Humic substances in the environment**. Marcel Decker, New York, USA. 220pp.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, v.30, p. 795-801, 2010. DOI <https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000500009>

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 367-372, 1997. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-06831997000300003>

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.229-235, 1991.

TAN, K.H. **Principles of soil chemistry**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1993. 362 p.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, v.19, p.111-119, 1991. DOI [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90080-H](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90080-H)

TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and waterstable aggregates in soil. *J. Soil Sci.*, 33:141-163, 1982. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

TISDALL, J.M., OADES, J.M., Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, v.33, n.2, p. 141-163, 1982.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effects of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **American Society Agricultural Engineering**, v.4, p.242-246, 1996

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of Soil Physics**. New York : Academic, 1980. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>

WEBSTER, R. Statistics to support soil research and their presentation. **European Journal of Soil Science**, v.52, p.331-340, 2001. DOI <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00383.x>

WENDLING, B. *et al.* Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 487-494, 2005. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000500010>

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, Madison, v. 28, 1936. p. 337-351. DOI <https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>

ZECH, Z. *et al.* **Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics**. Geoderma, 1997: 69-116. DOI [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00040-2)

CAPÍTULO II – Resposta espectral de atributos físicos de um latossolo vermelho sob cafeicultura na região do cerrado mineiro

RESUMO

O café é um dos principais produtos agrícolas do agronegócio brasileiro. Onde o país se destaca no mercado internacional como líder de produção. A agricultura de precisão é uma alternativa para redução de custos no setor cafeeiro. O conhecimento das propriedades físicas do solo é de fundamental importância para o desenvolvimento das culturas. O sensoriamento remoto, a partir das imagens de satélite vem de modo a auxiliar o manejo e as práticas culturais, aperfeiçoando o rendimento e a produção das culturas. Objetivou estabelecer relações entre parâmetros de sensoriamento remoto por meio da reflectância do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e os atributos físicos do solo densidade, porosidade total, resistência do solo à penetração, agregados do solo (4-2; 2-1; 1-0,5; 0,5-0,25; <0,25 mm), diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado, granulometria (teor de argila, silte e areia total). As amostras foram coletadas em um LATOSSOLO VERMELHO argiloso, sob cafeicultura na região do Cerrado Mineiro; ao mesmo tempo foi feito o levantamento das imagens de satélite. A área de estudo vem sendo cultivada com *Coffea arabica* nos últimos anos, tem 14 hectares e está situada no município de Monte Carmelo-MG. Os atributos físicos densidade do solo e porosidade total podem ser estimados via resposta espectral, onde apresentaram valores significativos entre os valores encontrados em campo e valores estimados via índice multiespectral (NDVI).

Palavras chave: física do solo, sensoriamento remoto, agricultura de precisão, café

CHAPTER II – Spectral response of physical attributes of an oxisol red under coffee cultivation in the Cerrado region of Minas Gerais

ABSTRACT

Coffee is one of the main agricultural products of Brazilian agribusiness. Where the country stands out in the international market as a production leader. Precision agriculture is an alternative to reduce costs in the coffee sector. Knowledge of the physical properties of the soil is of fundamental importance for the development of crops. The remote sensing, based on satellite images, comes to assist management and cultural practices, improving the yield and the production of cultures. It aimed to establish relationships between remote sensing parameters through the reflectance of the NDVI (Vegetation Index for Normalized Difference) and the physical attributes of the soil density, total porosity, resistance of the soil to penetration, soil aggregates (4-2; 2-1 ; 1-0.5; 0.5-0.25; <0.25 mm), geometric mean diameter, weighted average diameter, granulometry (clay, silt and total sand content). The samples were collected in a clayey RED LATOSOL, under coffee growing in the Cerrado Mineiro region; at the same time, satellite images were surveyed. The study area has been cultivated with *Coffea arabica* in recent years, has 14 hectares and is located in the municipality of Monte Carmelo-MG. The physical attributes of soil density and total porosity can be estimated via the spectral response, where they showed significant values between the values found in the field and values estimated via the multispectral index (NDVI).

Keywords: soil physics, remote sensing, precision agriculture, coffee

1 INTRODUÇÃO

Na cafeicultura o uso de máquinas agrícolas é cada vez mais intenso, com o aumento da tecnologia e da maximização do solo, o manejo da cultura tornou-se cada vez mais responsável pelo aumento das produtividades; portanto uma alternativa eficaz é o emprego da agricultura de precisão seja pela utilização de mapas e ou imagens de satélite.

A qualidade física do solo tem despertado o interesse de muitos produtores e pesquisadores para a obtenção de altas produtividades na cafeicultura brasileira; bem como no emprego de uma agricultura sustentável, onde a relação solo-água-planta não seja impactante ao ecossistema.

Importantes indicadores da qualidade do solo são a densidade, porosidade total, conteúdo de umidade, resistência do solo à penetração agregação do solo e as frações granulométricas. Esse conjunto de fatores indicam as condições e os parâmetros que podem ser limitantes ao bom desenvolvimento das culturas.

Quando as partículas primárias do solo agrupam-se e a força que une tais partículas é maior que a força de união entre partículas adjacentes, fica caracterizada a formação dos agregados (FERREIRA, 2010).

A densidade do solo é definida como a massa por unidade de volume de solo seco. Esse volume inclui tanto partículas sólidas como o seu espaço poroso (BRADY; WEIL, 2013), dessa forma um rearranjo de partículas de solo afeta diretamente os valores de densidade, porosidade e compactação, causando consequentemente uma redução na disponibilidade de água e nutrientes para as plantas.

A compactação do solo está diretamente relacionada com a densidade. Uma faixa de solo compactada é aquela que recebeu uma carga excedente, ou seja, a camada de solo sofreu rupturas em seu horizonte. Na cafeicultura nota-se problemas com a compactação, devido ao próprio manejo cultural, onde as máquinas agrícolas trafegam apenas nas entrelinhas e sempre na mesma faixa, próximo a saia da planta, onde se encontram as raízes ativas da planta.

A compactação afeta a expansão das raízes, de tal modo que limita o crescimento radicular da planta, altera a estrutura do solo horizontalmente e verticalmente. Essa limitação das raízes afeta o crescimento da planta, a absorção de água e as trocas gasosas no solo.

O crescimento do sistema radicular é de suma importância para o desenvolvimento da planta como um todo, uma maior área de solo explorado pelas raízes aumenta de forma linear a quantidade de nutrientes, de água e as trocas gasosas, à planta.

Segundo YI et al. (2007) e CAMPOS et al. (2009), o sensoriamento remoto permite obter informações objetivas para o acompanhamento e previsão de safras agrícola, uma vez que possibilita a identificação de áreas agrícolas e suas dinâmicas.

O Índice da Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um modelo resultante da combinação dos níveis de reflectância em imagens de satélites, que provem da equação composta pelas respostas das bandas espectrais do vermelho e infravermelho (RAMOS et al., 2010), conforme proposto por ROUSE et al. (1974).

A resposta espectral das culturas agrícolas depende de uma série de fatores bioquímicos do vegetal, além das características físicas do dossel. Normalmente, esses fatores estão condicionados a arquitetura do dossel, química foliar, parâmetros agrônômicos, condições atmosféricas; pigmentos presentes na folha, tais como a clorofila, carotenos, xantofila e antocianinas (Abdel-Rahman et al., 2008).

Nesse intuito o objetivo deste trabalho foi correlacionar as variáveis de solo: granulometria; agregação do solo; densidade do solo; porosidade total e resistência do solo à penetração sendo estas determinadas em campo com imagens de satélite por meio do índice de vegetação normalizada (NDVI).

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em área agrícola, próximo às coordenadas 18°42'28.9"S 47°33'27.0"W, em um LATOSSOLO VERMELHO argiloso (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2013). A área vem sendo cultivada com *Coffea arabica* L. nos últimos anos. Em janeiro de 2012 a lavoura foi renovada com plantio de café no espaçamento de 3,8 x 0,7 m. A partir de março de 2018 procedeu-se a caracterização da área de aproximadamente 14 ha, para definição da malha regular de amostragem, com 112 pontos distanciados de 25 x 50 m (Figura 1).

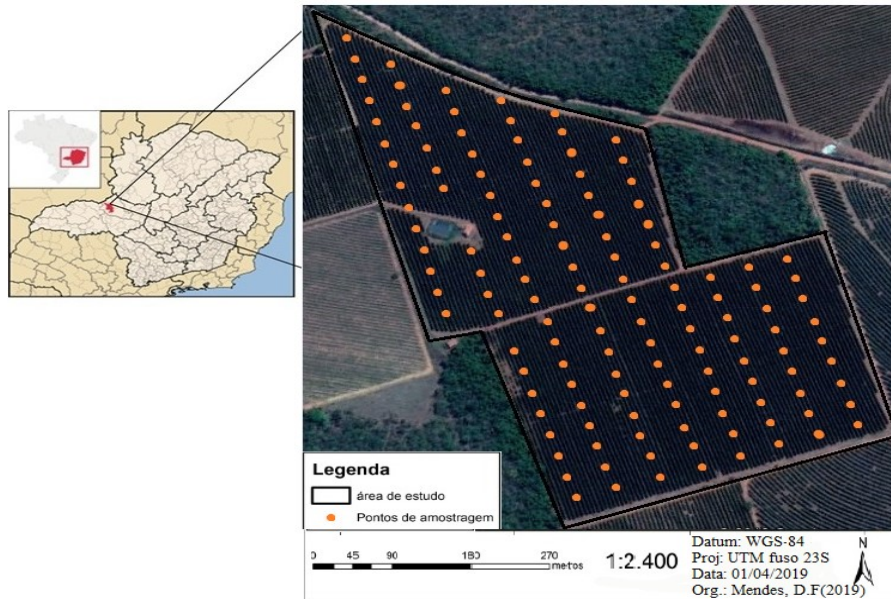


Figura 1. Croqui área de estudo Fazenda Juliana, Monte Carmelo-MG

2.1 Determinação da posição das amostras de campo

Foi utilizado um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) do tipo Hipper de dupla frequência L1/L2 para a coleta das coordenadas dos pontos. Um dos receptores foi utilizado para servir de base no rastreamento pelo GNSS, realizando um posicionamento relativo estático. Posteriormente, os dados foram processados no *software Topcon Tools 8.2.3*, adotando-se como estações de referência para o pós-processamento as estações de Uberlândia/MG e Rio Paranaíba/MG, da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC).

2.2 Amostragem do solo

O solo da área foi amostrado nas camadas de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, em todos os pontos da malha, contemplando os relevos diferenciados na paisagem. Essas amostras foram utilizadas na determinação dos indicadores físicos de qualidade do solo.

2.3 Análise granulométrica

A composição granulométrica foi determinada por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$), agitação lenta, durante 16 horas, e determinação do conteúdo de argila pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2011).

2.4 Agregação do solo

Para cada amostra, foi determinada a distribuição das classes de agregados por meio do tamisamento a úmido pelo método de Yoder (1936). O tamisamento a úmido foi realizado em um recipiente cilíndrico onde são colocados quatro jogos de peneiras. Cada conjunto no tamisador foi constituído por peneiras com malhas de 2,0 - 1,0 - 0,5 e 0,25 mm de abertura.

Foi quantificado o solo retido em cada peneira e, ainda, aquele que passou através da última peneira ($< 0,25 \text{ mm}$), obtendo-se, assim, cinco classes de agregados, cujos diâmetros médios foram, respectivamente, 3,0 - 1,5 - 0,75 - 0,375 e 0,125 mm. As amostras de solo foram preparadas com peneira de 4 mm de abertura de malha.

O processo de tamisagem para cada amostra consistiu na separação de três subamostras de 50 g cada, duas para cada jogo de peneiras e uma para determinar a umidade e, assim, calcular o peso da amostra seca. Em cada jogo de peneiras, as amostras foram dispostas sobre a peneira de maior malha, contendo um papel de filtro para retenção da amostra até que ela fosse saturada por capilaridade, durante 4 minutos. A saturação por capilaridade foi obtida por meio da elevação do nível de água do tamisador até o umedecimento do papel de filtro. Depois de saturadas as amostras, o papel foi retirado com auxílio de uma pisseta com água. Em seguida, o tamisador foi acionado por 4 minutos, com movimento vertical de 32 oscilações por minuto. O solo retido em cada peneira foi transferido para cápsulas de alumínio com o auxílio de jatos de água de uma pisseta dirigidos ao fundo da peneira. As amostras foram então levadas à estufa para secagem a $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo posteriormente pesadas. A menor classe de agregados foi constituída pelo solo que passou pela peneira de 0,25 mm de abertura de malha, ficando disperso no tamisador, sendo determinada, subtraindo-se o somatório do peso das outras classes de agregados do peso total da amostra seca. Os resultados obtidos foram utilizados para o cálculo do diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG, em mm), da seguinte maneira (KEMPER; ROSENAU, 1986):

$$DMG = \exp \frac{\sum_{i=1}^n w_i \log(\bar{x}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

em que: w_i é o peso dos agregados em cada classe (g), \bar{x}_i é o diâmetro médio das classes (mm).

2.5 Densidade do solo e porosidade total

Também foram coletadas amostras indeformadas de solo, com cilindros de 0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro ($53,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$), nas camadas de 0 a 0,1 m e de 0,1 a 0,2 m, que foram saturadas para determinação da porosidade total e da densidade do solo (EMBRAPA, 2011).

2.6 Resistência do solo à penetração

Determinou-se a resistência do solo à penetração também nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, através de um penetrômetro de impacto (STOLF, 1991). O penetrômetro que foi utilizado apresenta as seguintes características: área da base do cone de $1,77 \times 10^{-4} \text{ m}^2$; altura de queda de 0,57 m; massa do êmbolo, ou seja, massa que provoca o impacto igual a 8,02 kg e massa dos demais componentes do penetrômetro, excluía a de impacto, igual a 8,37 kg, conforme representado na Figura 2. Simultaneamente à essas leituras determinou-se o conteúdo gravimétrico de água no solo (EMBRAPA, 2011).

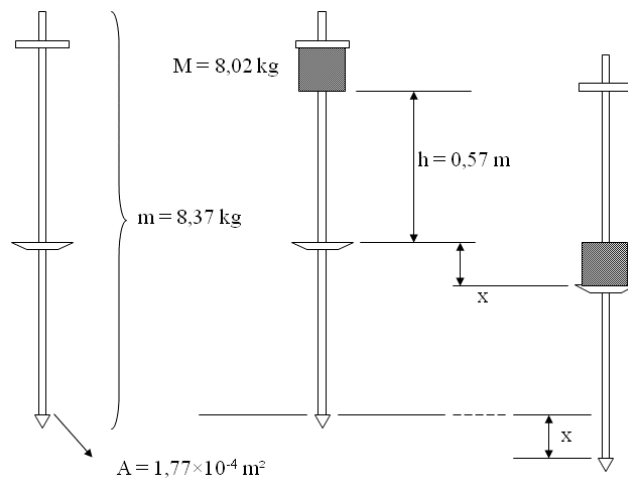


Figura 2. Características do penetrômetro de impacto utilizado.

2.7 Aquisição e processamento da imagem multispectral

Com intuito de relacionar as propriedades radiométricas de imagens multispectrais com os indicadores físicos do solo, foi utilizada uma imagem do sensor RapidEye para o desenvolvimento do experimento. Nesta condição, a opção por imagens de alta resolução espacial é justificada pelo tamanho da área experimental, a qual é pequena (14 hectares), e pela dificuldade de relacionar geograficamente a posição dos pontos levantados em campo com a respectiva rotulação em imagens de média resolução espacial.

Foram tomadas imagens multispectrais RapidEye em março de 2019, adquiridas no Nadir. O sistema RapidEye é composto por cinco satélites em um mesmo plano orbital, sendo que o sensor imageador registra os dados da superfície terrestre em cinco intervalos de comprimento de onda, sendo eles: azul (0,440-0,510 μm), verde (0,520-0,590 μm), vermelho (0,630-0,685 μm) vermelho limítrofe (0,690-0,730 μm) e infravermelho próximo (0,760-0,850 μm). O sensor é do tipo pushbroom e adquire dados tanto no nadir como off-nadir, sendo que no primeiro caso o tempo de revisita é de 5,5 dias e, no outro, os dados podem ser adquiridos diariamente.

A resolução espacial de um pixel é de 5 metros (BLACKBRIDGE, 2015). As imagens utilizadas neste estudo foram disponibilizadas pelo Ministério do Meio Ambiente (MNA), por meio da página “Geo Catálogo”. O MNA disponibiliza essas imagens de todo o Brasil a órgãos públicos federais, estaduais e municipais. O acesso é feito pela página web <<http://geocatalogo.mma.gov.br/>>.

O pré-processamento da imagem seguiu o a metodologia de correção apresentada em Martins e Galo (2014). As imagens foram adquiridas pelo Ministério do Meio Ambiente (geocatalogo.mma.gov.br) com nível de processamento chamado de *Basic Level 1B*, correspondente ao nível básico de correção geométrica e radiométrica, incluindo correções de erros inerentes aos sensores e relacionando-a a um sistema de referência.

Não houve a necessidade de calibração radiométrica das cenas, uma vez que as imagens RapidEye incorporam essa correção, feita pelo segmento de distribuição das imagens. Por outro lado, esse dado não possui qualquer tipo de tratamento atmosférico para os efeitos da absorção e do espalhamento da REM, de modo que foi realizada uma correção atmosférica em cada uma das cenas adquiridas. A correção atmosférica foi realizada no software *ENVI 4.8*, com o uso do módulo de correção FLAASH, o qual é baseado no modelo atmosférico *MODTRAN 4* proposto por (Kaufman et al., 1997).

Deve-se ressaltar que houve a necessidade de aplicar um fator de escala de 1000 sobre os pixels da imagem, no processo de correção atmosférica, para que o valor da reflectância dos pixels, os quais têm atributos expressos em Reflectância de Superfície fossem positivos.

2.8 Definição da imagem multiespectral

Para o cálculo e validação dos modelos radiométricos, considerou-se as variáveis de solo, no caso a granulometria, agregação do solo, densidade, porosidade total e resistência do solo à penetração e a resposta espectral dos pontos amostrados em campo. Em seguida foi feita uma seleção dos pontos de forma aleatória, sendo 25 pontos utilizados para o cálculo e os demais pontos para a validação do desempenho dos modelos.

Dentre os potenciais canais que foram avaliados para geração dos modelos, consideraram-se as cinco bandas originais do sensor RapidEye (1-Azul; 2-Verde; 3-Vermelho; 4-Vermelho Limítrofe, 5-Infravermelho Próximo), o índice NDVI definido conforme as equações 1 respectivamente:

$$NDVI = \frac{\rho_{\text{infravermelho próximo}} - \rho_{\text{vermelho}}}{\rho_{\text{infravermelho próximo}} + \rho_{\text{vermelho}}} \quad (1)$$

Onde, $\rho_{\text{vermelho limítrofe}}$ representa a banda do vermelho limítrofe

A partir dos valores de NDVI gerados para cada pixel da imagem, foi selecionado o pixel mais próximo dos pontos de coleta de solo e este valor de NDVI adotado como o representativo daquela região.

O processo de geração dos modelos seguiu duas abordagens, das quais, em um primeiro momento, verificou-se a possibilidade de gerar um modelo de predição a partir de duas bandas ou mais. Nesta abordagem, o critério para compor o modelo considerou os canais que apresentaram uma significativa correlação com os atributos físicos do solo. Deste modo, definiu-se, como significativa, a correlação superior a 40% e um nível de significância de 5% (MARTINS, 2016).

No cálculo do modelo foi utilizada a técnica de regressão linear múltipla *stepwise* do tipo *forward* (passo à frente). A regressão linear múltipla *stepwise* considera, inicialmente, um modelo de regressão simples usando, como variável auxiliar (bandas e índice multiespectral),

a variável de maior coeficiente de correlação com as variáveis respostas (granulometria, agregação do solo, densidade, porosidade e resistência do solo à penetração). O processo se sucede ao passo que uma nova variável auxiliar é incorporada ao modelo, sendo interrompido quando nenhuma nova variável é incluída no modelo. O modelo final é dado quando $F_{\max} < F_{\min}$, onde F_{\max} é dado a partir da Equação 2, enquanto que F_{\min} é o quantil especificado da distribuição F, com um e ((observações) – m(variáveis)) graus de liberdade (HAIR et al., 2009).

$$F_{\max} = \frac{SQReg_c - SQReg_r}{\sigma^2} \quad (2)$$

Em que $SQReg_c$ é a Soma dos quadrados dos resíduos do modelo de regressão; $SQReg_r$ é a Soma dos quadrados dos resíduos do modelo de regressão ajustado; e σ^2 é a soma dos quadrados dos erros do modelo de regressão completo.

Os parâmetros de entrada para aceitação de variáveis, no modelo de regressão linear múltipla, foram a um nível de significância de 5%, e o quantil da distribuição F no valor de 4. Ressaltasse que todos os modelos de regressão linear simples e múltipla foram calculados no *software Minitab 15.0*.

A validação e a análise de acurácia dos modelos empíricos foram realizadas aplicando-se os modelos sobre a radiometria dos vinte pontos de verificação. A partir dos dados de discrepância entre das variáveis do solo observada e estimada, foi calculado o erro médio quadrático (RMSE) da amostra e analisada a tendência do modelo de predição, considerando o teste de hipótese *t-Student*. O RMSE e erro RMSE(%) são calculados a partir das equações 3 e 4.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{med})^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{med})^2}{n}} \times \frac{100Xn}{\sum_{i=1}^n x_{med}} \quad (4)$$

Em que x_i e x_{med} representam o valor estimado e medido *in situ* da variável de solo, respectivamente; e n é o número de amostras.

Em uma segunda estratégia, verificou-se a possibilidade de gerar um modelo de predição a partir de uma única banda. Nesta etapa, o melhor modelo de predição foi estabelecido

considerando a função da regressão linear simples que apresentou maior coeficiente de determinação (R^2), a partir da relação das variáveis de solo e da radiométrica dos canais multiespectrais da imagem (variável de predição).

Por fim, a partir dos modelos empíricos de estimativa foram gerados mapas de cor-valor em relação às características físicas do solo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a figura 3, o correlograma apresenta a relação entre os atributos físicos do solo e o índice multiespectral do sensor RapidEye. A linha de tendência aponta a correlação negativa entre alguns parâmetros físicos, particularmente densidade e a fração argila havendo também correlações positivas para porosidade total, diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado e fração areia total.

As correlações estatisticamente significativas ($P\text{-valor} < 0,05$) são indicadas por variáveis que estão acima de valores de 0,4 de correlação. Os teores diâmetro médio geométrico e diâmetro médio ponderado apresentaram uma baixa correlação conjuntamente com os agregados de solo. Os maiores coeficientes de correlação foram apresentados pela densidade do solo (-0,53), e pela porosidade total (0,47), sendo aqueles que, podem indicar algum estresse vegetal e modificação na estrutura foliar.

A partir destas relações, consta-se que o índice espectral (NDVI) consegue discriminar, relativamente, apenas a densidade do solo e porosidade total, apresentando dessa forma correlações significativas.

Em estudos como em Zanzarini (2012), a partir de um modelo empírico de estimava com uso de valores NDVI, em áreas com cultivo de cana de açúcar, conseguiram discriminar a densidade do solo e o teor de argila no solo em um LATOSSOLO VERMELHO amarelo.

De certa forma pode-se afirmar que os atributos densidade do solo e a porosidade do solo afetam a estrutura física das plantas, ou seja, o dossel, onde por meio dessa reação o índice NDVI consegue capturar essas informações.

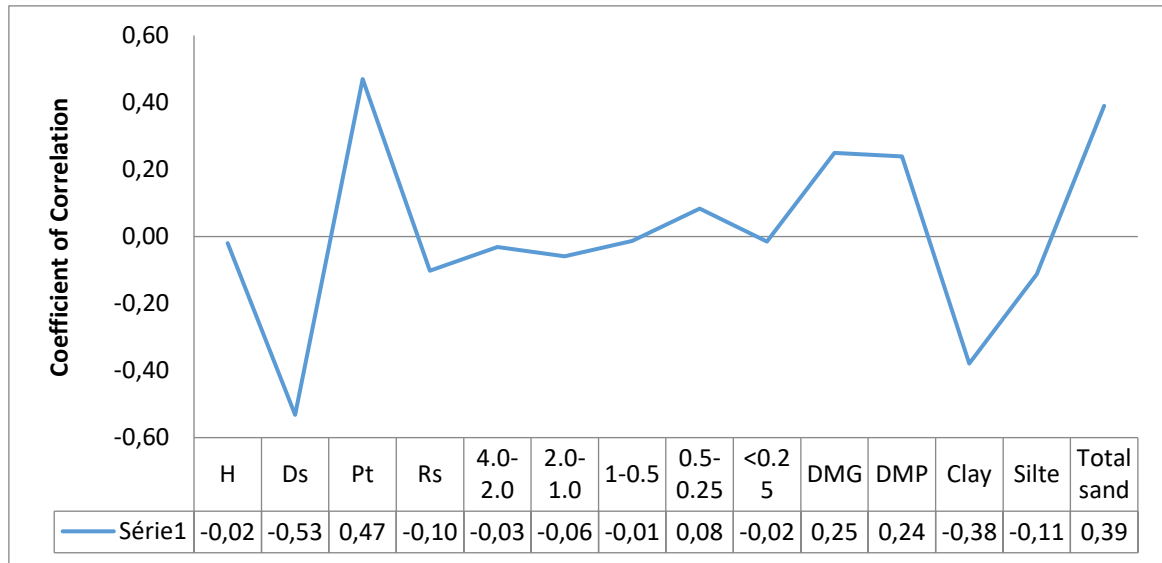


Figura 3. Correlograma entre os atributos físicos do solo: umidade gravimétrica (H), densidade do solo (Ds) porosidade total (Pt), Resistência do solo à penetração (Rs), agregados do solo (4-2; 2-1; 1-0,5; 0,5-0,25; <0,25 mm), Diâmetro médio geométrico (DMG), Diâmetro médio ponderado (DMP), Granulometria sendo: Teor de argila (Clay), Teor de silte (Silte) e Teor de areia total (Total sand) e a imagem espectral NDVI.

Na Figura 4, são apresentados os gráficos de regressão linear simples entre os atributos físicos do solo (porosidade total e densidade do solo) e o índice multiespectral NDVI. As equações de regressão linear, o coeficiente de determinação e o p-valor resultantes de cada relação são apresentados no lado esquerdo superior de cada gráfico.

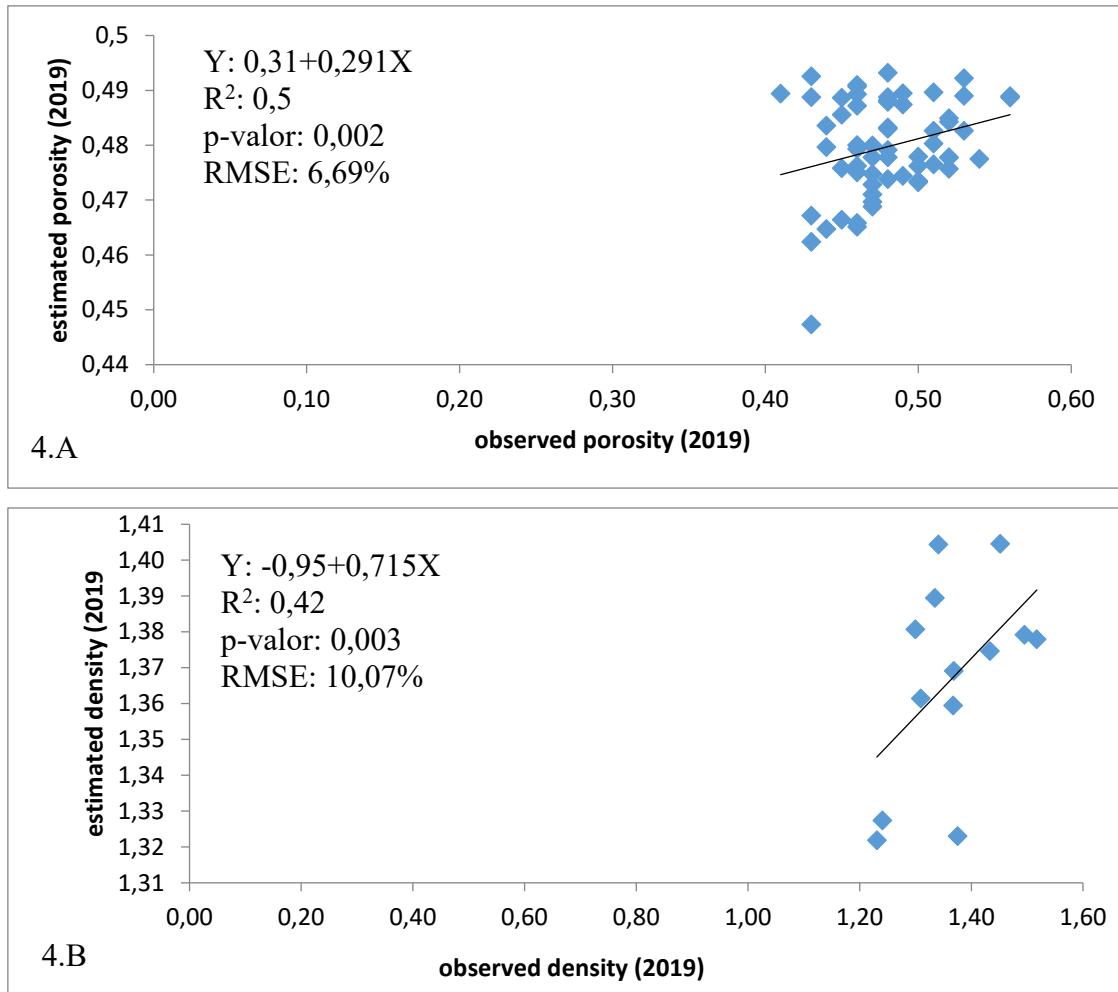


Figura 4. Gráficos de regressão entre a Porosidade do solo (4.a) e Densidade do solo(4.b) e índice NDVI

Os gráficos de regressão demonstram um alto grau de dispersão na relação aos atributos físicos densidade e porosidade do solo e a reflectância do NDVI. A amplitude dos R^2 variaram de 0,42 a 0,5. Além dos baixos valores de R^2 , o P-valor das equações de regressão gerados foram significativos, superando o nível de significância de 5%.

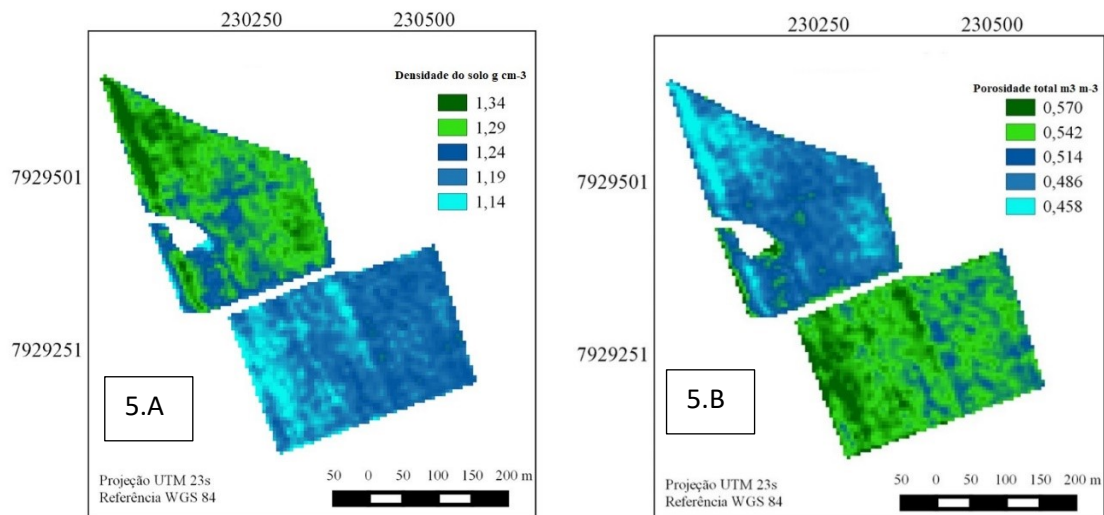


Figura 5 Mapa correlação da densidade do solo (5.a) e porosidade total (5.b) obtido a partir do modelo empírico de regressão linear.

A metodologia desenvolvida, que incluiu medidas hiperespectrais estimadas por meio de imagens de satélite NDVI e valores obtidos em campo possibilitaram a discriminação das variáveis densidade e porosidade total na cultura cafeeira; sendo possível confirmar a hipótese de que as abordagens baseadas no sensoriamento remoto são adequadas para o monitoramento na cultura cafeeira em relação à esses atributos físicos do solo para a área em estudo.

Para uma cultura perene como o café e as variáveis físicas do solo onde o manejo consiste, basicamente, no manejo de solo e práticas conservacionistas o sensoriamento remoto é uma ferramenta eficaz para o mapeamento das áreas cafeeiras e, nesse sentido, as imagens RapidEye atendem essa condição.

Nota-se então que o NDVI é um índice que pode ser usado na identificação e delimitação de áreas homogêneas para manejo do solo, mostrando-se como uma ferramenta a ser explorada dentro da agricultura de precisão.

4 CONCLUSÕES

As variáveis de solo densidade do solo e porosidade total podem ser estimadas por meio do índice multispectral (NDVI).

Tais variáveis apresentaram valores de correlação significativos, podendo assim afirmar que há precisão nos valores encontrados a campo comparados aos valores estimados via resposta espectral.

O sensorimento remoto pode maximizar o trabalho em campo, dispensando a prática de amostragem, podendo a mesma ser substituída por imagens de satélite.

O sensoriamento remoto através do índice NDVI pode indicar alternativas de manejo, não só para reduzir os efeitos da variabilidade do solo sobre a produção da cafeeira, como também para aumentar a possibilidade de estimar respostas da cultura sob determinadas práticas de manejo.

O índice de vegetação NDVI apresenta boa aplicação para observar a variabilidade espacial de alguns atributos do solo, mostrando-se uma ferramenta para delimitação de áreas homogêneas de manejo.

REFERÊNCIAS

- Abdel-Rahman, Elfatih; Ahmed, Fethi B. **The applicatio of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature.** [S.l]:[s.n.].
- BLACKBRIDE. PLANET. RapidEyeTM imagery product specifications, 2016. Disponível em: <https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye%20ImageProduct-Specifications.pdf>. Acesso: 15 de novembro de 2019.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3 Ed. Porto Alegre: Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686 p.
- CAMPOS, S. *et al.* **Evolução do uso da terra entre 1996 e 1999 no município de Botucatu - SP. *Engenharia Agrícola***, Jaboticabal, v.24, n.1, p.211-218, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v24n1/v24n01a24.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2009
DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-69162004000100024>
- EMBRAPA. Embrapa solos. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** 2 ed. Brasília, 2009. 623 p
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2011. 230 p.
- ENVI. Atmospheric correction module: QUAC and FLAASH User's Guide. ITT. Visual Information Solutions, 2009.
- FERREIRA, M. M.. Caracterização Física do Solo. In: LIER, Q. J. V. (Ed.). **Física do Solo.** Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.1-27, 2010.
- HAIR JR., J. F. et al. **Análise multivariada de dados.** 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.
- International Journal Of Remote Sensing.** Bristol, Pa, Usa, p. 3753-3767. jul. 2008.
- KAUFMAN, Y. J. The atmospheric effect on remote sensing and its correction. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing.** New York: John Wiley & Sons, 1997. cap. 9, p. 336-428.
- KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis.** 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Physical and mineralogical methods, p. 425-443. DOI <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Physical and mineralogical methods, p. 425-443. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>

MARTINS, G. D. **Inferência dos níveis de infecção por nematoides na cultura cafeeira a partir de dados de sensoriamento remoto adquiridos em multiescala**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Cartográfica, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2016.

MARTINS, G. D.; GALO, Maria de Lourdes Bueno Trindade. Detecção de áreas infestadas por nematoides e *Migdolus fryanus* em cultura canavieira a partir de imagens multiespectrais Rapideye. **Revista Brasileira de Cartografia**, Brasília, v. 2, n. 66, p.285-301, 01 jun. 2014

MINITAB Inc. Statistical Software Data Analysis Software. Version 15, 200

RAMOS, R. R. D. *et al.* Aplicação do índice da vegetação por diferença normalizada (ndvi) na avaliação de áreas degradadas e potenciais para unidades de conservação. **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, v. 6, n. 3, p.1-6, 30 jul. 2010.

ROUSE, J. W. *et al.* **Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**. Greenbelt: NASA/GSFC, Type III, Final Report, 1974. 371 p.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.229-235, 1991.

YI, J.L.R.; SHIMABUKURO, Y.E.; QUINTANILHA, J.A. **Identificação e mapeamento de áreas de milho na região sul do Brasil utilizando imagens MODIS**. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.3, dez.2007. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162007000400019&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 28 dez. 2019. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000400019>

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, Madison, v. 28, 1936. p. 337-351. DOI <https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>

ZANZARINI, Fabricio Valentim. **Correlação espacial entre os atributos do solo e o índice espectral de vegetação na cultura de cana-de-açúcar**. 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Jaboticabal, 2012.