



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Campus II - Areia - PB**



VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREAS DE FLORESTA NATIVA E DE PASTAGENS NA ZONA DA MATA PERNAMBUCANA

JOSÉ MARCÍLIO DA SILVA

**AREIA
PARAÍBA, BRASIL
NOVEMBRO, 2017**



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Campus II - Areia - PB



VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREAS DE FLORESTA NATIVA E DE PASTAGENS NA ZONA DA MATA PERNAMBUCANA

JOSÉ MARCÍLIO DA SILVA¹

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências para obtenção do título de *Doutor em Ciência do Solo*. Área de Concentração: Solos em Agroecossistemas Familiares.

Orientador: Prof. Dr. Adailson Pereira de Souza

**AREIA
PARAÍBA, BRASIL
NOVEMBRO, 2017**

¹ Licenciado em Ciências Agrárias. Professor Titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE/Campus Barreiros). Barreiros, PE.

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586v Silva, José Márcilio da.
Variabilidade espacial de atributos do solo em áreas de
floresta nativa e de pastagens na zona da mata
pernambucana / José Márcilio da Silva. - Areia, 2017.
68 f. : il.

Orientação: Adailson Pereira de Souza.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCA.

1. Química do solo. 2. Atributos químicos - Latossolo
amarelo. 3. Atributos físicos - Latossolo amarelo. 4.
Variabilidade espacial. I. Souza, Adailson Pereira de.
II. Título.

UFPB/BC

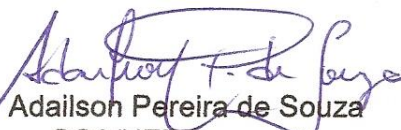
JOSÉ MARCÍLIO DA SILVA

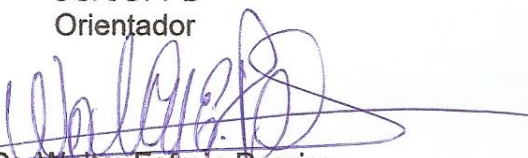
VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREAS DE
FLORESTA NATIVA E DE PASTAGENS NA ZONA DA MATA PERNAMBUCANA

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo do
Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Federal da Paraíba, como
parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Ciência do Solo.
Área de Concentração: Solos em
Agroecossistemas Familiares.

Aprovada: 27 de novembro de 2017

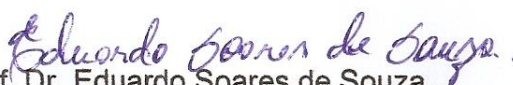
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Adailson Pereira de Souza
CCA/UFPB
Orientador


Prof. Dr. Walter Estrain Pereira
CCA/UFPB
Examinador


Pesq. Dr. Gilvan Barbosa Ferreira
CNPQ/EMBRAPA Algodão
Examinador


Profa. Dra. Silvana Maria de S. Gomes
GCHSA/UFPB
Examinadora


Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza
UAST/UFRPE
Examinador

A **DEUS**, autor da minha vida, por ter me concedido a oportunidade de concluir mais esta etapa, em minha vida profissional.

AGRADEÇO

Aos meus pais, **Maria Luísa** (*in memorian*) e **Vicente Paulo** (*in memorian*) pelos ensinamentos e legados deixados, os quais me conduzirão por toda minha vida.

HOMENAGEIO

Aos meus filhos, **Nathália**, **Lucas** e **João Pedro**, e a minha esposa, **Márcia Cristina**, pelo carinho, apoio incondicional e motivação constante nesta nova fase da minha vida profissional.

DEDICO

Aos meus irmãos **Márcia Luiza**, **Josias José**, **Isaque José**, **Diva Luiza**, **José Gilberto**, **Marcos Antônio**, **Mário José** e **Maria José**, cunhados, cunhadas, sobrinhos, sobrinhas e amigos.

OFEREÇO

AGRADECIMENTO ESPECIAL

Ao meu orientador, Prof. Dr. **Adailson Pereira de Souza**, agradeço pela amizade construída, pela paciência, pela compreensão e incentivo nas horas difíceis e pela confiança em mim depositada. Sua orientação foi de grande importância para conclusão desta tese.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)**, à **Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPESQ)** do **Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)** pelo apoio financeiro, de suma importância para a realização desta tese de doutorado e ao **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio)** pela autorização concedida para atividades com finalidade científica na Reserva Biológica de Saltinho (REBIO), localizada no município de Tamandaré, PE.

O meu muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, agradeço pelo dom da vida, pelo grande milagre a mim concedido durante a realização deste curso, pela grandeza de mais uma vitória trazendo perfeição em todos os meus passos, decisões e escolhas. Obrigado, SENHOR!

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE/Campus Barreiros), pela liberação para realização desta capacitação profissional em nível de Doutorado, o meu reconhecimento.

Ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba (CCA – UFPB/Campus II/Areia, PB) e ao Departamento de Solos e Engenharia Rural pelas portas abertas durante a realização do curso de doutorado.

À Coordenação e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) do CCA-UFPB, pela grandiosa oportunidade a mim concedida e por todo conhecimento recebido durante minha jornada no curso de doutorado.

Aos Professores Dr. Walter Esfrain Pereira, Dr. Gilson Moura Filho, Dra. Raunira da Costa Araújo, Dr. Raphael Moreira Beirigo, Dra. Silvânia Maria de Souza Gomes, Dr. Gilvan Barbosa Ferreira e ao Dr. Eduardo Soares de Souza, pelas valiosas contribuições, incentivos e sugestões nesta Tese. Sou grato.

Ao proprietário do Engenho Angico, na pessoa do Sr. José de Selva Teodoro Pereira Neto, pela concessão da área de cultivo ocupada com pastagens para realização das coletas de solo. Muito obrigado.

Ao Laboratório de Análise de Solos da Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina da Universidade Federal Rural de Pernambuco (EECAC-UFRPE), pela realização das análises químicas e físicas do solo.

Ao meu filho João Pedro Figueira da Silva e a José Miquéias de Oliveira Silvestre, pela colaboração e total apoio durante as atividades de campo realizadas nas áreas do Engenho Angico e na Reserva Biológica de Saltinho.

Ao José Cícero (Saberé), pela escolha da área na Reserva Biológica de Saltinho (REBIO) para realização das coletas de amostras de solo. Minha gratidão.

Ao casal João Lima de Oliveira e Cícera Evangelista Santos de Oliveira, pela hospitalidade a mim concedida na cidade de Areia, PB, durante a realização deste curso.

Aos colegas do curso de mestrado e doutorado da Pós-Graduação em Ciência do Solo do CCA-UFPB, pela convivência agradável durante a realização do curso, pela grande amizade construída, companheirismo e pelos momentos felizes de descontração.

A minha família, Márcia, Nathália, Lucas e João Pedro, pela paciência, experiência e esperança em mim depositada.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste novo desafio em minha vida profissional.

Minha eterna gratidão.

*“Os sonhos de Deus são maiores que os meus.
Ele vai fazer o melhor por mim.
Ele vai além do que eu posso ver. Ele faz o que eu não posso fazer.
Deus vai cumprir os seus planos em mim, Ele vai fazer o que lhe
apraz.
Sou pequeno e falho, mas Ele é Deus, Ele só faz o melhor pelos seus.
Acredito sim, que Deus vai fazer o impossível em meu viver.”*
(Nani Azevedo)

*“A educação tem papel fundamental no desenvolvimento da
sociedade, informando, transformando e conduzindo os cidadãos na
busca de mudanças de comportamentos que se refletem em sinônimo
de aprendizagem. Portanto, com esforço e dedicação venceremos os
obstáculos da vida. Sofrimento passado é glória no futuro.”*
(O autor)

*“Porém em nada considero a vida preciosa para mim mesmo,
contanto que complete a minha carreira e o ministério que recebi do
Senhor Jesus para testemunhar do evangelho da graça de Deus.”*
(Atos 20.24)
(Bíblia Sagrada Versão Almeida Revista e Atualizada).

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1. Caracterização da região da Zona da Mata Pernambucana.....	3
2.2. Variabilidade espacial de atributos do solo em floresta nativa e em pastagens.....	4
2.3. Geoestatística como ferramenta de análise espacial do solo.....	5
2.4. Semivariogramas para análise espacial do solo.....	7
2.4.1. Modelos e parâmetros de semivariogramas.....	8
2.4.2. Critérios da escolha dos modelos de semivariogramas.....	9
2.5. Métodos de interpolação para análise de semivariogramas.....	12
2.5.1. Krigagem ordinária.....	13
2.5.2. Inverso do quadrado da distância.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1. Localização e descrição das áreas de estudo.....	15
3.2. Caracterização dos dados de solos.....	17
3.2.1. Determinação de valores dos atributos químicos do solo.....	18
3.2.2. Determinação de valores dos atributos físicos do solo.....	18
3.3. Análise estatística e geoestatística dos dados.....	19
3.3.1. Análise estatística dos dados.....	19
3.3.1.1. Métodos de identificação de <i>outliers</i>	20
3.3.2. Análise geoestatística dos dados.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1. Análise exploratória dos atributos do solo em floresta nativa e em pastagens.....	23
4.1.1. Análise descritiva de valores dos atributos químicos do solo.....	23
4.1.1.1. Valores dos atributos químicos do solo em floresta nativa.....	23

4.1.1.2. Valores dos atributos químicos do solo em pastagens.....	25
4.1.2. Análise descritiva de valores dos atributos físicos do solo.....	27
4.1.2.1. Valores dos atributos físicos do solo em floresta nativa.....	27
4.1.2.2. Valores dos atributos físicos do solo em pastagens.....	28
4.2. Comparação das médias de valores dos atributos do solo entre floresta nativa e pastagens.....	31
4.2.1. Médias de valores dos atributos químicos do solo.....	31
4.2.2. Médias de valores dos atributos físicos do solo.....	32
4.3. Análise geoestatística dos atributos do solo em floresta nativa e em pastagens.....	33
4.3.1. Análise espacial de valores dos atributos químicos do solo.....	33
4.3.2. Análise espacial de valores dos atributos físicos do solo.....	46
5. CONCLUSÕES.....	57
6. REFERÊNCIAS.....	58

LISTA DE TABELAS

	página
Tabela 1. Estatística descritiva de valores dos atributos químicos do solo na área de floresta nativa, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	24
Tabela 2. Estatística descritiva de valores dos atributos químicos do solo na área de pastagens, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	26
Tabela 3. Medidas descritivas de variabilidade de atributos físicos do solo na área de floresta nativa, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	28
Tabela 4. Medidas descritivas de variabilidade de atributos físicos do solo na área de pastagens, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	29
Tabela 5. Média dos valores dos atributos químicos do solo em floresta nativa e em pastagens comparados na mesma profundidade.....	32
Tabela 6. Média dos valores dos atributos físicos do solo em floresta nativa e em pastagens comparados na mesma profundidade.....	33
Tabela 7. Modelos e parâmetros dos semivariogramas de valores dos atributos químicos do solo na área de floresta nativa, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	34
Tabela 8. Modelos e parâmetros dos semivariogramas de valores dos atributos químicos do solo na área de pastagens, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	35
Tabela 9. Modelos e parâmetros dos semivariogramas dos atributos físicos do solo na área de floresta nativa, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	47
Tabela 10. Modelos e parâmetros dos semivariogramas dos atributos físicos do solo na área de pastagens, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm	48

LISTA DE FIGURAS

	página
Figura 1. Localização da Mesorregião da Zona da Mata Pernambucana.....	3
Figura 2. Modelos teóricos e parâmetros de semivariogramas.....	8
Figura 3. Amostras espaçadas regularmente em duas dimensões.....	10
Figura 4. Localização das áreas experimentais.....	15
Figura 5. Dados médios do regime pluviométrico e temperatura na região da REBIO.....	16
Figura 6. Malha regular regionalizada e distribuição dos pontos de amostragem nas áreas de floresta nativa (A) e pastagens (B).....	17
Figura 7. Modelo de Elevação Digital das áreas de pastagens e floresta nativa.....	18
Figura 8. Mapas de declividade das áreas de floresta nativa (A) e de pastagens (B).....	36
Figura 9. Distribuição espacial dos atributos pH, Al^{3+} e $H+Al$ na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	38
Figura 10. Distribuição espacial dos atributos P, K^+ e MO na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	39
Figura 11. Distribuição espacial dos atributos Ca^{2+} , Mg^{2+} e SB na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	40
Figura 12. Distribuição espacial dos atributos T, V e m na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	41
Figura 13. Distribuição espacial dos atributos pH, Al^{3+} e $H+Al$ na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	42
Figura 14. Distribuição espacial dos atributos P, K^+ e MO na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	43
Figura 15. Distribuição espacial dos atributos Ca^{2+} , Mg^{2+} e SB na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	44
Figura 16. Distribuição espacial dos atributos CTC, V e m na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	45
Figura 17. Distribuição espacial granulométrica da areia, silte e argila na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	51

Figura 18.	Distribuição espacial granulométrica da areia, silte e argila na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	52
Figura 19.	Distribuição espacial MaP e Pt na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	53
Figura 20.	Distribuição espacial Ds e MiP na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	54
Figura 21.	Distribuição espacial MaP e Pt na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	55
Figura 22.	Distribuição espacial Ds e MiP na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	56

LISTA DE EQUAÇÕES

	página
Equação 1. Modelo esférico de semivariograma.....	11
Equação 2. Modelo exponencial de semivariograma.....	11
Equação 3. Modelo gaussiano de semivariograma.....	11
Equação 4. Modelo aleatório efeito pepita puro.....	12
Equação 5. Krigagem ordinária.....	14
Equação 6. Inverso do quadrado da distância.....	14
Equação 7. Teste de Kolmogorov Smirnov.....	19
Equação 8. Teste t de Student.....	20
Equação 9. Semivariograma experimental.....	21
Equação 10. Semivariância experimental.....	21
Equação 11. Grau de dependência espacial.....	22

RESUMO

JOSÉ MARCÍLIO DA SILVA. **Variabilidade espacial de atributos do solo em áreas de floresta nativa e de pastagens na zona da mata pernambucana.** Areia – PB, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, novembro de 2017. Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Orientador: Prof. Dr. Adailson Pereira de Souza.

Os solos apresentam em sua composição variabilidade espacial nos valores dos atributos químicos e físicos, sendo importante conhecê-los para um manejo eficiente. Os métodos e técnicas geoestatísticas utilizados conjuntamente com a estatística descritiva têm sido de grande importância na ciência do solo, permitindo avaliar a estruturação e medição da magnitude da variabilidade espacial de valores dos atributos químicos e físicos do solo, por meio de ajustes dos semivariogramas e pelos mapas de krigagem. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial de valores dos atributos químicos e físicos em Latossolo Amarelo sob floresta nativa e pastagens na Zona da Mata Pernambucana, utilizando técnicas geoestatísticas na análise dos dados. Em cada área foi montada malha regularmente espaçada em duas dimensões de 70 m x 70 m, onde foram coletadas 256 amostras de solo deformadas e indeformadas no cruzamento entre linhas e colunas da malha, em 64 pontos georreferenciados com distâncias entre si de 10 m nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, totalizando 512 amostras nas duas áreas, para determinação de valores dos seguintes atributos químicos do solo: acidez ativa (pH em CaCl_2), acidez trocável (Al^{3+}), acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (T), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m) e matéria orgânica do solo (MOS), e os seguintes atributos físicos do solo: composição das frações granulométrica do solo, densidade do solo, microporosidade, macroporosidade e porosidade total acumulada. A análise geoestatística foi utilizada para verificar e quantificar a existência do grau de dependência espacial de valores dos atributos químicos e físicos do solo. Concluiu-se que: os valores dos atributos químicos P, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SB, T, V, MOS e dos atributos físicos microporosidade e porosidade total apresentam forte grau de dependência espacial, e moderada

dependência espacial para os atributos químicos pH, K^+ , Al^{3+} , H+Al, m, e para as frações areia, silte, argila e as variáveis densidade do solo e macroporosidade com maior alcance para as variáveis H+Al (48,50 m) e argila (38,30 m) e menor alcance para a MOS (10,80 m), microporosidade e densidade do solo (12,80 m), na área de floresta nativa. Na área de pastagens, os valores dos atributos químicos P, K^+ , Al^{3+} , H+Al, SB, T, V, m, a fração silte e as variáveis microporosidade, macroporosidade e porosidade total apresentam forte variabilidade espacial e moderada para os valores dos atributos químicos pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , MOS e Al^{3+} e, para as frações areia, argila e densidade do solo, com maior alcance espacial para as variáveis m (37,90 m) e densidade do solo (23,74 m) e menor alcance para T (10,20 m) e areia (10,13 m). Na área de floresta nativa, os valores dos atributos químicos do solo ajustaram-se aos modelos esférico (45,83%), exponencial (37,50%) e gaussiano (16,67%) e os valores dos atributos físicos aos modelos esférico (71,43%), gaussiano (14,28%) e linear (14,28%). Na área de pastagens, os valores dos atributos químicos do solo ajustaram-se aos modelos esférico (50%), exponencial (37,50%), gaussiano (4,17%) e linear (8,32%), e os valores dos atributos físicos aos modelos exponencial (50%), esférico (35,71%) e gaussiano (14,29%).

PALAVRAS-CHAVE: Geoestatística, Dependência espacial, Química do solo, Física do solo, Sul de Pernambuco.

ABSTRACT

JOSÉ MARCÍLIO DA SILVA. Spatial variability of soil attributes in areas native forest and pastures in the zone of the forest pernambucana. Areia – PB, Center of Agrarian Sciences, UFPB, november of 2017. Doctorate. Graduate Program in Soil Science. Advisor: Dr. Adailson Pereira de Souza.

The soils present in their composition spatial variability in the values of the chemical and physical attributes, being important to know them for efficient handling. The geostatistical methods and techniques used in conjunction with descriptive statistic has been of great importance in soil science, enabling assessing the structuring and measurement of magnitude of spatial variability of values of the chemical and physical attributes of the soil, by means of adjustments of the semivariogram and the maps of kriging. This survey aimed to evaluate the spatial variability of values of chemical and physical attributes in Yellow Latosol under native forest and pastures Zone of the Forest Pernambuco, using geostatistical techniques in the analysis of the data. In each area, the mesh mounted regularly spaced in two dimensions of 70 m x 70 m, where 256 samples of deformed and undeformed soil were collected at the crossing between lines and columns of the mesh, at 64 points georeferenced with a distances between them of 10 m in depths of 0.10 cm and 10.20 cm, totaling 512 samples in both areas, for determining values of the following chemical attributes of soil: active acidity (pH in CaCl_2), exchangeable acidity (Al^{3+}), potential acidity ($\text{H}+\text{Al}$), phosphorus (P), potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sum of bases (SB), ability to exchange cations (T), base saturation (V), saturation aluminum (m) and soil organic matter (MOS) and the following physical soil attributes: composition of the granulometric fractions of the soil, soil density, microporosity, macroporosity, accumulated total porosity. The geostatistical analysis was used to verify and quantify the existence of the degree of spatial dependence of values of the chemical and physical attributes of the soil. It was concluded: the values of the chemical attributes P, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SB, T, V, MOS and the physical attributes microporosity and total porosity present strong degree of spatial dependence, and moderate spatial dependence for the chemical attributes pH, K^+ , $\text{H}+\text{Al}$, m and for the sand fractions, silt, clay and the density variables of the

soil and macroporosity with greater reach for the variables H+Al (48.50 m) and clay (38.30 m) and lower range for the soil organic matter (10.80 m), microporosity and soil density (12.80 m), in the native forest area. In the pasture area, the values of chemical attributes P, K⁺, Al³⁺, H+Al, SB, T, V, m and the silt fraction and the variables microporosity, macroporosity and total porosity feature strong spatial variability and moderate for the values of the chemical attributes pH, Ca²⁺, Mg²⁺, MOS and Al³⁺, and, for the sand, clay and soil density fractions, with greater spatial range for the variables m (37.90 m) and soil density (23.74 m) and less reach for T (10.20 m) and sand (10.13 m). In the native forest area, the values of the soil chemical attributes set to spherical (45.83%), exponential (37.50%) and gaussian (16.67%) and of the values physical attributes to spherical (71.43%), gaussian (14.17%), and linear (14.28%) models. In the pasture area, the values of the soil chemical attributes were adjusted to spherical models (50%), exponential (37.50%), gaussian (4.17%) and linear (8.32%) and the values of physical attributes to exponential (50%), spherical (35.71%) and gaussian (14.29%) models.

KEY WORDS: Geostatistics, Spatial dependence, Soil Chemical, Soil Physical, Southern Pernambuco.

1. INTRODUÇÃO

O solo, por mais uniforme que possa parecer, apresenta em sua composição heterogeneidades horizontal e vertical. Isto ocorre devido aos fatores de sua formação (material de origem, clima, organismos, relevo e tempo) e dos processos pedológicos (latolização, podzolização, salinização e gleização) que são responsáveis por sua formação. Esses processos permitem, naturalmente, a adição, a remoção, a translocação e a transformação de compostos sólidos, líquidos e gasosos, minerais e orgânicos, que alteram a composição dos solos. Assim, ele apresenta variabilidade espacial nos valores de seus atributos químicos e físicos, dentre outros.

Conhecer a variabilidade existente no solo é importante porque ela caracteriza o padrão e a distribuição espacial dos valores de atributos importantes da fertilidade, da capacidade de armazenamento de água e a distribuição radicular no solo. Assim, é possível tomar medidas corretivas com a utilização de corretivos e adubos para corrigir acidez e deficiências de nutrientes detectados pontualmente na área, assim como planejar a longo prazo o preparo e o manejo corretos do solo. Isto permite obter ganhos de produtividades, redução de custos e preservação do meio ambiente.

Os métodos e técnicas geoestatísticas têm sido aplicados à agricultura de precisão como ferramenta adicional, vem sendo utilizados no Brasil conjuntamente com a estatística descritiva na ciência do solo para avaliar a estruturação e dimensão da magnitude de valores de atributos do solo, descrevendo a sua distribuição espacial por meio dos mapas de krigagem e dos semivariogramas experimentais ajustados (SILVA et al., 2008a). Esta combinação busca identificar um padrão de amostragem adequado, para o qual se define número e espaçamento dos pontos onde as amostras serão coletadas, quantificando os valores das variáveis do solo (SILVA et al., 2008a). A geoestatística permite o emprego de práticas agrícolas de forma sistemática (AZEVEDO et al., 2015; OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2010) e não sistemática, a partir de amostras regularmente espaçadas contribuindo para se alcançar uma agricultura econômica, ecologicamente viável e sustentável (SILVA et al., 2008a; 2017).

A Zona da Mata Sul Pernambucana tem um dos últimos remanescentes de mata Atlântica do Brasil, que é a Reserva Biológica de Saltinho. Ela é considerada uma das maiores e mais importantes reservas do nordeste brasileiro.

As florestas nativas possuem fundamental importância para regulação climática, ciclagem de nutrientes e a manutenção das condições dos recursos ambientais naturais, em especial a biodiversidade e a proteção de solos e água (LIMA et al., 2014a). No Brasil, poucas são as informações de como as formações vegetais nativas se distribuem em relação à fertilidade natural de solos. A sua distribuição depende dos fatores de formação do solo, essas formações vegetais nativas ocorrem como fragmentos florestais isolados como única referência do *status* original de fertilidade do solo. Dessa forma, solos sob vegetação nativa podem informar sobre uma região e sua fertilidade natural (SKORUPA et al., 2012).

As pastagens estão inseridas no sistema de produção como um dos principais fatores produtivos, interagindo solo, planta e animais. Sua degradação está associada ao manejo inadequado, influenciando diretamente a distribuição espacial de valores dos atributos químicos e físicos do solo (GUIMARÃES et al., 2016). As propriedades químicas, indiretamente, e físicas do solo, em áreas ocupadas por pastagens são afetadas através da compactação do solo, resultante da intensificação do pisoteio dos animais e utilização de máquinas agrícolas, limitando o desenvolvimento agrícola e modificando a variabilidade natural o solo.

Neste sentido, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial de valores dos atributos químicos e físicos em Latossolo Amarelo sob floresta nativa e pastagens na Zona da Mata Pernambucana, utilizando conjuntamente a estatística e geoestatística na análise de valores dos atributos do solo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Caracterização da região da Zona da Mata Pernambucana

A Zona da Mata Pernambucana (Figura 1) é a parte mais úmida do território estadual. Essa mesorregião ocupa pouco mais de 10% da superfície estadual, estendendo-se por uma área de 8.738 km². Possui uma ocupação antiga, que remonta ao século XVI, com atividade econômica quase que exclusiva da atividade canavieira, que persiste até os dias atuais. Seu relevo é ondulado e os solos são argilosos.

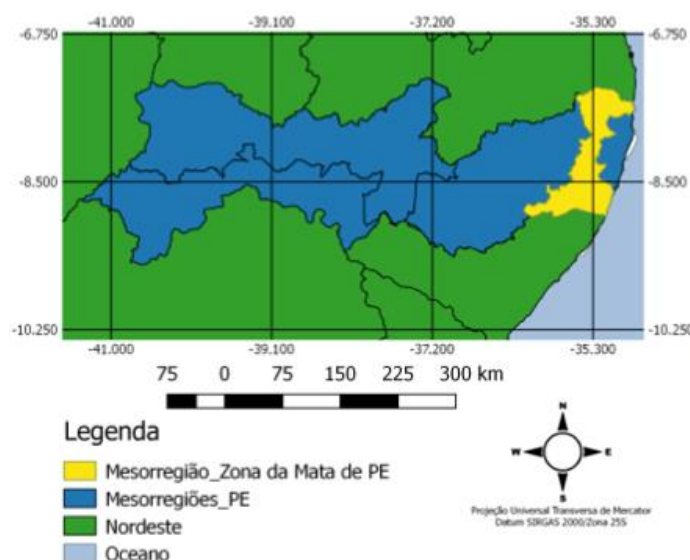


Figura 1. Localização da Mesorregião da Zona da Mata Pernambucana.

A área da Reserva Biológica de Saltinho (REBIO) está inserida nos municípios de Rio Formoso e Tamandaré, em conjunto com o município de Barreiros, às margens da rodovia PE-060. Ela está localizada a, aproximadamente, 100 km da cidade do Recife. A REBIO é uma das maiores e mais importantes reservas do nordeste brasileiro. Constitui-se em um dos últimos remanescentes de Floresta Atlântica do Estado de Pernambuco, com a finalidade de conservação integral da fauna e flora para fins científicos, com 548 hectares de floresta em um perímetro de 29 km (ICMBIO, 2017), situada no Bioma da Mata Atlântica da Costa

Brasileira na região do Nordeste do Brasil, na Mesorregião da Zona da Mata Pernambucana e na Microrregião da Mata Sul ou Mata Meridional Pernambucana.

2.2. Variabilidade espacial de atributos do solo em floresta nativa e em pastagens

O estudo da variabilidade espacial das características de atributos do solo, através da aplicação da geoestatística, vem sendo utilizado por diversos autores, tornando-se comum nos últimos anos, com a finalidade de avaliar, descrever e verificar sua distribuição no solo, permitindo o mapeamento das áreas de floresta nativa e de pastagens, estimando, com exatidão, os valores encontrados nos intervalos dos pontos amostrais a partir de malhas regularmente espaçadas (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014; SILVA, 2013; VIEIRA et al., 2008), possibilitando a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos do solo avaliados, considerando a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem para melhor compreensão da sua variabilidade (AQUINO et al., 2014).

Através da variabilidade espacial é possível analisar e descrever detalhadamente o comportamento dos atributos do solo, permitindo detectar a sua dependência em cada ponto amostral. A identificação da variabilidade espacial dos valores de atributos químicos e físicos do solo, por meio da geoestatística, torna-se útil para avaliar a fertilidade do solo. Esta ferramenta, visa à otimização da produção agrícola, através da realização de práticas agrícolas que minimizem os impactos negativos da ação antrópica no ambiente.

Conhecer a variabilidade espacial e a interpretação dos valores dos atributos do solo é de fundamental importância, pois ela influencia a qualidade das pastagens e das florestas nativas, como também é uma importante etapa para elaboração do planejamento experimental qualitativamente adequado (LIMA; SILVA; RAMINELLI, 2014b). Através da variabilidade espacial, os resultados das análises dos atributos do solo serão identificados, por meio de mapas de contorno de curvas de isovalores, chamados isolinhas, que caracterizam a distribuição da dependência espacial dos valores dos atributos analisados (SILVA et al., 2017).

A amostragem do solo é a primeira etapa em um planejamento racional a ser realizado em uma área agrícola. Ela é usada para definir o emprego de manejo e

adubação (OLIVEIRA JÚNIOR; SOUZA; MELO, 2010). Quando esta amostragem é realizada sistematicamente de forma regular em duas dimensões, a caracterização da variabilidade espacial dos valores de atributos químicos e físicos de uma área, permite evitar o emprego antieconômico de corretivos e fertilizantes (BERNARDI et al., 2017; MENDES; SILVA; BASSOI, 2014), como também aumenta a produtividade e reduz custos e os impactos negativos ao meio ambiente (SILVA et al., 2017).

Em áreas de floresta nativa e cultivadas com pastagens, a variabilidade espacial dos atributos do solo, fornece informações relevantes para o gerenciamento e uso racional do solo. Essas informações apresentam variabilidade horizontal e vertical, resultantes do processo de formação do solo (LIMA; SILVA; SILVA, 2013a; LIMA et al., 2014a). Portanto, a retirada da floresta nativa para a implantação de cultivos aliados a práticas de manejos inadequadas promovem o rompimento do equilíbrio entre o solo e o meio, modificando os fatores edáficos dos atributos do solo, como também altera a sua variabilidade natural (AQUINO et al., 2014).

2.3. Geoestatística como ferramenta de análise espacial do solo

A geoestatística é uma ferramenta importante para a análise de dados no âmbito da Agricultura de Precisão. Pode ser usada no planejamento e desenho de amostragens do solo e planta, na análise da continuidade espacial e na obtenção de grades interpoladas, através da krigagem. A geoestatística é um conjunto de métodos estatísticos apropriados para analisar um atributo de um fenômeno que tem distribuição contínua sobre uma área geográfica (SILVA et al., 2017).

Como ferramenta de análise espacial, a geoestatística foi desenvolvida com base na Teoria das Variáveis Regionalizadas (TVR) pelo professor Georges Matheron (MATHERON, 1971), baseado nos trabalhos do matemático sul-africano Daniel G. Krige (KRIGE, 1951) e do holandês H. J. De Wijs (DE WIJS, 1951, 1953), com dados de concentração de ouro. Matheron concluiu que somente a informação obtida pela variância não seria suficiente para explicar o fenômeno analisado. Portanto, seria necessário levar em consideração a distância entre amostras (MATHERON, 1971). A partir desta observação, surge o conceito da geoestatística que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial (CAMARGO, 1998).

Matheron (1971) definiu a variável regionalizada como uma função espacial numérica $f(x)$ do ponto x , que apresenta uma variação de um local para outro, com continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples. Esta continuidade e, ou dependência espacial, pode ser estimada através do semivariograma, que é definido a partir da variância das medidas realizadas em amostras espaçadas, no campo, de determinada distância h .

Para Matheron, a TVR tem dois objetivos: teórico e prático. O primeiro é descrever a correlação espacial, e o segundo é resolver problemas de estimativa de uma variável regionalizada com base em uma amostra (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A geoestatística aplicada à agricultura de precisão tem como objetivos: identificar nas amostras uma medida da correlação espacial, realizar estimativas no espaço e no tempo de valores não amostrados a partir de alguns valores conhecidos na população (VIEIRA et al., 2002), como também, a caracterização espacial de uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Os métodos e técnicas geoestatísticas aplicados conjuntamente com a estatística descritiva permitem avaliar e modelar a estruturação e dimensão da magnitude da variabilidade temporal e espacial de valores dos atributos químicos e físicos do solo, por meio de ajustes dos semivariogramas e pelos mapas de krigagem das variáveis em estudo (PELLIN et al., 2015; SILVA et al., 2008a; SILVA et al., 2017). Também é possível à realização com precisão, de um planejamento agrícola, a partir da separação de ambientes e adequação de práticas agrícolas adaptadas às restrições impostas aos atributos do solo (CAMPOS et al., 2009).

De acordo com Grego, Oliveira e Vieira (2014), a geoestatística auxilia fortemente nas decisões estratégicas e complexas em relação ao gerenciamento do sistema de produção agrícola e, conseqüentemente, nos seus efeitos ambientais. Ela contribui para o desenvolvimento sustentável em agricultura de precisão, através da qual as mudanças ocorrem sem prejuízos para as reservas naturais, ao mesmo tempo em que os danos são minimizados (MOLIN, 2013).

Vários autores vêm utilizando a geoestatística como ferramenta adicional que permite o mapeamento de fenômenos contínuos, quantificando, modelando e interpolando os valores dos atributos químicos e físicos do solo, por meio de amostragem regularmente espaçadas, considerando a dependência espacial nos

intervalos dos pontos onde as amostras serão coletadas (GUIMARÃES et al., 2016; MONTANARI et al., 2015; PELLIN et al., 2015; SILVA et al., 2008a; SILVA et al., 2015; SIQUEIRA; MARQUES JÚNIOR; PEREIRA, 2010; VALLADARES, 2012). Ela visa à otimização da produção agrícola de forma sustentável, a minimização do impacto ambiental, provocados pela utilização excessiva de insumos agrícolas e a redução dos custos de produção (NASCIMENTO et al., 2014; VIEIRA et al., 2002).

2.4. Semivariogramas para análise espacial do solo

O semivariograma é uma ferramenta de suporte às técnicas de krigagem que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço e no tempo (CAMARGO; FUKS; CÂMARA, 2004; YAMAMOTO; LANDIM, 2015). É utilizado para avaliar a variabilidade de valores dos atributos do solo, através da análise da dependência espacial, facilitando o entendimento do padrão de ocorrência desses atributos (AQUINO et.al., 2014).

Vários modelos matemáticos são utilizados para estimar os semivariogramas experimentais, através dos parâmetros de ajustes, determinando, assim, a variabilidade espacial de valores dos atributos físicos e químicos do solo (SILVA et al., 2008a; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Os principais modelos descritos na literatura contemplam semivariogramas como modelos transitivos básicos, com patamar e sem patamar. Segundo Camargo; Fuks e Câmara (2004), os modelos de semivariograma que possuem patamar (C_0+C_1) são referenciados na geoestatística como modelos transitivos, denominados de modelos isotrópicos. Estes, normalmente atingem o patamar assintoticamente (CAMARGO, 1998; YAMAMOTO; LANDIM, 2013) e o parâmetro alcance (a) é arbitrariamente definido como a distância correspondente a 95% do patamar (CAMARGO; FUKS; CÂMARA, 2004).

Os modelos sem patamar (C_0+C_1) continuam aumentando sua semivariância enquanto a distância aumenta. Eles são utilizados para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão (CAMARGO, 1998; CAMARGO; FUKS; CÂMARA, 2004, SILVA et al., 2008a; SILVA, 2013).

2.4.1. Modelos e parâmetros de semivariogramas

Um modelo de semivariograma é uma função que determina a variabilidade espacial para qualquer distância e direção e relaciona a semivariância ($\gamma(h)$) com a distância (h) e pode adquirir muitas formas, dependendo do conjunto de dados e do intervalo amostral. Os modelos de semivariogramas apresentados são considerados modelos teóricos transitivos básicos (esférico, exponencial e gaussiano) e apresentam os seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (a) e a componente estrutural (C_1) do semivariograma (Figura 2).

Para investigar a dependência espacial entre os dados, utiliza-se o semivariograma proposto por Matheron (1963), que mede a dependência entre os pontos amostrais e serve para a interpolação de valores necessários à construção de mapas de contorno (isolinhas) e superfícies através da krigagem (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

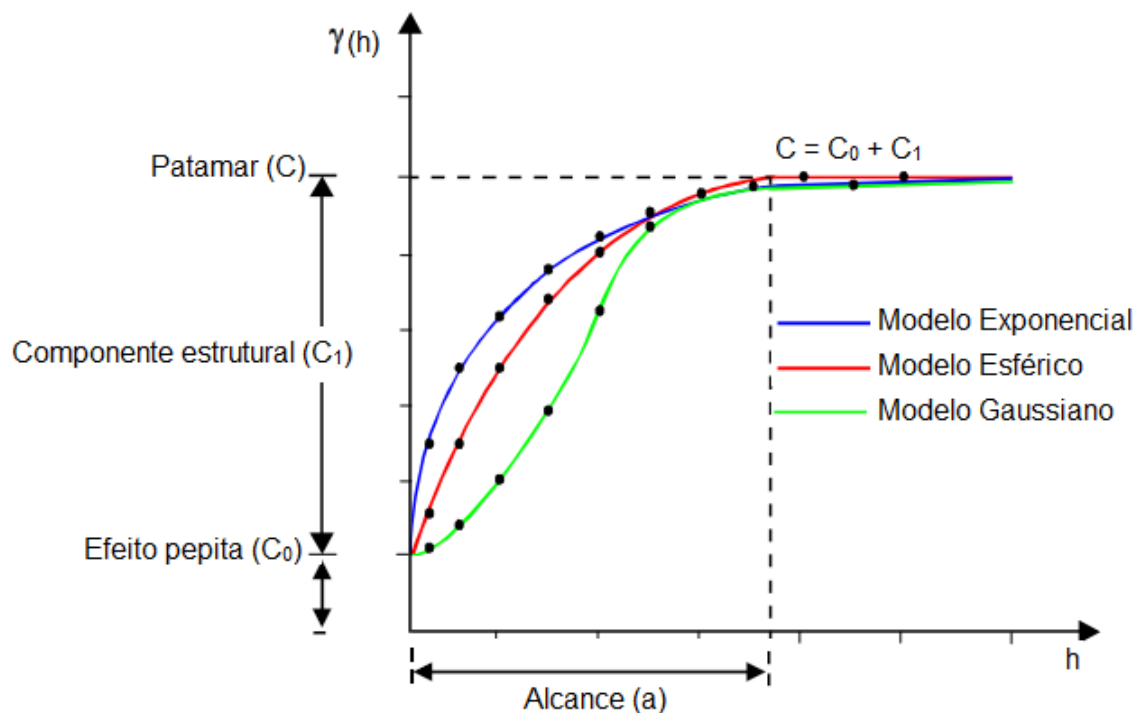


Figura 2. Modelos teóricos e parâmetros de semivariograma.

O efeito pepita (C_0): é o valor da função semivariograma perto da origem, revela a descontinuidade do semivariograma em distâncias menores do que a menor distância entre amostras. Este parâmetro constitui medida importante do

semivariograma, indicando a variabilidade não explicada em função da distância entre amostras, como variações locais, erros de análise e de amostragem (CAMBARDELLA et al., 1994) e pode ser expresso como percentagem do patamar, com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (SILVA et al., 2008a; SILVA, 2013).

O patamar (C_0+C_1): representa o valor máximo no qual a semivariância $\gamma(h)$ estabiliza-se, tornando-se independente à variação h , ou seja, é quando o semivariograma tende a estabilizar-se a uma constante. De acordo com Isaaks & Srivastava (1989), à medida que (h) aumenta a semivariância ($\gamma(h)$) também aumenta até um valor máximo no qual esta se estabiliza, chamado patamar (SILVA et al., 2008a; SILVA, 2014).

O alcance (a): é a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente, vai da origem do semivariograma até o momento em que este se estabiliza. Este parâmetro define a distância a partir da qual as amostras são independentes, ou seja, à distância na qual a semivariância ($\gamma(h)$) atinge o patamar (SILVA, 2014).

A contribuição (C_1): é a semivariância entre o patamar (C_0+C_1) e o efeito pepita (C_0). Mede a contribuição da distância (h) no valor global da semivariância

2.4.2. Critérios da escolha dos modelos de semivariogramas

O semivariograma pode ser calculado diretamente com base nos pontos amostrais, regularmente espaçados em duas dimensões, conforme apresentado na Figura 3, e também para pontos com distribuição irregular, espaçados em duas dimensões. Para determinar o semivariograma experimental em malha irregular, é necessário introduzir parâmetros adicionais, além da distância e da direção (CAMARGO, 1998; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

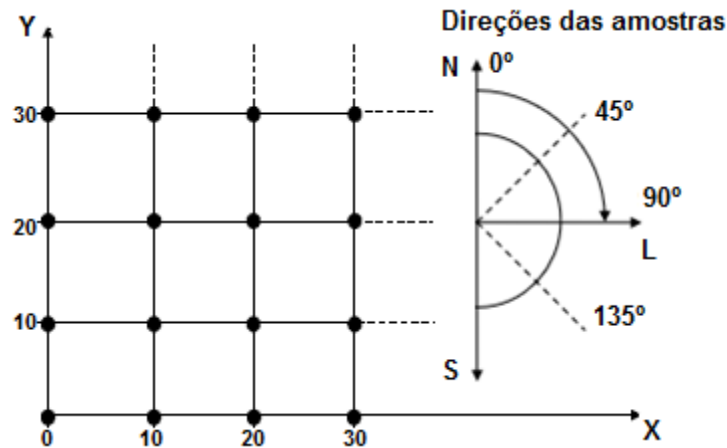


Figura 3. Amostras espaçadas regularmente em duas dimensões

Considerando a amostragem sistematicamente regionalizada (malha espaçada regularmente), como utilizada nesta pesquisa (Figura 6), são aplicados critérios para determinar os modelos de semivariograma experimental por meio de cálculos de semivariância $\gamma(h)$ considerando todos os pares de amostras nas direções (0 °N, 45 °NE, 90 °L (E) e 135 °SE) (Figura 3), separadas pelo vetor de distância h (Equação 7), o qual é repetido para todos os intervalos de h até que algum ponto de parada desejado seja alcançado (CAMARGO; FUKS; CÂMARA, 2004; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Os semivariogramas são ajustados através da seleção da menor soma dos quadrados dos desvios (SQD), através do maior coeficiente de determinação (R^2). Após a confecção dos semivariogramas de valores dos atributos químicos e físicos do solo, são ajustados modelos teóricos que representam o mais próximo possível à configuração dos mesmos.

Segundo Camargo (1998), entre os modelos transitivos básicos de semivariogramas com e sem patamares, os mais utilizados são:

a) Modelo Esférico de Semivariograma

O modelo esférico (Figura 2) apresenta comportamento linear próximo à origem e atinge o patamar (C) a uma distância igual ao alcance (a) (CAMARGO, 1998). Segundo Camargo; Fuks e Câmara (2004) é um modelo bastante utilizado. A equação 1 define este modelo.

$$\begin{aligned}
\gamma(h) &= 0 \xrightarrow{\text{quando}} |h| = 0 \\
\gamma(h) &= C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right] \xrightarrow{\text{quando}} 0 < |h| \leq a \\
\gamma(h) &= C_0 + C_1 \xrightarrow{\text{quando}} |h| > a
\end{aligned} \tag{Eq. 1}$$

b) Modelo Exponencial de Semivariograma

Este modelo (Figura 2) atinge o patamar (C) assintoticamente (CAMARGO; FUKS; CÂMARA, 2004) a uma distância máxima na qual o valor do modelo é 95% do patamar (C) (CAMARGO; FUKS; CÂMARA, 2004; ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). É caracterizado por apresentar o mesmo comportamento do modelo esférico. A equação 2 define este modelo.

$$\begin{aligned}
\gamma(h) &= 0 \xrightarrow{\text{quando}} |h| = 0 \\
\gamma(h) &= C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{|h|}{a} \right) \right] \xrightarrow{\text{quando}} |h| \neq 0
\end{aligned} \tag{Eq. 2}$$

c) Modelo Gaussiano de Semivariograma

O modelo transitivo gaussiano (Equação 3) é caracterizado por apresentar um comportamento parabólico perto da origem (Figura 2) e atinge o patamar de forma assintoticamente e o parâmetro alcance (a) é definido como alcance prático ou distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (C) (CAMARGO; FUKS; CÂMARA, 2004; ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

$$\begin{aligned}
\gamma(h) &= 0 \xrightarrow{\text{quando}} |h| = 0 \\
\gamma(h) &= C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{|h|^2}{a} \right) \right] \xrightarrow{\text{quando}} |h| \neq 0
\end{aligned} \tag{Eq. 3}$$

d) Modelo Linear sem Patamar

O modelo linear não apresenta estacionaridade, não atingem o patamar, e continuam aumentando enquanto a distância aumenta. Este modelo é definido para o intervalo $Y(h) = ph$, sendo p a inclinação da reta. É o modelo mais simples, originando uma reta passando pela origem do gráfico (SILVA et al., 2008a; SILVA, 2013). A indicação é de que os dados apresentam uma variância infinita, mostrando variações dentro de toda área do experimental (CAMARGO; FUKS, 2011; ROSSONI, 2014). Este modelo pode indicar que o tamanho do campo amostrado não foi suficiente para exibir a estacionaridade dos dados, devido as tendências (SILVA et al., 2008a; SILVA, 2013; SILVA et al., 2017).

e) Modelo Aleatório (Efeito Pepita Pura)

Este modelo revela a descontinuidade do semivariograma perto da origem em distância menor que aquela amostrada, indicando ausência de dependência espacial. A medida que a descontinuidade na origem do semivariograma aumenta, mais aleatório é o fenômeno que originou a variável em análise. Esta característica decorre de uma provável regionalização, inferior a escala de trabalho da malha amostral e, ou a variações espúrias associadas com a coleta e medição das amostras (SILVA et al., 2008a). Este modelo é representado pela Equação 4, para qualquer direção (h).

$$\gamma(h) = C \quad (\text{Eq. 4})$$

2.5. Métodos de interpolação para análise de semivariogramas

A interpolação é uma técnica usualmente adotada para estimar valores desconhecidos de uma função a partir de valores conhecidos da mesma função. A escolha do método de interpolação apropriado é essencial para obtenção de mapas de espacialização confiáveis (YAMAMOTO & LANDIM, 2013).

Entre os métodos de interpolação existentes, disponíveis na literatura, os mais utilizados são krigagem ordinária (KO) e o inverso do quadrado da distância (IQD) (SILVA et al., 2008b). Outros métodos de interpolação, também são utilizados,

com menor destaque, como simulação sequencial gaussiana (SSG) e o inverso da potência da distância (IPD) (TEIXEIRA et al., 2011).

Tanto o método KO como o método IQD é eficiente na inferência de valores para locais não amostrados referentes aos atributos químicos e físicos do solo. Os mapas de variabilidade espacial são gerados por meio de modelagem matemática através dos métodos de interpolação, estimando valores em locais não amostrados, a partir de determinado número de pontos amostrados (SOUZA et al., 2010).

2.5.1. Krigagem ordinária

A escolha da melhor técnica de interpolação para estimar propriedades do solo em locais não amostrados representa um importante princípio na agricultura de precisão. A técnica de krigagem ordinária (KO) é uma alternativa viável para a estimativa de dados em pontos não amostrados na área experimental, caracterizando os valores dos atributos do solo e identificando as camadas com maiores e menores valores de características (KAMIMURA et al., 2013).

O método de interpolação como a krigagem define o grau de dependência no espaço de uma grandeza e a área de domínio de cada amostragem. A interpretação dos resultados com o uso da krigagem pode facilitar a delimitação das unidades de mapeamento de solos (VALLADARES, 2012).

A KO é um dos métodos de interpolação mais utilizados, pela simplicidade e resultados que proporciona. Este método usa a variabilidade espacial entre amostras vizinhas através do semivariograma, como procedimento para estimar valores de um atributo em locais não amostrados em qualquer posição dentro da área (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Este método de estimativa interpola valores com as condições de estimativas sem tendência e com desvios mínimos em relação aos valores conhecidos (MACHADO et al., 2010; CARVALHO; ASSAD; PINTO, 2012). A KO considera a estrutura da variabilidade espacial encontrada na vizinhança próxima, através da combinação linear dos valores encontrados. O estimador da krigagem ordinária é definida através da Equação 5.

$$\hat{Z}_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z_i \quad (\text{Eq. 5})$$

em que: $\hat{Z}_i$ é o valor interpolado; λ_i é o peso atribuído aos valores amostrados; Z_i é o valor do atributo amostrado; n é o número de localidades vizinhas empregadas para a interpolação do ponto, sendo que o somatório dos pontos deve ser igual a um.

2.5.2. Inverso do quadrado da distância

O método do inverso do quadrado da distância (IQD) é um interpolador determinístico de médias ponderadas. Neste método quanto mais distante um ponto observado estiver do ponto estimado, menor será seu peso, isto é, menor será sua influência sobre o valor da inferência. O IQD é definido por meio da equação 6.

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \cdot x_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (\text{Eq. 6})$$

em que: X_p é a variável interpolada; X_i é o valor do atributo amostrado; d_i é a distância euclidiana entre o ponto amostrado e o ponto estimado.

Segundo os autores Silva et al. (2008b) e Souza et al. (2010), no IQD o fator de ponderação, é o inverso do quadrado da distância euclidiana entre o ponto conhecido e o estimado. Esse método é considerado simples e de fácil aplicação, no entanto menos acurado que a krigagem, uma vez que não considera o padrão da estrutura da dependência espacial.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e descrição das áreas de estudo

A pesquisa foi desenvolvida em duas áreas na Microrregião da Mata Meridional do Estado de Pernambuco, localizadas nos municípios de Barreiros e Tamandaré (Figura 4).

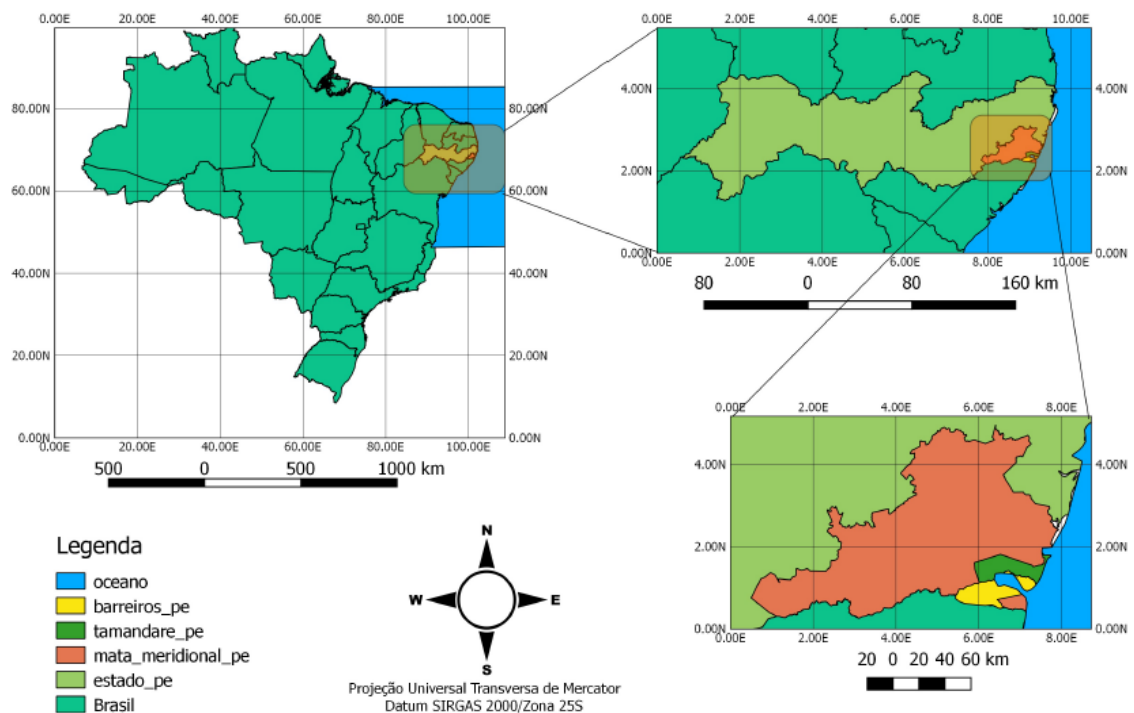


Figura 4. Localização das áreas experimentais

A primeira área é constituída de floresta nativa e está localizada na Reserva Biológica de Salinho (REBIO), no município de Tamandaré – PE. Situa-se entre os paralelos de 08°43'09" S e 08°44'13" S, e entre os meridianos de 35°10'11" W e 35°11'02" W, com altitude média de 8,0 m, relevo de morro e planície costeira. A segunda área é ocupada por pastagens e encontra-se localizada no Engenho Angico, no município de Barreiros – PE. Situa-se entre os paralelos 08°46'45" S e 08°46'57" S, e entre os meridianos de 35°15'17" W e 35°15'53" W, com altitude média de 22,0 m e relevo ondulado forte. As áreas de mata nativa e pastagens estão distantes aproximadamente 50 km uma da outra.

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima predominante é do tipo tropical (As'). É caracterizado pelo clima tropical denominado úmido com chuvas de outono-inverno, precipitação média anual de 1.500 mm e temperaturas médias anuais de 25° C (APAC, 2017).

A área do Engenho Angico está ocupada por cobertura de pastagens de capim *Urochloa brizantha* e *Urochloa humidicola* desde 1990, em substituição do cultivo da cana-de-açúcar, sendo utilizada exclusivamente para o pastejo de bovinos. A última correção da acidez e adubação nesta área foi realizada há, aproximadamente, 27 anos (PEREIRA NETO, 2017).

A vegetação nativa predominante nos municípios de Barreiros e Tamandaré é composta por Mata Atlântica. A temperatura média na região da REBIO situa-se entre 22 e 26 °C. Os meses mais quentes e menos quentes correspondem ao período de novembro a fevereiro e julho a agosto, respectivamente. O total pluviométrico acumulado no período janeiro a julho de 2016 foi de 1288 mm (Figura 5). O período de coleta das amostras de solo ocorreu entre os meses de fevereiro a abril de 2016. O maior índice pluviométrico foi observado no mês de março com 283,80 mm e o menor no mês de janeiro com 106,2 mm.

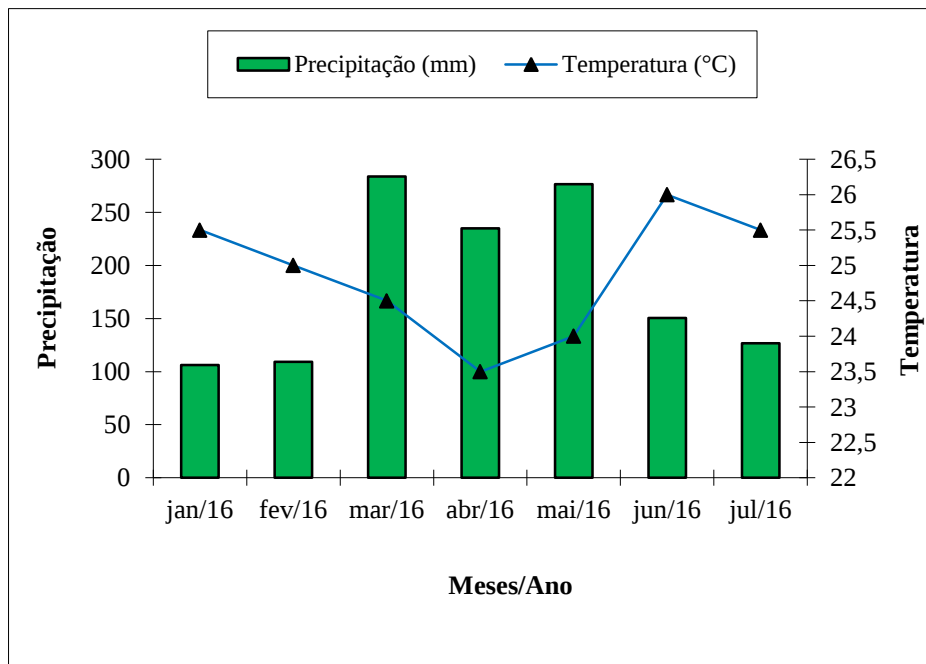


Figura 5. Dados médios do regime pluviométrico e temperatura na região da REBIO.

3.2. Caracterização dos dados de solos

Foram coletadas em cada área 128 amostras de solo deformadas e 128 indeformadas, com auxílio de um trado tipo sonda e trado tipo Uhland, respectivamente, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, totalizando 512 amostras. O solo que caracteriza a área de mata nativa e a área de pastagens é classificado como Latossolo Amarelo com textura média (EMBRAPA, 2013).

Foram georreferenciados 64 pontos com distância entre si de 10 m, em cada área, no cruzamento entre linhas e colunas da malha regular com dimensões de 70 m x 70 m (Figura 6). A locação dos pontos foi realizada utilizando tecnologia DGPS (*Differential Global Positioning System*), com auxílio de GPS modelo 76SX (estação móvel).

A Figura 7 apresenta a topografia das áreas de pastagens e mata nativa através do Modelo de Elevação Digital, georreferenciado com auxílio de GPS modelo 76SX (estação móvel), que faz conexão com a estação de referência para a eliminação de erros.

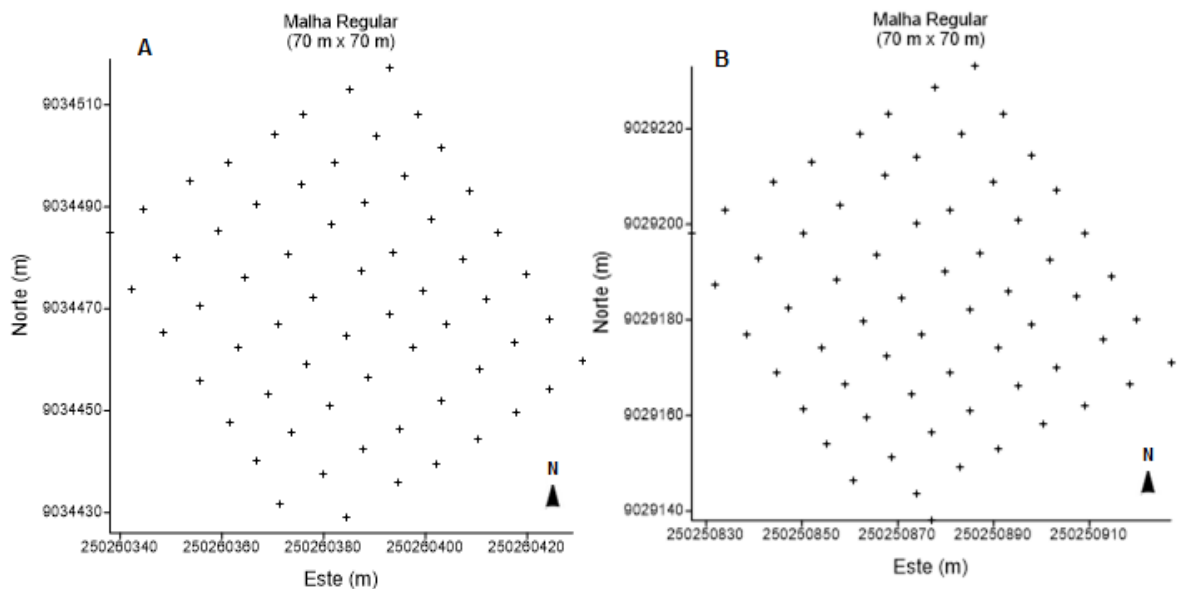


Figura 6. Malha regular regionalizada e distribuição dos pontos de amostragem nas áreas de mata nativa (A) e pastagens (B).

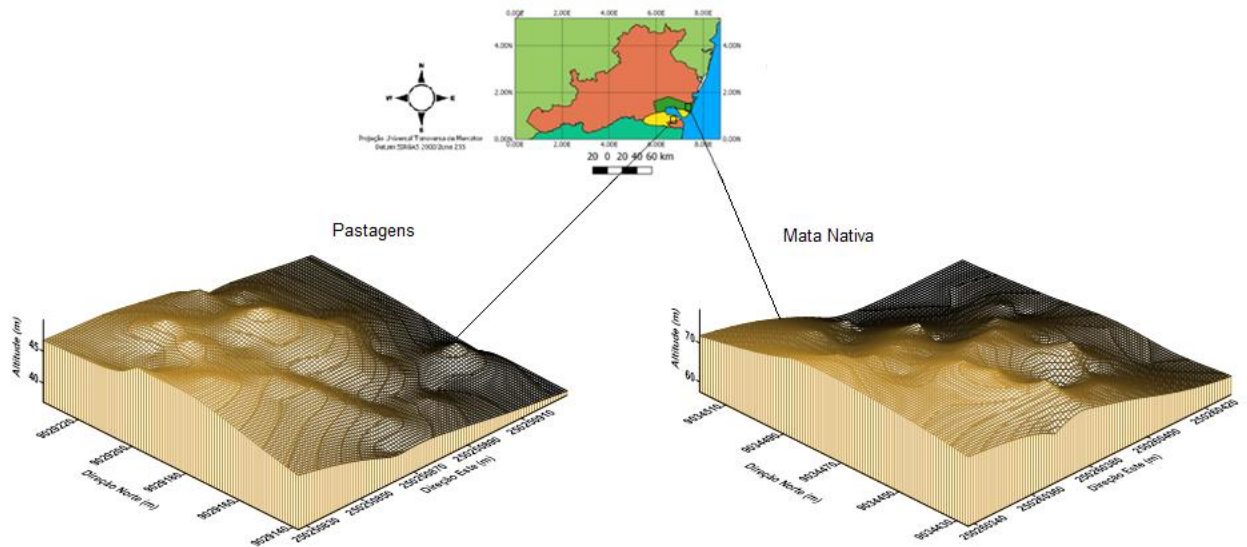


Figura 7. Modelo de Elevação Digital das áreas de pastagens e mata nativa.

3.2.1. Determinação de valores dos atributos químicos do solo

Após a coleta, as amostras deformadas foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e conduzidas ao Laboratório de Análise de Solos da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (EECAC-UFRPE), para serem submetidas às análises químicas de rotina.

A caracterização química do solo foi obtida segundo EMBRAPA (2011) na determinação de valores dos seguintes atributos químicos: acidez ativa (pH), acidez trocável (Al^{3+}), acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (T), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m) e matéria orgânica do solo (MOS).

3.2.2. Determinação de valores dos atributos físicos do solo

As amostras indeformadas do solo foram coletadas em cilindros volumétricos de aproximadamente 5,0 cm de altura por 4,5 cm de diâmetro, com capacidade de aproximadamente 80 cm^3 , para as análises dos atributos físicos, utilizado o método da mesa de tensão (unidade de sucção) a 0,06 atm (60 cm de

coluna de água). Foram determinados os seguintes atributos físicos: densidade do solo (Ds), microporosidade (MiP), macroporosidade (MaP) e porosidade total (Pt). Também foi determinada a composição granulométrica areia, argila e silte, segundo EMBRAPA (2011), nas amostras deformadas.

3.3. Análise estatística e geoestatística dos dados

3.3.1. Análise estatística dos dados

Inicialmente foi aplicada a análise exploratória (estatística descritiva) nos resultados de valores dos atributos químicos e físicos do solo nas áreas de mata nativa e pastagens para obter as medidas de posição (média, mediana, valores máximo e mínimo) e dispersão (variância, desvio padrão e coeficiente de variação, assimetria e curtose) dos dados.

A análise exploratória dos dados é importante e tem o objetivo de identificar a presença de pontos discrepantes, os chamados *outliers*, e verificar a normalidade e a variação do conjunto dos dados (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014).

A normalidade dos dados foi verificada pelo *software* Statistica 10.0 (STAT SOFT, 2011), pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) ($p \leq 0,05$). Este teste é utilizado para testar hipóteses de ajustamento de distribuição de frequência relativas acumuladas observadas ($fra_{i\ obs}$) às respectivas frequências relativas acumuladas esperadas ($fra_{i\ esp}$), sob a hipótese nula (H_0) em que os dados seguem distribuição normal (FERREIRA, 1994). A estatística utilizada para o teste Kolmogorov-Smirnov (K-S) é representada pela equação 7.

$$KS = \sup \left[\left(fra_{i\ obs} - fra_{i\ esp} \mid fra_{i-1\ obs} - fra_{i\ esp} \right) \right] \quad (\text{Eq. 7})$$

O teste KS é considerado um teste conservador, isto é, rejeita-se a hipótese nula de normalidade (H_0) se $KS > KS_\alpha$, sendo o nível de significância estabelecido para o teste. Foi usado, também, o teste *t* de Student ($p \leq 0,05$) para comparação das médias dos valores de atributos químicos e físicos do solo nas áreas de floresta nativa e de pastagens, entre si e entre suas camadas. O teste *t* de Student é dado pela equação 8.

$$t = \frac{M_A - M_B}{\sqrt{(S_e^2 / r_A) + (S_e^2 / r_B)}} \quad (\text{Eq. 8})$$

em que: M_A e M_B são as médias obtidas em grupos experimentais A e B; S_e^2 é a variância do resíduo estimado e r_A e r_B é o número de repetições dos grupos experimentais.

A variabilidade foi classificada com base no critério de Mulla; McBratney (2000) como: baixa variabilidade para valores de coeficiente de variação (CV) entre 0-15%; média variabilidade para CV entre 16-35% e alta variabilidade para CV > 36%.

3.3.1.1. Métodos de Identificação de *outliers*

Os *outliers* são observações extremas que afastam os dados da distribuição normal padrão, ou seja, é um ponto que está muito distante das demais observações e, ou que está fora da curva (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014).

A identificação de *outliers* é um procedimento adotado em análises descritivas dos dados dos atributos do solo. Nesta pesquisa se objetivou identificar e eliminar, previamente, a presença destes pontos discrepantes, os quais interferem no cálculo de medidas de posição e de dispersão, identificar a normalidade de distribuição de frequência e a variação do conjunto dos dados que apresenta grande influência sobre o semivariograma e o resultado da interpolação (GREGO; OLIVEIRA; VIEIRA, 2014).

Os *outliers* têm grande influência sobre o semivariograma e sobre o resultado da interpolação (ISAKS; SRIVASTAVA, 1989). Eles podem ser identificados através dos valores de posição máximos e mínimos, já que são observações de desvios extremos, mas nem sempre, essas medidas são *outliers* (OLIVEIRA, 2013).

Há vários métodos para determinar se um valor é ou não *outliers*. O critério, abordado nesta pesquisa foi: Distância entre quartis, avaliados através de Box-plot. O Box-plot é um gráfico que mostra se há *outliers* no banco de dados. Este critério, não depende da simetria dos dados e nem de sua distribuição. Para obter um Box-

plot é necessário: a) calcular o intervalo interquartil (I.I.Q) e, ou amplitude interquartílica, que é a diferença entre o 3º quartil e o 1º quartil; b) determinar limite superior (Ls) e limite inferior (Li), onde o Ls é igual ao 3º quartil + 1,5*I.I.Q; e o Li é igual ao 1º quartil – 1,5*I.I.Q; c) desenhar trações até menor e maior valor existentes dentro dos limites e, d) destacar valores fora dos limites e excluí-los. Qualquer valor abaixo do Li é considerado *outliers*.

3.3.2. Análise geoestatística dos dados

A análise geoestatística foi utilizada para verificar e quantificar a existência do grau de dependência (GD) espacial, baseada na suposição de que medições separadas por distâncias menores são mais semelhantes entre si do que aquelas separadas por distâncias maiores dos valores de atributos físicos e químicos do solo na determinação de modelos teóricos de variogramas nas duas áreas.

A análise foi realizada pelo ajuste do semivariograma experimental (Equação 9) para identificação da variabilidade espacial, que é um “medidor” do grau de semelhanças entre vizinhos, mostrando se há ou não autocorrelação espacial. O semivariograma mostra um modelo da estrutura de correlação espacial até o intervalo, a partir do qual a semivariância se torna constante, restringe a área de influência espacial (FONSECA et al., 2017). A semivariância experimental ($\gamma(h)$), pode ser estimado pela Equação 10 (GREGO; OLIVIEIRA; VIEIRA, 2014), obtida pelos valores das variáveis estudadas a partir do ajuste aos modelos matemáticos de semivariogramas.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (\text{Eq. 10})$$

em que $N(h)$ é o número de pares em uma mesma distância h ; ($Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$) valores medidos da variável na posição (x_i) e ($x_i + h$). Para que a variável avaliada tenha dependência espacial é necessário que o semivariograma seja crescente com

a distância. Além disso, é exigido que a hipótese intrínseca fosse válida, ou seja, que o semivariograma, após ter um aumento com a direção, se estabilize no valor da variância dos dados (GREGO; OLIVIEIRA; VIEIRA, 2014).

Para o ajuste dos modelos teóricos de semivariogramas com base na pressuposição de estacionalidade da hipótese intrínseca, foram testados alguns modelos matemáticos básicos: esférico (ESF), exponencial (EXP) e gaussiano (GAU), indicados segundo McBratney; Webster (1986) os modelos mais adequados para os mais variados tipos de situações, na maioria dos casos.

Segundo Yamamoto; Landim (2015), os modelos com melhor ajuste são testados para quantificar ainda mais o ajuste do modelo teórico de semivariograma.

Para análise do grau de dependência espacial (GD), foi utilizada a relação entre o efeito pepita (C_0) e o patamar (C_0+C_1) de seu semivariograma ajustado (Equação 11) e os intervalos propostos por Cambardella et al. (1994) que consideram alta dependência espacial ($GD<25\%$), moderada dependência espacial ($25\%\leq GD<75\%$) ou baixa dependência espacial ($GD\geq 75\%$).

$$GD = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 11})$$

Constatada a presença de dependência espacial entre os atributos, através da definição dos modelos de semivariogramas teóricos, fez-se a interpolação pelo método de krigagem ordinária para estimar valores em locais não amostrados. A expectativa é que os valores interpolados coincidam com os valores dos pontos amostrais. A partir da utilização da krigagem, foram gerados mapas de contorno de curvas de isovalores, chamadas isolinhas, usando o *Software Surfer* versão 13.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2016), para o ajuste de modelos de semivariograma em locais não amostrados de valores dos atributos químicos e físicos nas áreas de mata nativa e pastagens que apresentaram variabilidade espacial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise exploratória dos atributos do solo em floresta nativa e em pastagens

Após a identificação de *outliers* existentes em alguns atributos do solo nas duas áreas, eles foram excluídos e procedeu-se a verificação dos dados com a finalidade de observar se eles apresentavam comportamento próximo à curva da distribuição normal. A exclusão dos *outliers* não contribuiu para verificação da distribuição normal pelo teste Kolmogorov-Smirnov (K-S). Nesse caso, optou-se por mantê-los em função do número de amostras não ser grande e, também, pela diferença entre a média e a mediana dos dados não sofrerem alterações significativas.

4.1.1. Análise descritiva de valores dos atributos químicos do solo

4.1.1.1. Valores dos atributos químicos do solo em floresta nativa

Em condições de floresta nativa, os valores dos atributos químicos do solo, não apresentam distribuição normal, segundo Kolmogorov-Smirnov (K-S) ($p \leq 0,05$) (Tabela 1). Os valores dos atributos químicos do solo analisados nas duas profundidades apresentam distribuição assimétrica, com desvios para a direita da média, na maioria das variáveis. Os valores de Al, T e m tiveram desvios à esquerda da média. Neste aspecto, a média não pode ser adotada como estimativa da posição central dos valores desses atributos para identificar o padrão de distribuição espacial na área de floresta nativa em estudo. Aquino et al. (2014) em Latossolo sob floresta nativa, encontraram distribuição de frequência normal para as variáveis físicas analisadas nas profundidades de 0-20 cm e 40-60 cm.

Tabela 1. Estatística descritiva de valores dos atributos químicos do solo na área de floresta nativa, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm

Atributos	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	δ	CV	Cs	C _k	pKS
pH (CaCl ₂) ¹	4,48a	4,40	3,80	5,70	4,31	9,62	0,37	2,37	0,07
pH (CaCl ₂) ²	4,60a	4,60	3,80	5,60	3,66	7,95	0,35	3,11	0,08
P (mg dm ⁻³) ¹	2,25a	2,00	1,00	4,00	7,13	31,67	0,39	3,07	0,32
P (mg dm ⁻³) ²	1,52b	1,00	1,00	3,00	5,91	38,96	0,62	2,37	0,34
K (cmol _c dm ⁻³) ¹	0,08a	0,07	0,01	0,16	0,32	41,26	0,47	2,91	0,08
K (cmol _c dm ⁻³) ²	0,05b	0,04	0,01	0,13	0,24	48,64	1,22	4,74	0,17
Ca (cmol _c dm ⁻³) ¹	0,38a	0,30	0,10	1,10	2,09	55,05	1,50	4,94	0,35
Ca (cmol _c dm ⁻³) ²	0,33b	0,30	0,10	0,30	2,03	62,03	2,87	12,00	0,34
Mg (cmol _c dm ⁻³) ¹	0,40a	0,30	0,10	1,10	2,97	57,00	1,19	3,63	0,34
Mg (cmol _c dm ⁻³) ²	0,30b	0,30	0,10	0,80	1,35	44,80	1,64	6,32	0,36
Al (cmol _c dm ⁻³) ¹	1,20a	1,21	0,00	2,20	4,04	33,66	-0,13	3,07	0,09
Al (cmol _c dm ⁻³) ²	0,99b	1,00	0,00	1,80	3,33	33,49	-0,09	3,04	0,04*
H+Al (cmol _c dm ⁻³) ¹	5,32a	5,20	3,10	7,80	10,55	19,85	0,07	2,65	0,04*
H+Al (cmol _c dm ⁻³) ²	3,96b	4,00	1,40	6,00	9,53	24,07	-0,33	2,27	0,04*
SB (cmol _c dm ⁻³) ¹	0,92a	0,80	0,34	1,76	3,33	36,35	0,55	2,62	0,16
SB (cmol _c dm ⁻³) ²	0,72b	0,69	0,29	1,65	2,55	35,18	1,37	5,28	0,18
T (cmol _c dm ⁻³) ¹	6,25a	6,15	4,22	8,47	9,80	15,69	-0,02	2,58	0,03*
T (cmol _c dm ⁻³) ²	4,65b	4,69	2,49	6,75	9,74	20,95	-0,07	2,47	0,03*
V (%) ¹	15,15b	13,59	4,58	29,84	61,88	40,84	0,55	2,48	0,11
V (%) ²	16,05a	14,21	6,88	43,70	63,00	39,26	1,69	7,32	0,08
MOS (g kg ⁻¹) ¹	39,53a	40,50	17,90	50,85	54,33	12,02	-1,04	5,57	0,08
MOS (g kg ⁻¹) ²	29,01b	28,75	16,70	43,40	53,20	18,35	7,43	58,12	0,06
m (%) ¹	55,93b	55,90	0,00	82,80	144,98	25,92	-0,91	4,83	0,05*
m (%) ²	57,12a	59,62	0,00	80,58	127,58	22,34	-1,36	7,44	0,09

¹: profundidade de 0-10 cm; ²: profundidade de 10-20 cm; m: saturação por alumínio; δ : desvio-padrão; CV: coeficiente de variação segundo Mulla; McBratney (2000); Cs: coeficiente de assimetria; C_k: coeficiente de curtose; *: não apresenta distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

De acordo como o critério de classificação de Mulla; McBratney (2000) para CV, utilizados para se obter melhor precisão das variáveis, há pequena variação (CV $\leq$ 15%) para os valores de pH, nas duas profundidades, e para a MOS na profundidade de 0-10 cm, com média variação (CV 16-36%) na profundidade de 10-20 cm. As variáveis que apresentam baixa variação proporcionam uma melhor precisão para o experimento, enquanto que os atributos que apresentam alta variação diminuem a sua precisão, segundo Mulla; McBratney (2000). Os atributos

Al^{3+} , H+Al , T e m foram classificados com média variação nas duas profundidades. O P apresenta média e alta ($\text{CV} > 36\%$) variação nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente. Lima et al. (2013b), em área de vegetação natural, encontraram CV com pequena variação para a variável MOS (17,0%). Os atributos K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SB e V apresentam valores com alta variação ($\text{CV} > 36\%$) nas duas profundidades. Bottega et al. (2013), encontraram CV com valores médios para os atributos Ca^{2+} (15,37%), Mg^{2+} (22,00%) e alta variação para Al^{3+} (134,98%) e Lima et al. (2014a), encontraram valores com pequena variação para pH (6,85%), média variação para MOS (35,28%) e alta variação para Ca^{2+} (74,87%), Mg^{2+} (63,44%), P (172,51%), e K^+ (65,16%). Lima; Silva e Silva. (2013a) encontraram valores com pequena variação de CV para pH (3,1 e 4,5%), H+Al (12,9%), T (6,7 e 6,5%) e para MOS (8,3%), nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente, média para os valores dos atributos P (32,1%), K^+ (34,4%), SB (16,6 e 33,7%), H+Al (16,2%) e V (18,1%), e alta variação para P (48%) e K^+ (38%) e V (36,4%).

Os maiores CV na área sob floresta nativa, foram encontrados para o atributo Ca^{2+} (62,03%) e Mg^{2+} (57,00%), nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente, demonstrando grande variação em torno da média, e os menores para o pH (9,62% e 7,95%) nas duas profundidades.

4.1.1.2. Valores dos atributos químicos do solo em pastagens

Em condições de pastagens, os valores dos atributos químicos do solo apresentam distribuição assimétrica (Tabela 2) sem distribuição normal em nenhuma profundidade, de acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) ($p \leq 0,05$), não permitindo a observação de maior precisão das estimativas da krigagem para geração dos mapas de distribuição espacial dos atributos avaliados (SILVA et al., 2017).

Tabela 2. Estatística descritiva de valores dos atributos químicos do solo na área de pastagens, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm

Atributos	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	δ	CV	Cs	C _k	pKS
pH (CaCl ₂) ¹	5,09a	5,10	4,50	5,60	2,66	5,25	-0,08	2,23	0,09
pH (CaCl ₂) ²	4,98a	5,00	4,30	5,90	3,46	6,94	0,12	2,57	0,09
P (mg dm ⁻³) ¹	4,36a	3,00	2,00	19,00	26,03	59,70	3,23	16,84	0,24
P (mg dm ⁻³) ²	3,27b	2,00	1,00	18,00	26,32	80,60	3,24	16,68	0,23
K (cmol _c dm ⁻³) ¹	0,09a	0,07	0,03	0,60	0,87	96,57	4,68	25,64	0,28
K (cmol _c dm ⁻³) ²	0,04b	0,04	0,02	0,13	0,20	45,43	2,12	8,55	0,26
Ca (cmol _c dm ⁻³) ¹	0,66b	0,60	0,06	1,60	3,22	48,84	0,64	3,15	0,10
Ca (cmol _c dm ⁻³) ²	0,40a	0,30	0,00	1,00	2,10	51,99	0,63	2,91	0,28
Mg (cmol _c dm ⁻³) ¹	0,40a	0,30	0,00	1,10	2,68	66,25	0,66	2,71	0,18
Mg (cmol _c dm ⁻³) ²	0,32b	0,30	0,00	0,80	2,07	63,94	0,55	2,77	0,23
Al (cmol _c dm ⁻³) ¹	1,02b	1,10	0,00	1,60	4,44	43,50	-1,31	3,80	0,17
Al (cmol _c dm ⁻³) ²	1,32a	1,40	0,00	2,20	4,30	32,65	-1,58	6,09	0,14
H+Al (cmol _c dm ⁻³) ¹	4,38a	4,00	3,00	6,30	9,25	21,11	0,31	1,68	0,19
H+Al (cmol _c dm ⁻³) ²	4,15b	3,80	2,50	6,10	9,44	22,78	0,37	1,76	0,19
SB (cmol _c dm ⁻³) ¹	1,20a	1,20	0,69	1,98	3,40	28,23	0,42	2,43	0,06
SB (cmol _c dm ⁻³) ²	0,81b	0,69	0,16	1,68	2,97	36,48	0,10	2,79	0,17*
T (cmol _c dm ⁻³) ¹	5,58a	5,34	3,71	7,58	10,37	18,58	0,41	1,89	0,12
T (cmol _c dm ⁻³) ²	4,96b	4,58	3,56	7,23	9,07	18,28	0,61	2,28	0,15
V (%) ¹	21,75a	20,06	11,56	35,19	55,63	25,58	0,40	2,37	0,11
V (%) ²	16,94b	16,18	2,82	36,61	67,60	39,91	0,35	3,10	0,04*
MOS (g kg ⁻¹) ¹	21,99a	21,10	17,20	29,50	29,88	13,58	0,56	2,58	0,13
MOS (g kg ⁻¹) ²	16,68b	16,40	11,40	23,80	23,07	13,83	0,66	3,60	0,07
m (%) ¹	43,18b	47,18	0,00	66,89	187,80	43,49	-1,28	3,75	0,14
m (%) ²	59,98a	63,20	0,00	90,53	190,89	31,83	-1,73	6,53	0,14

¹: profundidade de 0-10 cm; ²: profundidade de 10-20 cm; m: saturação por alumínio; δ : desvio-padrão; CV: coeficiente de variação segundo Mulla; McBratney (2000); Cs: coeficiente de assimetria; C_k: coeficiente de curtose; *: não apresenta distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Conforme Mulla; McBratney (2000), em seu critério de classificação para o coeficiente de variação (CV), os valores dos atributos químicos P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ na área de pastagens (Tabela 2), nas duas profundidades, e para Al³⁺ e m, na profundidade de 0-10 cm e, SB e V, na profundidade de 10-20 cm, apresentam valores com alta variação (CV > 36%). Zanão Júnior et al. (2010), encontraram em Latossolo sob plantio direto, valores com alta variação para P (55,76% e 48,73%), K (39,99%), média variação para K⁺ (33,65%), Ca²⁺ (16,24% e 19,03%) e Mg²⁺

(23,94% e 20,81%), nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente. Bottega et al. (2013) e Lima; Silva e Silva (2013a), encontraram resultados semelhantes avaliando atributos em Latossolo no cerrado sob sistema de cultivo direto, com baixa, média e alta variação para os atributos analisados. Observa-se que os maiores CV (96,57% e 80,60%) foram encontrados para o K^+ e para o P nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente. As variáveis T e H+Al apresentam, nas duas profundidades, valores com média variação (CV 16-35%).

As variáveis SB, V, Al^{3+} e m apresentam valores com média variação (CV 16-35%), nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente. O pH e a MOS apresentam valores com baixa variação (CV 0-15%), como também os menores CV, nas duas profundidades. Lima et al. (2013b), em área de pastagens, encontraram CV com média variabilidade para a variável matéria orgânica do solo (17,0%). Resultados semelhantes foram encontrados por Lima; Silva e Silva (2013a) para pH (4,5%); Silva et al. (2017), em Latossolo sob cultivo contínuo, encontraram pequena e média variação para os valores do pH (14,94% e 16,61%), e alta variação para Ca^{2+} (40,46% e 45,41%), Mg^{2+} (36,87% e 39,45%) e Al^{3+} (60,77% e 53,71%), nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente

4.1.2. Análise descritiva de valores dos atributos físicos do solo

4.1.2.1. Valores dos atributos físicos do solo em floresta nativa

Os valores dos atributos físicos do solo observados não apresentam distribuição normal de frequência pelo teste Kolmogorov-Smirnov (K-S) ($p \leq 0,05$) (Tabela 3). Estes valores estão de acordo com os resultados encontrados por Aquino et al. (2014), em avaliação de atributos físicos, sob floresta nativa e pastagens; por Guimarães et al. (2016), avaliando atributos físicos de solos ocupados por pastagens e por Lima et al. (2013b), em área de vegetação natural.

De acordo como o critério de classificação de Mulla; McBratney (2000) para o coeficiente de variação (CV), observa-se na área de floresta nativa (Tabela 3) que os valores das frações granulométricas apresentam variações média (CV 16-36%) e as variáveis Ds, MiP, MaP e Pt, nas duas profundidades, apresentam pequena variação (CV 0-15%). Aquino et al. (2014), em Latossolo sob pastagens, encontraram pequena variação para argila, densidade do solo, microporosidade,

macroporosidade e porosidade total (12,67%, 5,98%, 14,91%, 15,05% e 7,55%), e média variação para areia e silte (16,52% e 18,98%), respectivamente, na profundidade de 0-20 cm.

Os maiores CV foram encontrados para as frações argila (17,95%) e silte (28,35%), e os menores CV foram encontrados para a variável Pt nas profundidades 0-0,10 m (6,14%) e 0,10-0,20 m (6,77%).

Tabela 3. Medidas descritivas de variabilidade de atributos físicos do solo na área de floresta nativa, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm

Atributos	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	δ	CV	Cs	C _k	pKS
Areia (g kg ⁻¹) ¹	395,97a	387,5	293	567	603,09	15,23	0,57	2,86	0,05*
Areia (g kg ⁻¹) ²	367,33b	357,5	237	534	654,99	17,83	0,56	2,75	0,07
Silte (g kg ⁻¹) ¹	288,63a	292,5	164	392	465,73	16,14	-0,37	2,91	0,05
Silte (g kg ⁻¹) ²	185,10b	186,5	90	350	524,65	28,35	0,77	3,63	0,09
Argila (g kg ⁻¹) ¹	315,4b	299,5	195	459	56,61	17,95	0,48	-0,22	0,12
Argila (g kg ⁻¹) ²	447,52a	438,00	295	638	75,48	16,87	0,13	2,42	0,06
Ds (kg dm ⁻³) ¹	1,29b	1,26	0,99	1,52	1,25	9,68	0,21	0,43	0,23
Ds (kg dm ⁻³) ²	1,36a	1,35	1,31	1,61	5,98	4,41	3,54	15,57	0,19
MiP (%) ¹	32,31a	32,91	25,43	39,16	34,86	10,79	0,21	3,11	0,19
MiP (%) ²	29,41b	28,22	26,89	34,00	25,19	8,57	1,07	2,25	0,39
MaP (%) ¹	28,98a	27,81	25,39	33,86	24,68	8,51	0,60	1,99	0,15
MaP (%) ²	28,10b	28,42	24,08	34,10	23,03	8,20	0,24	4,34	0,28
Pt (%) ¹	52,49a	52,43	48,49	62,02	32,20	6,14	1,35	5,29	0,19
Pt (%) ²	47,29b	48,79	39,18	59,59	32,00	6,77	-1,13	3,13	0,27

¹: profundidade de 0-10 cm; ²: profundidade de 10-20 cm; δ : desvio-padrão; CV: coeficiente de variação segundo Mulla; McBratney (2000); Cs: coeficiente de assimetria; C_k: coeficiente de curtose; *: não apresenta distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov; Ds: densidade do solo; MiP: microporosidade; MaP: macroporosidade; Pt: porosidade total.

4.1.2.2. Valores dos atributos físicos do solo em pastagens

Os valores dos atributos analisados na Tabela 4 apresentam diferença significativa para todas as variáveis. Verifica-se quanto à normalidade que os valores dos atributos físicos apresentados, apenas a fração granulométrica areia, na profundidade superficial, não apresenta distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) ($p \leq 0,05$), indicando distribuição assimétrica à direita e à

esquerda. Vários autores encontraram em área de pastagens, resultados para os atributos físicos de acordo com os valores das frações granulométricas e variáveis encontradas nesta pesquisa (AQUINO et al., 2014; CARDOSO et al., 2016; GUIMARÃES et al., 2016; LIMA et al., 2015; PELLIN et al., 2015; SILVA, 2013; TAVARES et al., 2012).

Tabela 4. Medidas descritivas de variabilidade de atributos físicos do solo na área de pastagens, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm

Atributos	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	δ	CV	Cs	C _k	pKS
Areia (g kg ⁻¹) ¹	552,6a	556,5	386	658	487,73	8,83	-0,54	3,82	0,05*
Areia (g kg ⁻¹) ²	532,5b	533,0	365,0	664,0	467,35	8,78	-0,33	4,88	0,06
Silte (g kg ⁻¹) ¹	198,01a	196,5	112,0	268,0	340,16	17,18	0,05	2,18	0,09
Silte (g kg ⁻¹) ²	141,9b	137,5	79,0	242,0	299,90	21,13	0,55	30,79	0,07
Argila (g kg ⁻¹) ¹	249,56b	243,5	139,0	374,0	454,06	18,19	0,30	3,08	0,08
Argila (g kg ⁻¹) ²	326,42a	332,5	199,0	474,0	466,68	14,60	0,09	3,70	0,07
Ds (kg dm ⁻³) ¹	1,73a	1,74	1,62	1,78	0,44	2,53	-1,73	4,86	0,31
Ds (kg dm ⁻³) ²	1,59b	1,60	1,41	1,73	0,83	5,25	-0,60	3,58	0,17
MiP (%) ¹	21,19b	21,14	19,12	23,94	13,37	6,31	0,60	2,97	0,16
MiP (%) ²	21,44a	22,60	11,59	24,60	39,79	18,56	-1,76	4,78	0,30
MaP (%) ¹	19,89b	19,74	18,12	21,33	10,74	5,40	-0,13	1,73	0,16
MaP (%) ²	23,70a	21,62	20,01	30,52	38,03	16,05	0,65	1,74	0,30
Pt (%) ¹	34,62b	34,24	33,07	38,74	16,50	4,77	1,75	4,89	0,28
Pt (%) ²	40,14a	39,60	34,59	46,80	31,89	7,94	0,48	3,51	0,23

¹: profundidade de 0-10 cm; ²: profundidade de 10-20 cm; δ : desvio-padrão; CV: coeficiente de variação segundo Mulla; McBratney (2000); Cs: coeficiente de assimetria; C_k: coeficiente de curtose; *: não apresenta distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov; Ds: densidade do solo; MiP: microporosidade; MaP: macroporosidade; Pt: porosidade total.

De acordo com os critérios de classificação para o CV de acordo com Mulla; McBratney (2000), os atributos físicos do solo analisados em área ocupada com pastagens (Tabela 4), apresentam pequena variação (CV 0-15%), para as variáveis areia, Ds e Pt nas duas profundidades, para a MiP e MaP na profundidade de 0-10 cm e argila na profundidade de 10-20 cm. As demais variáveis apresentam média variação. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Cardoso; Wanderley e Souza (2016) encontraram pequena variação (CV 0-15%) para as variáveis, densidade do solo (7,10%), porosidade total (8,90%), areia (6,69%) e argila (9,32%), em solos com pastagens na região sudeste de Goiás. Em Latossolo

ocupados por pastagens Guimarães et al. (2016), encontraram pequena variação para os valores de densidade do solo (6,56%), microporosidade (5,87%) e porosidade total (7,26%), e alta variação para macroporosidade (46,81%). Aquino et al. (2014), em Latossolo sob pastagens, encontraram pequena variação para areia, argila, densidade do solo, microporosidade e porosidade total (9,36%, 10,4%, 8,79%, 13%, e 11%), e média variação para silte e macroporosidade (16,63% e 35,45%), respectivamente, na profundidade de 0-20 cm.

Silva et al. (2008a), avaliando atributos físicos em preparo convencional em área de cerrado, encontraram valores com pequena variação para a densidade do solo (CV 4,0% e 4,5%), microporosidade (CV 6,0% e 4,5%), porosidade total (3,4% e 4,1%) e média variação para a macroporosidade (23,0% e 17,8%), nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente.

Tavares et al. (2012) em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar, encontraram pequena variação para densidade do solo e porosidade total com (11%), areia (9%), argila (14%) e alta variação para a fração silte (59%). Lima et al. (2015) em área de encosta sob processo de degradação que encontraram pequena variação para os valores da densidade do solo (3%) e areia (9% e 11%), média variação para silte (33%) e alta para Silte (40%) e argila (43% e 41%) nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente. Pellin et al. (2015) encontraram em Latossolo, pequena variação de CV para densidade do solo (5,6%) e para porosidade total (11,2% e 10,8%) nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente.

Os maiores CV foram encontrados para os teores da fração silte (21,13%) e para os valores da variável microporosidade (18,56%) na profundidade de 10-20 cm, e os menores foram encontrados para as variáveis, densidade do solo (2,53%) e porosidade total (4,77%) na profundidade de 0-10 cm.

4.2. Comparação das médias de valores dos atributos do solo entre floresta nativa e pastagens

4.2.1. Médias de valores dos atributos químicos do solo

Todos os valores dos atributos químicos nas duas áreas apresentam diferença significativa, exceto as variáveis K^+ , Mg^{2+} , nas duas profundidades e Al^{3+} na profundidade de 0-10 cm (Tabela 5).

Ao comparar os valores médios dos atributos químicos do solo na área de pastagens e na área de floresta nativa, obtidos nas duas profundidades, observa-se que o solo das áreas analisadas apresenta classificação de baixa fertilidade. Com base nos valores encontrados na área de pastagens, com baixa fertilidade dos atributos químicos, pode-se afirmar que é necessário fazer aplicação de corretivos e fertilizantes para melhorar a fertilidade do solo, para que possa ser utilizado de acordo com a sua capacidade produtiva (SANTOS et al., 2008a; BOTTEGA et al., 2013).

Apesar do quadro geral de baixa fertilidade no solo de ambas as coberturas vegetais, observa-se que a área com pastagens apresenta melhor fertilidade que a área de floresta nativa (Tabela 5). Provavelmente, isto se deve à correção da acidez e à adubação realizada na cultura da cana-de-açúcar antes de 1990. Isto manteve o sistema com maior riqueza em nutrientes, comparado com a floresta nativa.

Os maiores valores de matéria orgânica do solo nas áreas de floresta nativa e se devem provavelmente a grande quantidade de resíduos orgânicos (littera, resteva e, ou serrapilheira), presentes em ecossistema florestal e de pastagem natural; sendo responsável pela retenção de água pelo arejamento como agente cimentante na agregação do solo e liberação lenta de nitrogênio, fósforo, enxofre, micronutriente e solubilização de outros elementos, atuando como fonte de nutrientes para os organismos e para as plantas. A matéria orgânica do solo atua também na T e no poder tampão do pH do solo. O teor de matéria orgânica do solo nas duas áreas diminui em profundidades. Segundo Santos et al. (2008b), o teor de matéria orgânica do solo, para o estado de Pernambuco, varia entre 8 a 30 g kg⁻¹ de solo, na camada mais superficial, decrescendo para as camadas mais profundas do solo, estando de acordo com os resultados encontrados nesta pesquisa. Na camada superficial, além do efeito da reciclagem dos restos vegetais que caem na superfície,

o sistema radicular é mais abundante. Isto permite o enriquecimento da camada 0-10 cm ao longo do tempo.

Tabela 5. Média de valores dos atributos químicos do solo em floresta nativa e em pastagens comparados na mesma profundidade

Atributos	Profundidade de 0-10 cm		Profundidade de 10-20 cm	
	Floresta nativa	Pastagens	Floresta nativa	Pastagens
pH (em CaCl ₂)	4,48b	5,09a	4,60b	4,98a
P (mg dm ⁻³)	2,25b	4,36a	1,52b	3,27a
K (cmol _c dm ⁻³³)	0,08a	0,09a	0,05a	0,04a
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0,38b	0,66a	0,33b	0,40a
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,40a	0,40a	0,30a	0,32a
Al (cmol _c dm ⁻³)	1,20a	1,20a	0,99b	1,32a
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	5,32a	4,38b	3,96b	4,15a
SB (cmol _c dm ⁻³)	0,92b	1,20a	0,72b	0,81a
T (cmol _c dm ⁻³)	6,25a	5,58b	4,65b	4,96a
V (%)	15,15b	21,75a	16,05b	16,94a
MOS (g kg ⁻¹)	39,53a	21,39b	29,01a	16,68b
m (%)	55,93a	43,18b	57,12b	59,98a

m: saturação por alumínio; Para um mesmo atributo, médias seguidas de mesma letra minúscula na linha, não diferem pelo teste t ($p \leq 0,05$).

4.2.2. Médias de valores dos atributos físicos do solo

Os valores das frações granulométricas do solo e das variáveis, densidade do solo, microporosidade, macroporosidade e porosidade total, em área de mata nativa, comparados, na mesma profundidade com pastagens, apresentam diferença significativa em seus valores (Tabela 6).

A razão da superioridade dos valores médios dos atributos medidos na área de floresta nativa, comparado à área de pastagens, é provavelmente devido ao seu maior teor de argila, em ambas as profundidades. Isto permite maior formação de estruturas, com maiores microporosidade, macroporosidade e porosidade total e menor densidade do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por vários autores (AQUINO et al., 2014; GUIMARÃES et al., 2016; SILVA et al., 2008a; SILVA, 2013) avaliando atributos físicos sob floresta nativa, pastagens, preparo convencional e plantio direto, respectivamente.

Tabela 6. Média de valores dos atributos físicos do solo em floresta nativa e em pastagens comparados na mesma profundidade

Atributos	Profundidade de 0-10 cm		Profundidade de 10-20 cm	
	Floresta nativa	Pastagens	Floresta nativa	Pastagens
Areia (g kg^{-1})	396,00b	552,60a	367,60b	532,50a
Silte (g kg^{-1})	288,60a	198,00b	185,10a	141,90b
Argila (g kg^{-1})	315,40a	249,60b	447,50a	326,40b
Ds (kg dm^{-3})	1,29b	1,73a	1,36b	1,59a
MiP (%)	32,31a	21,19b	29,41a	21,44b
MaP (%)	28,98a	19,90b	28,10a	23,70b
Pt (%)	52,49a	34,62b	47,29a	40,14b

Para um mesmo atributo, médias seguidas de mesma letra minúscula na linha, não diferem pelo teste t ($p \leq 0,05$). Ds: Densidade do solo; MiP: Microporosidade; MaP: Macroporosidade; e Pt: Porosidade total.

4.3. Análise geoestatística dos atributos do solo em floresta nativa e em pastagens

A análise da variabilidade espacial dos valores de atributos químicos e físicos do solo nas áreas de floresta nativa e pastagens, realizada através dos ajustes dos semivariogramas experimentais, é um medidor do grau de semelhança entre vizinhos para determinação da semivariância (GREGO et al., 2014) e foi utilizada com o objetivo de verificar e quantificar a existência do grau de dependência para cada atributo, por meio dos modelos e parâmetros ajustados aos semivariogramas apresentados nas Tabelas 7 a 10, respectivamente.

4.3.1. Análise espacial de valores dos atributos químicos do solo

Na área de floresta nativa (Tabela 7), os valores dos atributos químicos pH, P e Ca^{2+} , nas duas profundidades, se ajustaram ao modelo esférico, com o maior alcance de 37,28 m para o atributo pH, na profundidade de 0-10 cm. O K^+ e a T se ajustaram ao modelo exponencial. O menor alcance foi observado para a MOS (10,80 m) e o maior para o H+Al (48,50 m). O alcance indica o limite de dependência espacial dos atributos. Na profundidade de 0-0-0,10 m os valores de pH, K^+ , Al^{3+} , H+Al e a T apresentam moderada variabilidade espacial e o P, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SB, T, V e a MOS apresentam grau com alta dependência espacial em seus valores. O

mesmo padrão espacial foi verificado pelos atributos pH, P, Ca^{2+} , SB, T e MOS na profundidade de 10-20 cm, segundo critério de Cambardella et al. (1994). Santos et al. (2012a) observaram estrutura de dependência espacial moderada e forte para os atributos químicos estudados.

Tabela 7. Modelos e parâmetros dos semivariogramas de valores dos atributos químicos do solo na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm

Modelos/ Parâmetros	Atributos											
	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	MOS	m
Profundidade de 0-10 cm												
Modelo	EXP	ESF	EXP	ESF	ESF	GAU	ESF	EXP	EXP	GAU	EXP	GAU
Efeito Pepita (Co)	0,07	0,093	0,0004	0,01	0,01	0,07	0,3	0,012	0,1	2	1,8	136
Patamar (C)	0,19	0,39	0,001	0,06	0,05	0,17	1,1	0,11	0,96	38,3	29,51	210
Alcance (a)	37,28	20,92	16,6	27,5	29,5	20,2	48,5	18,3	28,7	28,8	10,8	20,3
GD (%)	37,37	23,85	36,36	16,7	19,23	40	27,27	10,91	10,42	5,22	6,09	64,8
Grau	Mod.	Alta	Mod.	Alta	Alta	Mod.	Mod.	Alta	Alta	Alta	Alta	Mod.
R ²	0,15	0,23	0,45	0,10	0,17	0,07	0,44	0,13	0,37	0,33	0,07	0,15
Profundidade de 10,20 cm												
Modelo	ESF	ESF	EXP	ESF	EXP	ESF	GAU	ESF	EXP	EXP	ESF	ESF
Efeito Pepita (Co)	0,01	0,05	0,002	0,01	0,006	0,04	0,46	0,014	0,04	16,2	1,5	93,9
Patamar (C)	0,13	0,35	0,0006	0,04	0,02	0,11	0,91	0,064	0,95	39,72	28,33	163
Alcance (a)	23,79	21,87	18,70	18,5	32,2	23,8	34,5	20,5	21,9	32,7	26,9	28,8
GD (%)	7,69	13,71	33,33	25	31,11	32,72	50,55	21,87	4,21	40,78	5,29	57,7
Grau	Alta	Alta	Mod.	Alta	Mod.	Mod.	Mod.	Alta	Alta	Mod.	Alta	Mod.
R ²	0,08	0,17	0,34	0,12	0,16	0,02	0,22	0,09	0,16	0,31	0,06	0,09

ESF: esférico; EXP: exponencial; GAU: gaussiano; (a): metros; GD: grau de dependência espacial: $((\text{Co}/\text{Co}+\text{C}_1)*100)$; R²: coeficiente de determinação; Mod.: moderada; m: saturação por alumínio.

Os modelos de semivariogramas ajustados apresentam alcances que variam conforme o atributo. Os menores valores de alcances foram encontrados para os atributos, MOS (10,8 m) e K^+ (16,6 m) na área de floresta nativa (Tabela 7) e para T (10,20 m) e K^+ (13,56 m) na área com pastagens (Tabela 8). Estes valores evidenciam baixa continuidade estrutural do solo. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Silva et al. (2017), em trabalho com variabilidade espacial de atributos químicos sob cultivo contínuo, e resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2014).

Na área de pastagens (Tabela 8), os atributos pH, P, Ca^{2+} e SB ajustaram-se ao modelo esférico nas duas profundidades, apresentando moderada e alta variação espacial, de acordo com Cambardella et al. (1994); o mesmo ocorreu para os atributos K^+ , T e V, que se ajustaram ao modelo exponencial, nas duas profundidades, apresentando alta variabilidade espacial. Silva et al. (2014) em avaliação de atributos do solo sob pastagem e mata atlântica, encontraram alta variabilidade espacial para os atributos Mg^{2+} e pH e moderada para Ca^{2+} e K^+ , ajustando-se ao modelo exponencial e esférico. Os atributos Mg^{2+} e Al^{3+} apresentam valores com grau de alta e moderada dependência espacial, ajustando-se aos modelos esférico e exponencial em profundidades, respectivamente.

Tabela 8. Modelos e parâmetros dos semivariogramas de valores dos atributos químicos do solo na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm

Modelos/ Parâmetros	Atributos											
	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	MOS	m
Profundidade de 0-10 cm												
Modelo	ESF	ESF	EXP	ESF	ESF	ESF	GAU	ESF	EXP	EXP	LIN	EXP
Efeito Pepita (Co)	0,024	1,20	0,0014	0,036	0,016	0,15	0,213	0,015	0,15	3,73	2,30	44,80
Patamar (C)	0,07	6,77	0,0018	0,104	0,07	0,20	0,86	0,119	1,08	30,95	8,93	352,7
Alcance (a)	35,5	34,42	22,40	32,30	35,34	27,20	21,70	23,78	29,80	17,12	-----	20,35
GD (%)	34,71	17,72	12,73	25,71	22,86	75,00	24,87	12,50	13,89	12,05	25,76	12,7
Grau	Mod.	Alta	Alta	Mod.	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Mod.	Alta
R ²	0,31	0,07	0,06	0,41	0,10	0,07	0,71	0,14	0,76	0,04	0,43	0,03
Profundidade de 10-20 cm												
Modelo	ESF	ESF	EXP	ESF	EXP	EXP	ESF	ESF	EXP	EXP	LIN	ESF
Efeito Pepita (Co)	0,039	1,55	0,002	0,007	0,014	0,045	0,21	0,01	0,075	6,36	1,486	45,8
Patamar (C)	0,12	6,93	0,01	0,04	0,04	0,18	0,89	0,09	0,82	45,71	5,32	364,4
Alcance (a)	31,78	35,9	13,56	22,28	24,58	14,20	18,80	36,59	10,20	34,74	-----	37,90
GD (%)	32,50	22,36	20,0	17,50	35,0	25,0	23,59	11,11	9,14	13,91	27,82	12,57
Grau	Mod.	Alta	Alta	Alta	Mod.	Mod.	Alta	Alta	Alta	Alta	Mod.	Alta
R ²	0,33	0,04	0,27	0,08	0,13	0,11	0,70	0,04	0,71	0,22	0,36	0,14

ESF: esférico; EXP: exponencial; LIN: linear; (a): metros; GAU: gaussiano; GD: grau de dependência espacial: $((\text{Co}/\text{Co}+\text{C}_1)*100)$; R²: coeficiente de determinação; Mod.: moderada; m: saturação por alumínio.

O valor médio do atributo matéria orgânico do solo ajusta-se ao modelo linear, sem patamar, com moderada variabilidade espacial, apresenta variação

infinita, nas duas profundidades, mostrando tendências dentro de toda área com pastagens, podendo indicar que o tamanho da malha amostral não foi suficiente para exibir a estacionaridade do atributo (Tabela 8). Silva et al. (2017) e Rossini, (2014), encontraram valores semelhantes em suas avaliações com atributos químicos do solo.

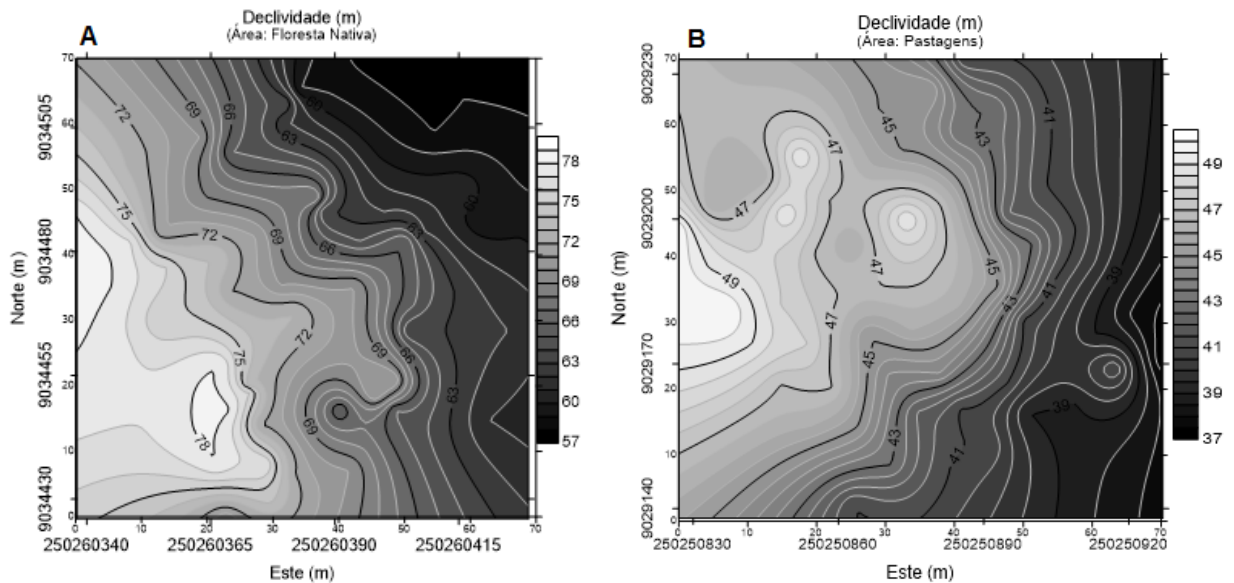


Figura 8. Mapas de declividade das áreas de floresta nativa (A) e de pastagens (B).

Os mapas da declividade das áreas de floresta nativa e da área de pastagens estão representados na Figura 8. Observa-se que a área de floresta nativa apresenta maior declive em relação à área de pastagens.

Após a definição dos modelos de teóricos de semivariogramas, pelo método da krigagem ordinária realizou-se a interpolação para confecção dos mapas de contorno de curvas de isovalores, chamadas isolinhas (Figuras 9 a 12), para o ajuste de semivariograma dos valores dos atributos químicos nas áreas de floresta nativa e pastagens, para identificar nos mapas os sítios específicos de maiores ou menores valores dos atributos estudados.

Observando-se através dos mapas de distribuição espacial dos atributos químicos nas áreas de floresta nativa (Figuras 9 a 12) e de pastagens (Figuras 13 a 16), nas duas profundidades, que todos os atributos avaliados apresentam variabilidade moderada a alta (Figuras 9 a 12), de acordo com Cambardella et al. (1994). Observa-se também, que parte da área se encontra com deficiência de

nutrientes, apresentando um pH ácido com elevado teor de acidez trocável, sendo necessário a sua correção com calcário dolomítico para melhorar a sua fertilidade que encontra-se com valores baixos, elevando a saturação por bases e, consequentemente, a diminuição da saturação por alumínio.

Observa-se que o solo das áreas de floresta nativa e de pastagens apresenta valores elevados de acidez (ativa, trocável e potencial) na faixa de maior declividade, podendo ser confirmado através da Figura 13, onde foram encontradas baixas concentrações de P, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , em profundidades. A área de pastagens apresenta o mesmo padrão espacial da área de floresta nativa, com reduzidos valores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e elevada concentração de saturação por alumínio. Isto se deve, devido o alumínio ser um gerador da acidez no solo, como também devido os valores da capacidade de troca catiônica ser afetada diretamente pelos teores de matéria orgânica do solo, que também atua no tamponamento do pH, resultando na sua diminuição no solo. Também, pela textura granulométrica do solo (Figuras 17 e 18), pela qualidade e quantidade de minerais na fração argila, o que pode ser atribuído aos baixos teores de densidade do solo nas áreas de floresta nativa e de pastagens (Figuras 19 e 20). Esta baixa variação no estado da estrutura do solo nas duas áreas, permite uma maior concentração de microporos, macroporos e porosidade total no solo, apresentando baixos teores da fração areia (Figuras 17 a 20).

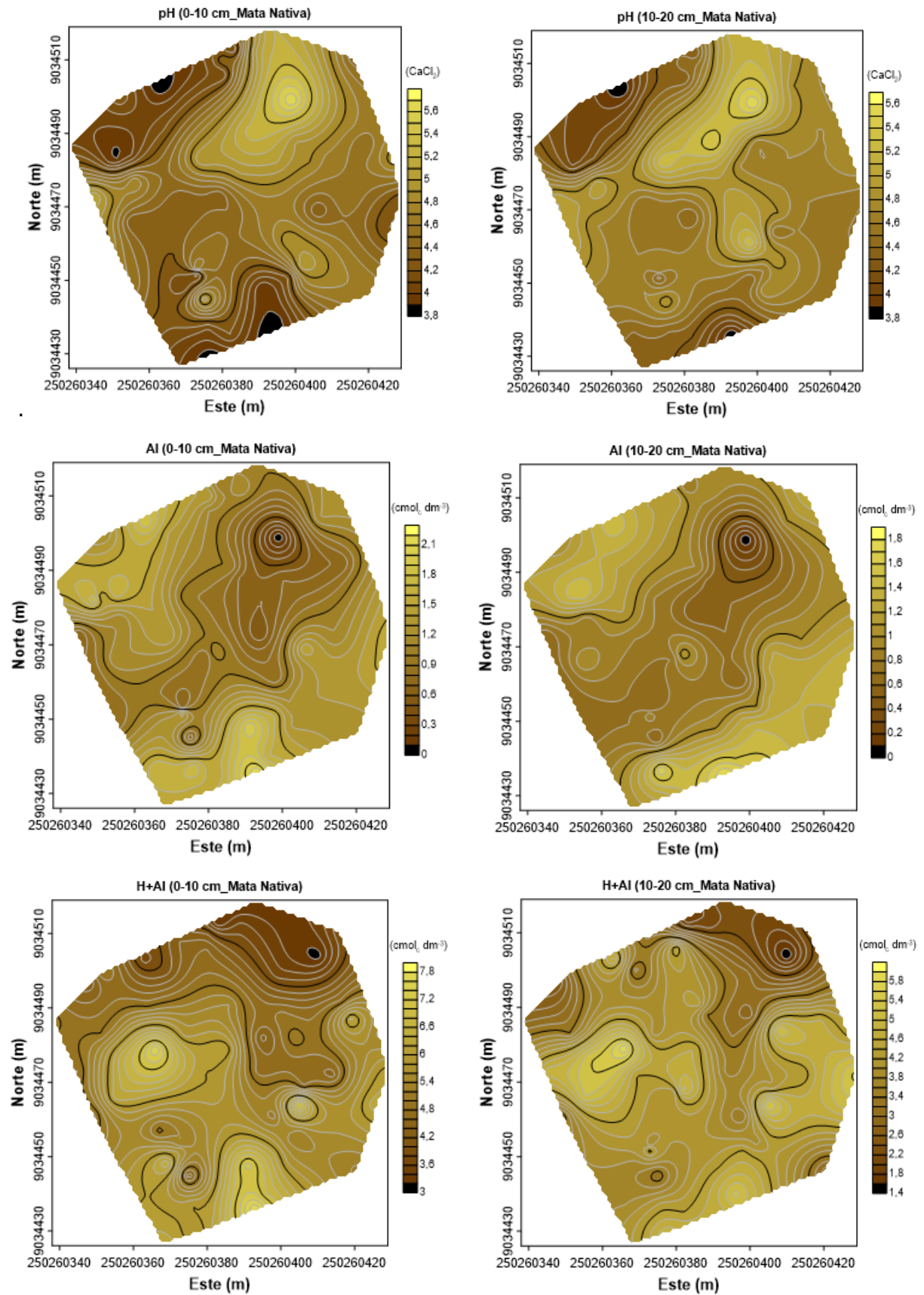


Figura 9. Distribuição espacial dos atributos pH, Al^{3+} e $H+Al$ na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

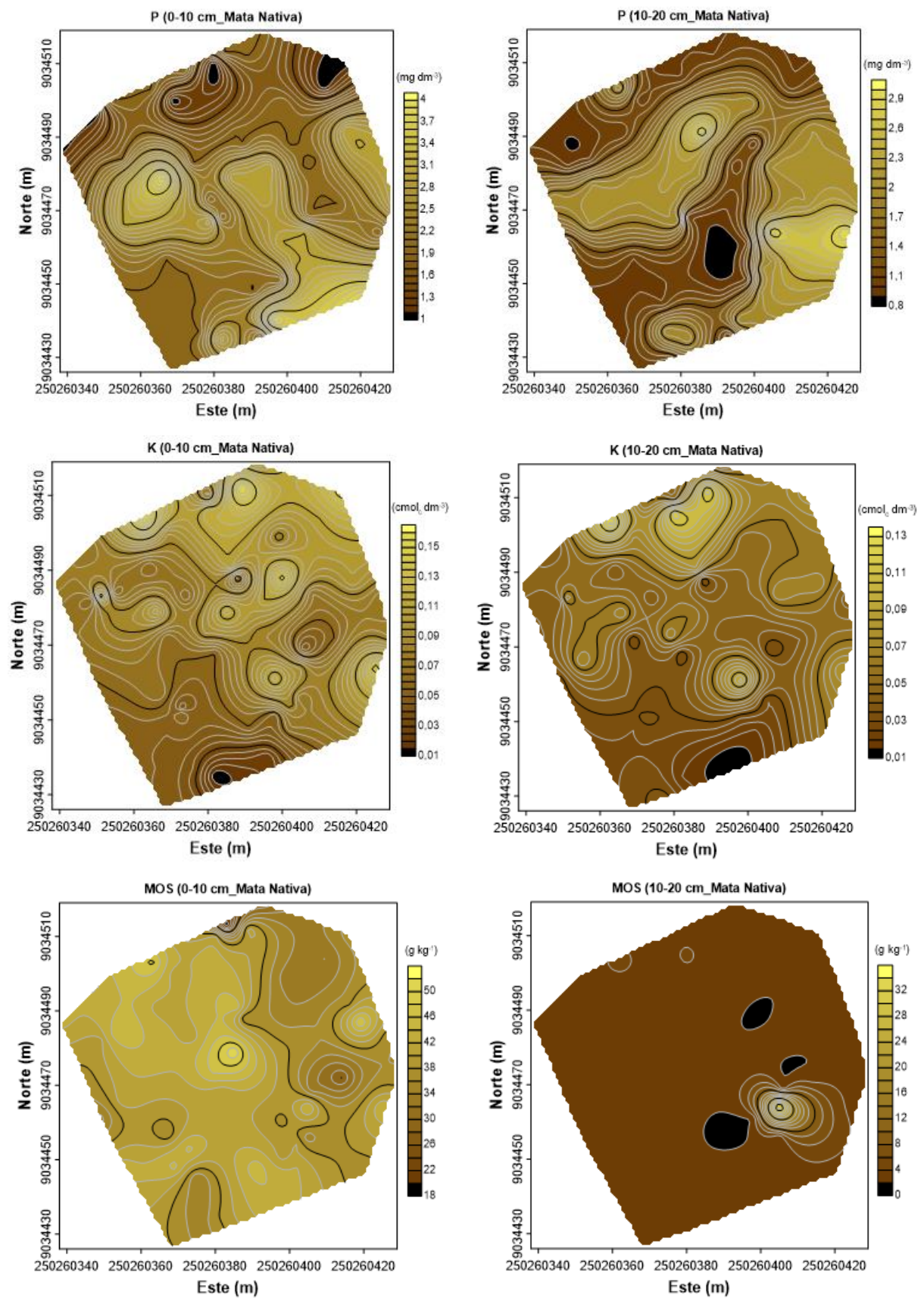


Figura 10. Distribuição espacial dos atributos P, K⁺ e MOS na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

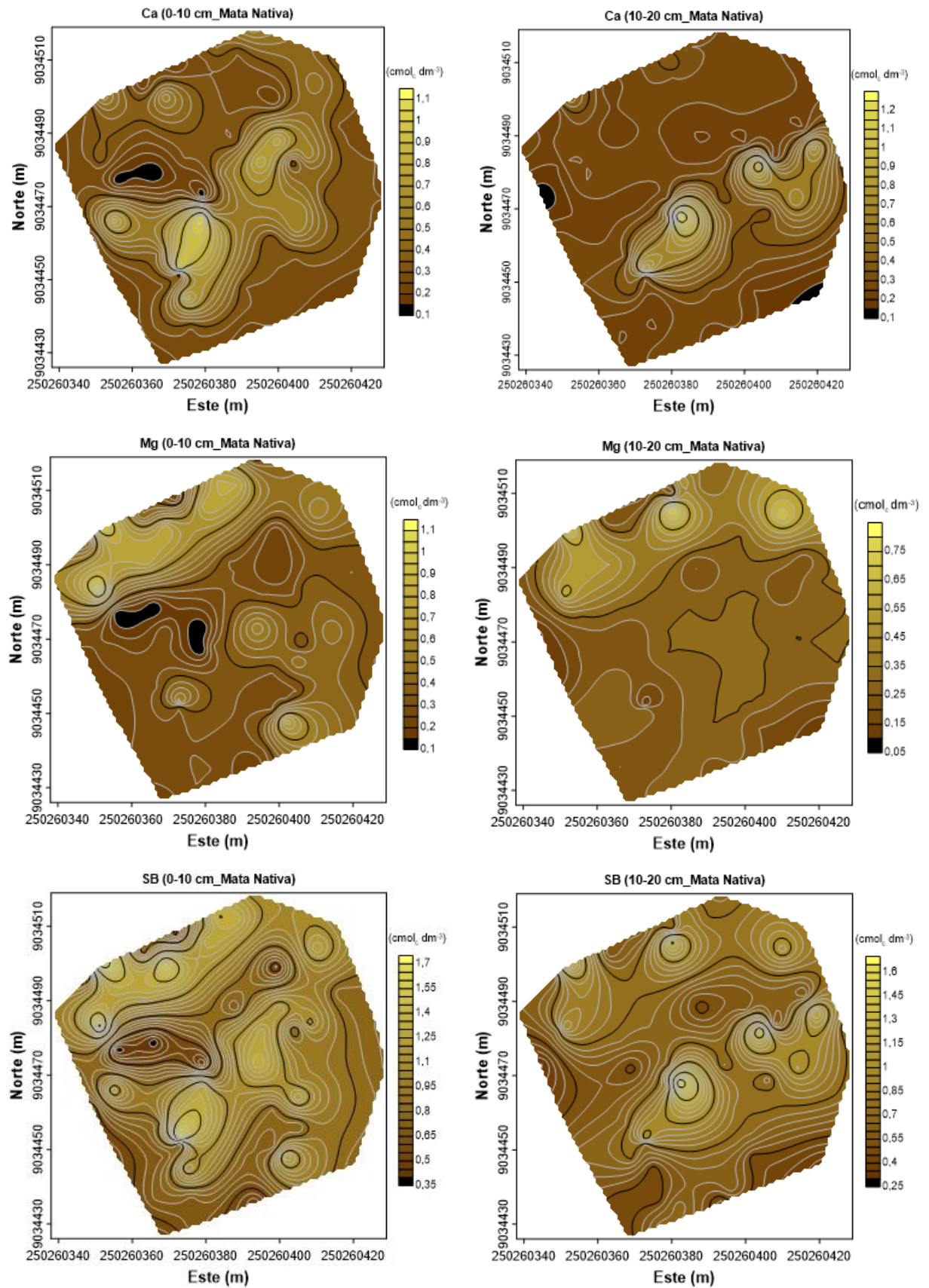


Figura 11. Distribuição espacial dos atributos Ca^{2+} , Mg^{2+} e SB na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

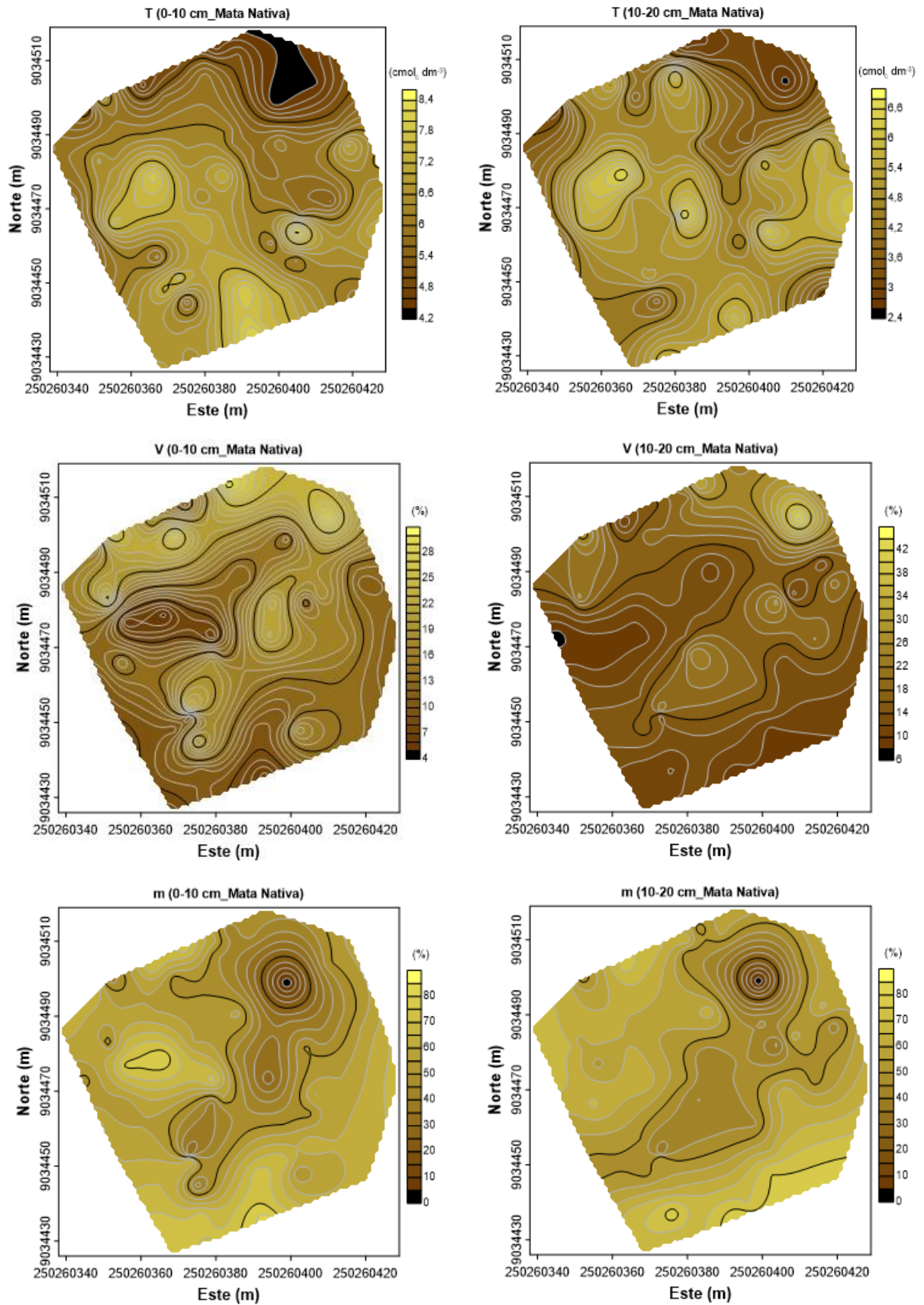


Figura 12. Distribuição espacial dos atributos T, V e m na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

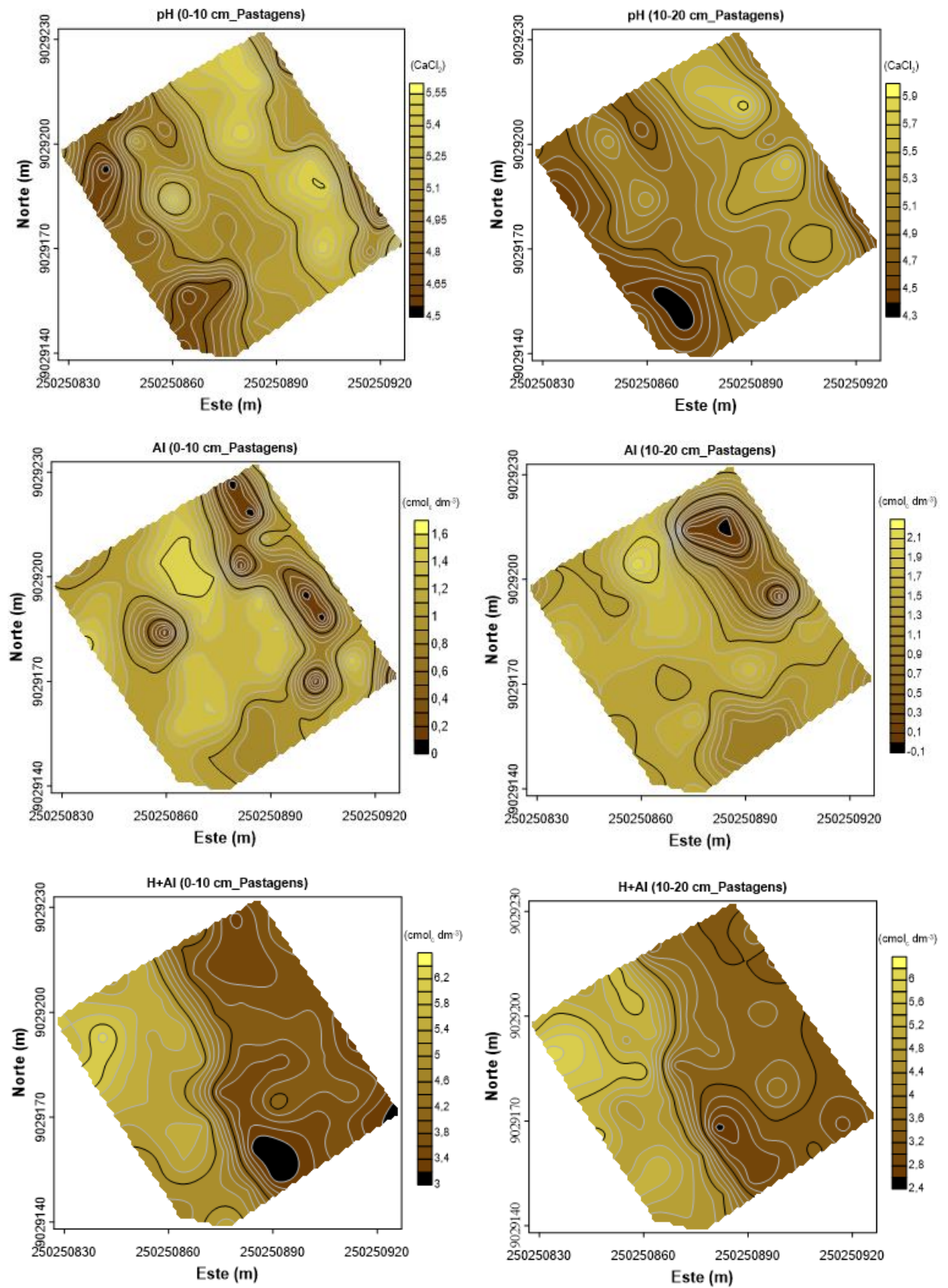


Figura 13. Distribuição espacial dos atributos pH, Al³⁺ e H+Al na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

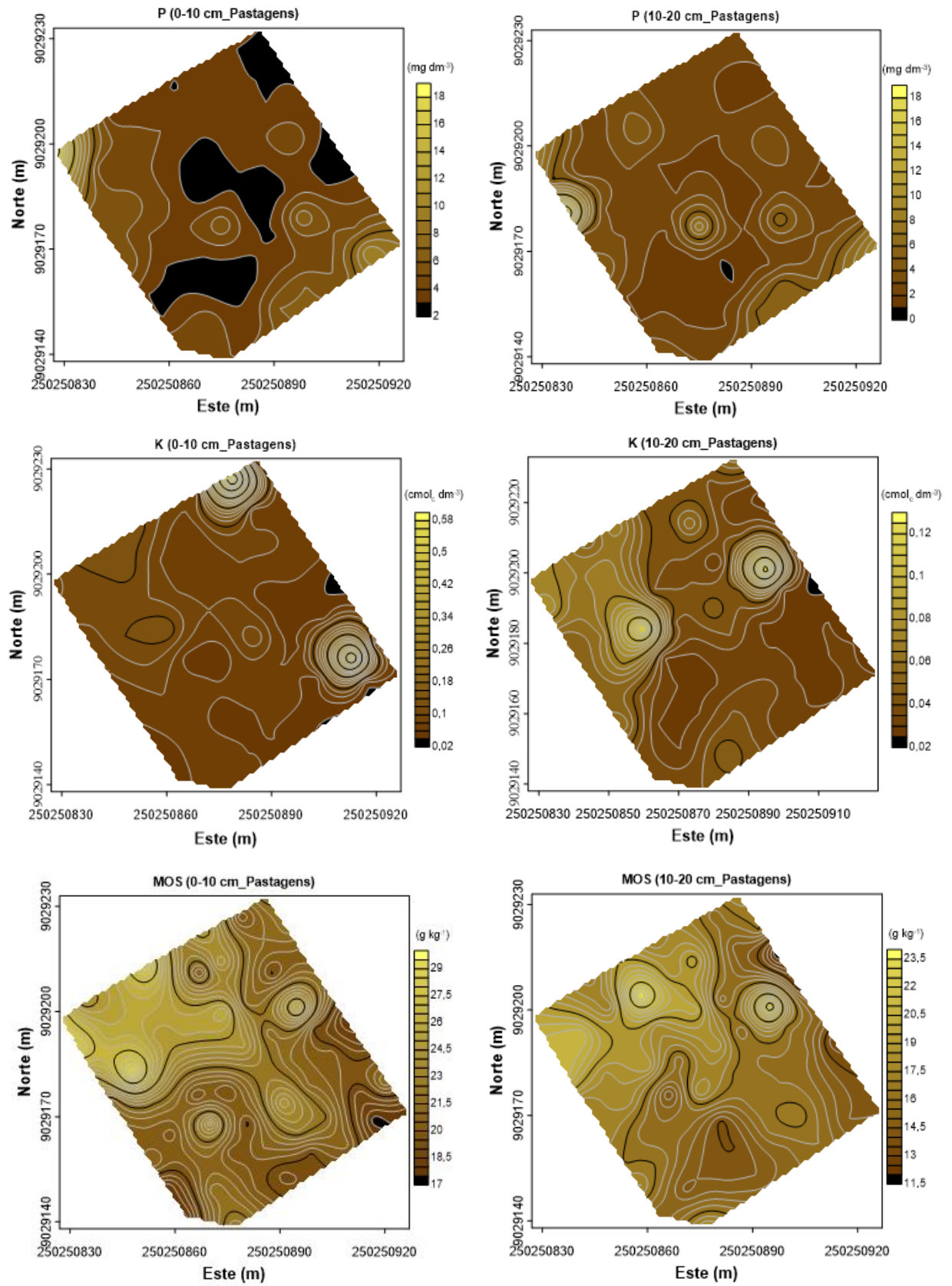


Figura 14. Distribuição espacial dos atributos P, K⁺ e MOS na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

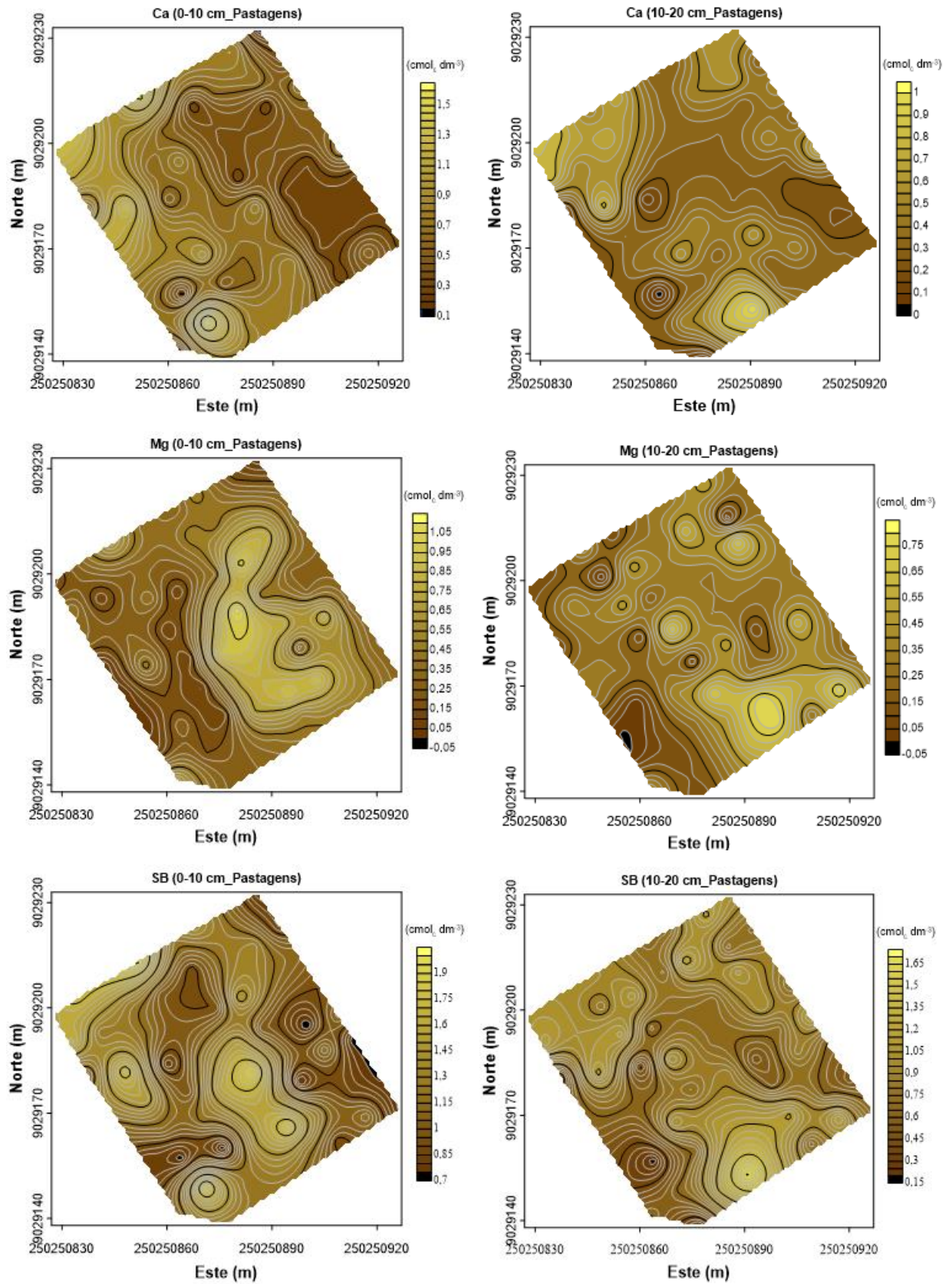


Figura 15. Distribuição espacial dos atributos Ca^{2+} , Mg^{2+} e SB na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

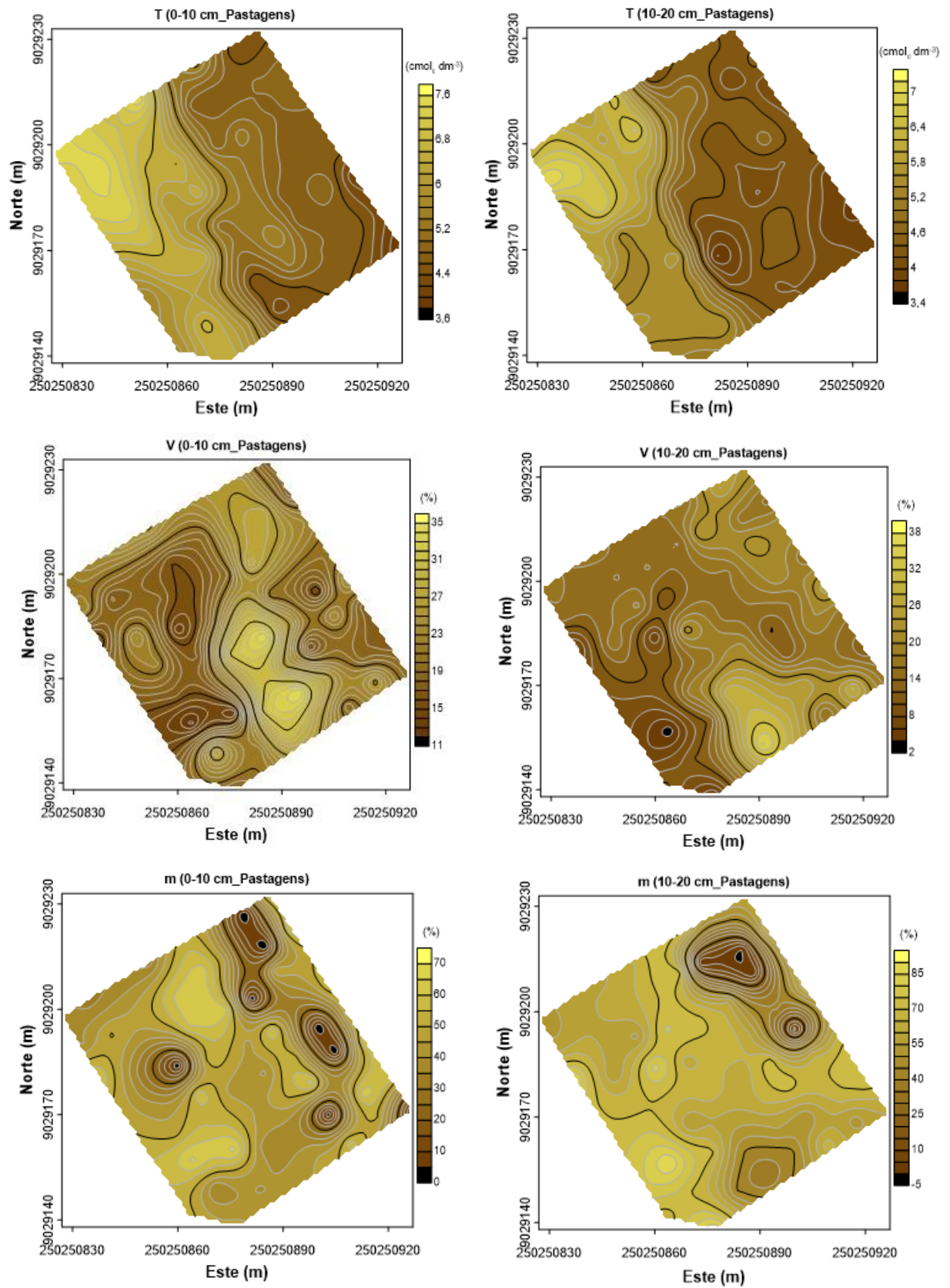


Figura 16. Distribuição espacial dos atributos T, V e m na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

4.3.2. Análise espacial de valores dos atributos físicos do solo

De acordo com os critérios de Cambardella et al. (1994), os teores das frações granulométricas areia, silte e argila, na área de floresta nativa (Tabela 9), apresentam grau de dependência espacial moderado, nas duas profundidades, ajustando-se aos modelos linear, esférico e gaussiano, respectivamente, enquanto que na área de pastagens (Tabela 10) apresentam grau de dependência moderada para as frações areia e argila e alta para silte, ajustando-se ao modelo exponencial, nas duas profundidades. Os atributos físicos microporosidade, macroporosidade e porosidade total, nas duas áreas em profundidades, apresentam variabilidades com amplitudes elevadas em relação a densidade do solo que apresenta menor variabilidade em seus valores, nas duas áreas analisadas. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Lima et al. (2015) em área de encosta sob processo de degradação, por Santos et al. (2012b), que encontraram valores com grau de dependência espacial moderado para os teores das frações granulométricas em estudo de atributos físicos no semiárido pernambucano, e por Lima et al. (2009), em avaliação sob pastagem e vegetação nativa, que encontraram na área de floresta nativa maiores concentrações espacialmente para argila e silte, quando comparado com área de pastagens que apresenta moderada dependência espacial.

Na área de floresta nativa (Tabela 9), os valores das variáveis densidade do solo e macroporosidade, apresentam moderada variabilidade espacial nas duas profundidades de acordo com os critérios de Cambardella et al. (1994), se ajustando aos modelos esféricos, e as variáveis microporosidade e porosidade total, apresentam alta dependência espacial, nas duas profundidades, ajustando-se aos modelos esféricos.

Os modelos de semivariogramas ajustados na área de floresta nativa (Tabela 9) apresentam valores com alcances que varia de 13,90 m a 38,30 m para as frações granulométricas silte e argila na profundidade de 10-20 cm, e para a variável densidade do solo, microporosidade, macroporosidade e porosidade total, o alcance apresenta variação de 12,80 m a 16,25 m, nas duas profundidades.

Observa-se que o teor da fração areia na área de floresta nativa (Tabela 9), nas duas profundidades se ajustou ao modelo linear sem patamar, e segundo Camargo; Fuks (2011) o modelo linear continuam aumentando enquanto a distância aumenta, apresentando variação infinita, mostrando tendências dentro de toda área

de floresta nativa, podendo indicar que o tamanho da malha amostral não foi suficiente para exibir a estacionaridade da fração areia. Esta distribuição espacial está de acordo com os resultados encontrados por vários autores (SILVA et al., 2008; Silva, 2013; Rossini, 2014). Os menores valores de alcances, na área de floresta nativa, foram para as variáveis microporosidade (12,8 m) e densidade do solo (12,8 m) nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente.

Tabela 9. Modelos e parâmetros dos semivariogramas dos atributos físicos do solo na área de floresta nativa, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm

Modelos/Parâmetros	Atributos						
	Areia	Silte	Argila	Ds	MiP	MaP	Pt
Profundidade de 0-10 cm							
Modelo	LIN	ESF	GAU	ESF	ESF	ESF	ESF
Efeito Pepita (Co)	980	550	856	0,004	1,36	1,53	1,4
Patamar (C)	3637,2	2169,1	3205,3	0,016	12,15	6,09	10,39
Alcance (a)	-----	33,50	26,80	15,50	12,80	14,64	13,11
GD (%)	26,94	25,36	26,71	25	11,19	25,12	13,47
Grau	Mod.	Mod.	Mod.	Mod.	Alta	Mod.	Alta
R ²	0,53	0,05	0,59	0,02	0,02	0,03	0,02
Profundidade de 10-20 cm							
Modelo	LIN	ESF	GAU	ESF	ESF	ESF	ESF
Efeito Pepita (Co)	1080	756	1490	0,001	0,05	1,53	1,23
Patamar (C)	4290	2753,6	5697	0,004	6,35	5,31	10,24
Alcance (a)	-----	13,90	38,30	12,80	16,25	14,25	13,35
GD (%)	25,17	27,45	26,15	25	14,29	28,81	12,01
Grau	Mod.	Mod.	Mod.	Mod.	Alta	Mod.	Alta
R ²	0,69	0,08	0,51	0,02	0,02	0,02	0,03

ESF: esférico; LIN: linear; GAU: gaussiano; Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partícula; MiP: microporosidade; MaP: macroporosidade; Pt: porosidade total; (a): metros; GD: grau de dependência espacial: $((Co/Co+C_1)*100)$. R²: coeficiente de determinação dos ajustes; Mod.: moderada; m: saturação por alumínio.

Na área de pastagens (Tabela 10) o valor médio da densidade do solo ajusta-se ao modelo esférico nas duas profundidades com moderada dependência espacial e a porosidade total na profundidade de 0-10 cm apresenta moderada dependência espacial e ajusta-se ao modelo esférico, enquanto que na profundidade de 10-20 cm a porosidade total ajusta-se ao modelo exponencial apresentando valores com alta dependência espacial. De acordo com Cambardella et al. (1994), a microporosidade e macroporosidade, apresentam valores com alta variabilidade

espacial, nas duas profundidades analisadas ajustando-se aos modelos esférico e gaussiano, respectivamente (Tabela 10). Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Camargo et al. (2010) e Santos et al. (2012c), onde as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial, que variou entre moderada para macroporosidade, porosidade total e umidade do solo, e forte para microporosidade e densidade do solo, em função do coeficiente de efeito pepita. Os valores das variáveis, densidade do solo e microporosidade se ajustaram ao modelo esférico nas duas profundidades, e a macroporosidade ao modelo gaussiano, enquanto que a porosidade total foi ajustada aos modelos esférico e exponencial nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente (Tabela 10).

Tabela 10. Modelos e parâmetros dos semivariogramas dos atributos físicos do solo na área de pastagens, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm

Modelos/Parâmetros	Atributos						
	Areia	Silte	Argila	Ds	MiP	MaP	Pt
Profundidade de 0-10 cm							
Modelo	EXP	EXP	EXP	ESF	ESF	GAU	ESF
Efeito Pepita (Co)	960	228,8	598,2	0,0005	0,2	0,12	0,67
Patamar (C)	2378,9	1157,1	2062,7	0,002	1,79	1,15	2,72
Alcance (a)	10,13	18,99	11,11	21,50	18,90	19,30	19,90
GD (%)	40,35	19,77	29	25	11,17	10,43	24,63
Grau	Mod.	Alta	Mod.	Mod.	Alta	Alta	Alta
R ²	0,13	0,16	0,12	0,33	0,10	0,77	0,32
Profundidade de 10-20 cm							
Modelo	EXP	EXP	EXP	ESF	ESF	GAU	EXP
Efeito Pepita (Co)	878	101	786	0,003	1,69	1,55	2,5
Patamar (C)	2184,1	899,4	2272,2	0,007	15,83	14,46	10,17
Alcance (a)	18,80	17,73	14,52	23,74	19,30	23,40	21,70
GD (%)	40,2	11,23	34,59	28,57	10,67	10,72	24,58
Grau	Mod.	Alta	Mod.	Mod.	Alta	Alta	Alta
R ²	0,11	0,06	0,10	0,09	0,22	0,56	0,08

ESF: esférico; EXP: exponencial; GAU: gaussiano; Ds densidade do solo; Dp: densidade de partícula; MiP: microporosidade; MaP: macroporosidade; Pt: porosidade total; (a): metros; GD: grau de dependência espacial: $((Co/Co+C_1)*100)$. R²: coeficiente de determinação dos ajustes; Mod.: moderada; m: saturação por alumínio.

O parâmetro alcance, na área de pastagens (Tabela 10), apresenta variação entre 10,13 m a 18,99 m para areia, silte e argila, e de 18,90 m a 23,74 para as variáveis, densidade do sol, microporosidade, macroporosidade e porosidade total,

nas duas profundidades analisadas, mostrando assim, variação de escala conforme o atributo. Os menores alcances foram para as frações areia (10,13 m) e argila (11,11 m). Fonseca et al. (2017) trabalhando em área suscetível ao deslizamento, encontraram valores para o alcance de 247,60 m para areia, 155,40 m para silte e 289,60 m para a fração argila, em profundidades.

A partir dos modelos teóricos dos semivariogramas, fez-se a interpolação pelo método de krigagem ordinária para geração dos mapas dos atributos físicos do solo (Figuras 17 a 22), nas áreas de floresta nativa e pastagens para identificar a variabilidade espacial e testar a eficiência de práticas utilizadas que possibilitem a adoção de tratamentos diferenciados de acordo com as necessidades específicas do solo.

Através dos mapas de distribuição espacial dos atributos físicos, observou-se a caracterização do grau de dependência espacial para os valores de todos os atributos químicos e físicos do solo, nas áreas de floresta nativa e pastagens, com exceção para o teor da fração areia e da variável matéria orgânica do solo, nas áreas de floresta nativa e pastagens, respectivamente, que se ajustaram ao modelo linear sem patamar, apresentando grau de dependência espacial moderado. Através dessas observações, verificou-se que nas áreas de floresta nativa e pastagens os atributos apresentam de moderada a alta dependência espacial, nas duas profundidades estudadas.

Os maiores valores das frações granulométricas na área de floresta nativa (Figura 17) ocorrem na região do eixo direito dos mapas nas duas profundidades para a fração areia e para argila na região do eixo esquerdo dos mapas, variando entre 293 a 567 g kg⁻¹ e 195 a 459 g kg⁻¹, na profundidade de 0-10 cm, respectivamente, e de 237 a 534 g kg⁻¹ e 295 a 638 g kg⁻¹, na profundidade de 10-20 cm, respectivamente. A fração silte, apresenta maiores números de valores no eixo de maior declive da área, variando entre 164 a 392 g kg⁻¹ e 90 a 350 g kg⁻¹, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente (Figura 17).

Na área de pastagens (Figura 18), as frações granulométricas apresentam valores com padrão espacial semelhante em toda a área, com maiores teores de areia e silte na profundidade de 0-10 cm, variando entre 386 a 658 g kg⁻¹ e 112 a 268 g kg⁻¹, respectivamente. Observa-se que com o aumento da profundidade ocorre diminuição significativa nos teores das frações areia e silte, enquanto que a fração argila apresenta maior valor na profundidade de 0,10-0,20 m com variação entre 199

a 474 g kg^{-1} . Estes resultados estão de acordo com os encontrados por vários autores (LIMA et al., 2009; LIMA et al., 2015; SILVA et al., 2015; TAVARES et al., 2012).

As variáveis, densidade do solo, micro e macroporosidade e porosidade total, na área de floresta nativa, se apresentam com valores aproximados de padrões de variabilidade espacial, em toda área com baixa densidade do solo e microporosidade e maiores dependência espacial para macroporosidade e porosidade total podendo propiciar adequada drenagem interna e baixa erodibilidade (Figura 19). Os resultados desta pesquisa estão de acordo com os encontrados por Aquino et al. (2014). Na área de pastagens (Figuras 21 e 22), os maiores valores de densidade do solo encontram-se na região de maior declividade da área variando entre $1,62$ a $1,78 \text{ kg dm}^{-3}$ e $1,40$ a $1,73 \text{ kg dm}^{-3}$ nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente. Nas regiões que a densidade do solo apresenta maiores valores, também ocorrem menores valores de microporosidade, da macroporosidade e da porosidade total, nas duas profundidades, devido a maiores quantidades de areia no solo, que condiciona maior densidade e menores microporosidade, macroporosidade e porosidade total.

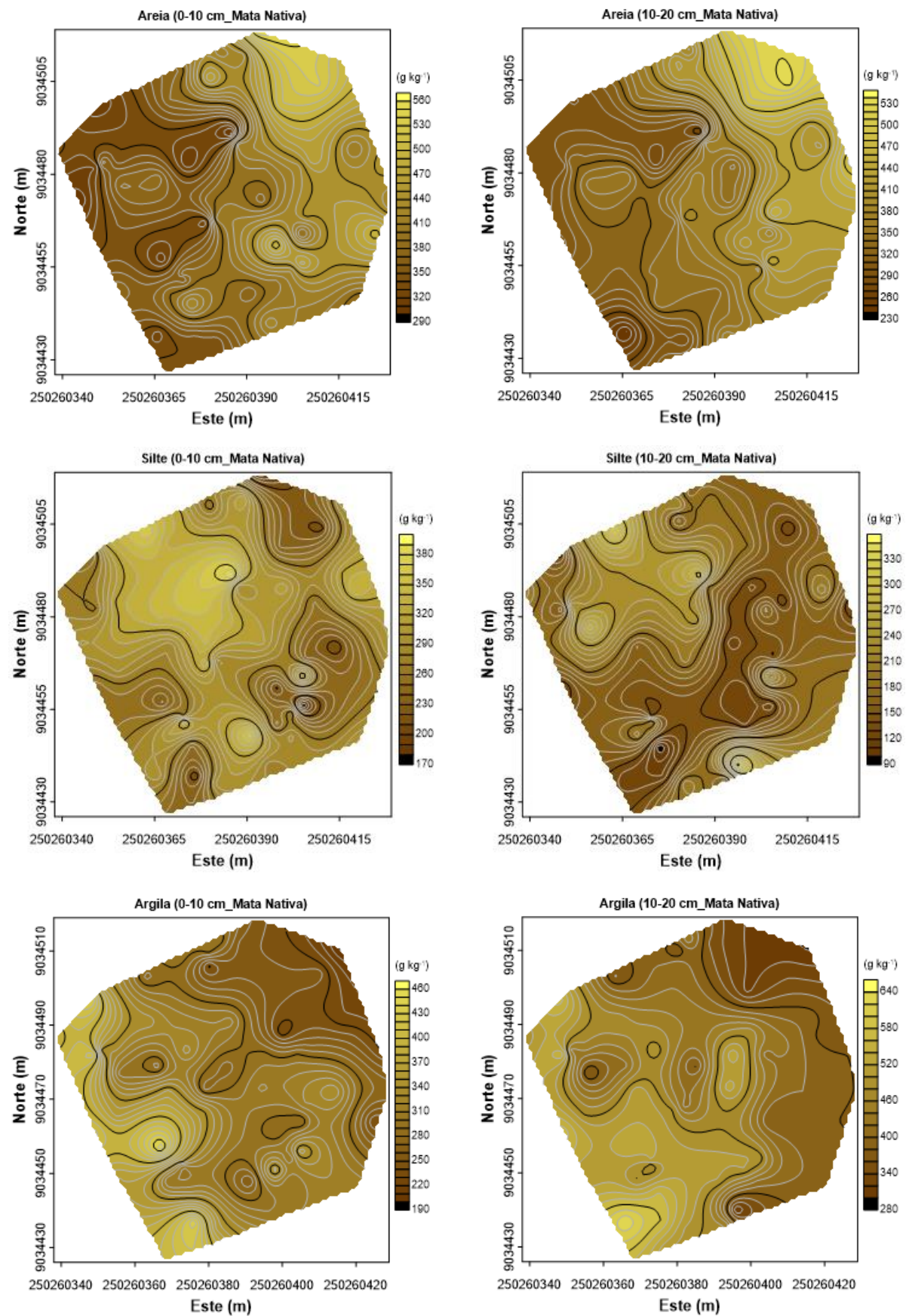


Figura 17. Distribuição espacial granulométrica da areia, silte e argila na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

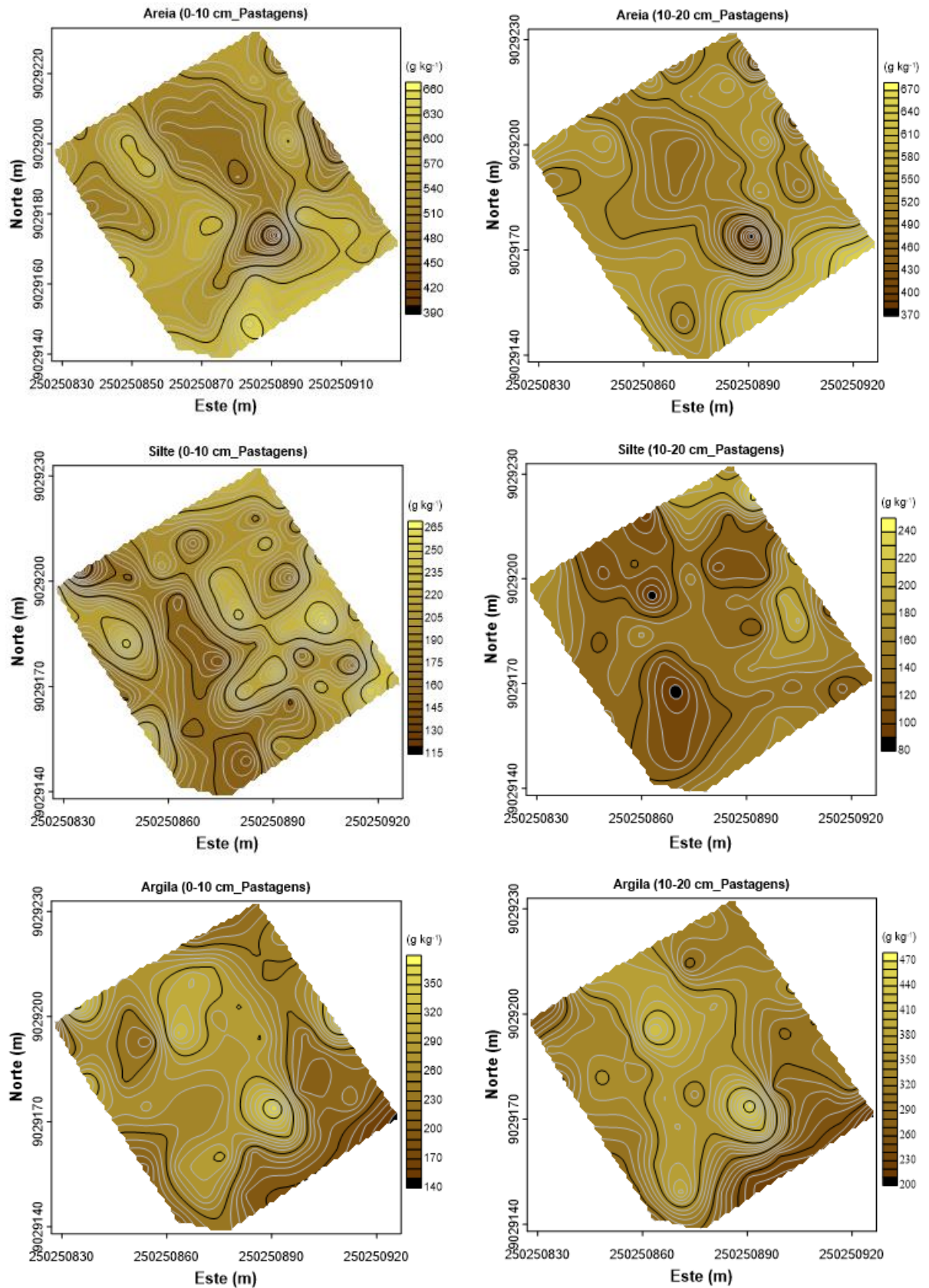


Figura 18. Distribuição espacial granulométrica da areia, silte e argila na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

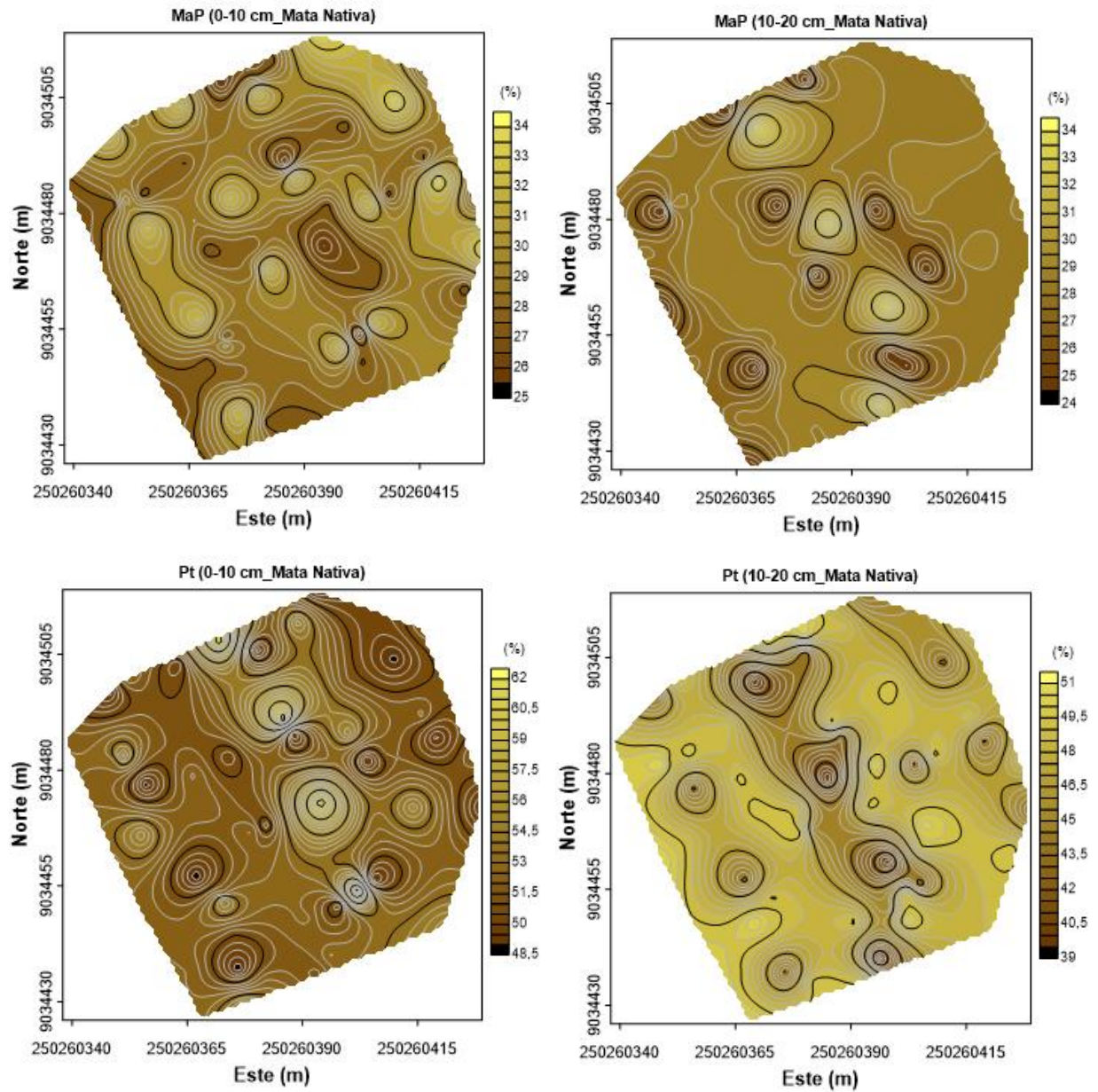


Figura 19. Distribuição espacial da MaP e Pt na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

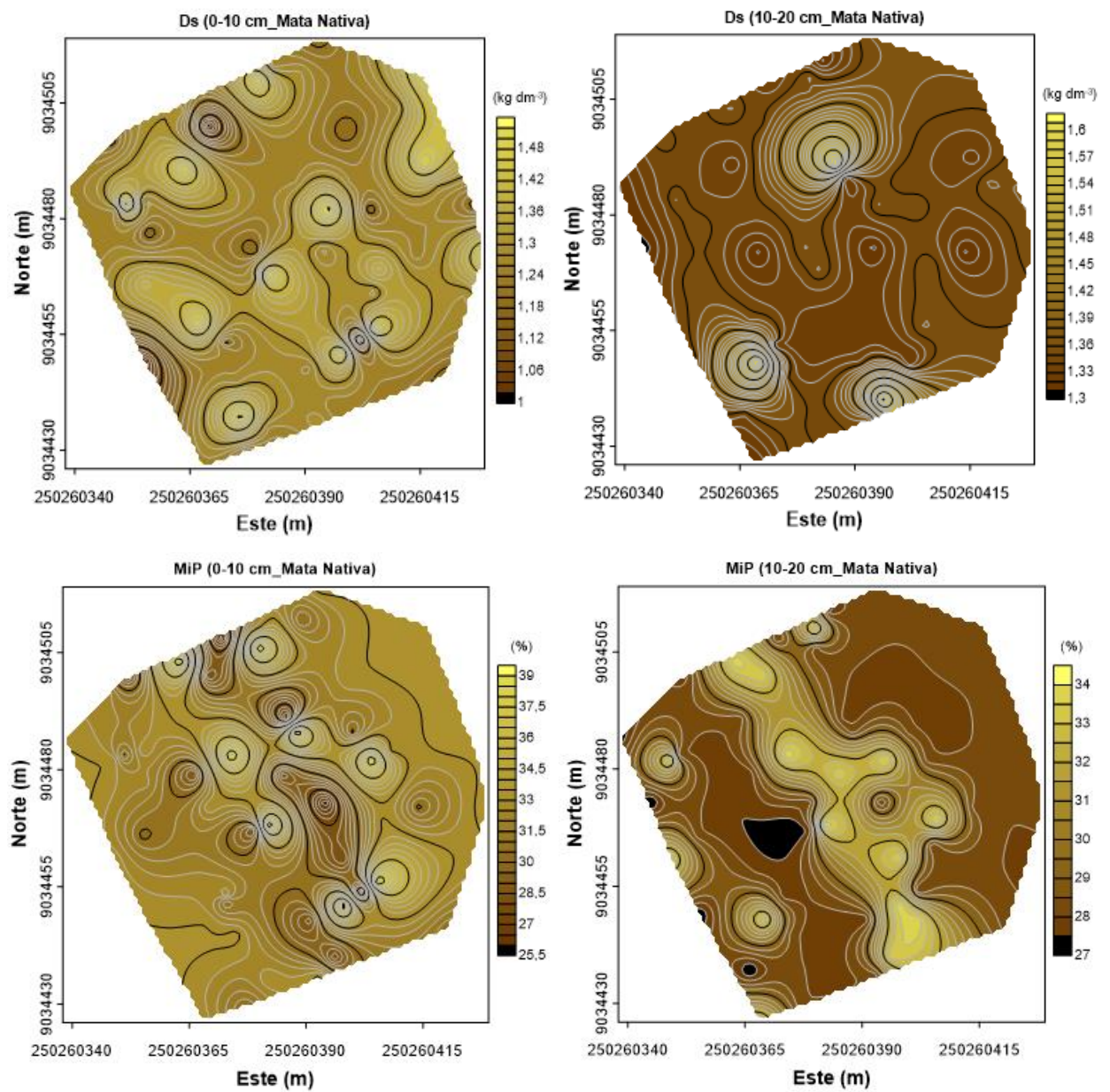


Figura 20. Distribuição espacial da Ds e MiP na área de floresta nativa nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

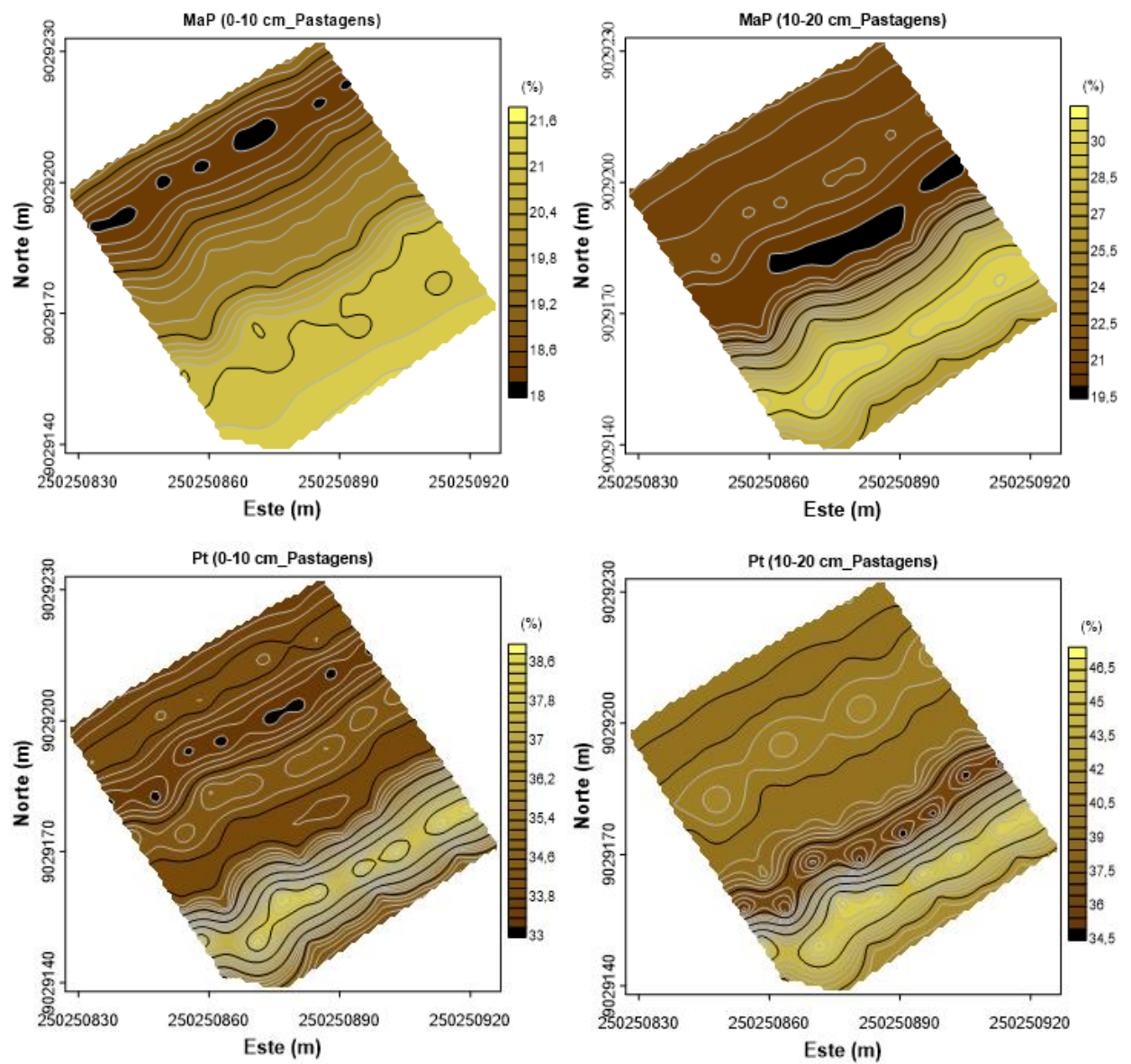


Figura 21. Distribuição espacial da MaP e Pt na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

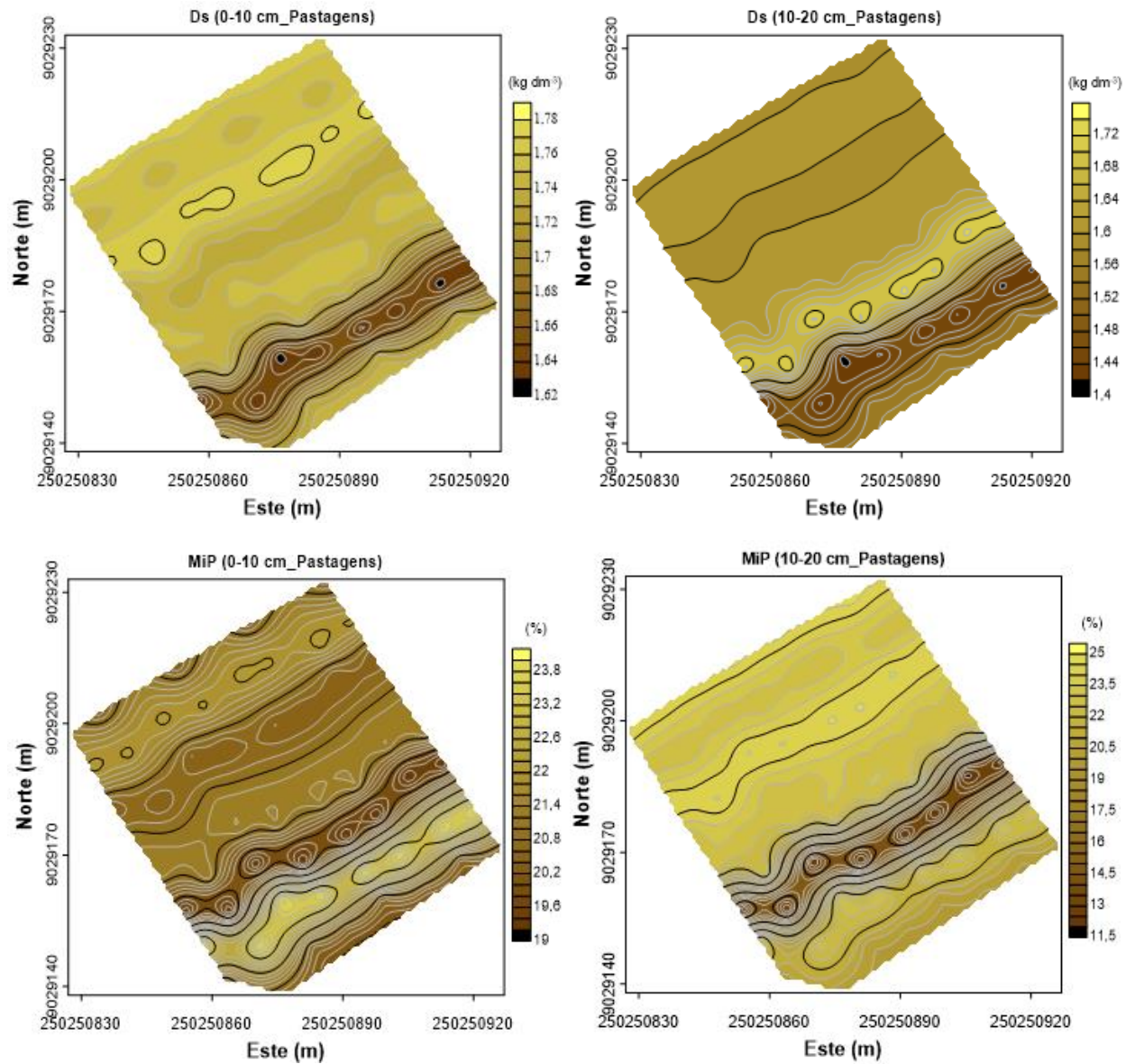


Figura 22. Distribuição espacial da Ds e MiP na área de pastagens nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.

5. CONCLUSÕES

1. Na área de mata nativa, através do ajuste do modelo de variograma, os valores dos atributos químicos P, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SB, T, V, matéria orgânica do solo e dos atributos físicos microporosidade e porosidade total apresentam forte grau de dependência espacial, e os atributos químicos pH, K^+ , Al^{3+} , H+Al, saturação por alumínio e para as frações areia, silte, argila e as variáveis densidade do solo e macroporosidade apresentam moderada dependência espacial, em profundidades.
2. Na área de mata nativa os valores dos atributos químicos do solo ajustaram-se aos modelos esférico (45,83%), exponencial (37,50%) e gaussiano (16,67%), e os valores dos atributos físicos aos modelos esférico (71,43%), gaussiano (14,28%) e linear (14,28%), com maior alcance para as variáveis H+Al (48,50 m) e argila (38,30 m) e menor alcance para a matéria orgânica do solo (10,80 m) e microporosidade e densidade do solo (12,8 m).
3. Na área de pastagem os atributos químicos P, K^+ , Al^{3+} , H+Al, SB, T, V, saturação por alumínio e a fração silte e as variáveis microporosidade, macroporosidade e porosidade total apresentam forte dependência espacial, e os atributos químicos pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , matéria orgânica do solo e Al^{3+} e as frações areia, argila e densidade do solo apresentam moderada dependência espacial, em profundidades.
4. Na área de pastagens os valores dos atributos químicos do solo ajustaram-se aos modelos esférico (50%), exponencial (37,50%), gaussiano (4,17%) e linear (8,32%), e os valores dos atributos físicos aos modelos exponencial (50%), esférico (35,71%) e gaussiano (14,29%), com o maior alcance para a variável saturação por alumínio (37,90 m) e densidade do solo (23,74 m) e menor alcance para T (10,20 m) e para a fração areia (10,13 m).
5. Os valores dos atributos químicos e físicos do solo, nas áreas de floresta nativa e de pastagens, apresentam elevada variabilidade espacial, exceto a matéria orgânica do solo na área de pastagens e a fração areia na área de mata nativa, que apresentam baixa variabilidade em seus valores.

6. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA-APAC. Disponível em:
<http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php?posto_id=314>.
Acesso em 16 fev. 2017.
- AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A.; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação de atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 397-406, 2014.
- ARTUR, A. G.; OLIVEIRA, D. P.; COSTA, M. C. G.; ROMERO, R. E.; SILVA, M. V. C.; FERREIRA, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 141-149, 2014.
- AZEVEDO, J. R.; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of soil properties in na agrarian reform settlement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1755-1763, 2015.
- BERNARDI, A. C. C.; PEREZ, N. B. Agricultura de precisão em pastagem. *In*: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASSU, R. Y. (eds). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília: EMBRAPA Instrumentação, 2014, cap. 3, p. 492-499.
- BERNARDI, A. C. C.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASSU, R. Y. Variabilidade espacial de índices de vegetação e propriedades do solo em sistema de integração lavoura pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 8, p. 513-518, 2017.
- BOTTEGA, E. L. QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

BURAK, D. L.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo. **Bragantia**, v. 71, n. 4, p. 538-547, 2012.

BRITO, G. F.; CHOI, V. P.; ALMEIDA, A. **Manual ABNT: regras gerais de estilo e formatação de trabalhos acadêmicos**. FECAP BIBLIOTECA: Paulo Ernesto Tolle. 4. Ed. ver. e amp. São Paulo, 2014.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G. (Ed). **Geoprocessamento em projetos ambientais**. São José dos Campos, SP: INPE, 1998, p. 1-36.

CAMARGO, E. C. G.; FUKS, S. D.; CÂMARA, G. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2004, p. 79-122.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 617-630, 2010.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 297-304, 2009.

CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; SANTOS, L. A. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, E. A. Spatial variability of physical attributes in Alfissol under agroforestry, Humaitá region, Amazonas state, Brazil. **Revista Ciências Agrárias**, v. 56, p. 149-159, 2013.

CARDOSO, G. G. G.; WANDERLEY, R. C.; SOUZA, M. L. C. Physical attributes of a pasture soil in southeast Goiás determined by geostatistics. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 1, p. 143-153, 2016.

CARDOSO, J. A.; LACERDA, M. P. C.; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; FIGUEIREDO, C. C. Variabilidade de atributos de fertilidade do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar no estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 506-515, 2014.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.. Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1235-1242, 2012.

CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Comparação de métodos para ajuste de modelos de semivariogramas da precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 443-448, 2009.

DE WIJS, H. J. Statistics of ore distribution. Part I: frequency distribution of assay values: geologie em Mijnbouw. **Journal of the royal Netherlands Geological and Mining Society**, New Series, v. 13, n. 11, p. 365-375, 1951.

DE WIJS, H. J. Statistics of ore distribution. Part II: theory of binomial distribution applied to sampling and engineering problems: geologie em Mijnbouw. **Journal of the royal Netherlands Geological and Mining Society**, New Series, v. 15, n. 1, p. 12-24, 1953.

DEUTSCH, C. V. **Geostatistical reservoir modeling**. New York: Oxford University Press, 2002. 376 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. rev. amp. Rio de Janeiro: Embrapa, 2013. 353 p.

FARACO, M. A.; URIBE-OPACO, M. A.; SILVA, E. A. A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 463-476, 2008.

FERRAZ, G. A. S.; SILVA, F. M.; OLIVEIRA, M. S.; CUSTÓDIO, A. A. P.; FERRAZ, P. F. P. Variabilidade especial dos atributos da planta de uma lavoura cafeeira. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 1, p. 81-91, 2017.

FERREIRA, A. M. **Testes de normalidade: ajustamento à função de distribuição normal**. Castelo Branco: Instituto Politécnico. Escola Superior Agrária de Castelo Branco, 1994. 25p.

FONSECA, L. A. M.; LANI, J. L.; FERNANDES FILHO, E. I.; SANTOS, G. R.; FERREIRA, W. P. M.; SANTOS, A. M. R. T. Variability in soil physical properties in landslide-prone areas. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v. 39, n. 1, p. 109-118, 2017.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer 13.0 – Surface Mapping System - User's Guide**. New York: Golden Software, 2016.

GUEDES, L. P. C.; URIBE-OPACO, M. A.; JOHANN, J. A.; SOUZA, E. G. Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2217-2226, 2008.

GUIMARÃES, W. D.; GRIPP JUNIOR, J.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 2, p. 247-255, 2016.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L.

H.; INAMASSU, R. Y. (eds). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília: EMBRAPA Instrumentação, 2014, cap. 1, p. 74-83.

INAMASSU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. *In*: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASSU, R. Y. (eds). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília: EMBRAPA Instrumentação, 2014, cap. 1, p. 21-33.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE-ICMBio. **Plano de Manejo-Fase 2 da Reserva Biológica de Saltinho**. MMA/IBAMA. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/pm_rebio_saltinho_encartes.pdf> Acesso em: 03 jun. 2017.

ISAAKS, H. E.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

KAMIMURA, K. M.; SANTOS, G. R.; OLIVEIRA, M. S.; DIAS, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 37, n. 4, p. 877-888, 2013.

KRIGE, D. G. A statistical approach of some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of Africa**, v. 52, p. 119-139, 1951.

LIMA, F. V.; SILVINO, G. S.; MELO, R. S. S.; LIRA, E. C.; RIBEIRO, T. S. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 4, p. 53-63, 2015.

LIMA, G. C.; SILVA, M. L. N.; OLIVEIRA, M. S.; CURTI, N.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. H. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 5, p. 517-526, 2014a.

LIMA, J. S. S.; SATTTLER, M. A.; XAVIER, A. C.; OLIVEIRA, R. B.; PASSOS, R. R.; OLIVEIRA, P. C. Variabilidade espacial da textura de um Argissolo Vermelho Amarelo sob cultivo de pastagem e vegetação nativa. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2634-2637, 2009.

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 16-23, 2013a.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Distribuição espacial da matéria orgânica, grau de floculação e argila dispersa em água em área de vegetação natural em regeneração e pastagem. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 539-546, 2013b.

LIMA, R. P.; SILVA, A. R.; RAMINELLI, J. A. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo por análise de agrupamento de pontos amostrais. **Revista Agrarian**, v. 7, n. 23, p. 82-88, 2014b

MACHADO, R. L.; CEDDIA, M. B.; CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S.; FRANCELINO, M. R. Spatial variability of maximum annual daily rain under different return periods at the Rio de Janeiro state, Brazil. **Bragantia**, v. 69, supl. 0, p. 77-84, 2010.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Paris School of Mines Publication, p. 211, 1971.

MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for the semivariograms of soil properties and fitting them to sample estimates. **Journal of Soil Science**, v. 37, n. 4, p. 617-639, 1986.

MENDES, A. M. S.; SILVA, D. J.; BASSOI, L. H. Variabilidade espacial de solo em pomar de uva de mesa em Petrolina – PE. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASSU, R. Y. (eds). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília: EMBRAPA Instrumentação, 2014, cap. 3, p. 380-388.

MIGUEL, F. R. M.; VIEIRA, S. R.; GREGO, C. R. Variabilidade espacial da infiltração de água em solo sob pastagem em função da intensidade de pisoteio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 11, p. 1513-1519, 2009.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. In: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. **Agricultura de precisão**. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2013, p. 5-25. (Boletim Técnico).

MONTANARI, R.; PANACHUKI, E.; LOVERA, L. H.; CORREA, A. R.; OLIVEIRA, I. S.; QUEIROZ, H. A.; TOMAZ, P. K. Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono cerrado-pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 385-396, 2015.

MULLA, D. J.; McBRATNEY, A. B. Soil spatial variability. In: SUMNER, M. E. (Ed.) **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, 2000. Cap. 9, p. 321-352.

NASCIMENTO, P. C.; BISSANI, C. A.; LEVIEN, R.; LOSEKANN, M. E.; FINATO, T. Uso da terra e atributos de solos do estado do Rio Grande do sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 9, p. 920-926, 2014.

NEVES NETO, D. N.; SANTOS, A. C.; SANTOS, P. M.; MELO, J. C.; SANTOS, J. S. Análise espacial de atributos do solo e cobertura vegetal em diferentes condições de pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 9, p. 995-1004, 2013.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C.; SOUZA, L. C. P.; MELO, V. F. Variabilidade de atributos físicos e químicos de solos da formação guabirotuba em diferentes unidades de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1491-1502, 2010.

OLIVEIRA, L. M. **Avaliação de um método de identificação de outliers multivariados baseado na análise de componentes principais via simulação de Monte Carlo**. Ouro Preto, MG. 2013. 52 f. Monografia (Bacharel em Estatística). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

PASINI, M. P. B.; LÚCIO, A. D.; FRONZA, D.; WEBER, L. S. Krigagem ordinária e inverso da distância ponderada aplicados na espacialização da população da mosca-do-figo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 3, p. 452-459, 2015.

PELLINI, D. M. P.; MONTANARI, R.; LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; CORRÊA, A. R. Variabilidade de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 28-38, 2015.

PEREIRA NETO, J. S. T. **Adubação na área ocupada por pastagens**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <marcilio@barreiros.ifpe.edu.br> em: 17 fev. 2017.

RESENDE, J. M. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; DANTAS, J. S.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B. Variabilidade espacial de solos coesos do leste maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1077-1090, 2014.

ROSSONI, D. F. **Testes bootstrap para detecção de anisotropia espacial em fenômenos contínuos**. Lavras-MG, 2014. 81 p. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2014.

SANA, R. S.; ANGHINONI, I.; BRANDÃO, Z. N.; HOLZSCHUH, M. J. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 994-1002, 2014.

SANTOS, D. C.; LIRA, M. A.; DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F. MELLO, A. C. L. Recomendações de calcário e fertilizantes. In: CAVALCANTI, F. J. A. (Ed.). **Recomendação de adubação para o estado de Pernambuco: 2. aproximação, 3.ed.** Recife, PE: Instituto Agrônomo de Pernambuco-IPA, 2008a, p. 105-204.

SANTOS, E. O. J.; GONTIJO, I.; NICOLE, L. R. Variabilidade espacial de cálcio, magnésio, fósforo, potássio no solo e produtividade da pimenta-do-reino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 10, p. 1062-1068, 2012a.

SANTOS, E. O. J.; GONTIJO, I.; SILVA, M. B.; DRUMOND NETO, A. P. Variabilidade especial de macronutrientes em uma lavoura de café conilon no Norte do Espírito Santo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 469-476, 2015.

SANTOS, J. C. P.; ARAÚJO FILHO, J. C.; BURGOS, N.; CAVALCANTI, A. C. Solos de Pernambuco: Caracterização e ocorrência. In: CAVALCANTI, F. J. A. (Ed.). **Recomendação de adubação para o estado de Pernambuco: 2.aproximação, 3.ed.** Recife, PE: Instituto Agronômico de Pernambuco-IPA, 2008b, p. 5-30.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. S.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 828-835, 2012b.

SANTOS, D.; SOUZA, E. G.; NÓBREGA, L. H. P.; BAZZI, C. L.; GONÇALVES JÚNIOR, A. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 843-848, 2012c.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 699-705, 2014.

SILVA, A. F.; BARBOSA, A. P.; ZIMBACK, C. R. L.; LIMA, J. S. S.; LANDIM, P. M. B. Análise multivariada na diferenciação entre manejos do solo cultivado com café. **Energia na Agricultura**, v. 29, n. 1, p. 57-63, 2014.

SILVA, A. F. **Análise multivariada de dados espaciais na classificação interpretativa de solos.** Botucatu, SP, 2014. 96 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu, 2014.

SILVA, E. N. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 598-607, 2015.

SILVA, J. M. Análise espacial de atributos físicos em um latossolo cultivado em plantio direto. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 10, n. 3, p. 27-38, 2013.

SILVA, J. M.; LIMA, J. S. S.; PIRES, F. R.; ASSIS, R. L. Variabilidade espacial de atributos físicos em um latossolo sob plantio direto e preparo convencional no cultivo da soja no cerrado. **Revista Ciências Agrárias**, v. 50, p. 167-180, 2008a.

SILVA, J. M.; SILVA, L. F.; SILVA SOBRINHO, D. R.; SILVA, J. P. F. Variabilidade espacial de atributos químicos em um latossolo vermelho amarelo sob cultivo contínuo. **Energia na Agricultura**, v. 32, n. 1, p. 96-103, 2017.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B.. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. **Idesia**, v. 26, n. 2, p. 75-81, 2008b.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v. 155, n. 1-2, p. 55-66, 2010.

SKORUPA, A. L. A.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N.; SILVA, C. P.; SCOLFORO, J. R. S.; MARQUES, J. J. G. S. M. Propriedades de solos sob vegetação nativa em Minas Gerais: Distribuição por fitofisionomia, hidrografia e variabilidade especial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 11-22, 2012.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. S. D. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um Argissolo. **Scientia Agrária**, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010.

STAT SOFT Inc, 2011 **Programa Statistica for windows, versão 10.0**. Tulsa, EUA: Stat Soft, Inc, 2011. 1 CD-ROM.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MAGALHÃES, A. G.; BARRETO, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1206-1214, 2012.

TEIXEIRA, D. DE B.; BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; PERILLO, L. I.; IAMAGUTI, J. L.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JÚNIOR, N. Krigagem ordinária e simulação sequencial gaussiana na interpolação da emissão do CO₂ do solo. **Energia na Agricultura**, v. 26, n. 3, p. 26-42, 2011.

VALLADARES, G. S. Geoestatística no mapeamento digital de solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do estado do Ceará. **Revista Equador**, v. 1, n. 1, p. 26-43, 2012.

VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P.; PAZ GONZALEZ, A. Jackknifing for semivariogram validation. **Bragantia**, v. 69, supl. 0, p. 97-105, 2010.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2002, v. 2, p. 1-45.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215 p.

ZANÃO JÚNIOR, L. A. LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; PEREIRA, J. M. A. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em latossolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 389-400, 2010.