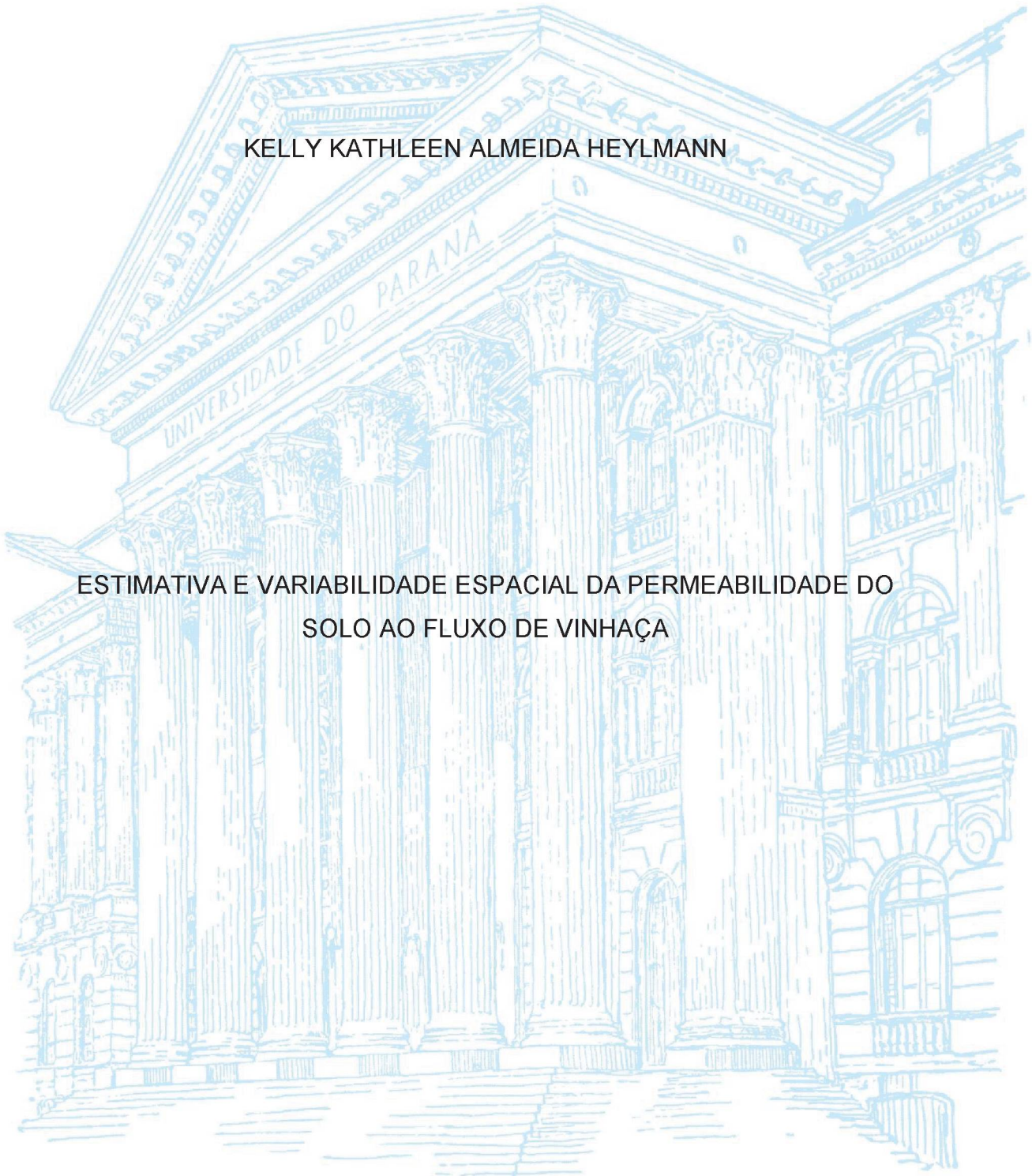
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KELLY KATHLEEN ALMEIDA HEYLMANN



ESTIMATIVA E VARIABILIDADE ESPACIAL DA PERMEABILIDADE DO SOLO AO FLUXO DE VINHAÇA

CURITIBA

2018

KELLY KATHLEEN ALMEIDA HEYLMANN

ESTIMATIVA E VARIABILIDADE ESPACIAL DA PERMEABILIDADE DO SOLO AO FLUXO DE VINHAÇA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. D.Sc. Robson André Armindo

CURITIBA

2018

Catalogação na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

H617e Heylmann, Kelly kathleen Almeida

Estimativa e variabilidade espacial da permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça [recurso eletrônico] / Kelly kathleen Almeida Heylmann – Curitiba, 2018.

Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.
Orientador: Prof. D.Sc. Robson André Armindo

1. Física do solo. 2. Geologia – métodos estatísticos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Armindo, Robson André. III. Título.

CDD 631.43

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **KELLY KATHLEEN ALMEIDA HEYLMANN** intitulada: **ESTIMATIVA E VARIABILIDADE ESPACIAL DA PERMEABILIDADE DO SOLO AO FLUXO DE VINHAÇA**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 30 de Novembro de 2018.

ROBSON ANDRÉ ARMINDO
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

CLAUDIO AUGUSTO UYEDA
Avaliador Externo (IFPE) (via videoconferência)

MICHAEL MANNICH
Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Robson André Armindo, por toda orientação, paciência e incentivo no decorrer dessa pesquisa e por quem sempre terei um profundo sentimento de admiração.

A Liana do Rocio Bastos de Morais pelos dados utilizados para composição deste estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de crescimento pessoal e por todo apoio.

À Fundação CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos concedida.

Ao secretário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Leonildo, sempre gentil e solícito com as demandas dos alunos.

Aos meus pais, Ruymar e Rosilda, por existirem. Nada disso seria possível sem o apoio de vocês. Agradeço por todos os conselhos e ensinamentos. Somos todos uma única luz. Vocês são o meu maior incentivo; meu exemplo.

Aos meus irmãos e cunhada, pelo companheirismo e amizade; em especial a minha irmã Stephanie por ser minha melhor amiga e me iluminar sempre.

Aos meus amigos, Rodrigo, Laís, Rosa, Carlos, Maria Eliza, Aline, Caroline e Júlio, por toda ajuda, companhia e apoio na realização desse estudo.

RESUMO

O estudo da variabilidade espacial de atributos físicos do solo é importante para a compreensão dos processos que regem as práticas de manejo e uso do solo. O objetivo neste trabalho foi analisar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo, especificamente, dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água (K_a) e vinhaça (K_v) e de permeabilidade específica medida com água (K_{ea}) e vinhaça (K_{ev}). O experimento foi conduzido em Morretes/PR em um solo classificado como franco-argilo-arenoso. O local de estudo foi dividido de acordo com o manejo agrícola em: área de plantio de cana-de-açúcar (CA), pousio de dois anos (PS), mata nativa (MN) e pousio de três anos com aplicação de vinhaça (PV). A textura do solo foi determinada juntamente com as propriedades densidade do solo seco, densidade das partículas, porosidade total, microporosidade, macroporosidade, umidade volumétrica na saturação, coeficiente de permeabilidade e permeabilidade específica do solo ao fluxo de água e vinhaça. Os resultados foram analisados no *software R* com auxílio do pacote *geoR*. Os semivariogramas foram ajustados aos modelos exponencial, esférico, gaussiano, *matérn* e *wave*. Os coeficientes K_a foram 9,05, 17,86, 305,90, 31,66 e 6,84, 34,81, 172,51, 218,17 mm h^{-1}; enquanto os coeficientes K_v foram 0,59, 2,54, 28,55, 5,01 e 3,43, 3,79, 71,47 e 63,11 mm h^{-1}, respectivamente, para as áreas CA, PS, MN e PV nas camadas 0 – 20 e 20 – 40 cm. A correlação linear de Pearson (*r*) entre K_a e K_v variou de 0,41 a 0,68. Todos os atributos avaliados apresentaram dependência espacial. O modelo exponencial apresentou o melhor ajuste para a maioria das variáveis com base no critério da máxima verossimilhança (VMS). Os valores de alcance atenderam ao espaçamento de coleta, sendo o menor alcance de 11 m para densidade de solo seco na área MN. A validação cruzada com a correlação de Pearson para cada *pixel* dos mapas evidenciou as semelhanças entre os mapas de K, areia e macroporosidade; K_a e K_{ea}; e, K_v e K_{ev}. Assim, a estimativa variabilidade espacial de Kv pode ser aproximada a partir dos mapas de Ka e da viscosidade da vinhaça. A investigação da variabilidade espacial dos coeficientes de permeabilidade também permitiu a identificação das zonas de vulnerabilidade aos impactos ambientais decorrentes de sua aplicação.

Palavras-chave: Física do solo; práticas de manejo; geoestatística.

ABSTRACT

The study of spatial variability of soil physical properties has large importance on the comprehension of processes that guide handling practices and soil use. The aim of this study was to evaluate the spatial variability of physical properties and permeability coeficients to water and vinasse, as well as specific permeability to these fluids. The experiment was conducted in Morretes/PR in a soil classified as sandy-clay-loan. The study site was divided according to soil handling in four areas: sugarcane crop area (SSC), fallow with two years (FLW), native florest (NF) and fallow with three years and vinasse application (FLV). Texture, bulk density, particle density, porosity, microporosity, macroporosity, soil moisture, specific permeability, permeability coeficients to water and to vinasse were determined. The results were submitted to descriptive statistic and geostatistical analysis. The semivariance data were fitted exponential, spherical, gauss, matérn and wave models using the GeoR package, in software R. The permeability coeficients to water (K_w) were 9.05, 17.86, 305.90, 31.66 and 6.84, 34.81, 172.51, 218.17 mm h^{-1}; permeability coeficients to vinasse (K_v) were 0.59, 2.54, 28.55, 5.01 and 3.43, 3.79, 71.47 and 63.11 mm h^{-1}, respectively, for SSC, FLW, NF and FLV in the layers 0-20 and 20-40 cm. The Pearson correlation (r) between K_w and K_v ranged from 0.41 to 0.68. All attributes presented spatial dependence. The exponential model presented the best fit for most variables based on the VMS criterion. The range values met the spacing and the lowest range being 11 m for ρ_{ss} in the NF area. Pearson's correlation evidenced the similarities between the maps of K, sand and macroporosity; and between the coefficients K_w and K_{ew}; K_v and K_{ev}. The results infer that the spatial variability can be approximated for these variables. The investigation of the spatial variability of K_w and K_v coefficients provided the identification of areas of greatest vulnerability to environmental impacts.

Key words: Soil physics; management practices; geostatistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição dos produtores de cana-de-açúcar no Paraná. 19

Figura 2 - Semivariograma experimental 27

Figura 3 - Amostragem da área de estudo. 35

Figura 4 - Local de coleta do solo dos diferentes manejos estudados. 36

Figura 5 - Malha disforme das diferentes áreas experimentais 39

Figura 6 - Relação 1:1 da porosidade (φ) com a umidade volumétrica na saturação (θ_s) (esq.) e com a densidade do solo seco (ρ_{ss}) (dir.)..... 43

Figura 7 - Log_{10} dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água, vinhaça e estimado para os fatoriais A (CA 0 – 20 cm), B (CA 20 – 40 cm), C (PS 0 – 20 cm), D (PS 20 – 40 cm), E (MN 0 – 20 cm), F (MN 20 – 40 cm), G (PV 0 – 20 cm) e H (PV 20 – 40 cm). 45

Figura 8 - Comparação entre os valores dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça estimado e medido. 46

Figura 9 - Coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça (K_v) e coeficiente estimado ($K_{v\ estimado}$) para área de plantio de cana-de-açúcar (CA), pousio de dois anos (PS), mata nativa (MN) e pousio de três anos com aplicação de vinhaça (PV). 47

Figura 10 - Comparação dos coeficientes de permeabilidade específica (K_e) medidos com água (K_{ea}) e vinhaça (K_{ev}) (esq.); e dos fatoriais A (CA 0 – 20 cm), B (CA 20 – 40 cm), C (PS 0 – 20 cm), D (PS 20 – 40 cm), E (MN 0 – 20 cm), F (MN 20 – 40 cm), G (PV 0 – 20 cm) e H (PV 20 – 40 cm) (dir.). 47

Figura 12 - Mapas da área CA para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 0 – 20 cm. 50

Figura 13 - Mapas da área CA para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm. 51

Figura 14 - Mapas da área PS para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 0 – 20 cm. 52

Figura 15 - Mapas da área PS para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica

para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm. 53

Figura 16 - Mapas da área MN para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 0 – 20 cm. 54

Figura 17 - Mapas da área MN para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm. 55

Figura 18 - Mapas da área PV para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 0 – 20 cm. 56

Figura 19 - Mapas da área PV para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm. 57

Figura 20 - Mapas da área CA para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 20 – 40 cm. 62

Figura 21 - Mapas da área CA para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada 20 – 40 cm. 63

Figura 22 - Mapas da área PS para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 20 – 40 cm. 64

Figura 23 - Mapas da área PS para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada 20 – 40 cm. 65

Figura 24 - Mapas da área MN para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 20 – 40 cm. 66

Figura 25 - Mapas da área MN para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}),estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada 20 – 40 cm. 67

Figura 26 - Mapas da área PV para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 20 – 40 cm. 68

Figura 27 - Mapas da área PV para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada 20 – 40 cm. 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de cana-de-açúcar nos principais estados produtores.... 17

Tabela 2 - Produção de álcool etanol nos principais estados produtores. 18

Tabela 3 - Valores do coeficiente de permeabilidade hidráulica do solo. 23

Tabela 4 - Composição química da vinhaça por diferentes autores. 29

Tabela 5 - Densidade amostral, altitude e tamanho das áreas estudadas. 35

Tabela 6 - Composição química da vinhaça. 37

Tabela 7 – Valores médios para areia, silte, argila, densidade do solo seco (ρ_{ss}), densidade das partículas (ρ_p) para as camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. 41

Tabela 8 – Valores médios para porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) para as camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. 42

Tabela 9 – Valores médios dos coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), de vinhaça (K_v) e de vinhaça estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e os coeficientes de permeabilidade específica para água (K_{ea}) e para vinhaça (K_{ev}). 44

Tabela 10 - Modelos de semivariograma ajustados e seus índices de ajuste aos valores de areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}),porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro); coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica (K_{ev}), estimado ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica (θ_s) para a camada de 0 – 20 cm. 49

Tabela 11 - Correlação de Pearson obtida entre cada pixel dos mapas de areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), permeabilidade do solo ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) para camada de 0 – 20 cm. 59

Tabela 12 - Modelos de semivariograma ajustados e seus índices de ajuste aos valores de areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}),porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro); coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica (K_{ev}), estimado ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica (θ_s) para a camada de 20 – 40 cm. 61

Tabela 13 - Correlação de Pearson obtida entre cada pixel dos mapas de areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade

(φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) para camada de 20 – 40 cm. 72

Tabela 14 - Valores de RMSE (mm h^{-1}) obtidos entre cada pixel dos mapas de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça medido (K_v) e estimado ($K_{v\ estimado}$) e de permeabilidade específica para água (K_{ea}) e para vinhaça (K_{ev}) para as camadas de 0 – 20 e 20 – 40 cm. 73

LISTA DE SIGLAS

AIC	Critério de Informação de Akaike
BIC	Critério de Informação Baysiano
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
CV	Coeficiente de Variação
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
GDE	Grau de Dependência Espacial
GEE	Gases do Efeito Estufa
IAA	Instituto do Açúcar e do Álcool
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Álcool
PCC	Permeâmetro de Carga Constante
PCD	Permeâmetro de Carga Decrescente
RMSE	Raiz Quadrada do Erro Médio
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
USDA	United State Department of Agriculture
VMS	Máxima verossimilhança

LISTA DE SIMBOLOS

g	Aceleração da gravidade
K	Coeficiente de permeabilidade
K_a	Coeficiente de permeabilidade hidráulica
K_v	Coeficiente de permeabilidade ao fluxo de vinhaça
K_{ea}	Coeficiente de permeabilidade específica da água
K_{ev}	Coeficiente de permeabilidade específica da vinhaça
ρ_p	Densidade das partículas
ρ_{ss}	Densidade do solo seco
φ	Porosidade
φ_d	Porosidade drenável
θ_s	Umidade volumétrica na saturação do solo
η	Viscosidade dinâmica
υ	Viscosidade cinemática

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

2. FUNDAMENTACAO TEORICA 17

2.1. Cana-de-açúcar e a produção sucroalcooleira no Brasil 17

2.2. Produção sucroalcooleira no Paraná 19

2.3. Legislação ambiental sobre vinhaça 20

2.4. Coeficiente de permeabilidade hidráulica do solo 22

2.5. Coeficiente de permeabilidade específica 24

2.6. Geoestatística 25

3. REVISÃO DE LITERATURA 28

3.1. Vinhaça 28

3.2. Efeitos da aplicação da vinhaça nos atributos do solo 30

3.3. Aplicações da geoestatística no estudo de propriedades físicas e dos coeficientes de permeabilidade hidráulica do solo 30

4. MATERIAL E MÉTODOS 35

4.1. Área de estudo 35

4.2. Análise laboratorial 36

4.3. Análise geoestatística 39

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 41

5.1. Atributos físicos do solo 41

5.2. Coeficientes de permeabilidade do solo 44

5.3. Geoestatística dos coeficientes de permeabilidade do solo 48

6. CONCLUSÃO 74

REFERÊNCIAS 75

APÊNDICE 85

1. INTRODUÇÃO

A biomassa, como fonte renovável de energia, ganha cada vez mais importância à medida que o esgotamento dos recursos fósseis se acentua e os problemas de poluição ambiental se agravam (GÜRKAN et al., 2016). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a queima dos combustíveis fósseis é responsável por mais 60% das emissões antrópicas dos gases do efeito estufa (GEE). Nesse sentido, o etanol se destaca como fonte alternativa capaz de suprir uma elevada demanda e contribuir com uma menor emissão de GEE (MOREIRA et al., 2016).

O Brasil é o maior produtor mundial de etanol, utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar. A monocultura para o setor energético brasileiro foi impulsionada pelo Programa PROALCOOL, que incentivava a produção de etanol e exerceu um importante papel na economia brasileira (BERNAL et al., 2017; BRASIL, 1975; PAZUCH et al., 2017). De acordo com a CONAB (2018), a produção brasileira de cana-de-açúcar totalizou 633 milhões de toneladas na safra de 2017/18, utilizada não somente para produção de etanol, mas também para a produção de açúcar e bioenergia.

No processamento da cana-de-açúcar, a indústria sucroalcooleira gera um resíduo denominado vinhaça. Devido aos níveis de colheita no país, a proporção de geração é elevada, sendo produzidos de 11 a 13 L de vinhaça para cada 1 L de etanol produzido (SADEGHI et al., 2016; DE CARVALHO et al., 2016; BERNAL et al., 2017).

O descarte inadequado da vinhaça é nocivo ao meio ambiente devido ao seu potencial de contaminação dos corpos hídricos. No Brasil, a Portaria N° 323/78 proibiu o lançamento direto ou indireto de vinhaça pelas destilarias de álcool em qualquer coleção hídrica. Segundo Lima et al. (2016), o descarte foi proibido devido à degradação aeróbia dos compostos causada pela matéria orgânica e devido a acidez, temperatura, odor e coloração.

A vinhaça apresenta nutrientes como potássio, nitrogênio, fósforo e matéria orgânica que podem justificar sua aplicação no solo (ORTEGÓN et al., 2016). Assim, a fertirrigação é uma opção para descarte da vinhaça sobre os solos de cultivo visando à ciclagem dos nutrientes e água ao solo que foram perdidos durante a colheita (FUESS; GARCIA; ZAIAT, 2018).

Nos locais onde há restrição normativa quanto à lâmina máxima anual a ser aplicada no solo, a contribuição da fertirrigação para suprir a lâmina d'água necessária para o completo ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar é desprezível. Contudo, a fertirrigação excessiva, nos locais sem restrição, pode torna-se prejudicial. Tejada e Gonzalez (2005) relatam que a composição da vinhaça pode afetar a estrutura do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas comprometendo, consequentemente, a qualidade do solo e produtividade das culturas.

A aplicação de vinhaça pode ser responsável por alterações nas propriedades físicas e químicas do solo (CHRISTOFOLETTI et al., 2013; MADEJÓN et al., 2001). Dentre estas alterações, o potássio, presente em elevada concentração na vinhaça, e que assim como o sódio, proporciona a dispersão das partículas de argila, pode causar a redução da porosidade e, consequentemente, da permeabilidade hidráulica (UYEDA et al., 2013). A permeabilidade hidráulica é uma propriedade do solo fundamental para os estudos que envolvam infiltração, drenagem, armazenamento de água, transporte de solutos, perda de fertilizantes, erosão e crescimento radicular (DE JONG VAN LIER; LIBARDI, 1999; MESQUITA; MORAIS, 2004).

Estudos sobre os efeitos da aplicação da vinhaça na permeabilidade hidráulica do solo foram realizados nos últimos anos. Contudo, os estudos não avaliam os coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo da própria vinhaça e do coeficiente de permeabilidade específica do líquido. Outro fator não considerado é a variabilidade espacial das áreas de aplicação. Assim, o estudo da dependência espacial da permeabilidade do solo ao fluxo de água e vinhaça possibilitaria, concomitantemente, a identificação de áreas vulneráveis aos impactos decorrentes de sua aplicação.

1.1. Objetivo Geral

Objetivou-se analisar os coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água e vinhaça em zonas de manejo do solo bem como a existência de padrão espacial entre esses coeficientes e demais atributos físicos do solo.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar as diferenças entre os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água e vinhaça e de seus respectivos coeficientes específicos;

- Analisar a estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça;

- Obter os mapas e padrões de variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, especificamente dos coeficientes de permeabilidade;

- Analisar as diferenças e semelhanças entre os mapas de variabilidade dos coeficientes de permeabilidade do solo e demais atributos físicos das áreas estudadas.

2. FUNDAMENTACAO TEORICA

2.1. Cana-de-açúcar e a produção sucroalcooleira no Brasil

No Brasil, a cultura da cana-de-açúcar surgiu em meados do século XVI. As primeiras mudas foram trazidas por Martim Afonso de Souza para a capitania hereditária de São Vicente, onde hoje se localiza São Paulo. Dentre os principais motivos do seu cultivo, destacam-se fatores agrícolas como a existência do solo de massapê favorável para o plantio e fatores econômicos como a valorização do açúcar no comércio europeu e a força no alicerce econômico da colonização portuguesa (MILLER, 2017; PASTELLI, 2014).

Os ciclos iniciais de expansão da cultura ocasionaram avanço da fronteira agrícola sobre áreas naturais como a Mata Atlântica (RODRIGUES; ORTIZ, 2006). Assim, a produção de cana-de-açúcar se expandiu por toda a costa do país, sendo produzida nos estados de Alagoas, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraíba, Paraná, Pernambuco e São Paulo (LOPEZ PANTOJA et al., 2016) (Tabela 1).

Tabela 1 - Produção de cana-de-açúcar nos principais estados produtores.

Estado	Área (mil ha)		Produtividade (kg ha^{-1})		Produção (mil t)	
	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19	2017/18	2018/19
Alagoas	303,8	286,2	44.916	54.673	13.646	15.647
Goiás	911,6	917,1	77.470	77.366	70.622	70.622
Mato Grosso	226,9	235,3	70.974	76.796	16.101	18.067
Mato Grosso do Sul	666,0	664,7	70.480	74.202	46.940	49.320
Minas Gerais	824,9	851,3	78.816	78.283	65.017	66.645
Paraíba	119,6	119,7	48.742	52.542	5.829	6.290
Paraná	583,7	570,3	64.207	64.251	37.477	36.640
Pernambuco	223,2	231,0	48.470	51.202	10.819	11.828
São Paulo	4.558,4	4.476,3	76.607	76.262	349.200	341.370
Total	8.729,5	8.662,3	333.645	338.512	633.262	635.510

FONTE: Boletim Cana 2º Levantamento 2018/19 (CONAB, 2018).

São Paulo destaca-se como o maior produtor nacional, responsável por aproximadamente 60% de toda a produção de cana-de-açúcar no país (IPEA, 2015). A produção brasileira totalizou 633 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra de 2017/18, sendo a estimativa mínima para safra seguinte de 635 milhões de toneladas (CONAB, 2018; UNICA, 2018).

A produção de cana-de-açúcar direcionada à geração de biocombustíveis iniciou-se em meados do século XX, quando começaram as primeiras experiências para a produção de energia. A criação do Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), em 1933, apontava para um crescente desenvolvimento dessa tecnologia. O cultivo de cana-de-açúcar para o setor energético brasileiro foi impulsionado pelo Decreto Nº 75.593/75 que instituiu o Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL) que incentivava a produção de etanol e torna-se o responsável pelo desenvolvimento pioneiro do Brasil na área de biocombustíveis (BRASIL, 1975).

O relatório Brundtland intitulado "Nosso Futuro Comum" descreve o programa PROALCOOL como um exemplo de exploração do potencial de uma fonte renovável de energia em:

> "The fuel alcohol programme in Brazil produced about 10 billion litres of ethanol from sugar-cane in 1984 and replaced about 60 per cent of the gasoline that would have been required. The cost has been estimated at $50-60 per barrel of gasoline replaced. When subsidies are removed, and a true exchange rate is used, this is competitive at 1981 oil prices. With present lower oil prices, the programme has become uneconomical. But it saves the nation hard currency, and it provides the additional benefits of rural development, employment generation, increased self-reliance, and reduced vulnerability to crises in the world oil markets" (BRUNDTLAND et al., 1987, p. 133).

Desde então, o etanol tem sido produzido em larga escala no país que se tornou referência mundial. O crescente cultivo da cana-de-açúcar direcionado à produção do álcool impulsionado pelo governo pode ser observado ao longo dos anos. Os valores de produção de etanol da safra de 2016/17 e a sua respectiva estimativa são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Produção de álcool etanol nos principais estados produtores.

Estado	Anidro		Hidratado		Total	
	(mil m^3)					
	2016/17	2017/18	2016/17	2017/18	2016/17	2017/18
Alagoas	276	219	107	112	383	331
Goiás	1.313	1.323	3.072	3.295	4.384	4.618
Mato Grosso	524	539	696	960	1.221	1.499
Mato Grosso do Sul	807	878	1.902	1.754	2.709	2.632
Minas Gerais	1.193	1.067	1.448	1.642	2.641	2.708
Paraíba	139	184	145	187	284	370
Paraná	616	570	739	699	1.355	1.269
Pernambuco	132	92	203	229	335	321
São Paulo	6.151	5.963	7.046	7.260	13.197	13.223
Total	11.589	10.419	15.665	15.669	27.254	26.088

FONTE: Relatório Unicadata (UNICA, 2018).

O potencial de produção e o aumento na demanda por etanol fazem da cana-de-açúcar uma das mais importantes culturas no cenário atual da economia na agroindústria brasileira (PASTELLI, 2014).

Além dos principais produtos oriundos da cana-de-açúcar, o bagaço e a palha também passaram a agregar valor ao mercado sucroalcooleiro, pois representam fontes de biomassa para a geração de bioenergia e para a produção de etanol de segunda geração (YAMAGUCHI et al., 2017; HOANGY et al., 2017). A cana-de-açúcar não é tratada apenas como um produto agrícola, mas como a mais importante fonte de biomassa energética brasileira (LOPEZ PANTOJA et al., 2016).

2.2. Produção sucroalcooleira no Paraná

O Paraná encontra-se entre os cinco maiores produtores brasileiros de cana-de-açúcar. A produtividade paranaense representa aproximadamente 6% da produção brasileira (CONAB, 2018; UNICA, 2018).

A produção de cana-de-açúcar no estado concentra-se principalmente nas regiões noroeste e nordeste (Figura 1). Os principais municípios produtores de cana-de-açúcar são Cianorte, Cornélio Procópio, Jacarezinho, Londrina, Maringá, Paranavaí e Umuarama.

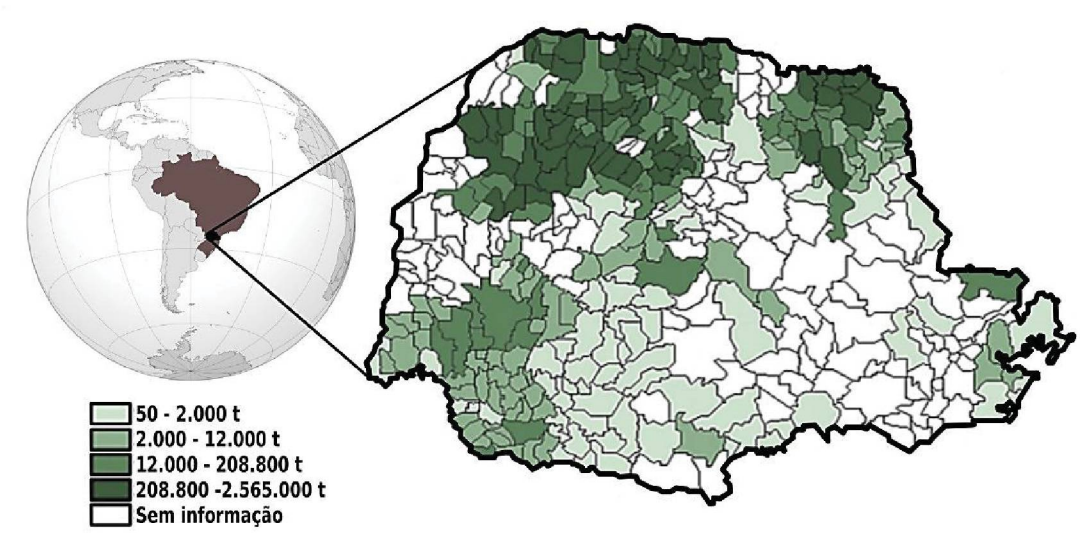


Figura 1 - Distribuição dos produtores de cana-de-açúcar no Paraná.
Fonte: Adaptado: De Souza e De Morais (2015).

De acordo com Severino et al. (2008) a cana-de-açúcar foi a cultura que mostrou maior expansão em área cultivada nos últimos anos no Paraná.

Contudo, segundo o autor, a cultura ainda apresenta limitações por nematóides decorrentes das favoráveis condições edafo-climáticas.

Já com relação à produção sucroalcooleira paranaense, as principais usinas encontram-se nos municípios de Araucária, Astorga, Bandeirantes, Cidade Gaúcha, Colorado, Engenheiro Beltrão, Florestópolis, Ibaiti, Iguatemi, Ivaté, Jacarezinho, Jandaia do Sul, Jussara, Marialva, Moreira Sales, Morretes, Nova América da Colina, Nova Londrina, Paranacity, Perobal, Porecatu, Rondon, Santo Inácio, São Carlos do Ivaí, São Pedro do Ivaí, São Tomé, Tapejara, Terra Rica, Umuarama e Ventania (NOVA CANA, 2016).

2.3. Legislação ambiental sobre vinhaça

A disposição indiscriminada e ambientalmente inadequada da vinhaça em corpos hídricos recebeu atenção nos últimos anos devido aos problemas associados a essa prática. No Brasil, a Portaria N° 323/78 proibiu o lançamento direto ou indireto da vinhaça, em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool. O descarte da vinhaça nos corpos d'água foi proibido devido à degradação aeróbia dos compostos causada pela matéria orgânica bem como pela acidez, temperatura, odor e coloração (LIMA et al., 2016). A Resolução CONAMA 002/86 determina o controle da poluição causada pelos efluentes das destilarias e águas de lavagem da cana-de-açúcar. Ao passo que, a Portaria Nº 158/80 determina que destilarias que não possuam áreas para a disposição da vinhaça, poderão adotar os critérios e padrões estabelecidos para o lançamento de efluentes industriais.

De acordo com a Resolução CONAMA 357/05 alterada pela Resolução CONAMA 430/11 que dispões sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, o lançamento em corpos hídricos só poderá ocorrer após o seu devido tratamento. Como a composição da vinhaça exige tratamento e como esse resíduo é gerado em grande quantidade, o tratamento pode se tornar oneroso. Assim, a fertirrigação é uma opção para descarte da vinhaça sobre os solos de cultivo visando à ciclagem dos nutrientes e água ao solo que foram perdidos durante a colheita (FUESS; GARCIA; ZAIAT, 2018).

No âmbito federal ainda não há legislação restritiva em relação à aplicação de vinhaça no solo. Mas na esfera estadual, São Paulo foi pioneiro

apresentando a Norma Técnica P4.231/05 que define os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça em solo agrícola, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar e determina aos estabelecimentos a apresentação do Plano de Aplicação. São Paulo também foi pioneiro ao apresentar a Portaria CTSA Nº 01/05 como legislação específica referente aos prazos e procedimentos para a impermeabilização de tanques de armazenamento de vinhaça e de canais mestres ou primários já instalados, de uso permanente, para a distribuição da vinhaça destinada à aplicação no solo.

O Paraná não apresenta legislação específica referente à aplicação da vinhaça no solo. Sob este cenário, a legislação estadual Portaria Nº 239/10 estabelece critérios, prazos e procedimentos para a impermeabilização das lagoas de armazenamento e canais de transporte da vinhaça e o Decreto Nº 10.068/14 que estabelece critérios, prazos e procedimentos para adequação ambiental das usinas de beneficiamento de cana-de-açúcar.

Contudo, os estados como o Paraná, que não possuem legislação restritiva à aplicação de vinhaça no solo podem seguir a Resolução CONAMA 375/06, que define os critérios e procedimentos para uso agrícola de lodos e seus derivados, determinando a quantidade, frequência e monitoramento destas aplicações. Os critérios devem respeitar que a aplicação máxima anual em toneladas por hectare não deverá exceder o quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura e o disponível no lodo ou derivado que será aplicado, a elevação de pH causada pela aplicação e os limites de carga total teórica acumulada quanto à aplicação de substâncias inorgânicas. As substâncias inorgânicas que possuem limites definidos nesta Resolução são Ar, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Se e Zn.

Apesar do potássio não limitado na legislação, é preciso observar suas concentrações. O potássio pode promover a dispersão das partículas de argila, provocando assim, a redução do espaço poroso do solo que, por sua vez, pode reduzir a permeabilidade hidráulica (UYEDA et al., 2013).

2.4. Coeficiente de permeabilidade hidráulica do solo

A permeabilidade hidráulica é uma propriedade que representa a capacidade do meio poroso em permitir o movimento da água entre dois pontos nesse meio, pela ação do gradiente de potencial hidráulico (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015). O conhecimento do coeficiente de permeabilidade hidráulica na compreensão do movimento da água em um meio poroso é fundamental para os estudos relacionados à agricultura, conservação e preservação do meio ambiente. Werisch e Muller (2017) descrevem a permeabilidade como uma das propriedades de grande relevância para estudos do deslocamento de água e substâncias químicas no solo.

O coeficiente foi descrito por Henry Darcy em 1856, em um experimento de infiltração vertical de água em uma coluna de areia grossa e outra de areia fina saturadas de água. A coluna de areia grossa apresentou maior facilidade de permitir o movimento da água quando comparado à coluna de areia fina. Como o experimento foi conduzido com fluxo de água em regime laminar para tratar da capacidade permeável do meio, Darcy definiu essa constante como coeficiente de permeabilidade hidráulica. Muitos estudos utilizam o termo *condutividade*, mas em respeito ao estudo de Henry Darcy, nesta pesquisa, será utilizado o conceito de *permeabilidade*.

Com a experimentação foi verificado que a densidade de fluxo é proporcional à área da seção e à variação do potencial hidráulico, e inversamente proporcional ao comprimento do meio, descrita em

$$q = \frac{V}{A \cdot t} = K \frac{dh}{ds} \qquad (1)$$

em que q é a densidade de fluxo (m s^{-1}), K é o coeficiente de permeabilidade hidráulica do solo saturado (m s^{-1}), h é a energia da água por unidade de peso (m), A é a área da seção (m^2) e s é a coordenada de posição (m).

O valor máximo do coeficiente ocorre quando o solo está saturado e é definido como permeabilidade hidráulica do solo saturado. Nesta condição, a permeabilidade depende principalmente da forma e continuidade porosa que pode variar localmente bem como ao longo do perfil e orientação do solo.

Observando a equação descrita, percebe-se que o coeficiente K é uma propriedade que possui unidade de velocidade e que possui comportamento

exponencial ao conteúdo de água (BRITO, 2010). Assim, como a água presente no solo encontra-se nos poros, um solo permeável apresenta poros grandes e interconectados e solos menos permeáveis apresentam poucos poros, poros muito pequenos ou oclusos e não conectados.

Os poros podem ser divididos em macroporos responsáveis pela aeração e drenagem e em microporos encarregados da retenção de água através dos fenômenos de capilaridade, redistribuição e adsorção (DEXTER et at., 2004). Conclui-se então, que geometria, disposição, quantidade, tamanho, orientação e continuidade porosa são fatores importantes na compreensão da permeabilidade (BRITO, 2010; MESQUITA; MORAIS, 2004).

A granulometria que expressa distribuição das partículas em classes encontra-se relacionada a valores de permeabilidade. De acordo com a USDA, as partículas são divididas em areia (2 – 0,05 mm), silte (0,05 – 0,002 mm) e argila (< 0,002 mm). As diferentes frações que compõem o solo podem apresentar valores distintos de permeabilidade como demostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores do coeficiente de permeabilidade hidráulica do solo.

Fração do solo	K ($m\ s^{-1}$)
Argila	$<10^{-9}$
Silte	$10^{-6} \sim 10^{-9}$
Areia fina	10^{-5}
Areia média	10^{-4}
Areia grossa	10^{-3}

Fonte: Pinto (2002)

A determinação da permeabilidade hidráulica pode ser feita em campo ou em laboratório. No campo pode ser realizado pelo método de perfil instantâneo. Em laboratório, em condição de saturação, pode ser determinada pelo método do permeâmetro de carga constante (PCC) ou pelo método do permeâmetro de carga decrescente (PCD).

O método PCC é indicado para amostras de solo com alta permeabilidade, com valores superiores a $2 \cdot 10^{-3}$ m s^{-1} (LIBARDI, 2012), e está descrito na equação

$$K = \frac{q}{(\Delta h / \Delta z)} = \left[\frac{V}{A \cdot t \cdot (\Delta h / \Delta z)} \right] \qquad (2)$$

em que K é a constante de permeabilidade hidráulica do solo saturado (m s^{-1}), q é a densidade de fluxo (m s^{-1}), A é a área do anel volumétrico (m^2), t é o tempo (s), e $\Delta h/\Delta z$ é o gradiente hidráulico aplicado na amostra (m/m).

O método PCD é recomendado para amostras de solo com baixa permeabilidade. Essas amostras apresentam adensamento de partículas que resultam em valores de K inferiores a $2 \cdot 10^{-6}$ m s^{-1} (LIBARDI, 2012), assim a permeabilidade é obtida utilizando-se o PCD e a Lei de Darcy (1856) na forma

$$K = \frac{L}{\Delta t} \ln \left[\frac{(h_{(t=0)} + L)}{(h_{(t=t)} + L)} \right] \quad (3)$$

em que K é permeabilidade hidráulica do solo saturado (m s^{-1}), L é altura do anel amostrador (m), Δt é o intervalo de tempo (s), $h_{(t=0)}$ é a carga hidráulica em t=0, $h_{(t=t)}$ é a carga hidráulica em t=t e L é a altura da amostra (m).

2.5. Coeficiente de permeabilidade específica

A permeabilidade específica ou intrínseca se refere a uma propriedade que representa a geometria do espaço poroso quanto ao fluxo de um determinado líquido no solo (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015). A permeabilidade específica (K_e) é determinada por meio da relação dos valores da permeabilidade hidráulica do solo descrita em

$$K_e = \frac{K \cdot \eta}{\rho \cdot g} = \frac{K \cdot \upsilon}{g} \quad (4)$$

em que K_e é a constante permeabilidade específica (m^2), K é a constante de permeabilidade hidráulica do solo saturado (m s^{-1}), η é a viscosidade dinâmica do fluido (Pa s), ρ é a massa específica (kg m^{-3}), g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}) e υ é a viscosidade cinemática do fluido (m^2 s^{-1}).

O coeficiente K_e considera além da natureza do solo, a massa específica e viscosidade do fluido, que são funções da temperatura e pressão . A densidade e a viscosidade da água são propriedades que podem ser consideradas constantes (os valores de permeabilidade hidráulica alteram-se cerca de 3% para mudanças de 1ºC na temperatura, mas este efeito é ainda menor para intervalos normais de temperatura). Contudo, o conhecimento do

coeficiente de permeabilidade específica para o estudo com diferentes líquidos é necessário. Para solos argilosos, a permeabilidade específica é também dependente do líquido devido às cargas elétricas e da elevada área superficial presentes na argila (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015).

Os coeficientes de permeabilidade, como parâmetro de modelagem da dinâmica do fluxo de água e transporte de solutos no solo, apresentam grande variabilidade no espaço e no tempo e devem ser estudados (RIENZNER; GANDOLFI, 2014; NAGY et al., 2013).

2.6. Geoestatística

O valor associado a uma posição no espaço é conhecido como variável regionalizada. A dependência espacial de uma variável regionalizada é fundamental no diagnóstico espacial de uma matriz estudada. Nesse sentido, diferentes métodos geomatemáticos podem ser utilizados para variáveis regionalizadas, e dentre eles, a geoestatística tem se destacado. Contudo, a geoestatística trata-se de um dos principais eixos da estatística espacial que compreende também a variação discreta e o processo pontual (MATHERON, 1970; DIGGLE; RIBEIRO JR., 2007).

A geoestatística surgiu como ferramenta para solucionar problemas relacionados à predição espacial em uma área de mineração devido à necessidade de compreender a variação das concentrações de ouro na África do Sul realizadas pelo engenheiro Daniel Krige (MATHERON, 1970).

Assim, na geoestatística, uma característica (Z) variando continuamente no espaço está em função de suas coordenadas geográficas e é representada por $Z(x_i)$ em que x_i denota a coordenada geográfica em duas dimensões. O conjunto das variáveis aleatórias $Z(x_n)$ constitui um processo estocástico e a representação da estrutura de correlação destas variáveis aleatórias no espaço, quando x varia, é dada pelo semivariograma.

O semivariograma é construído considerando a distância *h* que separa dois pontos. A avaliação da dependência espacial dos dados por meio da construção de um semivariograma que é determinado por meio de um estimador. O estimador de Matheron (eq. 5) e o estimador de Cressie (eq. 6), também denominado estimador robusto são descritos em

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (5)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[\frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} | Z(X_i + h) |^{\frac{1}{2}} \right]^4}{0,457 + \frac{0,494}{N(h)}} \right\} \quad (6)$$

em que $\gamma(h)$ é a função dos valores correspondentes de h ou semivariância estimada, N(h) é o número de pares de valores observados e $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ são observações nas posições x_i e x_i+h separados por uma distância h.

O estimador clássico de Matheron é amplamente empregado e aplica-se para a grande maioria dos dados, enquanto o estimador de Cressie é utilizado principalmente para dados com valores discrepantes ou *outliers*.

Assim, o semivariograma descreve a relação entre a variância dos dados e a distância apresentada por eles, ou seja, possibilita caracterizar a estrutura, comportamento e magnitude da continuidade espacial da variável analisada (OLIVEIRA, 2003). Segundo Landim (2006), o semivariograma expõe o tamanho da zona de influência de cada amostra e a continuidade através do efeito pepita que demonstram os erros de medição ou de ausência de dados suficientes. Essa relação é demonstrada na Figura 2.

O semivariograma experimental pode assumir diversas formas em função da distribuição dos dados e da distância de amostragem. Graficamente, o semivariograma inicia-se pelo seu valor nomeado efeito pepita (C_o) e cresce à medida que se elevam as distâncias entre os pares de pontos amostrais até a distância nomeada alcance (a) que revela a distância em que os pontos são espacialmente dependentes. A partir do alcance, o semivariograma tende a se estabilizar no valor nomeado patamar (C_o+C_1) ou (C). O patamar descreve a distância limite na qual as amostras ainda estão correlacionadas ou espacialmente dependentes. Na Figura 2, ainda é possível observar a variância estrutural ou contribuição (C_1) que revela a diferença entre os valores de patamar e efeito pepita encontrados.

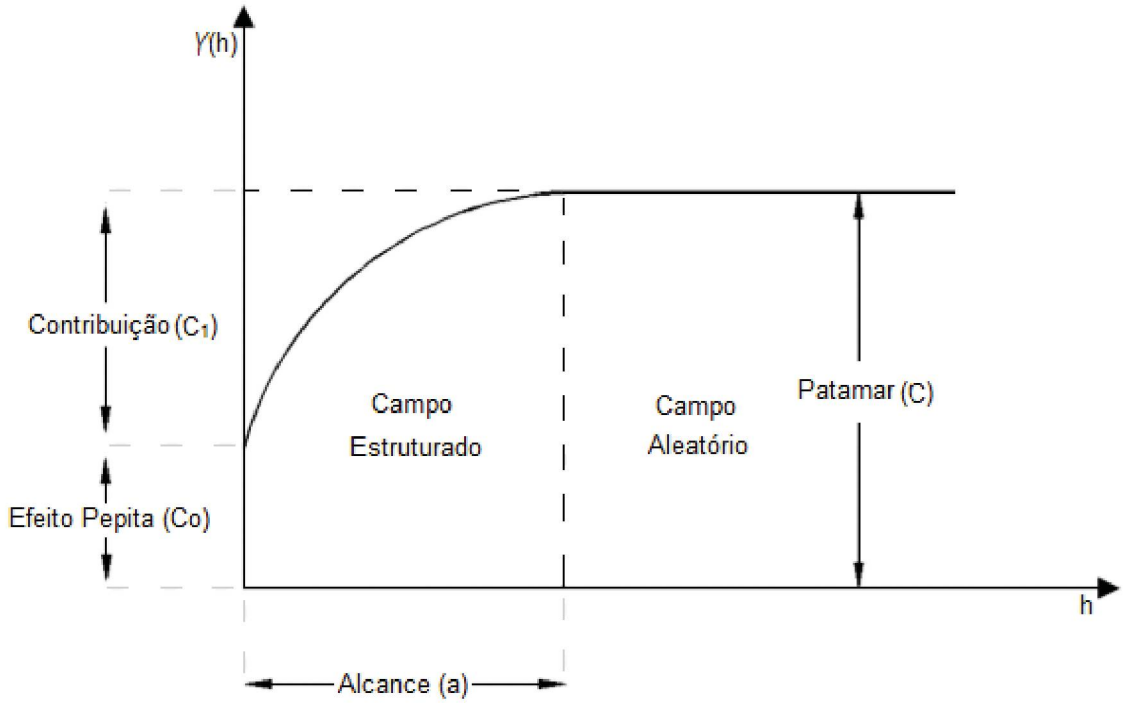


Figura 2 - Semivariograma experimental

A função *γ(h)* depende da direção e magnitude do vetor *h*. Nesse sentido, quando o valor do semivariograma depender da direção, existe a condição de anisotropia nos dados (LANDIM, 2006). Além da anisotropia, é preciso identificar o processo estocástico que ocorre quando o evento é indeterminado, com origem em eventos aleatórios e pode ser definido como um grupo de variáveis aleatórias que variam continuamente no espaço e representam a evolução de um sistema (OLIVEIRA, 2003).

As variáveis são normalmente dependentes e estão compreendidas em um mesmo espaço de probabilidade. Contudo, é usual a análise de apenas uma observação deste fenômeno. Nesse contexto, a geoestatística aproveita todos os pares de observações separados pelo vetor de distância *h* como medidas repetidas da variável aleatória analisada. Desta forma é necessário considerar que a variável regionalizada é aleatória localmente para cada ponto e para cada par de pontos distanciados em *h* apresentando correlação através da estrutura espacial (YAMAMOTO; LANDIM, 2015).

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Vinhaça

A vinhaça, vinhoto ou restilo é obtida durante o processo de destilação do líquido fermentado pela biomassa para a produção de açúcar e/ou etanol, a partir de culturas de amido e material celulósico (CETESB, 2005).

A proporção de geração deste resíduo é elevada, sendo produzidos de 11 a 13 L de vinhaça para 1 L de etanol (SADEGHI et al., 2016). Devido aos níveis de produção no país, este resíduo, consequentemente, é gerado em grande quantidade (DE CARVALHO et al., 2016; BERNAL et al., 2017). De acordo o Relatório Unicadata, a produção de etanol da safra de 2017/18 foi de cerca de 28 bilhões de litros, gerando assim, aproximadamente 336 bilhões de litros de vinhaça (UNICA, 2018). Cada litro de vinhaça apresenta aproximadamente 93% de fase líquida e 7% de fase sólida, sendo essa em sua maioria orgânica. Por se tratar de uma suspensão com sólidos orgânicos, a vinhaça apresenta elevada DBO, responsável pelo seu potencial poluidor.

Os elementos presentes na vinhaça são principalmente o potássio e nitrogênio; enquanto cálcio, magnésio, sódio, fósforo e enxofre estão em menores concentrações (SEIXAS et al., 2016). A vinhaça apresenta elevada acidez e temperatura, conteúdo orgânico, odor desagradável e coloração marrom escuro (CHRISTOFOLETTI et al., 2013). A coloração é atribuída, principalmente, ao pigmento melanoidina e a presença de compostos fenólicos, açúcares e melanina (KALAVATHI et al., 2001). De acordo com Seixas et al. (2016) estes são compostos recalcitrantes, e em virtude de suas propriedades antioxidantes, podem causar toxicidade aos microrganismos quando a vinhaça é submetida ao tratamento biológico convencional.

As concentrações destes elementos na vinhaça são dependentes da composição do mosto. O mosto pode ser dividido em: mosto de melaço e mosto de caldo. O mosto de melaço é obtido na produção de açúcar, enquanto o mosto de caldo é obtido na produção de álcool. Ainda há o mosto misto obtido na mistura dos mostos.

Além disso, a vinhaça apresenta variação em sua composição química decorrente também do processo de fermentação, tipo de levedura, aditivos, qualidade da água, equipamentos e a limpeza destes, sistema de produção,

armazenamento e principalmente da natureza e composição da matéria-prima (CHÁVEZ RODRÍGUEZ, 2010).

Assim, na Tabela 4 são apresentadas diferentes composições químicas da vinhaça encontradas na literatura.

Tabela 4 - Composição química da vinhaça por diferentes autores.

Autores	K	P	Ca	Na	Mg	N	DBO
				(mg L^{-1})			
Barros et al. (2010)	1392	175	728	110	29	-	21275
Brito et al. (2009)	1123	-	352	113	16	-	5000
Correia et al. (2017)	3401	207	671	114	264	1,5	7941
Da Silva et al. (2012)	2934	-	-	51	-	-	10974
Del Nery et al. (2018)	1470	102	540	277	237	441	15300
Lyra et al. (2003)	3050	150	600	325	310	425	11000
Martínez et al. (2018)	3970	105	2950	-	640	595	19800
Melo et al. (2017)	21700	700	2700	-	1200	-	-
Moro et al. (2013)	1500	96	339	-	400	296	7856
Oliveira et al. (2017)	6200	-	-	-	-	100	18600
Paulino et al. (2002)	2400	120	1100	-	240	28	-
Rocha et al. (2012)	2035	61	515	52	226	357	76949
Silva et al. (2014)	18894	-	58	759	424	-	-
Sydney et al. (2018)	2386	105	791	20	203	2	8358

Os impactos da aplicação da vinhaça dependem da composição química, volume e periodicidade de aplicação. Contudo, devido aos teores de matéria orgânica, DBO, DQO, potássio, nitrogênio, temperatura e baixo pH tornam o seu descarte inadequado nocivo ao meio ambiente (RODRIGUES et al., 2016). O descarte impróprio da vinhaça pode ocasionar impactos locais como mortandade de peixes, interrupção do abastecimento público de água , proliferação excessiva de insetos, eutrofização de corpos hídricos, problemas de saúde pública e crises econômicas locais para dependentes da pesca (REZENDE, 1984). De acordo com Freire e Cortez (2000) o potencial poluidor da vinhaça em corpos hídricos pode ser até cem vezes maior que o do esgoto doméstico.

No solo, a aplicação da vinhaça excessivamente pode contribuir para a elevação das concentrações de sais no solo ocasionando o processo de salinização, bem como pode contribuir para a poluição dos corpos hídricos próximos ao local de aplicação. Logo, a fertirrigação não é uma alternativa que deve ser aplicada arbitrariamente para todas as situações.

3.2. Efeitos da aplicação da vinhaça nos atributos do solo

A vinhaça pode elevar temporariamente o pH do solo devido a elevada DBO. O consumo dos íons de H^+ ocorre durante a decomposição da matéria orgânica (DOELSCH et al., 2009). Fuess e Garcia (2014) descrevem que vinhaça quando não tratada apresenta efeito acidificante e aos níveis de nitrato que podem reduzir a concentração de oxigênio, tornando a decomposição anaeróbia. Ao mesmo tempo em que a elevada turbidez e baixo pH da vinhaça podem apresentar-se como fatores negativos para a biodegradação.

Diferentes autores relatam efeitos nos atributos químicos do solo que podem ser observados sob a capacidade de troca de cátions, saturação por potássio, soma das bases e alteração dos valores de macro e micronutrientes.

Christofoletti et al. (2013) relatam que o pH, a condutividade elétrica e elementos químicos presentes na vinhaça podem causar graves alterações nos corpos hídricos e ocasionar efeitos adversos sobre o solo e sobre a biota presente. São exemplos destes efeitos no solo, os processos de salinização, lixiviação, redução da alcalinidade, desequilíbrio de nutrientes, aumento da fitotoxidade e odor desagradável na lavoura (MORAES et al., 2015).

Freire e Cortez (2000) descrevem que de acordo com a quantidade e tempo de contato da vinhaça no solo, observam-se efeitos indiretos sobre a aglutinação das partículas, decorrente da mucilagem excretada pelos microrganismos na decomposição. Contudo, efeitos diretos de uma única aplicação na aglutinação podem ser desprezíveis, uma vez que a quantidade de matéria orgânica presente na vinhaça é menor que no solo. Tejada e Gonzalez (2005) relatam que a adição de vinhaça no solo pode afetar principalmente as propriedades físicas e causar perdas de solo por erosão decorrente da elevada presença de cátions monovalentes.

3.3. Aplicações da geoestatística no estudo de propriedades físicas e dos coeficientes de permeabilidade hidráulica do solo

O estudo da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo é fundamental na compreensão dos processos que regem as práticas de manejo e uso adequado do solo, e assim, é objeto de interesse de muitos autores.

Dentre os primeiros estudos de variabilidade espacial na ciência do solo, encontram-se os de Nielsen et al. (1973), Hajrasuliha et al. (1980), Burgess e Webster (1980), Gajem (1980) e Vieira et al. (1981).

Tsegaye e Hill (1998) estudaram a variabilidade espacial das propriedades de tamanho de partícula, densidade de solo, resistência, tamanho médio dos poros e permeabilidade hidráulica para as camadas 6 - 9 cm e 27 - 30 cm em uma área localizada em Maryland nos EUA. O estudo concluiu que as propriedades de variabilidade espacial de baixa a moderada dependência exigem menos amostras em campo. Contudo, para a análise da permeabilidade hidráulica do solo saturado, um maior número de amostras para sua estimação se fez necessária.

Iqbal et al. (2005) determinaram o grau de variabilidade espacial das propriedades físicas do solo, a estrutura de variância e os modelos teóricos para solos aluviais de uma planície inundável localizada em Mississipi nos EUA. As propriedades analisadas foram densidade de solo, fração granulométrica, permeabilidade e umidade volumétrica para três horizontes. Os resultados sugerem que o componente estocástico espacialmente dependente era predominante em relação ao efeito da pepita. A faixa de 400 m seria adequada para a detecção de estrutura espacial de da fração granulométrica e de 100 m para propriedades hidráulicas do solo e densidade do solo.

Montenegro e Montenegro (2006) analisaram a variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e permeabilidade hidráulica de solos em uma planície aluvial. Houve correlação espacial entre textura e permeabilidade bem como um potencial de lixiviação e susceptibilidade à salinização nestas áreas.

Duffera et al. (2007) pesquisaram a variabilidade espacial das propriedades de textura, umidade, conteúdo de água disponível para plantas, permeabilidade hidráulica, densidade de solo e porosidade para uma área costeira localizada em Kinston, Carolina do Norte nos EUA. As propriedades de fração granulométrica, umidade e conteúdo de água disponível para plantas foram ajustadas ao modelo esférico, enquanto porosidade, densidade de solo e permeabilidade hidráulica foram ajustados ao modelo linear. As propriedades de permeabilidade hidráulica saturada, silte, densidade de solo e porosidade apresentaram fraca dependência espacial.

Souza et al. (2009) investigaram as propriedades físicas nas camadas de 0,0 - 0,2; 0,2 - 0,4 e 0,4 - 0,6 m e as propriedades mineralógicas para a camadas de 0,6 - 0,8 m de uma área com plantio de cana-de-açúcar localizada em Guariba-SP. Os valores de alcance foram superiores para as propriedades de densidade do solo e resistência à penetração e inferiores para macroporosidade e permeabilidade hidráulica.

Brito (2010) estudou a variabilidade espacial dos parâmetros da equação que correlaciona a permeabilidade hidráulica com o conteúdo de água no solo e da permeabilidade do solo ao ar para uma área localizada em São Paulo. Os mapas de predição apontaram que a permeabilidade hidráulica do solo estava correlacionada diretamente com o conteúdo de água do solo.

Scherpinski et al. (2010) avaliaram a variabilidade espacial da permeabilidade hidráulica do solo saturado e infiltração da água de uma área de 20 ha com intensa produção agrícola. Os resultados do estudo demonstram uma dependência espacial dos atributos.

Adhikari et al. (2012) investigaram as propriedades hidráulicas do solo através de testes de infiltração *in situ* para uma área localizada em Las Cruces no México sob aplicação contínua de águas residuárias. Os mapas das propriedades apresentaram dependência espacial de curto e longo alcance.

Lewis et al. (2012) exploraram a variabilidade espacial da densidade do solo e dos coeficientes de permeabilidade hidráulica horizontal (K_h) e vertical (K_v) para em uma área localizada na Irlanda. Os resultados demonstram que os valores de K_h foram aproximadamente o dobro do K_v e que as variações espaciais são fundamentais na análise de fluxo na bacia hidrográfica.

Wang e Shao (2013) avaliaram as propriedades de permeabilidade hidráulica, porosidade, porosidade capilar e densidade do solo para a bacia hidrográfica de Loess Plateau na China. A permeabilidade hidráulica apresentou forte dependência espacial ajustada ao modelo esférico. A porosidade capilar foi ajustada ao modelo exponencial e os dados de densidade do solo e porosidade ao modelo gaussiano.

Akis (2015) investigou a variabilidade espacial da permeabilidade hidráulica e do teor de sal sob influência de um lençol freático não drenado na Turquia. Os valores de permeabilidade do solo diminuíram constantemente enquanto o teor de sal aumentou com a profundidade.

Ganasri e Dwarakish (2015) analisaram a variabilidade espacial da fração granulométrica, permeabilidade hidráulica, matéria orgânica e densidade do solo para duas profundidades na bacia do rio Netravati de Karnataka, na Índia. Os semivariogramas foram ajustados e a interpolação foi realizada para três métodos distintos de krigagem. Os resultados da pesquisa demonstram que os métodos de krigagem apresentaram erros de predição aproximados. Os dados apresentaram forte e média dependência espacial.

Huang et al. (2016) analisaram a variabilidade espacial da permeabilidade hidráulica de duas áreas: atividade de petróleo e mineração ambas em recuperação. A permeabilidade hidráulica foi estimada através de da permeabilidade ao ar e estes foram comparados aos valores medidos com permeâmetro de Guelph. Os valores foram semelhantes a um nível de confiança de 0,01. Os coeficientes apresentaram fraca dependência espacial, sendo o alcance prático de 158 m para de área de petróleo.

Moradi et al. (2016) estudaram a variabilidade espacial e correlação dos parâmetros de Van-Genucthen e permeabilidade hidráulica saturada de um solo sob cultivo de cana-de-açúcar localizado em Khuzestan no Irã. A permeabilidade hidráulica saturada apresentou ajuste ao modelo de efeito pepita puro. De acordo com os autores, o resultado encontrado para a permeabilidade hidráulica pode estar relacionado à heterogeneidade da área e ao número reduzido de amostras no experimento.

Pahlavan-Rad e Akbarimoghaddam (2018) pesquisaram a variabilidade espacial da fração textural e do pH na influência da estrutura, fertilidade, permeabilidade hidráulica, infiltração e erosão do solo. O interessante do estudo é que a distância do rio foi a variável ambiental mais relevante na predição, sendo o maior teor de areia próximo ao rio, enquanto a argila e pH aumentaram com a distância do rio.

Com relação à variabilidade espacial dos efeitos da aplicação da vinhaça nos coeficientes de permeabilidade ao fluxo da vinhaça, não foram encontrados estudos. A variabilidade espacial da aplicação da vinhaça foi investigada para o potássio (CARVALHO et al., 2014), relação entre matéria orgânica e nematoides (BARROS et al., 2017), a textura, densidade de solo, porosidade e umidade (COSTA et al., 2013), capacidade de troca de cátions, capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça, capacidade estimada,

potássio, matéria orgânica, argila, classe de solo e relevo (PELUCO et al., 2013) e da variabilidade espaço-temporal da permeabilidade elétrica em águas subterrâneas sob aplicação de vinhaça no solo (SILVA et al., 2014).

Muitos autores investigaram os efeitos da aplicação da vinhaça, mas não no contexto espacial ou avaliando a permeabilidade ao fluxo da vinhaça. Dentre eles, destacam-se os estudos dos efeitos da aplicação de vinhaça na permeabilidade hidráulica (UYEDA et al., 2013), na microbiologia (YANG et al., 2013) e nas propriedades físico-químicas do solo a longo prazo (JIANG et al., 2012). Os estudos não apresentam as diferenças entre os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água e vinhaça ou a estimativa de um coeficiente ao fluxo da vinhaça, tão pouco avalia os coeficientes no contexto geoespacial.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados no presente estudo foram coletados para compor a pesquisa realizada por Rocio (2015) no Núcleo de Atividades em Engenharia de Biossistemas (NAEB) do Setor de Ciências Agrárias (SCA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A descrição das coletas e os procedimentos laboratoriais estão apresentados nos subitens a seguir:

4.1. Área de estudo

O estudo foi realizado em uma propriedade localizada no município de Morretes-PR (Figura 3). A região apresenta altitude média de 800 m, clima tipo Cfa subtropical úmido, na classificação de Koppen-Geiger, com temperatura média de 18ºC e precipitação média do mês mais seco acima de 60 mm.

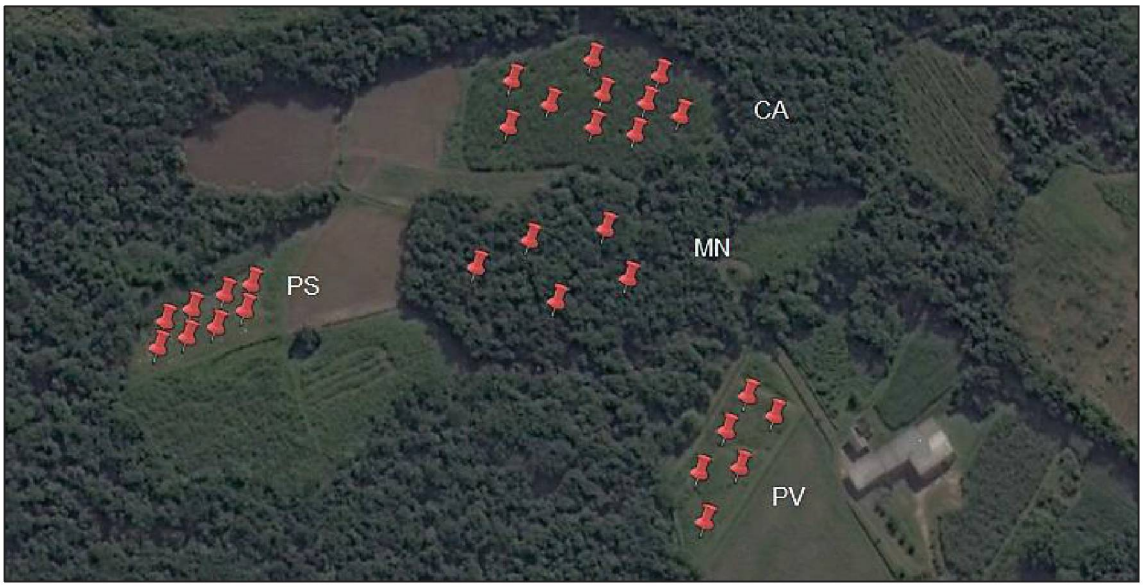


Figura 3 - Amostragem da área de estudo.
Fonte: Google Earth (2018)

O local de estudo foi dividido em quatro subáreas de acordo com as práticas de manejo do solo em: plantio de cana-de-açúcar (CA), pousio de dois anos (PS), mata nativa (MN) e pousio de três anos com aplicação de vinhaça (PV). As informações de cada área de coleta são descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Densidade amostral, altitude e tamanho das áreas estudadas.

Sigla	Manejo	Nº pontos	Nº amostras	Altitude (m)	Área (m²)
CA	Cana-de-açúcar	20	60	802	6285
PS	Pousio sem aplicação	16	48	800	5608
MN	Mata nativa	10	30	794	4866
PV	Pousio com aplicação de vinhaça	12	36	789	2889

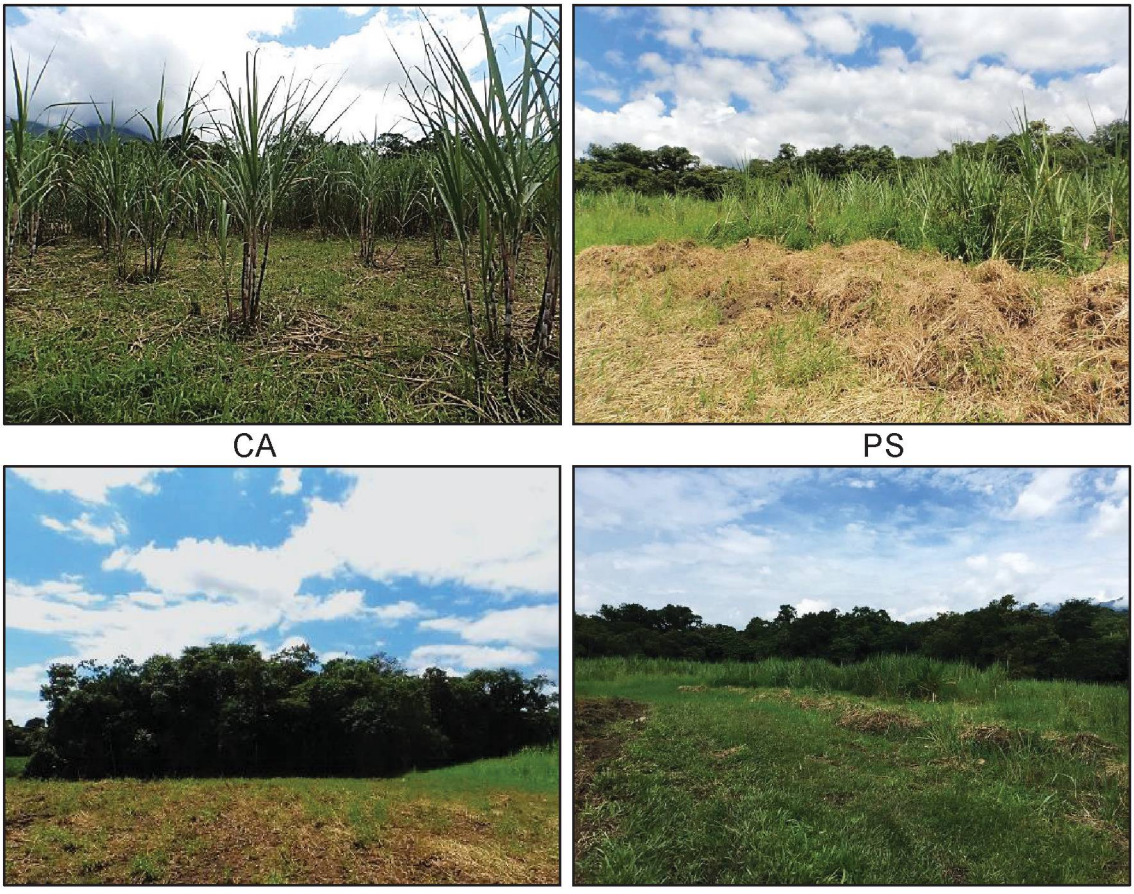


Figura 4 - Local de coleta do solo dos diferentes manejos estudados.
Fonte: Rocio (2015)

Para cada área foram coletadas amostras indeformadas de solo em anéis metálicos, sendo 29 amostras na camada de 0 – 20 cm e 29 amostras na camada de 20 – 40 cm, totalizando-se 58 amostras indeformadas. Para cada ponto de coleta da coordenada geográfica e da amostra indeformada de solo, coletaram-se três amostras deformadas.

A dimensão média dos cilindros utilizados na coleta de solo não deformado é de 4,71 cm de diâmetro, 3,48 cm de altura e 60,78 cm^3. As medidas do anel foram utilizadas para cálculo da densidade de solo seco.

4.2. Análise laboratorial

As amostras deformadas de solo foram utilizadas para análise de textura, densidade de solo seco e densidade das partículas. A análise de textura foi realizada pelo método do densímetro para os porcentuais de areia, silte e argila de acordo com o tempo de sedimentação; a densidade do solo

seco pelo método do anel volumétrico, por meio da relação de massa do solo seco e o volume total; e, a densidade das partículas pelo método do balão volumétrico, onde é medido o volume de álcool requerido pela massa de solo.

Os valores de porosidade (φ) foram determinados a partir da relação entre densidade das partículas e densidade do solo seco. Adicionalmente, os valores de φ foram comparados aos valores da umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s). Assim, a porosidade é expressa em

$$\varphi \approx 1 - \frac{\rho_{ss}}{\rho_p} \quad (7)$$

em que ρ_{ss} é a densidade de solo seco e ρ_p é a densidade das partículas.

As amostras indeformadas foram empregadas para obtenção da permeabilidade (K) ao fluxo de água e vinhaça, da permeabilidade específica (K_e) e dos valores de microporosidade e macroporosidade.

Os coeficientes de permeabilidade do solo foram obtidos pelo método do permeâmetro de carga constante percolando água e vinhaça. As amostras permaneceram na condição de saturação até o valor de massa constante. Após obter o fluxo constante no permeâmetro, iniciaram-se as medições. Os coeficientes foram calculados pela equação

$$K = \frac{q}{(1 + h/L)} \quad (8)$$

em que K é o valor de permeabilidade do solo saturado (m s^{-1}), q é a densidade de fluxo (m s^{-1}), h é a carga constante aplicada (m) e L é altura do anel amostrador (m).

A massa específica da vinhaça foi obtida pela razão entre sua massa e volume enquanto viscosidade cinemática pelo copo Ford (1986) pela equação

$$\upsilon = 2{,}388 \cdot t - 0{,}007 \cdot t^2 - 57{,}008 \quad (9)$$

em t é o tempo (s) e υ é a viscosidade cinemática (m^2 s^{-1}).

A composição química da vinhaça foi determinada por espectrometria de emissão atômica e os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química da vinhaça.

Al	Ba	Ca	Co	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Pb	Si	Zn
- - - - - - - - - - - - (mg L^{-1}) - - - - - - - - - - - -												
0,8	0,3	161,9	0,1	0,1	11,6	273,4	16,2	4,7	13,5	0,2	24,9	0,3

Os valores de potássio encontram-se dentro do intervalo encontrado pelos autores citados na Tabela 3 e abaixo do valor reportado por Freitas et al. (2017) de 1582,4 mg L^{-1}. Há uma predominância de potássio, cálcio, silício, magnésio, fósforo e ferro, respectivamente.

Com o valor de permeabilidade ao fluxo de água e vinhaça bem como com os valores de viscosidade cinemática da água e vinhaça, foi possível calcular os coeficientes de permeabilidade específica na forma de

$$K_e = \frac{K \cdot \upsilon}{g} \tag{10}$$

em que K_e é a permeabilidade específica (m^2), K é a permeabilidade do solo saturado (m s^{-1}), g é aceleração da gravidade (m s^{-2}) e υ é a viscosidade cinemática do fluido (m^2 s^{-1}).

Os valores de microporosidade e macroporosidade foram obtidos após as amostras indeformadas terem sido saturadas por capilaridade e submetidas à tensão de 60 cm no extrator de Richards. Assim, a macroporosidade foi obtida tomando-se a diferença entre a porosidade total e a microporosidade, que por sua vez foi relacionada a diâmetros de poros menores que 50 μm, que correspondem à umidade volumétrica referente à tensão de 60 cm [θ(60 cm)].

O software Splintex 1.0 (DA SILVA et al., 2017; HUF DOS REIS et al., 2018) foi utilizado para aquisição dos parâmetros θ_s, θ_r, α, n e m da equação de Van-Genuchten (1980) - Mualem. Com esses parâmetros, foi estimada a umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) pelo critério da taxa de drenagem (*p*) de 1% (PREVEDELLO, 1999; ARMINDO; WENDROTH, 2016), obtida por

$$0{,}01 = \left[\frac{\theta_{cc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right]^{\frac{1}{2}} \left\{1 - \left[1 - \left(\frac{\theta_{cc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\frac{1}{m}}\right]^{m}\right\}^2 \tag{11}$$

Os valores de θ_{cc} foram obtidos por iteração não linear, utilizando-se o método dos mínimos quadrados pela função solver no Excel. Então, a porosidade drenável (φ_d) foi obtida pela diferença entre os valores de θ_s e θ_{cc}.

A análise das amostras foi realizada em triplicata e todas as amostras deformadas passaram pelo processo de peneiramento conforme NBR 7181/88.

4.3. Análise geoestatística

Os métodos da estatística clássica foram empregados para o cálculo das medidas de tendência, dispersão e distribuição, assim como os gráficos *boxplot*. A análise estatística descritiva foi empregada nos dados para posterior aplicação da geoestatística. A análise geoestatística foi realizada no *software* R (Development Core Team, 2014), utilizando os pacotes *geoR* (RIBEIRO JR.; DIGGLE, 2001), *classInt* (BIVAND et al., 2009) e *MASS* (RIPLEY et al., 2013).

A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk e o comportamento da distribuição. Se necessário, os dados foram transformados para correção da normalidade. Os indícios de padrão espacial também foram observados no gráfico envelope.

Para a composição da malha, os dados foram coletados em pontos equidistantes formando uma malha disforme conforme apresentado a seguir:

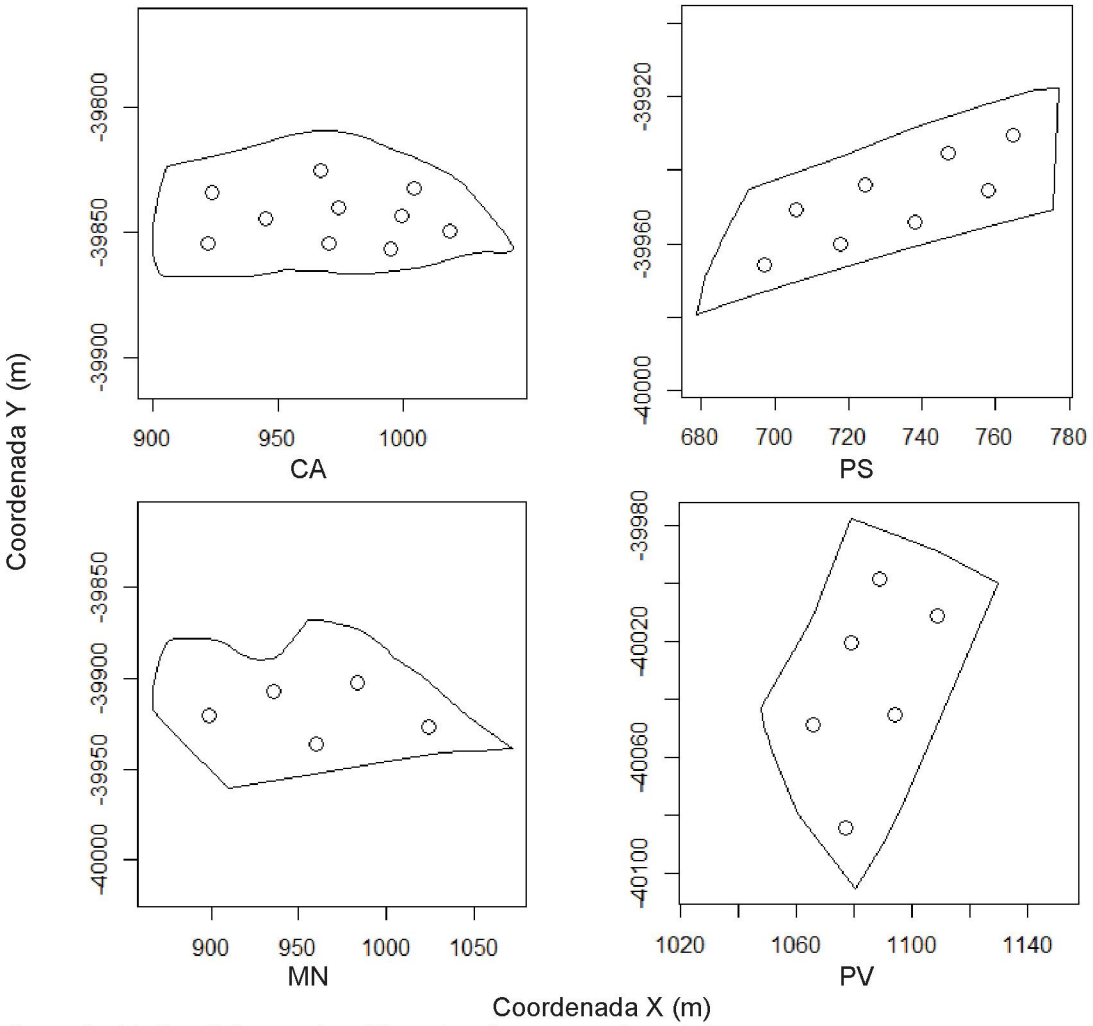


Figura 5 - Malha disforme das diferentes áreas experimentais

Os semivariogramas foram ajustados aos modelos Esférico (eq. 12), Exponencial (eq. 13), Gaussiano (eq. 14), *Matérn* (eq. 15) e *Wave* (eq. 16) descritos respectivamente como:

$$\gamma(h) = C_o + C_1\left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right] \quad (12)$$

$$\gamma(h) = C_o + C_1\left[1 - \exp\left(\frac{-h}{a}\right)\right] \quad (13)$$

$$\gamma(h) = C_o + C_1\left\{1 - \exp^{\left(\frac{-h}{a}\right)^2}\right\} \quad (14)$$

$$\gamma(h) = C_o + C_1\left[1 - \left(\frac{2\sqrt{kh}}{a}\right)^k \frac{1}{2^{k-1}\Gamma(K)} K_k\left(\frac{2\sqrt{kh}}{a}\right)\right] \quad (15)$$

$$\gamma(h) = C_o^2 + \frac{a}{h}\,sen\left(\frac{h}{a}\right) \quad (16)$$

em que γ (h) é a correlação entre os pares de valores observados separados pela distância h, C_o é o efeito pepita, C_1 é a contribuição, *a* é o alcance, $\Gamma(K)$ é a função Gama e K_k é a Função Bessel de ordem k.

A avaliação do ajuste aos modelos foi realizada de acordo os maiores valores de máxima verossimilhança (VSM). Os menores valores dos critérios AIC e BIC, assim como os maiores valores alcance prático também foram considerados no caso de empate. O grau de dependência espacial (GDE) foi calculado, pois indica o modelo com maior estrutura de continuidade espacial.

Após a determinação do modelo, utilizou-se a técnica de interpolação por krigagem para obter estimativas dos valores desconhecidos, gerando-se mapas temáticos da variabilidade espacial das propriedades estudadas. O método de *borrowingstrength* foi utilizado visando o empréstimo permitindo dos dados das regiões vizinhas para produzir estimativas mais estáveis e reduzir a incerteza na predição em estimativas de taxa suavizada sem uma alta carga computacional, devido aos erros na predição serem semelhantes em áreas vizinhas. Estudos de Giorgi et al. (2018), Wojciechowski et al. (2017), Kelsall e Wakefield (2011) e Hampton et al. (2011) apresentam bons resultados no emprego desse método. A correlação de Pearson (*r)* para comparação entre os mapas de cada variável e profundidades analisada foram obtidas a fim de evidenciar os mapas de correlação positiva e o RMSE foi calculado para comparação do erro entre os mapas de dados obtidos e estimados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Atributos físicos do solo

Os resultados da análise de areia, silte, argila, densidade das partículas (ρ_p) e densidade do solo seco (ρ_{ss}) para as camadas de 0 – 20 e 20 – 40 cm estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores médios para areia, silte, argila, densidade do solo seco (ρ_{ss}), densidade das partículas (ρ_p) para as camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.

Área	Camada - (cm) -	Frações granulométricas (%)			ρ_{ss}	ρ_p
		Areia	Silte	Argila	- - - (kg dm^{-3}) - - -	
CA	0 – 20	52,1	17,0	30,8	1,475	2,675
	20 – 40	40,1	17,7	42,1	1,392	2,665
PS	0 – 20	55,2	20,5	24,3	1,450	2,703
	20 – 40	50,9	21,9	27,2	1,487	2,751
MN	0 – 20	52,5	23,6	23,9	1,035	2,754
	20 – 40	50,6	24,2	25,2	1,223	2,778
PV	0 – 20	50,9	22,5	26,6	1,313	2,638
	20 – 40	52,3	21,3	26,4	1,398	2,729

CA: Plantio de cana-de-açúcar; PS: Pousio de dois anos; MN: Mata nativa; PV: Pousio de três anos com aplicação de vinhaça.

Os resultados da análise das frações granulométricas permitiram verificar que as quatro áreas de estudo apresentam textura homogênea ao longo dos perfis avaliados. Conforme o triângulo textural adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), a textura foi classificada como franco-argilo-arenosa para todas as áreas. Houve uma diminuição dos valores de areia e consequente aumento dos valores de argila com a profundidade, exceto para área de pousio com aplicação de vinhaça (PV), onde os valores aumentam com a profundidade.

Os valores encontrados para ρ_{ss} variaram de 1,04 a 1,49 kg dm^{-3}, sendo o menor na área MN para as duas camadas analisadas enquanto o maior valor na camada superficial foi encontrado para a área CA e na camada de 20-40 cm na área PS. Os valores médios de ρ_{ss} ficaram dentro do intervalo de Aquino et al. (2015) para uma área de floresta, Sá et al. (2016) para uma área de plantio de cana-de-açúcar e Marques et al. (2016) para as mesmas camadas analisadas. Chaudhari et al. (2013) relatam que ρ_{ss} apresenta comportamento semelhante para mesmo uso e manejo do solo, devido a sua relação com conteúdo de matéria orgânica, textura, cultivo e tráfego na área. Corroborando com os resultados, Freitas et al. (2017), que avaliaram aplicação

de vinhaça em um Latossolo Amarelo distrófico psamítico sob cultivo de floresta nas camadas 0 – 20, 20 – 40 e 40 – 60 cm, descrevem que as interações decorrentes da prática só foram observadas na camada superficial como uma menor concentração de argila e densidade de solo seco.

Os valores de areia, argila e ρ_p apresentaram semelhantes entre as áreas e camadas estudadas, independentes do manejo adotado. Os valores de ρ_p encontram-se entre 2,64 e 2,78 kg dm^{-3}, intervalo semelhante ao encontrado por Ma et al. (2016). Na literatura, autores definem o valor médio de ρ_p como 2,65 kg dm^{-3} (ARMINDO; PREVEDELO, 2015; JARVIS et al., 2017).

Os resultados da análise da porosidade, porosidade drenável, microporosidade e macroporosidade para as camadas de 0 – 20 e 20 – 40 cm estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores médios para porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) para as camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm.

Área	Camada	φ	φ_d	Micro	Macro
	- (cm) -	---------- (m^3 m^{-3}) ----------			
CA	0 – 20	0,537	0,201	0,459	0,078
	20 – 40	0,586	0,175	0,519	0,068
PS	0 – 20	0,506	0,225	0,427	0,079
	20 – 40	0,468	0,202	0,403	0,066
MN	0 – 20	0,624	0,279	0,488	0,135
	20 – 40	0,557	0,254	0,377	0,180
PV	0 – 20	0,576	0,264	0,454	0,122
	20 – 40	0,526	0,245	0,415	0,112

CA: Plantio de cana-de-açúcar; PS: Pousio de dois anos; MN: Mata nativa; PV: Pousio de três anos com aplicação de vinhaça.

Os valores de porosidade variam entre 0,46 a 0,62 m^3 m^{-3}, estando em acordo com os valores descritos para solos arenosos (0,35 a 0,50 m^3 m^{-3}) e siltosos e francos (0,30 a 0,55 m^3 m^{-3}), conforme relatam Prevedello e Armindo (2015). Os valores de porosidade diminuíram com o aumento da profundidade e da densidade do solo, demonstrando interdependência. Os valores de porosidade e porosidade drenável apresentaram um aumento com a profundidade, exceto na camada superficial na área CA.

A área MN apresentou os valores médios de porosidade, microporosidade e macroporosidade superiores às demais áreas analisadas. Contudo, o valor médio de microporosidade da área MN foi inferior ao obtido na área PV na camada de 20 – 40 cm.

Valores inferiores de densidade do solo seco e microporosidade foram encontrados por Reichert et al. (2016) para uma área de floresta e por Macedo et al. (2017) para dois manejos – pasto e cana-de-açúcar – com as mesmas variações nos valores de micro, macro e porosidade ao grau 5% de probabilidade. A avaliação de Kuncoro et al. (2014) para os efeitos da compactação nas propriedades de difusividade, permeabilidade hidráulica e permeabilidade do solo ao ar na camada de 0 – 15 cm para cinco tratamentos, demonstrou que em termos de compactação, a presença de matéria orgânica foi a principal responsável pelo bloqueio dos poros do solo a curto prazo. Assim, o manejo não foi o principal responsável pela alteração na porosidade.

Bonetti et al. (2017) relatam que a densidade do solo seco, permeabilidade ao ar, macro, micro e porosidade retornaram aos valores originais após a compactação e três ciclos de molhagem-secagem; e que a macroporosidade foi a propriedade individual mais afetada pela compactação.

A relação da porosidade com a umidade na saturação e com a densidade do solo seco é apresentada na Figura 6.

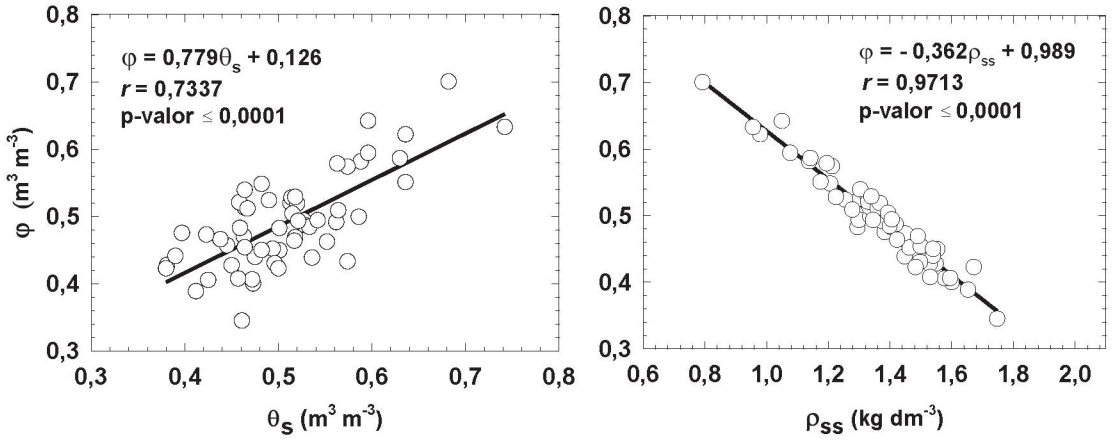


Figura 6 - Relação 1:1 da porosidade (φ) com a umidade volumétrica na saturação (θ_s) (esq.) e com a densidade do solo seco (ρ_{ss}) (dir.).

Observa-se correlação entre as propriedades, θ_s representa o espaço poroso total preenchido por água e nesse sentido os valores de φ e θ_s deveriam ser mais próximos. Nesse sentido, Prevedello e Armindo (2015) descrevem que φ pode ser obtida pelos valores da ρ_{ss} e ρ_p, conforme apresentado na equação 8. Nota-se ainda, a correlação inversa da ρ_{ss} com φ, mostrando que os maiores valores de densidade apresentam valores de porosidade reduzida.

Cherubin et al. (2016) relatam que o plantio de cana-de-açúcar induziu uma degradação da qualidade física do solo com redução máxima de 68% da sua capacidade. A degradação ocorreu devido à diminuição na porosidade do solo, aeração e permeabilidade hidráulica, assim como o aumento na resistência à penetração do solo, degradação estrutural e risco de erosão.

5.2. Coeficientes de permeabilidade do solo

Os resultados dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água e vinhaça e seus respectivos coeficientes específicos, bem como o coeficiente de permeabilidade ao fluxo da vinhaça estimado com água do solo estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores médios dos coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), de vinhaça (K_v) e de vinhaça estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e os coeficientes de permeabilidade específica para água (K_{ea}) e para vinhaça (K_{ev}).

Área	Camada	K_a	K_v	$K_{v\ estimado}$	K_{ea}	K_{ev}
	- (cm) -	- - - - - - - - (mm h^{-1}) - - - - - - - -			- - - (pm²) - - -	
CA	0 – 20	9,04	0,59	2,10	0,25	0,07
	20 – 40	6,84	3,43	1,59	0,20	0,41
PS	0 – 20	17,86	2,54	4,15	0,51	0,30
	20 – 40	34,81	3,79	8,08	0,99	0,45
MN	0 – 20	305,90	28,55	71,02	8,70	3,39
	20 – 40	172,51	71,47	40,05	4,91	8,49
PV	0 – 20	31,66	5,01	7,35	0,90	1,29
	20 – 40	218,17	63,11	50,65	6,21	7,66

CA: Plantio de cana-de-açúcar; PS: Pousio de dois anos; MN: Mata nativa; PV: Pousio de três anos com aplicação de vinhaça.

Os valores encontrados para permeabilidade variaram de 9,05 a 305,9 mm h^{-1} para K_a; 0,59 a 28,55 mm h^{-1} para K_v; e 2,10 a 71,02 mm h^{-1} para K_v estimado. Os maiores valores dos coeficientes de permeabilidade foram encontrados para a área MN devido a elevada macroporosidade, enquanto os menores valores de permeabilidade foram observados para área CA. Os valores de K_v apresentaram aumento com a profundidade, enquanto esse comportamento só foi observado nos valores de K_a e K_v estimado para as áreas de pousio. Na camada superior, os valores de K_v apresentaram-se superiores aos valores de K_v estimado, enquanto na camada de 20 – 40 cm apenas a área PS apresentou esse comportamento. Desta forma, na estimativa de K_v a partir de dados de K_a, os valores de K_v estimado nas camadas superiores foram inferiores aos obtidos na medição (Figura 7).

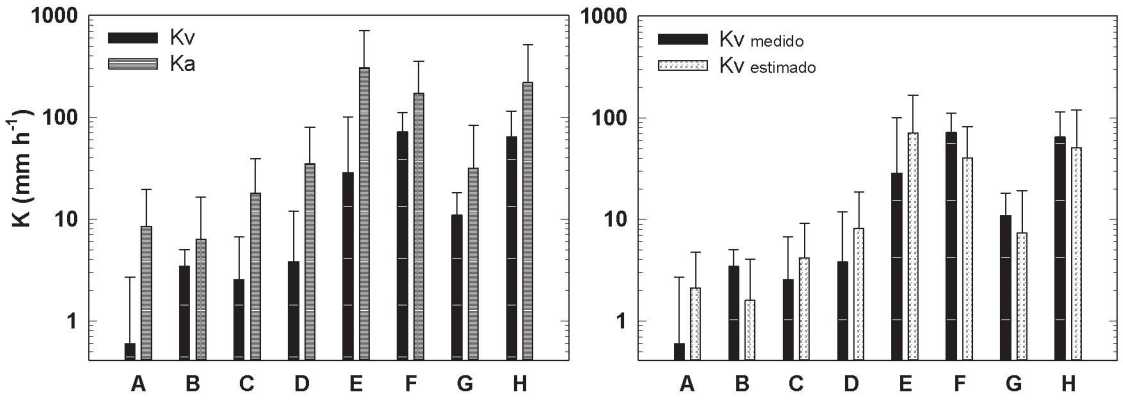


Figura 7 - Log_{10} dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água, vinhaça e estimado para os fatoriais A (CA 0 – 20 cm), B (CA 20 – 40 cm), C (PS 0 – 20 cm), D (PS 20 – 40 cm), E (MN 0 – 20 cm), F (MN 20 – 40 cm), G (PV 0 – 20 cm) e H (PV 20 – 40 cm).

A menor diferença entre os valores dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo vinhaça e do coeficiente de permeabilidade do solo estimado foi encontrada para área PV. Os valores médios de permeabilidade do solo ao fluxo da vinhaça foram entre 2 e 15 vezes menor do que ao fluxo de água para os tratamentos avaliados, sendo os maiores valores dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água e vinhaça e do coeficiente ao fluxo de vinhaça estimado com água foram observados para área de MN, comportamento observado também para os valores de macroporosidade. Os menores valores de K na área CA ocorreram possivelmente pela diminuição da macroporosidade causada pela compactação do solo.

Os valores de correlação entre K_v e K_a são os mesmos obtidos para K_v e K_v estimado com água. Na ausência de valores medidos de permeabilidade ao fluxo da própria vinhaça, estima-se esse valor com a eq. (5). A aproximação entre os valores dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça e do coeficiente estimado com água são apresentados na Figura 8.

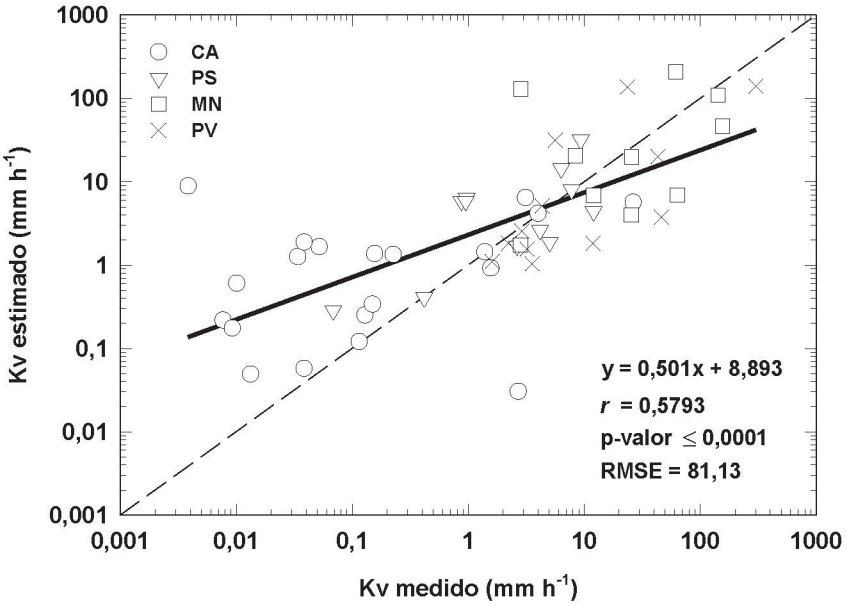


Figura 8 - Comparação entre os valores dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça estimado e medido.

Os valores de Kv estimados superestimaram os medidos para pequenos valores (K_v < 1 mm h^{-1}), sendo mais aproximados a partir desse ponto (Figura 8). Os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água e vinhaça apresentaram moderada correlação (r = 0,5793) quando todas as áreas analisadas foram agrupadas. Quando realizada a mesma análise estatística para valores de K_v > 1 mm h^{-1}, a equação linear y = 0,144x + 12,46 foi obtida com os valores de r = 0,5335 e p-valor = 0,0012.

O coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça encontrado foi em média oito vezes menor que ao fluxo de água. Os resultados da diferença entre os coeficientes decorrem das variações entre a composição química da vinhaça e da viscosidade entre os líquidos.

Analisando-se os resultados de K_v versus K_v estimado nas áreas de manejo separadamente (Figura 9), verificou-se que os níveis de significância (p-valor) não foram atrativos (altos valores), mesmo que em áreas como PS e PV a correlação entre essas variáveis tenha sido observada.

Macedo et al. (2017) demonstraram que os valores podem não diferir inicialmente sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo. Porém, a estrutura do solo sob um determinado sistema pode resultar em diferentes valores de permeabilidade ao longo do perfil, podendo acarretar em modificações na permeabilidade ao longo do tempo.

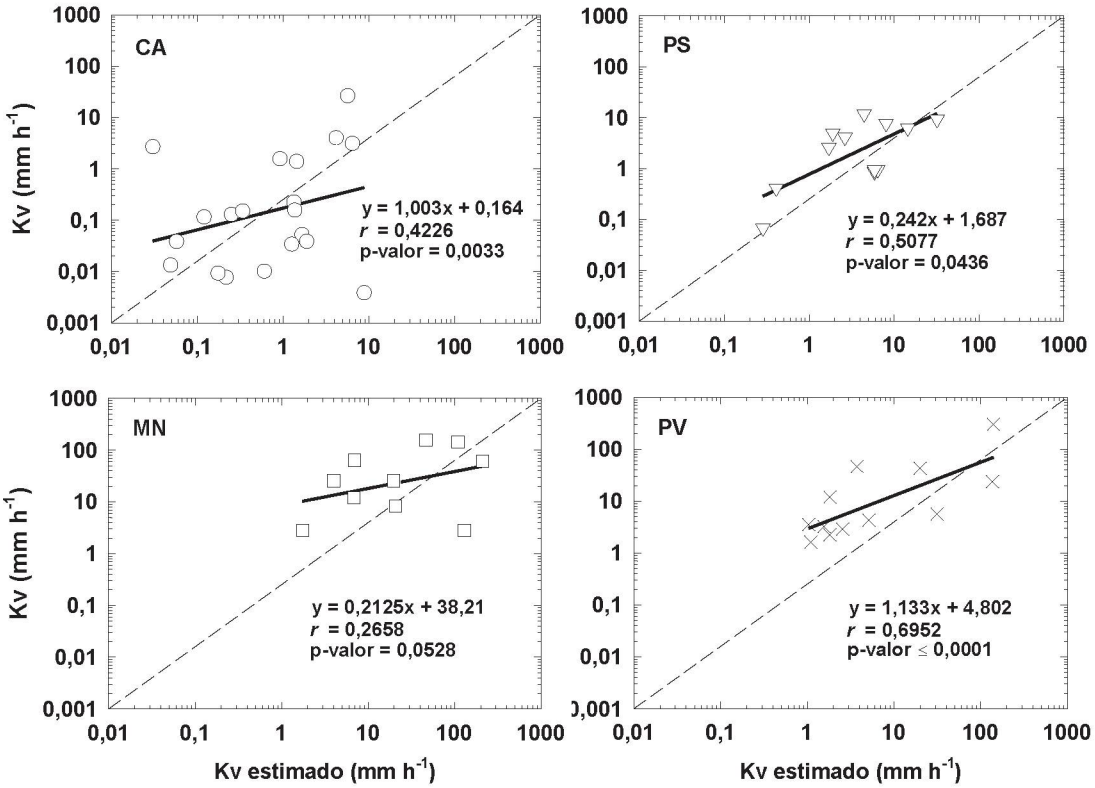


Figura 9 - Coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça (K_v) e coeficiente estimado ($K_{v\ estimado}$) para área de plantio de cana-de-açúcar (CA), pousio de dois anos (PS), mata nativa (MN) e pousio de três anos com aplicação de vinhaça (PV).

A comparação entre os coeficientes de permeabilidade específica determinados com água (K_{ea}) e vinhaça (K_{ev}) estão dispostos na Figura 10.

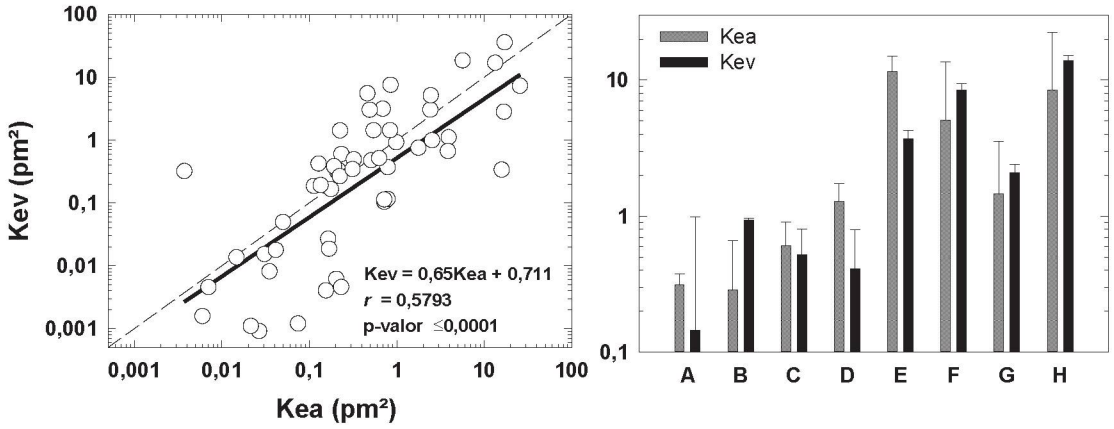


Figura 10 - Comparação dos coeficientes de permeabilidade específica (K_e) medidos com água (K_{ea}) e vinhaça (K_{ev}) (esq.); e dos fatoriais A (CA 0 – 20 cm), B (CA 20 – 40 cm), C (PS 0 – 20 cm), D (PS 20 – 40 cm), E (MN 0 – 20 cm), F (MN 20 – 40 cm), G (PV 0 – 20 cm) e H (PV 20 – 40 cm) (dir.).

A vinhaça apresenta maior concentração de íons e viscosidade dinâmica, que em média é quatro vezes superior à da água. Contudo, na camada superficial, somente a área de mata nativa apresentou valores de K_{ea} superiores aos de K_{ev}. O mesmo comportamento foi observado para área CA,

na camada de 20 – 40 cm. Os menores valores dos coeficientes específicos foram observados para área PS para as duas camadas analisadas.

Os maiores valores dos coeficientes K_{ea} e K_{ev} foram observados para área MN e os menores na área CA. Da mesma forma, os valores são mais aproximados para Ke > 0,1 pm².

De acordo com um estudo conduzido por Uyeda et al. (2013) a aplicação de vinhaça pode ser responsável pela redução dos valores de permeabilidade para um Latossolo Vermelho-Escuro, com o aumento das doses de vinhaça. Assim, se a aplicação da vinhaça ocorrer sem restrição, a permeabilidade hidráulica do solo poderá ser reduzida.

Dalri et al. (2018) observaram a influência da aplicação da vinhaça na capacidade de infiltração do solo, relacionada diretamente à permeabilidade. O estudo concluiu que a vinhaça proporcionou redução da taxa de infiltração, possibilitando riscos de erosão e escoamento superficial. Além disso, a alteração da permeabilidade também pode decorrer a concentração de potássio no solo. Barros et al. (2010) relata que a aplicação de vinhaça alterou, positivamente, as propriedades químicas do solo, proporcionando melhoria na fertilidade, pelo maior aporte de macronutrientes no perfil, contudo reduziu a disponibilidade de micronutrientes. A aplicação não gerou alteração sobre o pH do solo estudado. Contudo, os autores salientam que a aplicação indiscriminada pode ser responsável por um aumento excessivo de potássio ocasionando desequilíbrios nutricionais para determinadas culturas e alterações expressivas nas propriedades do solo.

5.3. Geoestatística dos coeficientes de permeabilidade do solo

Os resultados da análise geoestatística dos atributos do solo para os parâmetros de efeito pepita (C_0), contribuição (C_1), alcance (a), máxima verossimilhança (VMS), critérios AIC e BIC e grau de dependência espacial (GDE) para a camada de 0 – 20 cm estão dispostos na Tabela 10. No Apêndice são demonstrados graficamente os semivariogramas.

Tabela 10 - Modelos de semivariograma ajustados e seus índices de ajuste aos valores de areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}),porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro); coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica (K_{ev}), estimado ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica (θ_s) para a camada de 0 – 20 cm.

Parâmetro	Areia	Argila	ρ_p	ρ_{ss}	φ	φ_d	Micro	Macro	K_a	K_{ea}	K_v	K_{ev}	$K_{v\ estimado}$	θ_s
							CA							
Modelo	Wave	Esférico	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Wave	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Esférico
C_0	17,37	8,63	0,001	2,63	0,002	0,002	0,003	0,0004	0,96	0,96	2,30	9,60	1,43	1,82
C_1	3,45	10,84	0,009	6,89	0,005	0,002	0,008	0,0011	2,43	2,43	5,24	7,05	2,82	1,65
a (m)	27,52	104,36	64,83	111,91	120,16	42,65	51,07	17,51	75,61	75,87	217,18	159,48	184,55	110,77
VMS	-85,08	-81,64	29,32	-63,63	33,52	49,21	29,61	53,62	-125,40	-22,23	-56,71	15,33	18,39	-83,01
AIC	178,17	171,29	-50,64	135,26	-59,04	-90,41	-51,22	-98,33	258,87	52,45	121,41	-22,66	-28,78	173,99
BIC	183,63	176,81	-45,17	140,73	-53,57	-84,96	-45,75	-92,86	264,34	57,92	126,88	-17,19	-23,31	179,46
GDE	83,47	44,32	5,56	27,63	26,03	48,78	28,81	26,67	28,27	28,34	36,01	57,66	33,71	52,46
							PS							
Modelo	Wave	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Wave	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp
C_0	11,42	6,82	0,001	0,28	0,002	0,0001	0,001	0,001	0,96	0,95	2,30	9,60	0,97	0,011
C_1	9,40	12,70	0,009	6,57	0,005	0,0021	0,008	0,001	2,43	2,43	5,24	7,05	2,42	0,013
a (m)	21,49	108,19	64,83	40,53	120,16	42,65	51,07	15,55	75,61	75,87	217,18	159,48	75,95	75,13
VMS	-84,85	-82,02	29,32	-58,80	33,52	49,21	29,61	54,87	-125,40	-22,23	-56,71	15,33	-83,09	35,23
AIC	117,70	172,03	-50,64	135,26	-59,04	-90,42	-51,22	-98,33	258,87	52,45	121,41	-22,66	174,18	-62,46
BIC	183,17	177,50	-45,17	140,73	-53,57	-84,95	-45,75	-92,87	264,34	57,92	126,88	-17,19	179,46	-56,99
GDE	54,84	34,93	5,56	4,11	26,03	4,55	5,62	41,67	28,27	28,07	30,49	57,66	28,50	45,71
							MN							
Modelo	Wave	Esférico	Exp	Exp	Exp	Matérn	Exp	Wave	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp
C_0	17,37	8,63	0,001	1,51	0,002	0,015	0,034	0,003	0,96	0,96	2,30	9,60	0,97	0,017
C_1	3,45	10,84	0,008	0,77	0,005	0,006	0,050	0,014	2,43	2,43	5,24	7,05	2,42	0,026
a (m)	27,52	104,37	64,83	12,04	120,16	116,68	92,96	11,21	75,61	75,87	217,18	159,48	75,95	30,44
VMS	-85,08	-81,64	29,32	-53,05	33,52	49,16	29,62	54,54	-125,40	-22,23	-56,71	15,33	-83,09	35,34
AIC	178,17	171,29	-50,64	114,11	-59,04	-90,31	-51,25	-101,08	258,87	52,45	121,41	-22,66	174,18	-62,68
BIC	183,63	176,75	-45,17	119,58	-53,57	-84,84	-45,77	-95,61	264,34	57,92	126,88	-17,19	179,65	-57,21
GDE	83,41	44,32	5,56	66,22	26,03	71,43	40,48	17,65	28,27	28,34	30,49	57,66	28,50	39,81
							PV							
Modelo	Wave	Esférico	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Wave	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp
C_0	0,004	0,013	0,001	0,005	0,009	0,010	0,010	0,100	0,96	0,960	2,30	9,60	0,97	0,011
C_1	0,004	0,016	0,009	0,029	0,019	0,045	0,061	0,093	2,43	2,427	5,24	7,05	2,42	0,013
a (m)	21,50	107,46	64,83	24,02	114,05	41,87	46,71	15,49	75,61	75,87	217,18	159,48	75,95	47,73
VMS	-84,86	-82,56	29,32	-53,03	34,19	48,97	28,59	54,59	-125,40	-22,23	-56,71	15,33	-83,09	34,56
AIC	178,40	173,11	-50,64	114,06	-60,38	-89,95	-49,18	-96,97	258,87	52,45	121,41	-22,66	174,18	-62,46
BIC	183,87	178,58	-45,17	119,53	-54,91	-84,48	-43,71	-91,50	264,34	57,92	126,88	-17,19	179,65	-56,99
GDE	50,00	44,90	5,56	15,88	32,97	18,18	14,12	51,79	28,27	28,34	30,49	57,66	28,50	45,71

CA: Plantio de cana-de-açúcar; PS: Pousio de dois anos; MN: Mata nativa; PV: Pousio de três anos com aplicação de vinhaça.

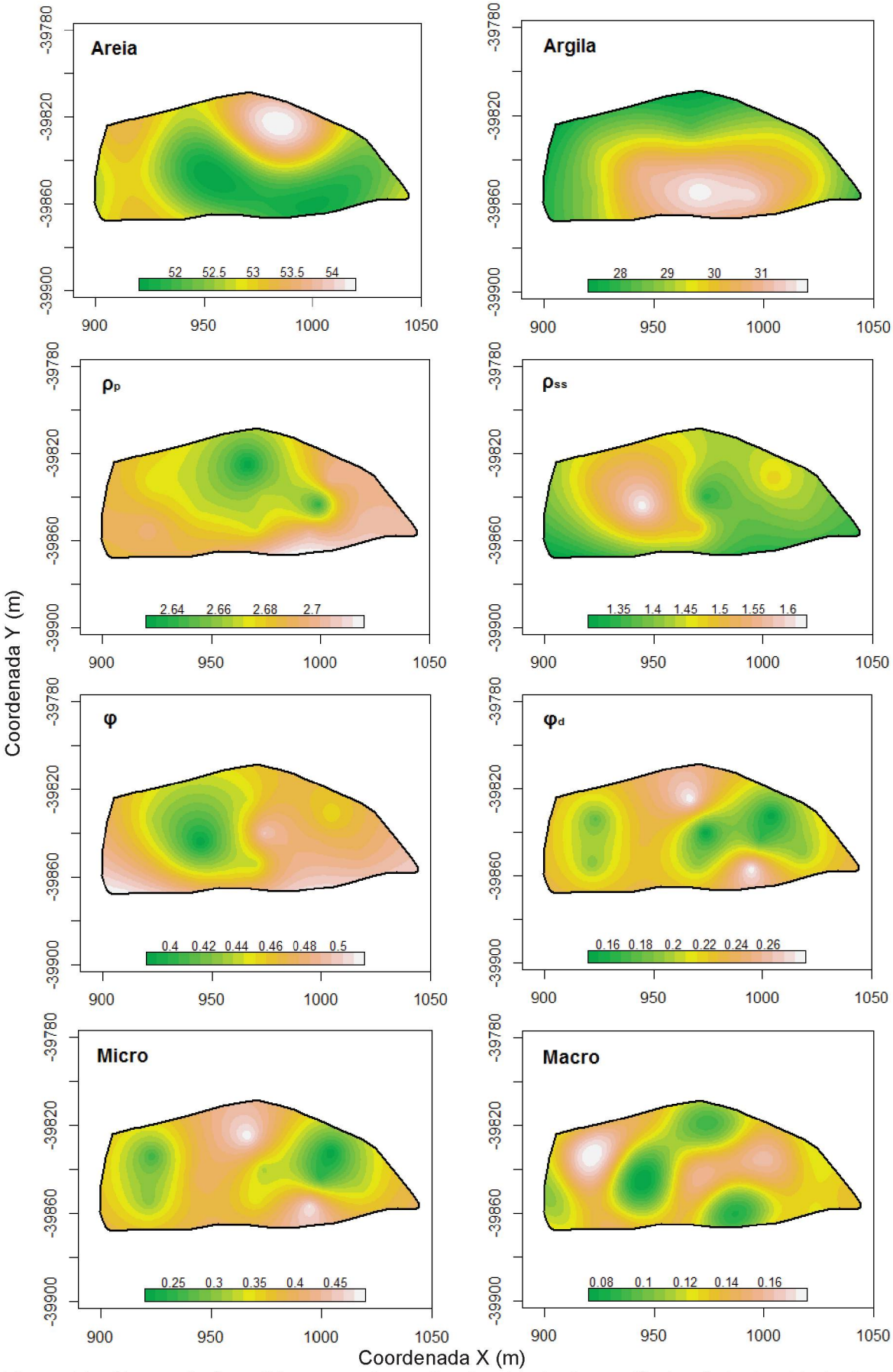


Figura 11 - Mapas da área CA para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 0 – 20 cm.

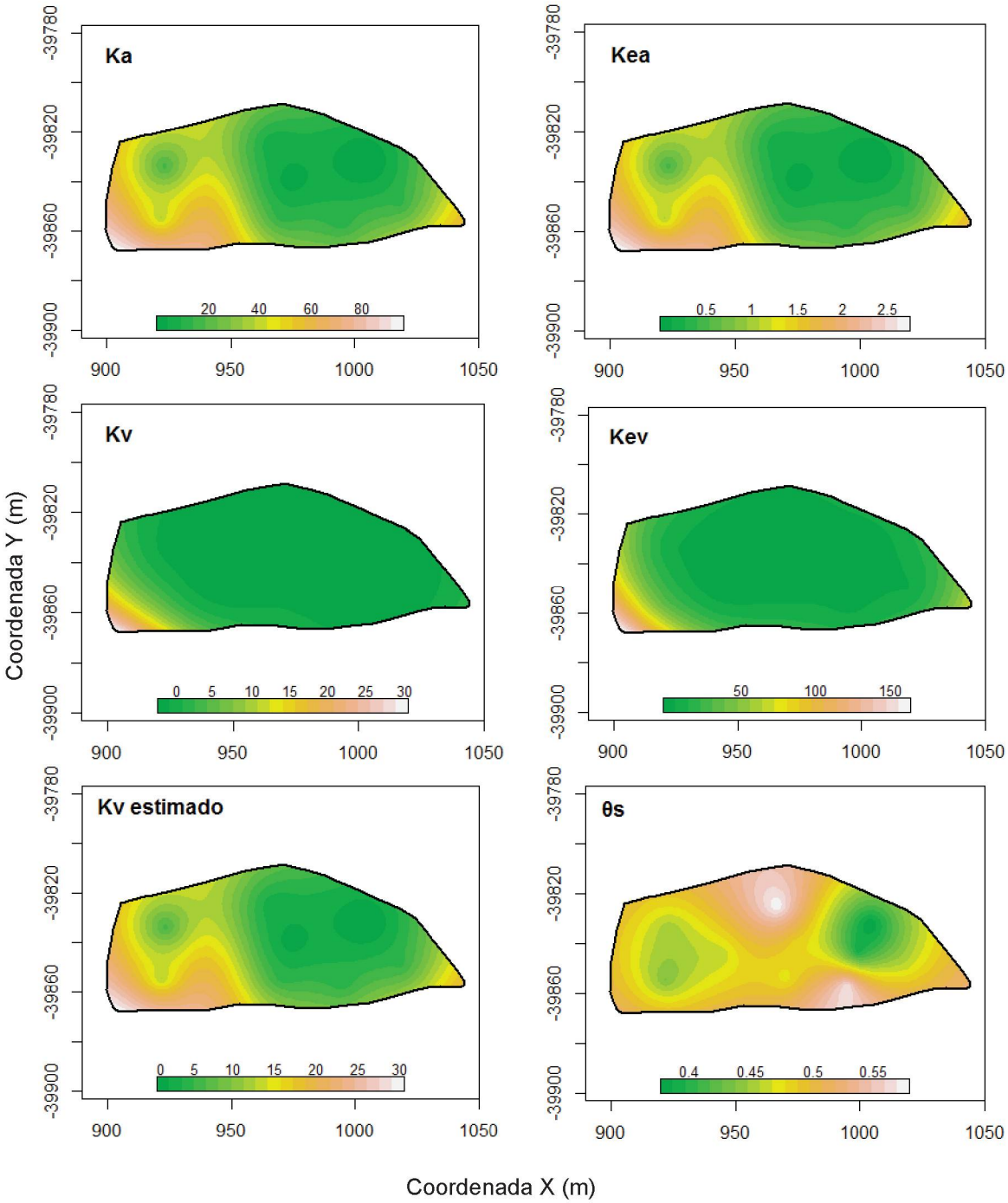


Figura 12 - Mapas da área CA para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm.

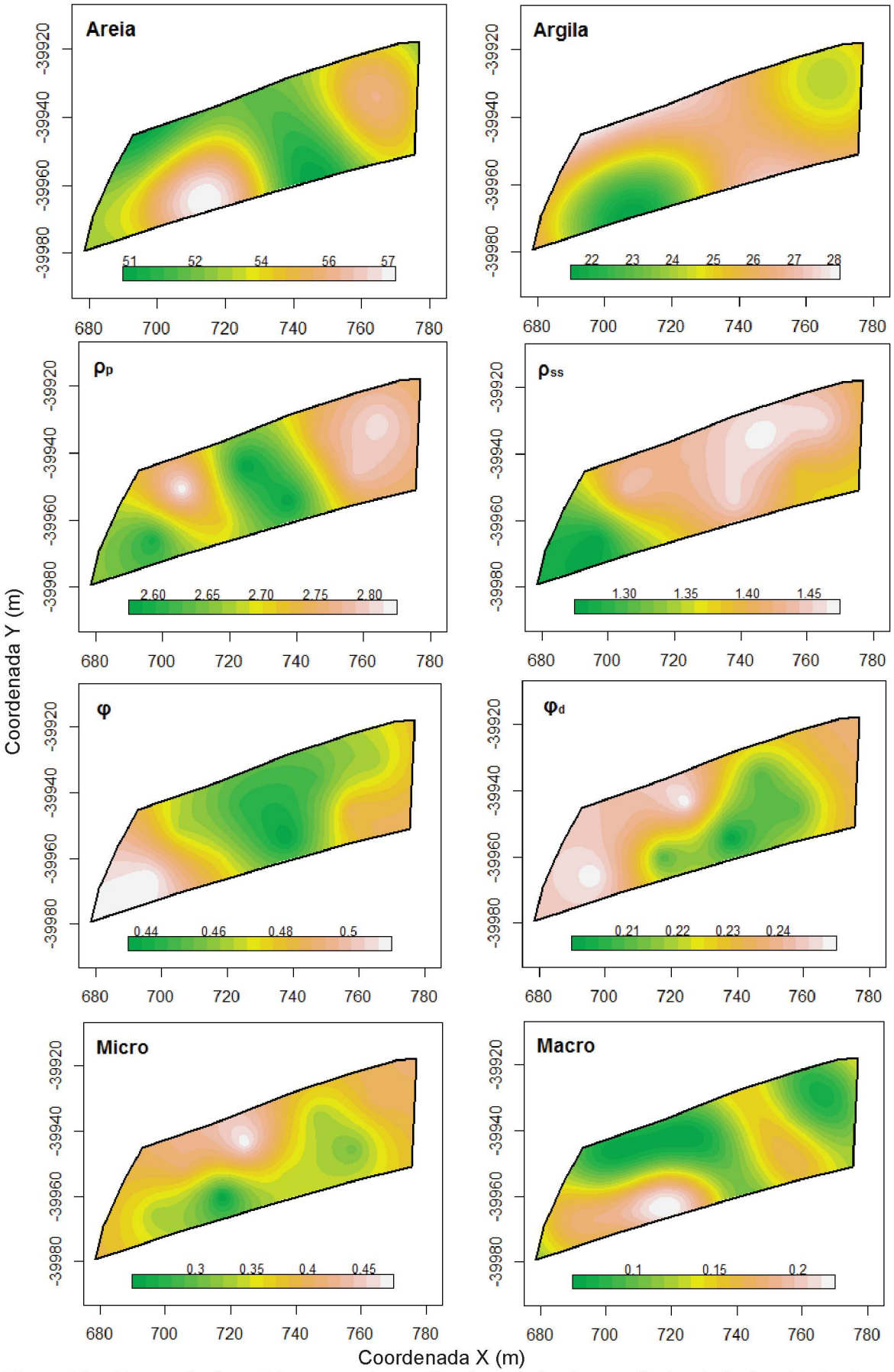


Figura 13 - Mapas da área PS para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 0 – 20 cm.

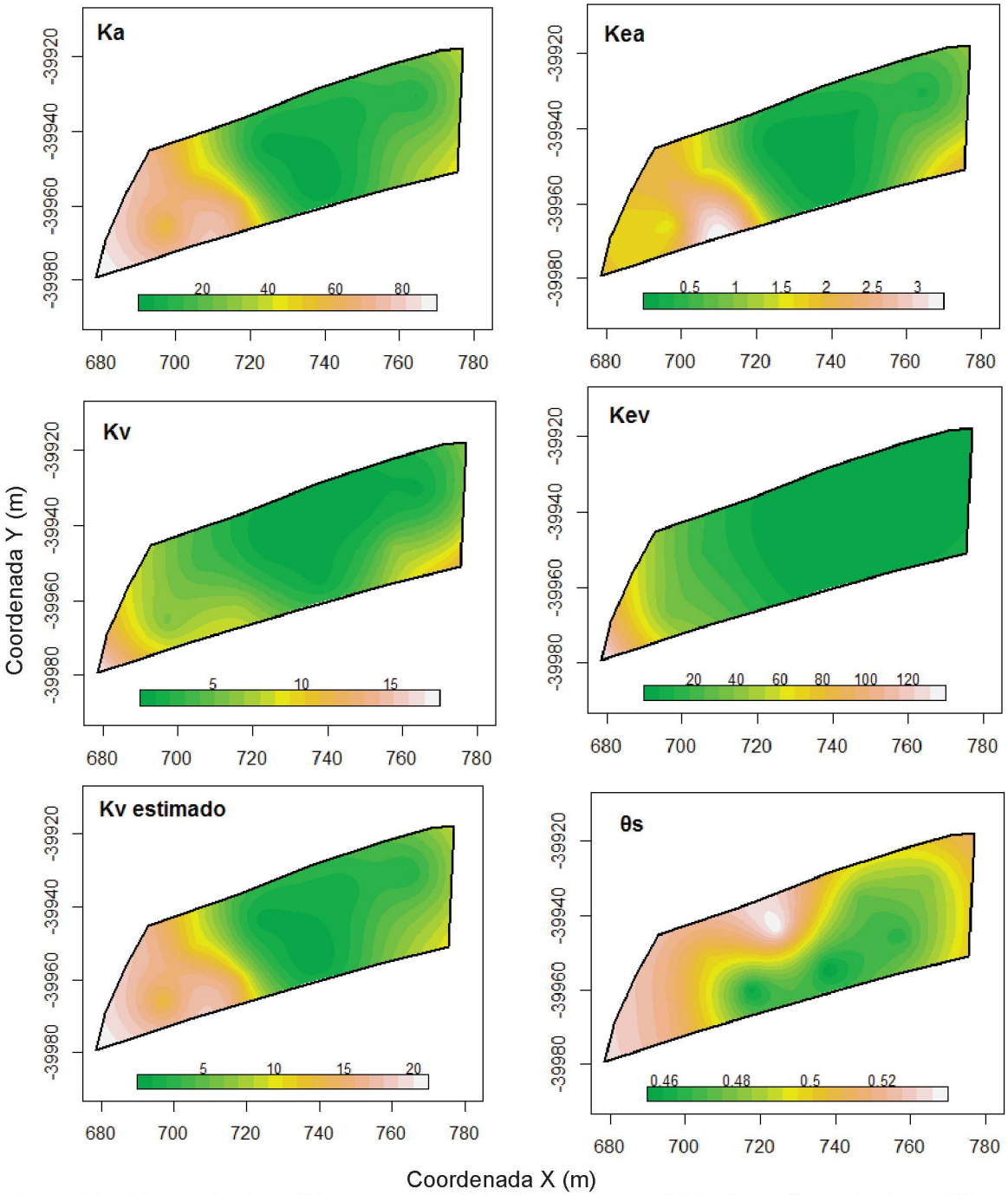


Figura 14 - Mapas da área PS para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm.

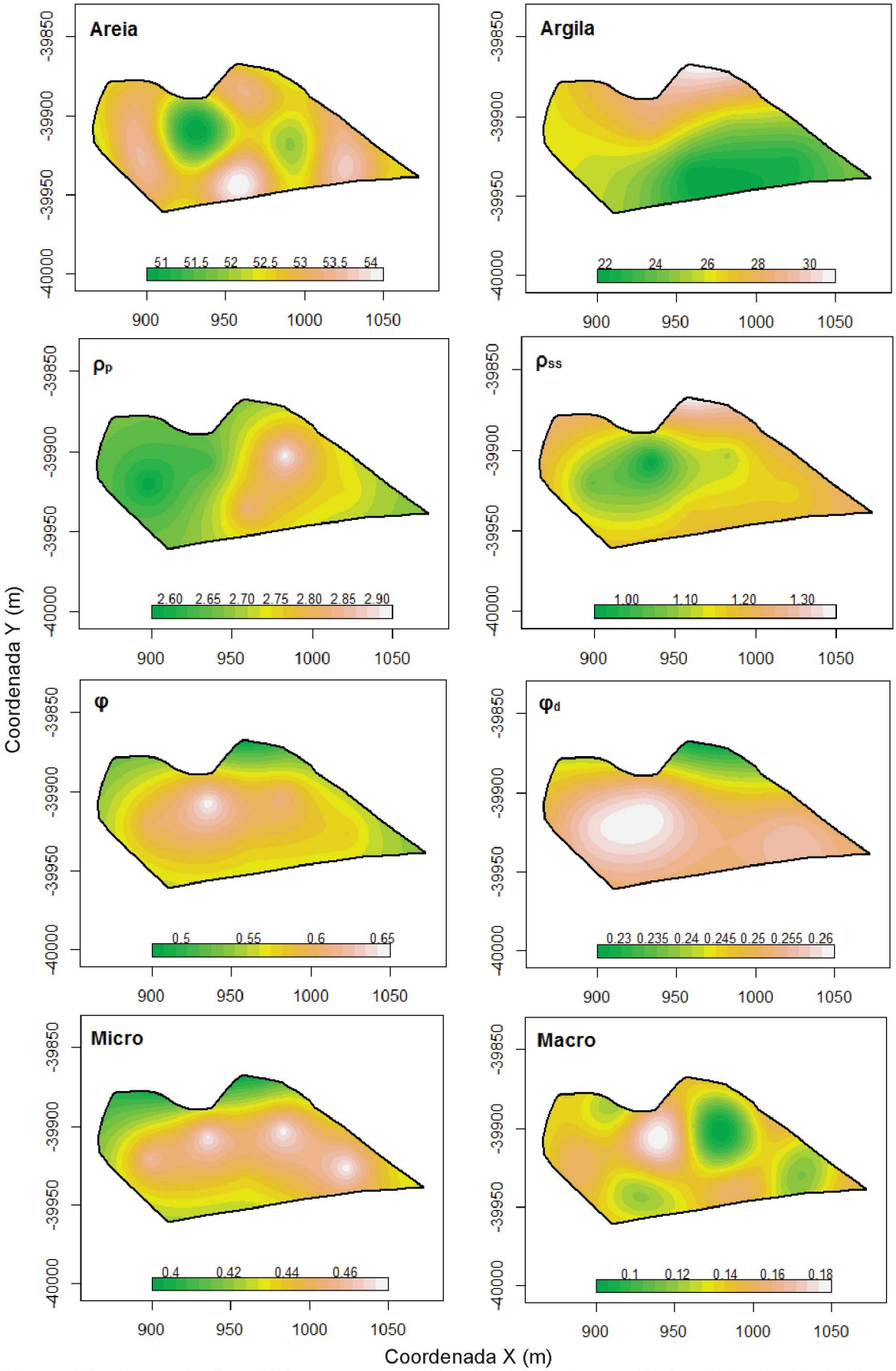


Figura 15 - Mapas da área MN para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 0 – 20 cm.

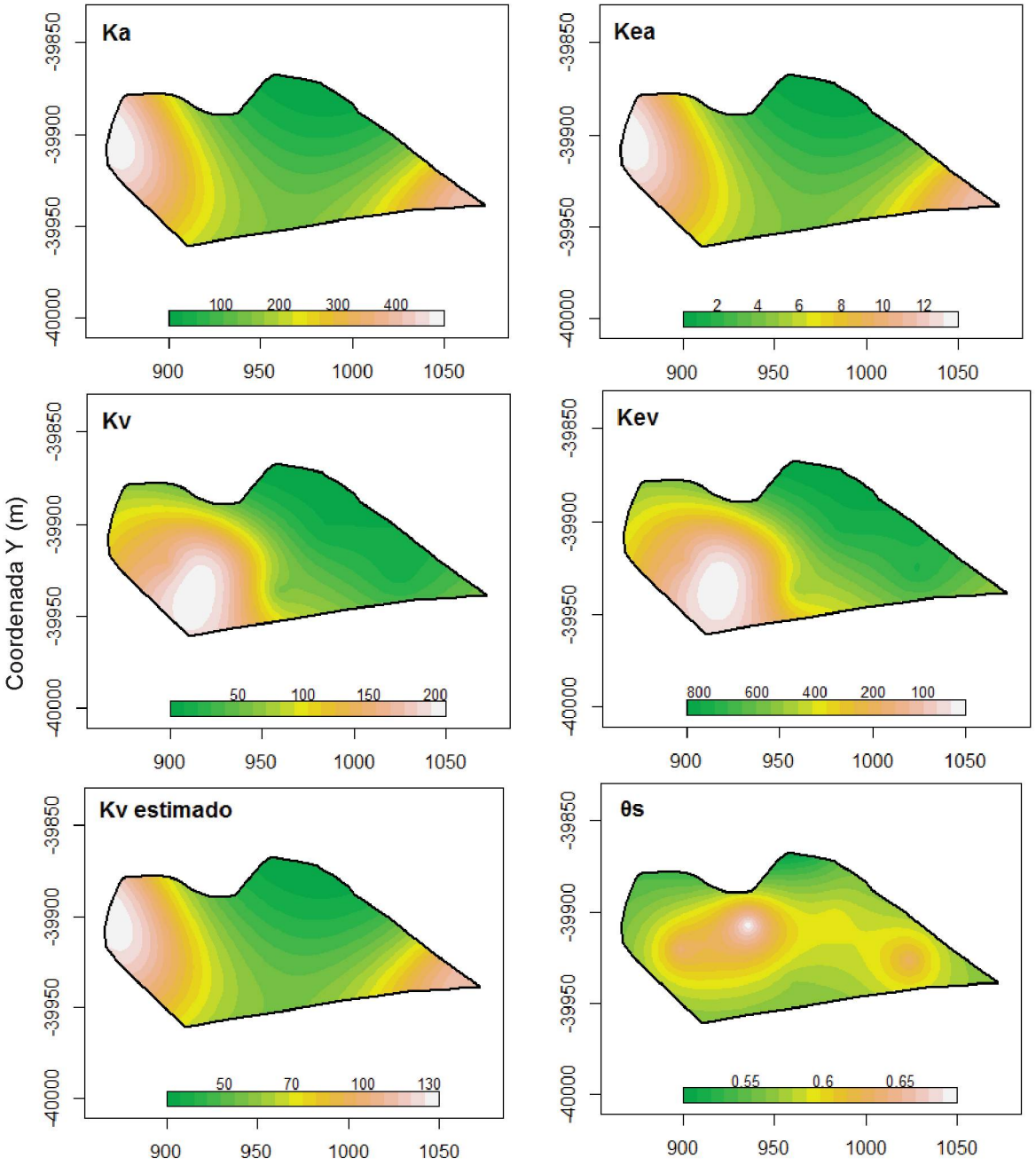


Figura 16 - Mapas da área MN para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm.

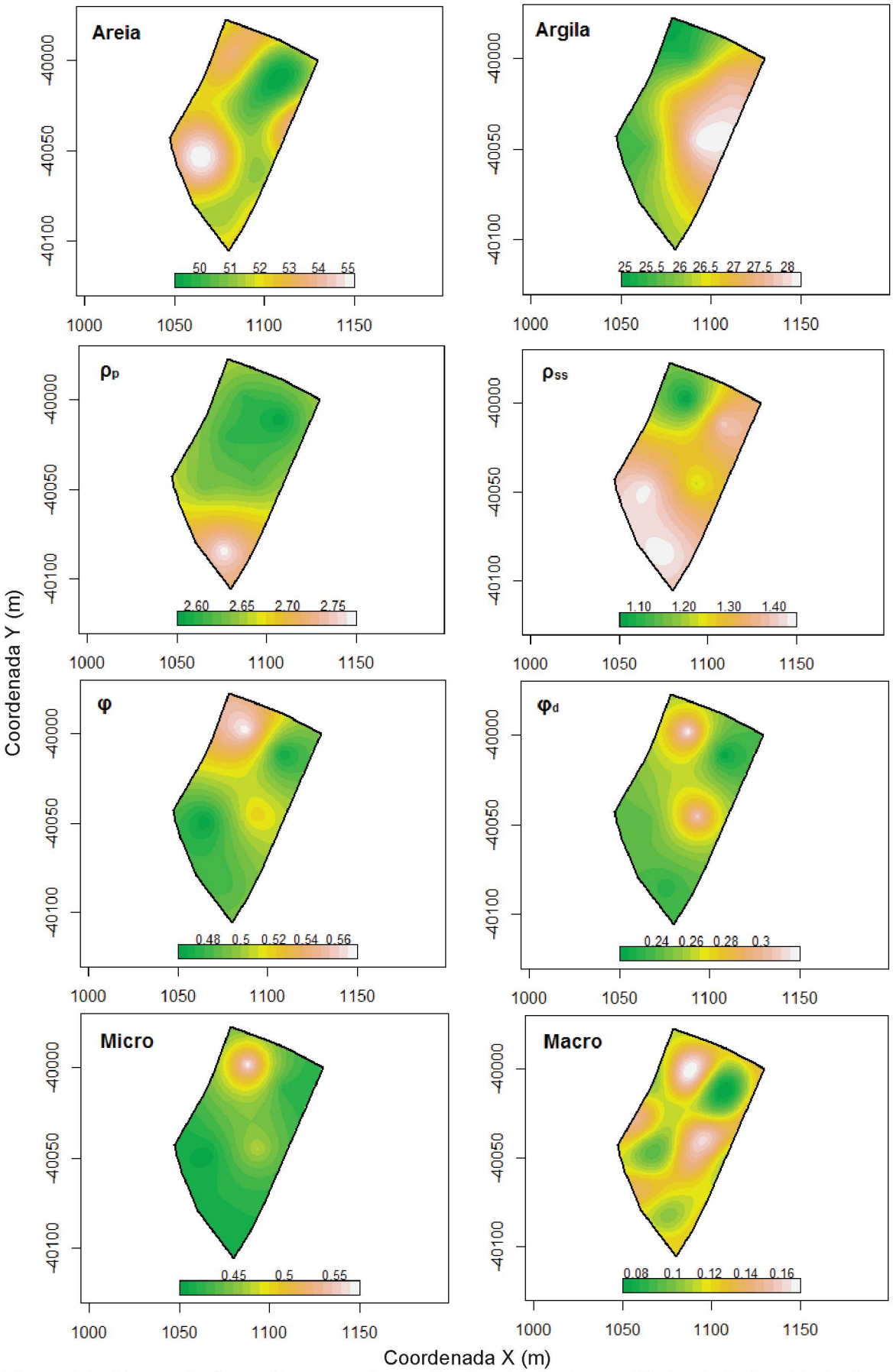


Figura 17 - Mapas da área PV para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 0 – 20 cm.

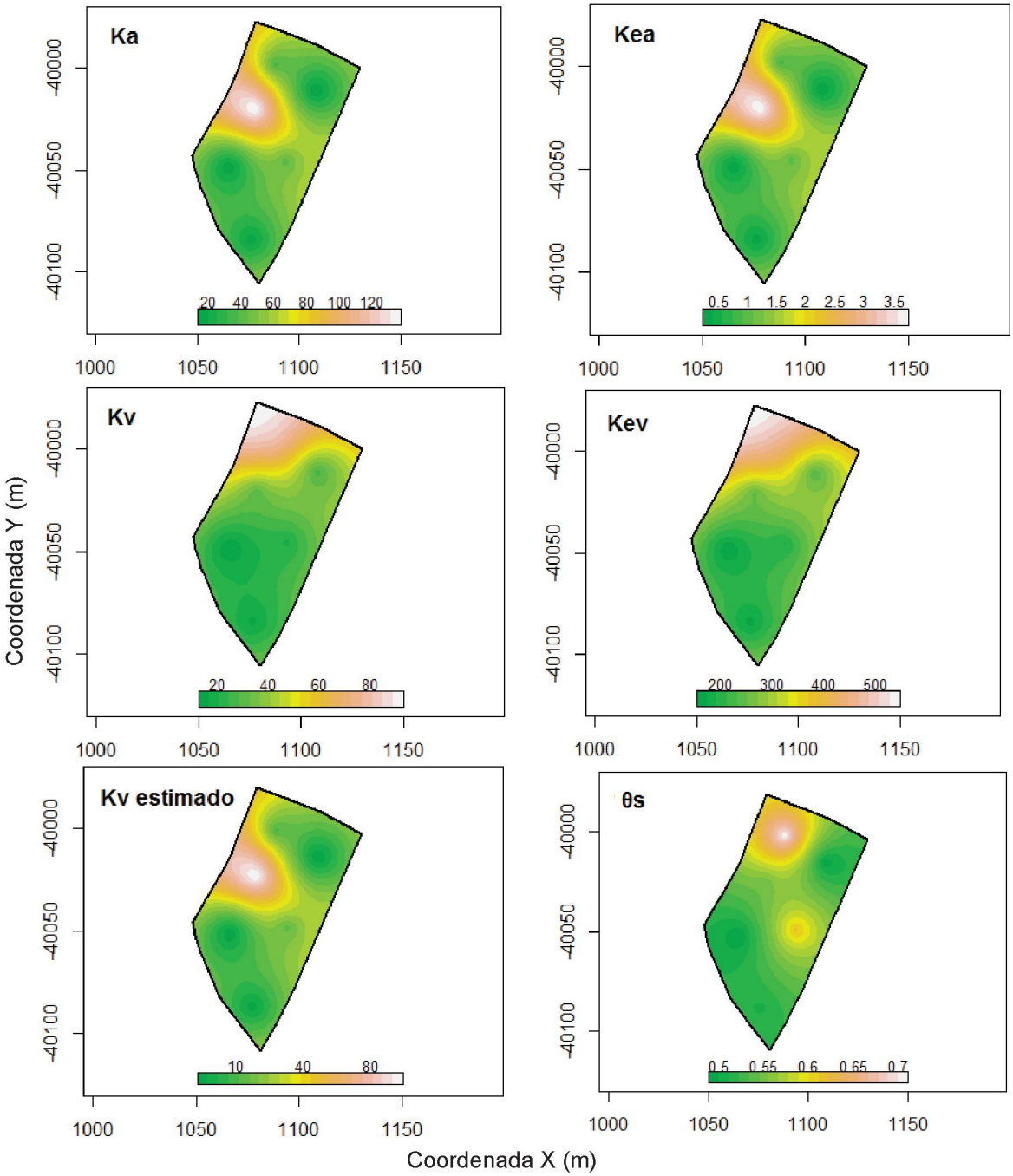


Figura 18 - Mapas da área PV para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm.

Os valores de alcance variaram entre 11,27 e 217,18 m sendo os maiores valores de alcance encontrados para K_v, enquanto os menores valores foram encontrados para macroporosidade nas quatro áreas analisadas. Alcances entre 100 e 400 m para propriedades físicas do solo como textura, ρ_{ss} e propriedades hidráulicas foram obtidos por Iqbal et al. (2005) e de 158 m para permeabilidade hidráulica por Huang et al. (2016).

Na análise da dependência espacial, foi adotado um valor <25% para forte dependência, 25 - 75% moderada e >75% fraca dependência. A maioria das variáveis apresentou moderada dependência. A forte dependência foi

encontrada para ρ_p para CA; ρ_p, ρ_{ss}, φ_d e micro, para PS; ρ_p e macro para área MN; e ρ_p, ρ_{ss}, φ_d e micro para PV. As áreas de pousio apresentaram forte dependência para as mesmas variáveis e nenhuma variável com fraca dependência. Na camada superficial, houve fraca dependência para areia na área CA e areia na área MN.

Na área de CA, as áreas de maiores valores de porosidade drenável contrapõem-se com as zonas de maiores valores de microporosidade. Esse comportamento também foi observado para os mapas de ρ_p e φ.

Na área de PS, as zonas de maior concentração de argila apresentam-se semelhantes às áreas de maiores valores de microporos. O mapa de K_v apresenta comportamento suavizado em relação ao de K_a, K_{ea} e K_v estimado.

Na área de MN, as áreas de maior microporosidade contrapõem-se com as zonas de maior porosidade.

Na área de PV, os locais com maior concentração dos valores de micro e φ_d podem ser identificados no mapa de porosidade (Figura 16 - φ). Os mapas dos coeficientes de permeabilidade na área com aplicação de vinhaça apresentam diferente comportamento para as zonas de maior concentração. O comportamento sugere que para a aplicação da vinhaça devem ser analisados os coeficientes de permeabilidade ao fluxo do próprio líquido em locais que já tiveram aplicação.

Nesse sentido, apesar de se tratar de um líquido, a vinhaça tende a concentrar o potássio nas camadas superiores do solo que recebeu o descarte da vinhaça. Como relatado por Gonzalo et al. (2005), os maiores valores apresentavam-se superficialmente, ocorrendo diminuição com a profundidade.

As correlações de Pearson para as quatro áreas na camada de 0 – 20 cm, estão dispostas na Tabela 11.

Tabela 11 - Correlação de Pearson obtida entre cada *pixel* dos mapas de areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), permeabilidade do solo ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) para camada de 0 – 20 cm.

Parâmetro	Areia	Argila	ρ_p	ρ_{ss}	φ	φd	Micro	Macro	K_a	K_{ea}	K_v	K_{ev}	$K_{v\ estimado}$	θ_s
						CA								
Areia	1	-0,53	-0,13	0,21	0,17	0,11	0,07	0,13	0,26	0,22	0,23	0,21	0,26	-0,12
Argila		1	0,13	0,13	-0,21	0,23	0,09	0,37	-0,21	-0,19	-0,03	-0,14	-0,21	-0,23
ρ_p			1	-0,17	0,21	-0,13	0,10	-0,13	0,29	0,25	0,12	0,11	0,29	0,14
ρ_{ss}				1	-0,52	-0,08	0,23	0,22	-0,21	-0,17	-0,16	-0,21	-0,21	-0,13
φ					1	0,21	0,22	0,21	0,13	0,18	0,11	0,17	0,13	0,29
φ_d						1	0,36	0,11	0,17	0,20	0,16	0,14	0,17	0,31
Micro							1	-0,13	0,19	0,22	0,31	0,34	0,19	0,37
Macro								1	0,84	0,64	0,21	0,29	0,84	0,36
K_a									1	0,93	0,48	0,53	0,93	-0,24
K_{ea}										1	0,51	0,56	0,93	-0,24
K_v											1	0,89	0,48	-0,31
K_{ev}												1	0,53	-0,28
$K_{v\ estimado}$													1	-0,24
θ_s														1
						PS								
Areia	1	-0,32	0,28	-0,23	-0,13	-0,19	0,29	0,37	0,41	0,56	0,13	0,11	0,41	-0,23
Argila		1	-0,21	0,19	0,12	-0,11	-0,35	-0,23	-0,21	-0,23	-0,44	-0,42	-0,21	0,17
ρ_p			1	0,11	0,09	-0,19	0,22	0,39	-0,12	-0,15	-0,11	-0,18	-0,12	0,11
ρ_{ss}				1	-0,47	-0,28	0,15	0,14	-0,65	-0,57	-0,43	-0,43	-0,65	-0,31
φ					1	-0,15	0,12	0,18	-0,24	-0,19	-0,13	-0,22	-0,24	0,15
φ_d						1	0,52	0,14	0,19	0,21	-0,13	-0,14	0,19	0,47
Micro							1	-0,37	0,14	0,19	-0,33	-0,28	0,14	0,44
Macro								1	0,42	0,45	0,34	0,36	0,42	0,11
K_a									1	0,88	0,67	0,63	0,88	-0,17
K_{ea}										1	0,59	0,55	0,88	0,09
K_v											1	0,88	0,67	-0,21
K_{ev}												1	0,63	-0,23
$K_{v\ estimado}$													1	0,19
θ_s														1
						MN								
Areia	1	-0,22	0,13	-0,27	-0,21	0,14	0,17	-0,42	0,22	0,16	0,14	-0,18	0,22	-0,22
Argila		1	-0,19	-0,43	-0,28	-0,21	-0,31	-0,33	-0,11	-0,23	-0,19	-0,36	-0,11	0,10
ρ_p			1	-0,37	0,59	-0,21	0,38	-0,27	-0,19	-0,2	-0,15	-0,21	-0,19	0,29
ρ_{ss}				1	-0,14	-0,23	0,21	-0,43	-0,28	0,22	-0,42	-0,45	-0,28	-0,32
φ					1	0,39	0,44	0,19	-0,24	-0,23	-0,43	-0,48	-0,24	0,47
φ_d						1	0,24	-0,12	-0,20	-0,18	0,14	0,11	-0,20	0,29
Micro							1	-0,21	-0,19	-0,19	-0,23	-0,21	-0,19	0,19
Macro								1	-0,12	-0,17	-0,21	-0,12	-0,12	0,11
K_a									1	0,89	0,59	0,59	0,93	-0,21
K_{ea}										1	0,58	0,58	0,89	-0,21
K_v											1	0,87	0,59	0,13
K_{ev}												1	0,59	0,13
$K_{v\ estimado}$													1	-0,21
θ_s														1
						PV								
Areia	1	-0,28	0,32	-0,44	0,15	0,17	0,11	-0,13	0,16	0,14	0,32	0,33	0,16	0,13
Argila		1	-0,18	0,35	0,17	-0,13	-0,27	-0,22	-0,13	-0,17	-0,21	-0,22	-0,13	0,09
ρ_p			1	-0,32	0,11	0,13	0,30	0,13	0,28	0,26	-0,16	-0,19	0,28	-0,34
ρ_{ss}				1	-0,44	-0,29	-0,49	-0,21	-0,27	-0,30	-0,56	-0,49	-0,27	-0,54
φ					1	0,22	0,41	0,29	0,24	0,21	0,39	0,41	0,24	0,56
φ_d						1	0,21	0,38	0,56	0,54	0,68	0,64	0,56	0,38
Micro							1	0,29	0,27	0,34	0,49	0,50	0,27	0,49
Macro								1	-0,28	-0,20	-0,13	-0,14	-0,28	0,11
K_a									1	0,93	0,49	0,49	0,93	0,21
K_{ea}										1	0,41	0,43	0,93	0,21
K_v											1	0,89	0,49	0,29
K_{ev}												1	0,49	0,29
$K_{v\ estimado}$													1	0,21
θ_s														1

CA: Plantio de cana-de-açúcar; PS: Pousio de dois anos; MN: Mata nativa; PV: Pousio de três anos com aplicação de vinhaça.

Os mapas gerados para K_v estimado apresentaram comportamento semelhante para K_a com valores menores da variável analisada para todas as áreas na camda de 0 – 20 cm.

O modelo exponencial foi o que melhor se ajustou aos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água e vinhaça, bem como ao coeficiente estimado, sendo ajustado para a maioria dos parâmetros analisados. O modelo *Matérn* $_{(k=1,5)}$ somente se ajustou para porosidade drenável na área MN. O ajuste ao modelo *wave* foi encontrado para areia e macroporosidade nas quatro áreas analisadas. O ajuste ao modelo esférico foi encontrado para argila na área CA, MN e PV corroborando com os resultados obtidos para textura de Duffera et al. (2007) e Wang e Shao (2013). O modelo Gaussiano teve ajuste para areia na área PV.

A correlação de Pearson apresentou-se elevada entre os mapas de K_a e K_v e seus respectivos K_{ea} e K_{ev}, com valores de correlação superiores a 0,41 entre os diferentes líquidos e 0,88 para o coeficiente de permeabilidade do solo e coeficiente de permeabilidade específica (Tabela 11).

Com relação à variabilidade espacial apresentada entre os coeficientes de permeabilidade do solo na camada superficial e os valores de dosagem máxima de vinhaça calculados, o estudo conduzido por Peluco et al. (2013) encontrou que os locais com maior suscetibilidade coincidem com as áreas com potencial para receber as maiores doses de vinhaça e com as áreas com maiores porcentuais de argila, assim como verificado no presente estudo.

Barbalho e De Campos (2010) avaliaram a vulnerabilidade natural de solos e águas à contaminação por vinhaça a partir de dados de declividade, tipo e permeabilidade hidráulica dos solos e concluíram que cerca de 60% das terras, que podem ser ocupadas pela cana-de-açúcar, apresenta alta e muito alta vulnerabilidade à aplicação da vinhaça na camada superficial.

Na tabela 12 são apresentados os parâmetros de efeito pepita (C_o), contribuição (C_1), alcance (a) em metros, máxima verossimilhança (VMS), critérios AIC e BIC e grau de dependência espacial (GDE) para as variáveis analisadas na camada de 20 – 40 cm.

Os mapas gerados para K_v estimado apresentam o mesmo comportamento observado para K_a com valores menores da variável analisada para todas as áreas na camda de 20 – 40 cm. Os resultados sugerem que nem sempre as zonas de maior porosidade ou concentração de areia, apresentavam maiores permeabilidades.

Tabela 12 - Modelos de semivariograma ajustados e seus índices de ajuste aos valores de areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}),porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro); coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica (K_{ev}), estimado ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica (θ_s) para a camada de 20 – 40 cm.

Parâmetro	Areia	Argila	ρ_p	ρ_{ss}	φ	φ_d	Micro	Macro	K_a	K_{ea}	K_v	K_{ev}	$K_{v\ estimado}$	θ_s
						CA								
Modelo	Esférico	Esférico	Exp	Exp	Exp	Esférico	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Esférico
C0	19,95	10,41	0,002	0,015	0,002	0,003	0,003	0,001	1,191	1,165	4,167	4,313	0,373	1,486
C1	27,42	63,35	0,006	0,004	0,070	0,002	0,000	0,001	3,608	3,598	4,778	4,651	5,093	2,982
a (m)	180,19	177,39	68,11	209,99	174,69	46,46	317,00	150,82	160,79	159,04	113,05	115,029	94,396	114,628
VMS	-92,77	-93,69	31,64	16,77	46,58	46,39	41,17	55,89	-135,10	-31,82	-94,86	-33,28	-31,54	-92,16
AIC	194,47	195,37	-55,28	-25,53	-85,17	-84,78	-74,33	-103,79	278,14	71,64	197,71	74,57	71,08	192,32
BIC	199,94	200,84	-49,81	-20,06	-79,70	-79,31	-68,86	-98,22	283,60	77,11	203,18	80,04	76,56	197,79
GDE	42,12	14,11	21,92	81,05	2,51	55,56	91,43	40,00	24,82	24,46	46,58	48,12	6,83	33,26
						PS								
Modelo	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Esférico	Exp	Esférico	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Esférico
C0	19,23	7,94	0,002	0,015	0,002	0,000	0,003	0,001	1,191	1,164	4,167	4,313	1,191	0,010
C1	29,09	66,92	0,006	0,004	0,001	0,003	0,000	0,001	3,601	3,598	4,778	4,651	3,602	0,004
a (m)	249,71	244,41	68,11	209,99	174,68	56,75	317,00	112,74	160,79	159,04	113,06	115,03	160,93	302,44
VMS	-93,24	-94,51	31,64	16,77	46,58	46,43	41,17	56,70	-135,10	-31,82	-94,86	-33,28	-92,71	42,92
AIC	194,47	197,03	-55,28	-25,54	-85,17	-85,86	-74,33	-103,78	278,14	71,64	197,71	74,57	193,43	-77,89
BIC	199,94	202,50	-49,81	-20,06	-79,69	-79,39	-68,86	-98,32	283,60	77,11	203,18	80,04	198,90	-72,42
GDE	39,80	10,60	21,92	81,05	72,00	3,57	91,43	42,86	24,85	24,45	46,58	48,12	24,85	72,99
						MN								
Modelo	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Matérn	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp
C0	19,23	7,94	0,002	0,015	0,002	0,001	0,003	0,001	1,191	1,165	4,167	4,313	1,191	0,010
C1	29,09	66,92	0,006	0,004	0,001	0,002	0,000	0,001	3,601	3,598	4,778	4,651	3,602	0,004
a (m)	249,71	244,45	68,11	209,99	174,70	52,30	317,00	150,82	160,79	159,04	113,06	115,03	160,93	322,81
VMS	-93,24	-94,51	31,64	16,77	46,58	46,49	41,17	55,89	-135,10	-31,82	-94,86	-33,28	-92,71	42,79
AIC	194,47	197,03	-55,28	-25,53	-85,17	-84,99	-74,33	-103,78	278,14	71,64	197,71	74,57	193,43	-77,58
BIC	199,94	202,50	-49,812	-20,06	-79,70	-79,52	-68,86	-98,32	283,60	77,11	203,18	80,04	198,90	-72,11
GDE	39,80	10,60	21,918	81,05	72,00	21,43	91,43	40,00	24,85	24,46	46,58	48,12	24,85	71,22
						PV								
Modelo	Gauss	Esférico	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp
C0	0,010	0,013	0,002	0,015	0,008	0,045	0,023	0,079	1,191	1,165	4,167	4,313	1,191	0,010
C1	0,014	0,066	0,006	0,004	0,002	0,083	0,003	0,026	3,601	3,598	4,778	4,651	3,602	0,004
a (m)	162,79	177,97	68,11	209,99	178,63	60,32	380,33	123,53	160,79	159,03	113,06	115,03	160,93	322,81
VMS	-92,31	-94,54	31,64	16,77	46,44	36,03	41,03	54,92	-135,10	-31,82	-94,86	-33,28	-92,71	42,79
AIC	192,61	197,08	-55,28	-25,53	-84,89	-64,07	-74,06	-101,85	278,14	71,64	197,71	74,57	193,43	-77,58
BIC	198,08	202,55	-49,81	-20,06	-79,42	-58,60	-68,59	-96,38	283,60	77,11	203,18	80,04	198,90	-72,11
GDE	42,31	16,88	21,92	81,05	77,14	35,16	88,72	75,50	24,85	24,46	46,58	48,12	24,85	71,22

CA: Plantio de cana-de-açúcar; PS: Pousio de dois anos; MN: Mata nativa; PV: Pousio de três anos com aplicação de vinhaça.

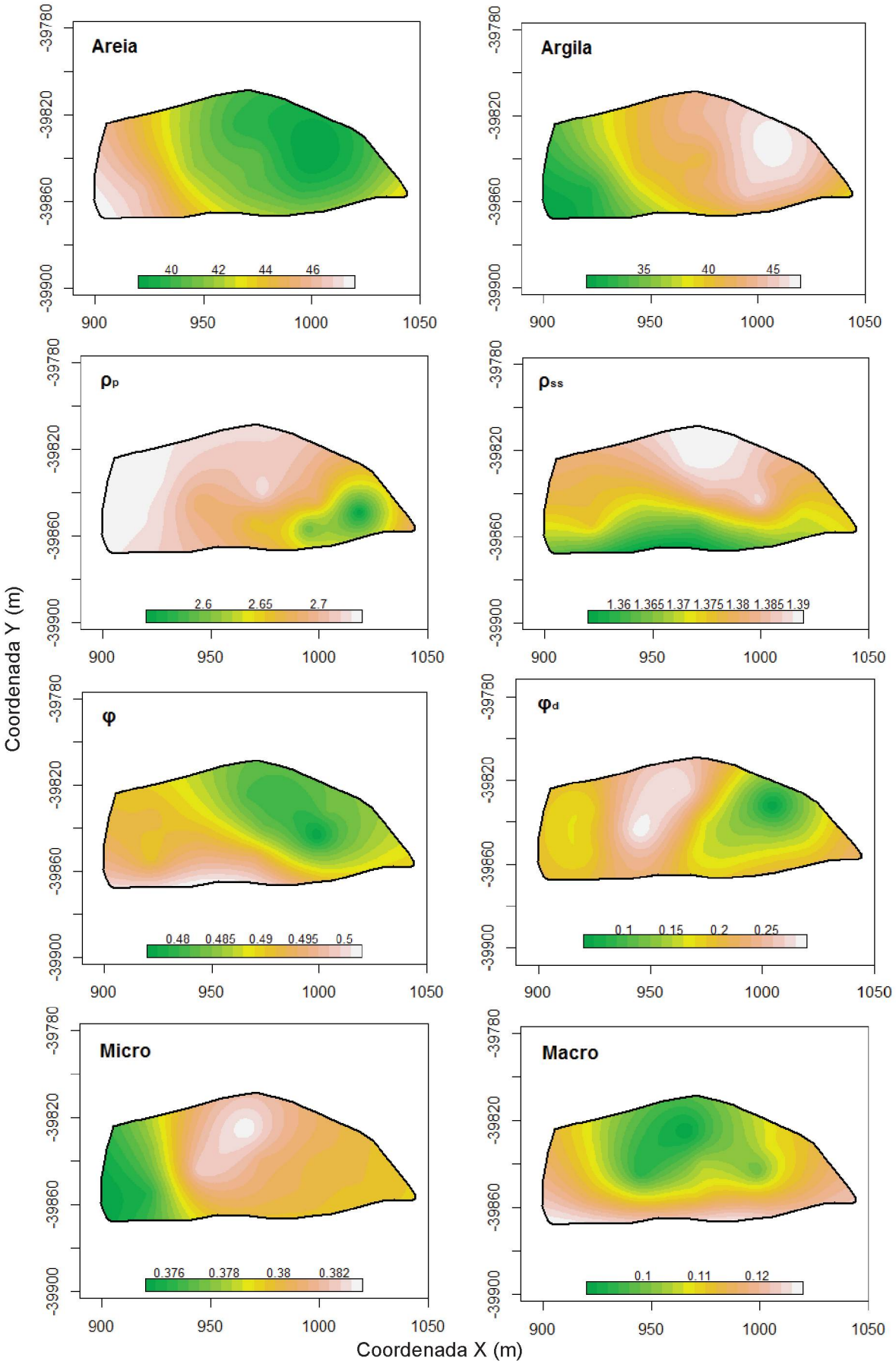


Figura 19 - Mapas da área CA para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 20 – 40 cm.

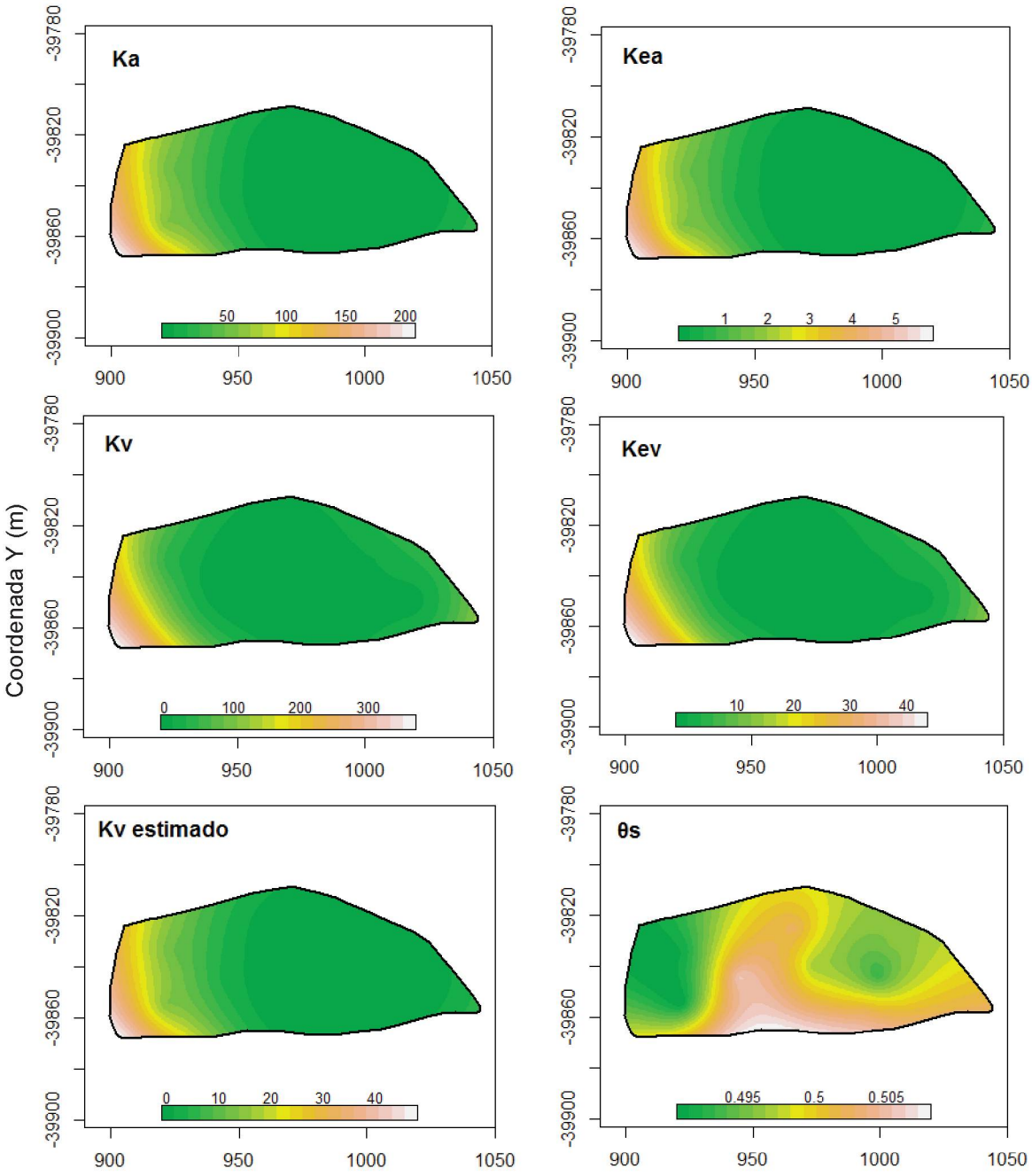


Figura 20 - Mapas da área CA para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada 20 – 40 cm.

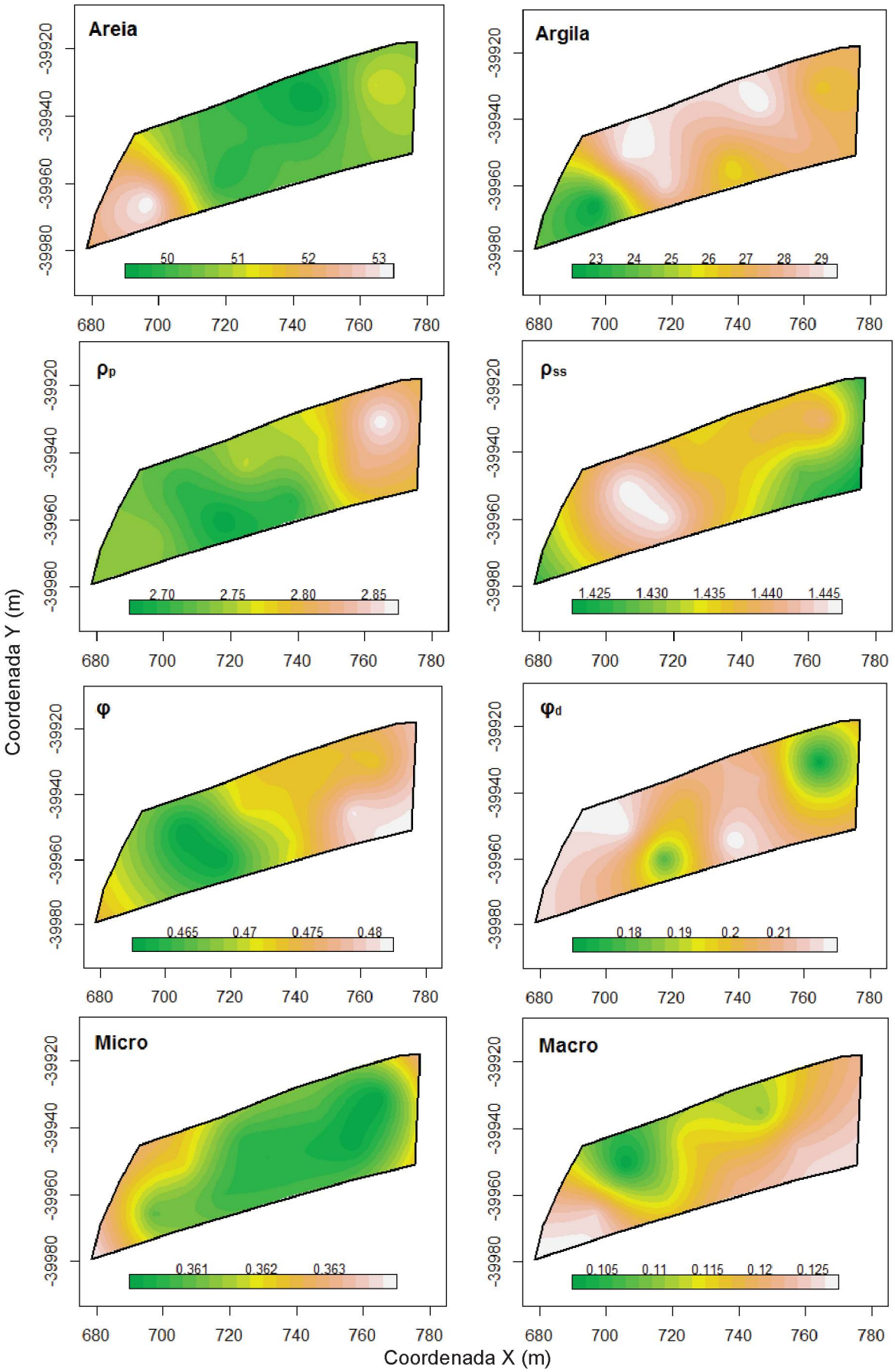


Figura 21 - Mapas da área PS para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 20 – 40 cm.

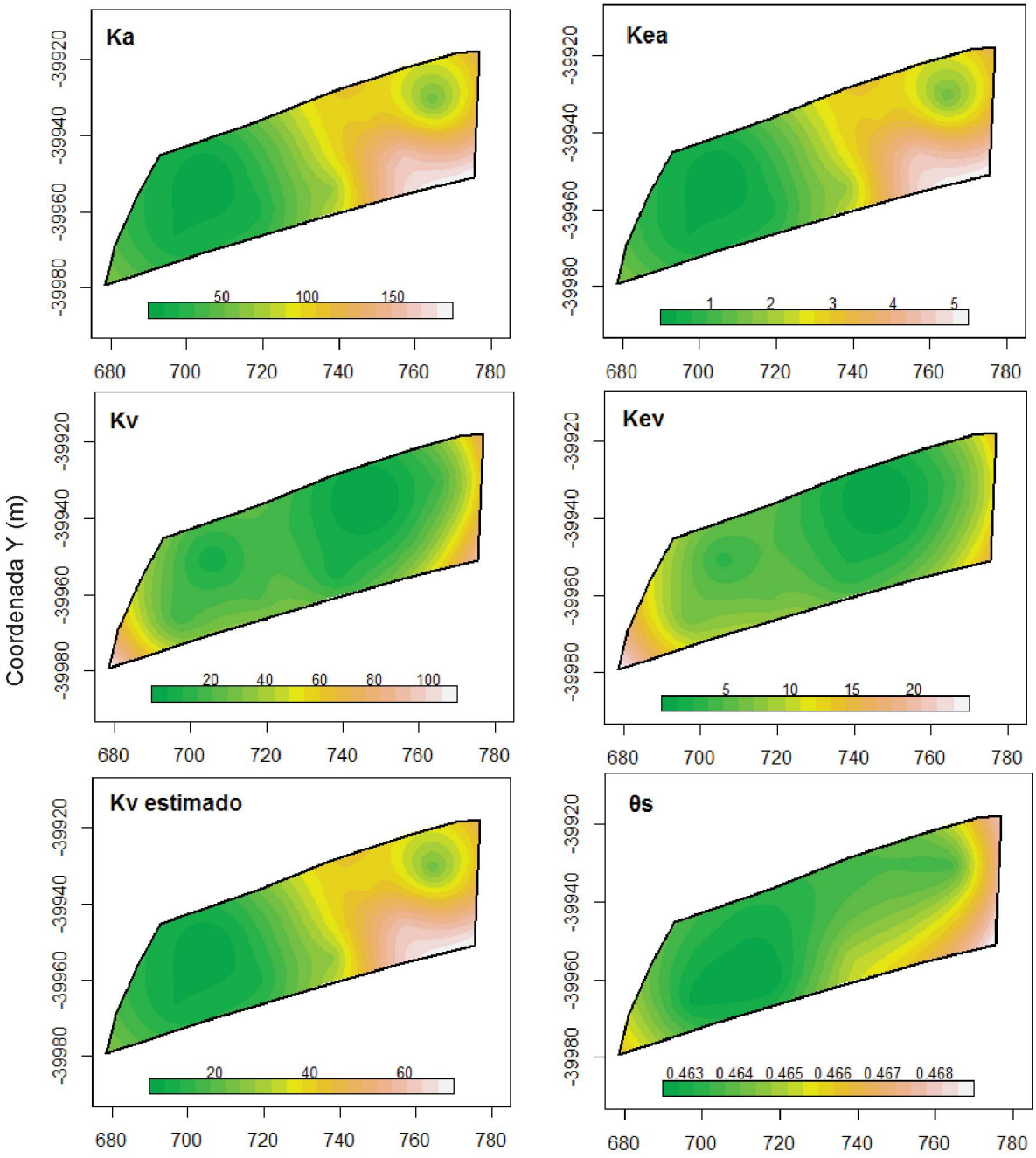


Figura 22 - Mapas da área PS para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada 20 – 40 cm.

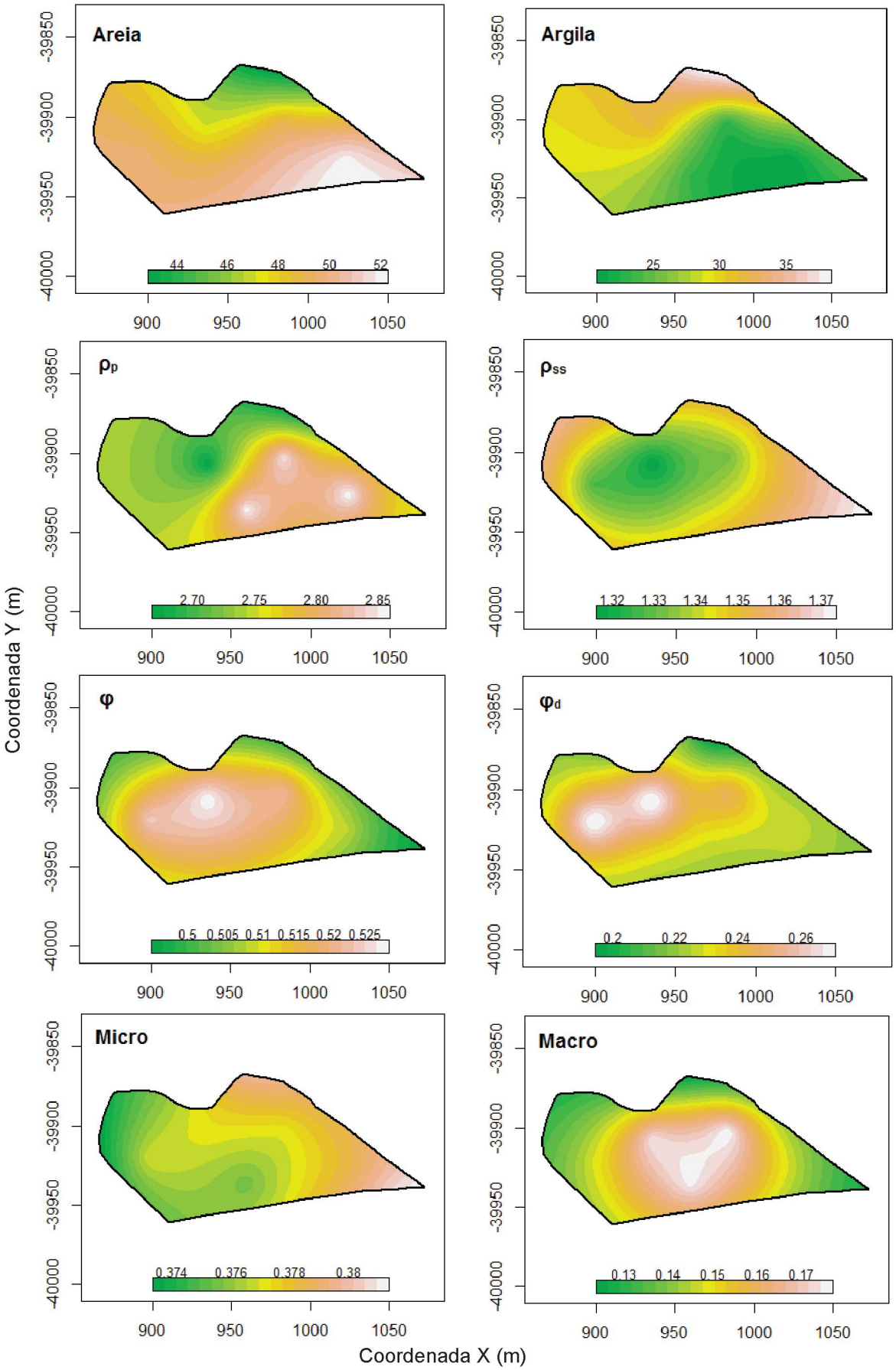


Figura 23 - Mapas da área MN para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 20 – 40 cm.

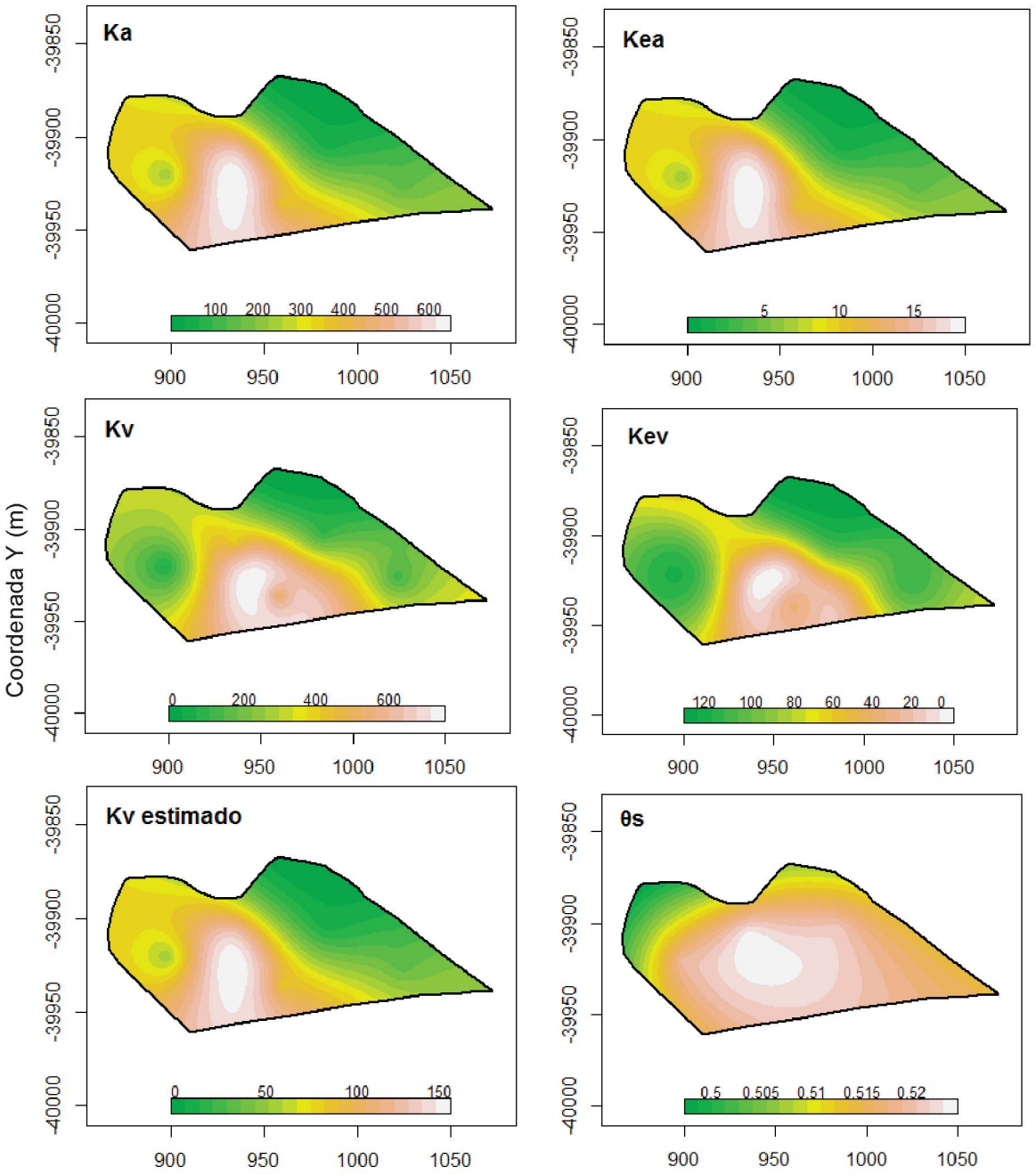


Figura 24 - Mapas da área MN para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}),estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada 20 – 40 cm.

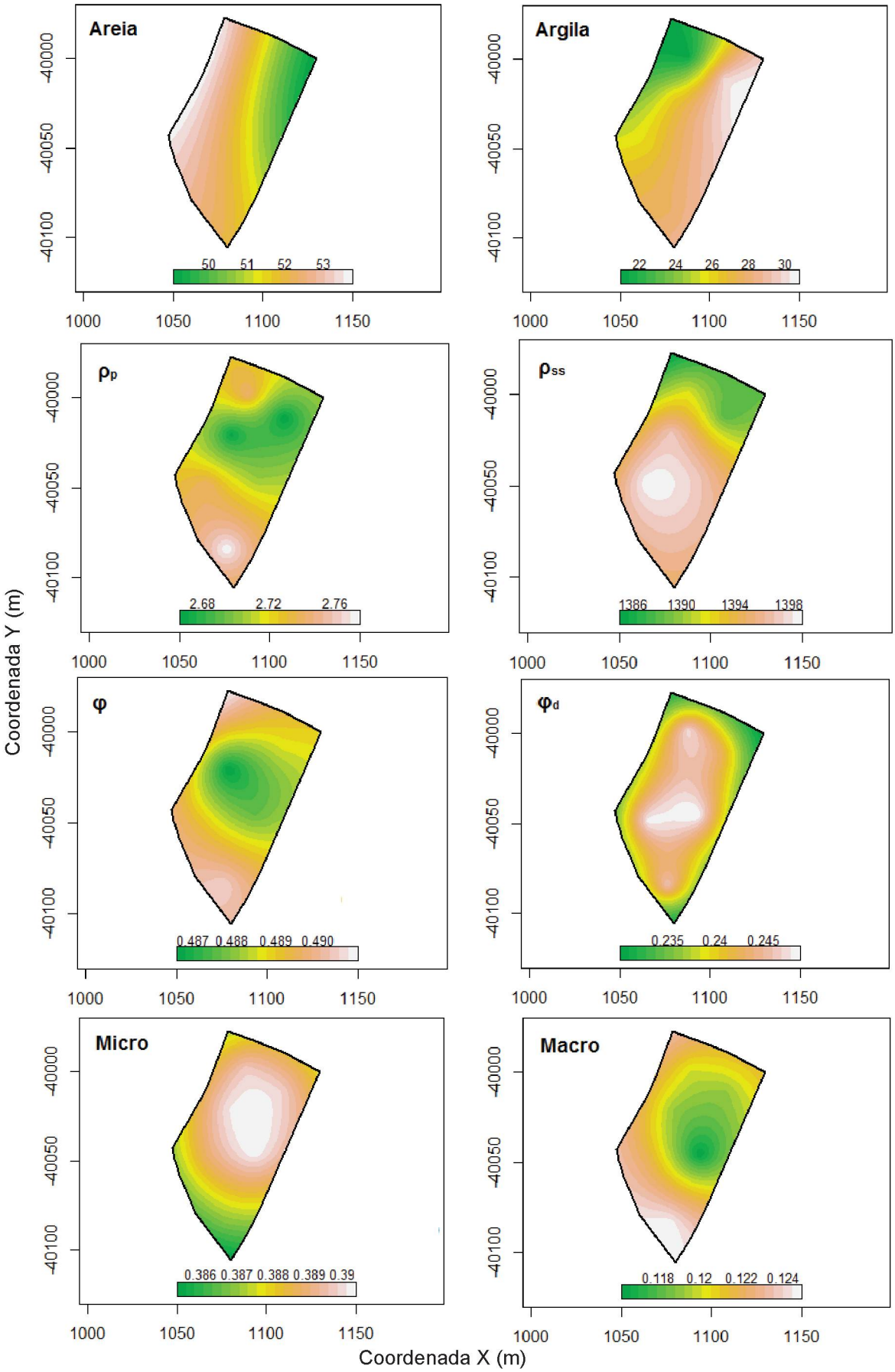


Figura 25 - Mapas da área PV para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro) na camada de 20 – 40 cm.

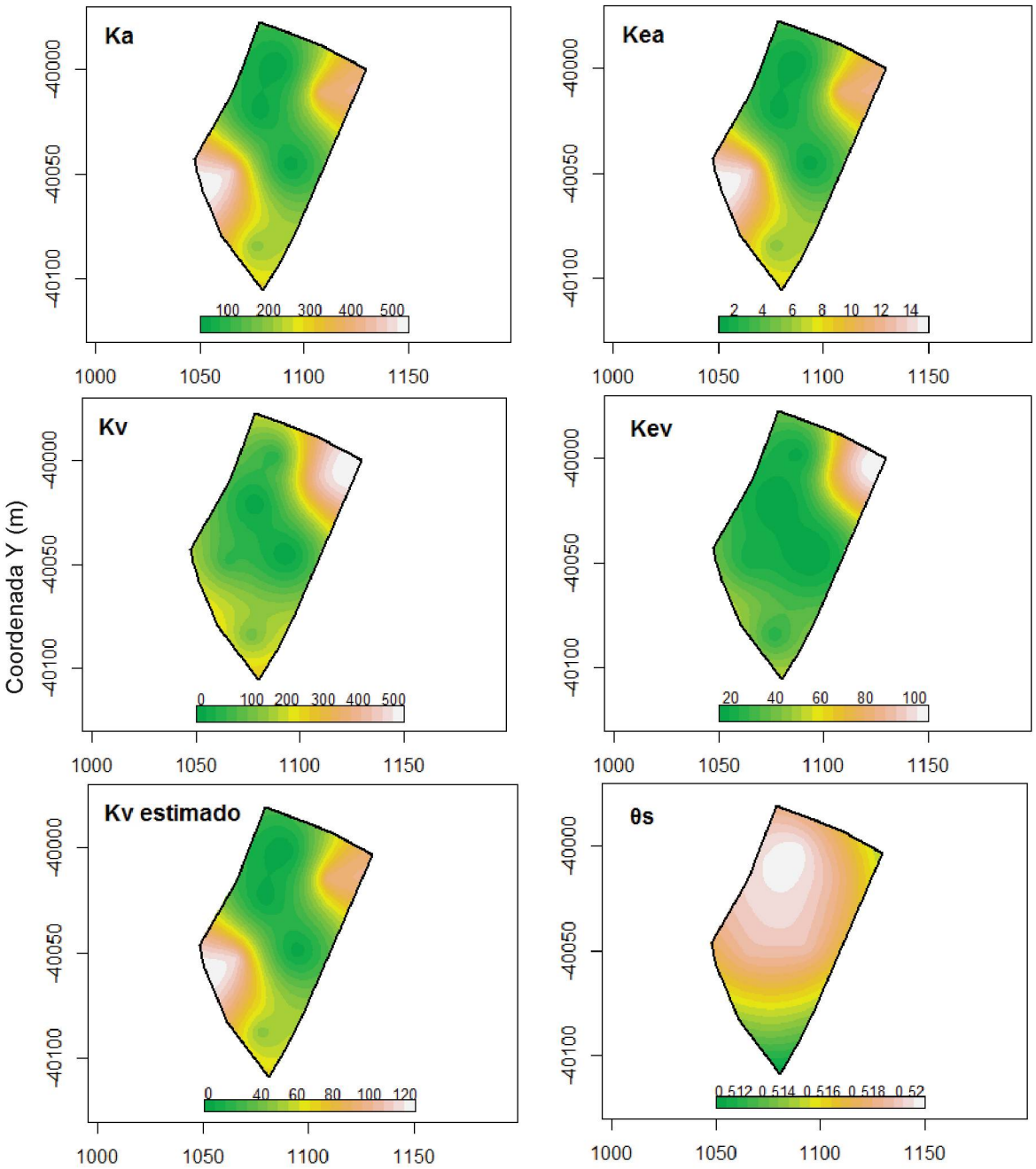


Figura 26 - Mapas da área PV para os coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada 20 – 40 cm.

Na área CA, as zonas de maior concentração de microporosidade assemelham-se das zonas de maior concentração de argila. Os mapas dos permeabilidade do solo apresentaram comportamento semelhante na camada. Nesse sentido, como houve pouca variação na predição, o mapa do coeficiente de K_{ea} poderia ser utilizado na estimativa de K_v.

A variabilidade de áreas sujeitas a aplicação de vinhaça, como é o caso da área CA de cultivo de cana-de-açúcar, deve ser avaliada, pois em uma área cultivada existem, além da variabilidade natural, fontes adicionais de heterogeneidade no solo, devido ao manejo e as variações influenciam o acúmulo de matéria orgânica, compactação e erosão hídrica.

Na área PS, as áreas de maiores concentrações de areia contrapõem-se com as zonas de maiores valores de macroporosidade. Esse comportamento também foi observado para os maiores valores de densidade do solo seco. O mapa do coeficiente de K_v apresenta comportamento diferente ao coeficiente de K_a. O comportamento do mapa de K_v e K_{ev} apresentam menores valores e maior homogeneidade quando compara ao fluxo da água.

Na área MN, os mapas de porosidade, porosidade drenável e macroporosidade apresentam comportamento semelhante. As zonas de maior valor das três variáveis apresentam-se inseridas na zona de maior concentração de areia. Os mapas sugerem que o interior da área de mata nativa apresenta maior permeabilidade. Contudo, este comportamento central foi expresso no mapa de K_v e K_{ev}. Para os coeficientes hidráulicos, as zonas de maior concentração das variáveis estão deslocadas à esquerda.

Os mapas do coeficiente K_a e K_{ea} apresentam áreas de maior concentração semelhantes à direita ao fluxo de vinhaça. Na área com aplicação de vinhaça (PV), para as duas profundidades analisadas há uma maior proximidade da escala de valores entre os coeficientes de permeabilidade.

Do mesmo modo que a camada superficial, o modelo exponencial apresentou o ajuste mais adequado para a maioria dos parâmetros analisados. As evidências de ajuste ao modelo exponencial também foram observadas para as mesmas propriedades físicas do solo nos estudos produzidos por Cardoso et al. (2016), Oliveira et al. (2015) e Behera e Shukla (2015).

O modelo esférico se ajustou aos dados de areia, argila, φ_d e θ_s para área de CA; φ_d, macroporosidade e θ_s para área PS e argila para área PV. O modelo *Matérn* $_{(k=1,5)}$ apresentou ajuste adequado para φ_d para área de MN da mesma forma que a camada superficial. O modelo Gaussiano apresentou ajuste para areia na área PV. O ajuste aos modelos esférico e Gaussiano corroborando com os resultados obtidos por Moradi et al. (2016) Wang e Shao

(2013). O modelo *wave* normalmente é ajustado a fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão. Da Silva et al. (2017) encontrou ajuste ao modelo *wave* para as variáveis de permeabilidade e difusividade hidráulica e capacidade específica de água. O modelo se ajustou às variáveis estimadas pelo modelo de pedotransferência Splintex 1.0. A heterogeneidade das propriedades hidráulicas do solo decorrentes de fatores como estrutura do solo e umidade também foram observadas pelos autores.

Com relação ao método de ajuste, o estudo realizado por Nunes Nesi et al. (2013) determinou que as medidas de validação cruzada pouco acrescentam quando comparada à verossimilhança, demonstrando assim que este critério se apresenta como um método eficiente para a escolha do modelo. Contudo, o autor destaca o cuidado com a escolha do modelo, a observação de tendências e os locais atípicos para obtenção de resultados compatíveis com a realidade da área.

Com relação aos valores de alcance, os maiores valores foram observados para microporosidade com alcance de 380,33 m e menores para φ_d de 46,46 m para as quatro áreas analisadas. Os valores de alcance, mínimo e máximo na camada de 20 – 40 cm foram superiores aos valores encontrados na camada superficial, dentro do intervalo relatado por Iqbal et al. (2005).

Da mesma forma, na camada de 20 – 40 cm, a maioria das variáveis apresentou moderada dependência espacial. A dependência espacial forte foi encontrada para argila, ρ_p, K_a, K_v estimado e K_{ea} em todas as áreas; φ_d nas áreas PS e MN e para φ na área CA. As dependências espaciais classificadas como fraca foram observadas para microporosidade e ρ_{ss} para todas as áreas analisadas e φ e macroporosidade na área PV.

As correlações de Pearson para as quatro áreas na camada de 20 – 40 cm, estão dispostas na Tabela 13.

A correlação de Pearson apresentou-se elevada entre os mapas de K_a e K_v e seus respectivos K_{ea} e K_{ev}. A correlação apresentou-se elevada entre os mapas de K_a e K_v e seus respectivos K_{ea} e K_{ev}, com valores mínimos de acima de 0,89 e entre os coeficientes dos diferentes líquidos de 0,41.

Tabela 13 - Correlação de Pearson obtida entre cada *pixel* dos mapas de areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) para camada de 20 – 40 cm.

Parâmetro	Areia	Argila	ρp	ρss	φ	φd	Micro	Macro	Ka	Kea	Kv	Kev	$Kv_{estimado}$	θ_s
						CA								
Areia	1	-0,66	-0,43	-0,39	0,58	0,24	-0,45	0,29	0,62	0,60	0,48	0,49	0,62	0,11
Argila		1	0,17	0,22	-0,33	-0,24	0,54	0,13	-0,41	-0,43	-0,51	-0,51	-0,41	0,14
ρ_p			1	0,48	-0,26	0,18	0,21	-0,29	-0,39	-0,36	-0,54	-0,50	-0,39	-0,19
ρ_{ss}				1	-0,21	0,19	0,17	-0,23	-0,31	-0,31	-0,41	-0,41	-0,31	-0,30
φ					1	0,27	-0,21	0,24	0,13	0,14	0,11	0,13	0,13	0,19
φ_d						1	0,23	0,14	-0,32	-0,32	-0,29	-0,28	-0,32	0,23
Micro							1	-0,43	-0,48	-0,43	-0,34	-0,32	-0,48	0,18
Macro								1	0,34	0,32	0,41	0,39	0,34	-0,13
K_a									1	0,94	0,68	0,68	0,94	-0,13
K_{ea}										1	0,68	0,68	0,94	-0,13
K_v											1	0,88	0,68	-0,17
K_{ev}												1	0,67	-0,17
$K_{v\ estimado}$													1	-0,13
θ_s														1
						PS								
Areia	1	-0,65	0,23	-0,34	-0,13	-0,27	0,41	0,13	0,23	0,22	0,57	0,56	0,23	0,37
Argila		1	-0,34	0,21	0,14	0,19	-0,54	-0,65	-0,54	-0,54	-0,61	-0,60	-0,54	-0,28
ρ_p			1	-0,24	0,18	-0,23	0,21	-0,17	0,53	0,53	0,42	0,43	0,53	0,23
ρ_{ss}				1	-0,34	-0,27	-0,56	-0,32	-0,17	-0,17	-0,32	-0,32	-0,17	-0,45
φ					1	-0,22	0,15	-0,10	0,46	0,45	0,24	0,24	0,46	0,11
φ_d						1	-0,34	0,29	0,17	0,16	-0,41	-0,41	0,17	-0,26
Micro							1	-0,49	0,23	0,23	0,35	0,35	0,23	0,44
Macro								1	-0,29	-0,28	-0,48	-0,48	-0,29	-0,24
K_a									1	0,93	0,64	0,64	0,93	0,34
K_{ea}										1	0,62	0,62	0,93	0,34
K_v											1	0,91	0,64	0,59
K_{ev}												1	0,64	0,58
$K_{v\ estimado}$													1	0,58
θ_s														1
						MN								
Areia	1	-0,57	0,23	-0,11	0,23	0,12	-0,17	0,19	0,22	0,22	0,19	0,19	0,22	0,31
Argila		1	-0,48	0,10	-0,14	-0,27	0,13	-0,19	-0,32	-0,32	-0,27	-0,26	-0,32	0,08
ρ_p			1	-0,32	0,16	0,21	0,13	-0,28	-0,19	-0,19	0,11	0,11	-0,19	0,27
ρ_{ss}				1	-0,56	-0,42	0,13	-0,43	0,18	0,17	-0,23	-0,23	0,18	-0,16
φ					1	0,45	0,23	0,21	0,12	0,12	0,26	0,26	0,12	0,21
φ_d						1	0,25	0,25	0,14	0,14	0,19	0,19	0,14	0,25
Micro							1	-0,23	-0,18	-0,17	-0,23	-0,23	-0,18	0,10
Macro								1	0,28	0,28	0,32	0,37	0,28	0,24
K_a									1	0,89	0,43	0,43	0,89	0,16
K_{ea}										1	0,45	0,45	0,86	0,16
K_v											1	0,83	0,43	0,27
K_{ev}												1	0,43	0,28
$K_{v\ estimado}$													1	0,16
θ_s														1
						PV								
Areia	1	-0,56	0,24	0,21	0,14	0,19	0,12	0,32	-0,17	-0,17	-0,19	0,15	-0,17	0,22
Argila		1	0,11	0,27	-0,17	0,20	0,36	-0,24	-0,26	-0,26	-0,31	0,08	-0,26	0,21
ρ_p			1	-0,34	0,23	-0,21	-0,19	-0,20	0,13	0,13	0,19	0,11	0,13	-0,14
ρ_{ss}				1	-0,18	0,23	0,18	-0,12	-0,22	-0,22	-0,37	-0,31	-0,22	0,28
φ					1	-0,27	-0,31	0,13	0,12	0,12	0,17	0,22	0,12	0,05
φ_d						1	0,43	-0,39	-0,29	-0,29	-0,34	-0,14	-0,29	0,29
Micro							1	-0,56	-0,38	-0,38	-0,35	0,16	-0,38	0,68
Macro								1	0,32	0,32	0,37	0,33	0,32	-0,17
K_a									1	0,89	0,48	0,43	0,89	0,11
K_{ea}										1	0,41	0,41	0,89	0,11
K_v											1	0,81	0,48	-0,09
K_{ev}												1	0,48	-0,11
$K_{v\ estimado}$													1	-0,27
θ_s														1

CA: Plantio de cana-de-açúcar; PS: Pousio de dois anos; MN: Mata nativa; PV: Pousio de três anos com aplicação de vinhaça.

A correlação para cada variável evidenciou os mapas que apresentaram correlação positiva como foi o caso dos coeficientes de permeabilidade hidráulico e ao fluxo de vinhaça com seus coeficientes específicos, respectivamente. Montenegro e Montenegro (2006) encontraram correlação semelhante entre as variáveis de textura e permeabilidade.

Na tabela 14 são apresentados os valores RMSE entre cada pixel dos mapas do coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça (K_v) e do coeficiente ao fluxo de vinhaça estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e dos coeficientes de permeabilidade específica para água (K_{ea}) e para vinhaça (K_{ev}).

Tabela 14 - Valores de RMSE (mm h^{-1}) obtidos entre cada *pixel* dos mapas de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça medido (K_v) e estimado ($K_{v\ estimado}$) e de permeabilidade específica para água (K_{ea}) e para vinhaça (K_{ev}) para as camadas de 0 – 20 e 20 – 40 cm.

Parâmetro	CA	PS	MN	PV	CA	PS	MN	PV
	0 – 20 cm				20 – 40 cm			
K_v x $K_{v\ estimado}$	5,58	13,56	56,73	21,34	69,82	57,89	46,59	54,32
K_{ea} x K_{ev}	27,75	31,45	*44,78*	42,45	8,39	11,43	8,63	9,87

CA: Plantio de cana-de-açúcar; PS: Pousio de dois anos; MN: Mata nativa; PV: Pousio de três anos com aplicação de vinhaça.

Os resultados de RMSE sugerem que os erros na predição dos mapas de variabilidade espacial das permeabilidades ao fluxo de vinhaça são menores na camada superficial. Esse comportamento só não foi observado para área de MN. A área com cultivo de cana-de-açúcar apresentou os menores valores de RMSE para a camada de 0 – 20 cm para os mapas dos coeficientes ao fluxo de vinhaça e na camada 20 – 40 cm para os mapas dos coeficientes específicos. O fato da área de CA apresentar maior densidade amostral pode ter colaborado para uma maior representatividade na predição.

Áreas pedologicamente semelhantes podem apresentar comportamento espacial distintos em seus atributos quando submetidas a diferentes práticas de manejo (CORÁ et al., 2004). Com relação aos efeitos da aplicação de vinhaça nas propriedades físicas e nos respectivos mapas, os resultados apresentados demonstraram que as doses de vinhaça não promoveram alterações nas propriedades físicas do solo à curto prazo. Nesse sentido, o estudo conduzido por Silva et al. (2016) corroboram os resultados obtidos no presente estudo.

6. CONCLUSÃO

Com base nas condições em que esse estudo foi realizado e diante dos resultados obtidos, conclui-se que:

O coeficiente de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça é em média oito vezes menor que o coeficiente de permeabilidade hidráulica do solo e a estimativa da permeabilidade do solo ao fluxo da vinhaça a partir dos valores medidos com água e viscosidade da vinhaça apresentou-se condizente para valores maiores que 1 mm/h;

Os valores de alcance e dependência espacial foram semelhantes para os coeficientes de permeabilidade hidráulica e ao fluxo de vinhaça quando comparados aos coeficientes específicos dos respectivos líquidos evidenciados pela proporcionalidade entre os mapas de K e macroporosidade e os coeficientes K_a e K_{ea}; e, K_v e K_{ev};

Os mapas dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de vinhaça a partir dos valores medidos com água e viscosidade da vinhaça apresentaram-se aproximados entre os coeficientes analisados;

A investigação da diferença entre variabilidade espacial de K_a e K_v permitiu a identificação das diferenças no comportamento da variabilidade da área quando analisada somente a permeabilidade hidráulica do solo. Assim como, a análise da variabilidade espacial das propriedades físicas, especificadamente dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água e vinhaça possibilitou, concomitantemente, a identificação de áreas passíveis de impactos ambientais decorrentes da aplicação da vinhaça no solo.

Por fim, sugere-se que os efeitos da aplicação da vinhaça nos coeficientes de permeabilidade sejam analisados em outras classes de solo investigando também a variabilidade espaço-temporal a fim de descrever os efeitos dessa prática em longo prazo.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**. NBR 7181/88. Análise granulométrica. 1988.

ADHIKARI, P.; SHUKLA, M. K.; MEXAL, J. G. Spatial variability of hydraulic conductivity and sodium content of desert soils: Implications for management of irrigation using treated wastewater. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 5, p. 1711-1721, 2012.

AKIS, R. Spatial variability of soil solute and saturated hydraulic conductivity affected by undrained water table conditions. **Precision Agriculture**, v. 16, n. 3, p. 330-359, 2015.

AQUINO, R. E. D.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; OLIVEIRA, I. A. D.; TEIXEIRA, D. D. B.; CUNHA, J. M. D. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil physical properties in southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 21-30, 2015.

ARMINDO, R. A.; WENDROTH, O. Physical soil structure evaluation based on hydraulic energy functions. **Soil Science Society American Journal**, v. 80, n. 5, p. 1167-1180, 2016.

BARBALHO, M. G. S.; DE CAMPOS, A. B. Vulnerabilidade natural dos solos e águas do estado de Goiás à contaminação por vinhaça utilizada na fertirrigação da cultura de cana-de-açúcar. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 155-170, 2010.

BARROS, P. A.; RÉGIS PEDROSA, E. M.; SOARES DE OLIVEIRA CARDOSO, M.; MONTEIRO ROLIM, M. Relationship between soil organic matter and nematodes in sugarcane fields. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 2, p. 551-559, 2017.

BARROS, R. P.; ALMEIDA VIÉGAS, P. R.; LIMA DA SILVA, T.; MATOS DE SOUZA, R.; BARBOSA, L.; ALMEIDA VIÉGAS, R.; SOARES DE MELO, A. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 3, 2010.

BEHERA, S. K.; SHUKLA, A. K. Spatial distribution of surface soil acidity, electrical conductivity, soil organic carbon content and exchangeable potassium, calcium and magnesium in some cropped acid soils of India. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 1, p. 71-79, 2015.

BERNAL, A. P.; DOS SANTOS, I. F. S.; SILVA, A. P. M.; BARROS, R. M.; RIBEIRO, E. M. Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO_2 emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 260-271, 2017.

BIVAND, R.; ONO, H.; DUNLAP, R. **classInt**: Choose univariate class intervals. R package version 0.1-14. 2009.

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

BRASIL. Decreto Nº 75.593, de 14 de novembro de 1975. **Diário Oficial da União**. Poder Executivo, DF,1975.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Diário Oficial da União**, DF, 2005.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 375, de 29 de agosto 2006. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Diário Oficial da União**, DF, 2006.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº430, de 13 de maio de 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Diário Oficial da União**, DF, 2011.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 002, de 23 de janeiro de 1986. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Diário Oficial da União**, DF, 1986

BRITO, A. S. **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar em função dos conteúdos de água e ar no solo**. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo, p. 144. 2010.

BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 4, 2009.

BRUNDTLAND, G. H.; AHALID, M.; AGNELLI, S.; AL-ATHEL, S. A.; CHIDZERO, B.; FADIKA, L. M.; MAUFF, V. et al. Development and international economic co-operation: environment. **Report of the World Commission on Environment and Development**, Tokyo, 1987.

BURGESS, T. M. ; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. **Journal of soil science**, v. 31, n. 2, p. 315-331, 1980.

CARDOSO, 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. 143-151, 2016.

CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; JÚNIOR, C. A.; SANTOS, C. F.; LIBARDI, P. L. Spatial variability of soil potassium in sugarcane areas subjected to the application of vinasse. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 86, n. 4, p. 1999-2012, 2014.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Norma Técnica P4.231 – **Vinhaça: Critérios e Procedimentos para Aplicação no Solo Agrícola**. São Paulo. 2005.

CHÁVEZ RODRÍGUEZ, M. F. **Uso de água na produção de etanol de cana de açúcar**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, p. 198, 2010.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L., TORMENA, C. A.; CERRI, C. E.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156-168, 2016.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira**. Cana, Segundo levantamento, Brasília. Safra 2018/19, p. 138, 2018. Disponível 08/11/2018.

CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de

agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, 2004.

CORREIA, J. E.; CHRISTOFOLETTI, C. A.; MARCATO, A. C. C.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Histopathological analysis of tilapia gills (Oreochromis niloticus Linnaeus, 1758) exposed to sugarcane vinasse. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 135, p. 319-326, 2017.

COSTA, C. D. S.; PEDROSA, E. M.; ROLIM, M. M.; SANTOS, H. R.; CORDEIRO NETO, A. T. Effects of vinasse application under the physical atributes of soil covered with sugarcane straw. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, p. 636-646, 2013.

CHAUDHARI, P. R.; AHIRE, D. V.; AHIRE, V. D.; CHKRAVARTY, M.; MAITY, S. Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore soil. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 3, n. 2, p. 1-8, 2013.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J. P.; CORREIA, J. E.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2752-2761, 2013.

DA SILVA, N. F.; NETO, J. A. L.; TEIXEIRA, M. B.; CUNHA, F. N.; DE MIRANDA, J. H.; COELHO, R. D. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça**. Irriga**, v. 1, n. 01, p. 340, 2012.

DA SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; BRITO, A. D. S.; SCHAAP, M. G. An Assessment of Pedotransfer Function Performance for the Estimation of Spatial Variability of Key Soil Hydraulic Properties. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 9, 2017.

DALRI, A. B.; CORTEZ, G. E. P.; RIUL, L. G. S.; ARAÚJO, J. A. C.; CRUZ, R. L. Influência da aplicação de vinhaça na capacidade de infiltração de um solo de textura franco arenosa. **Irriga**, v. 15, n. 4, p. 344, 2018.

DE CARVALHO, A. L.; ANTUNES, C. H.; FREIRE, F. Economic energy environment analysis of prospective sugarcane bioethanol production in Brazil. **Applied Energy**, v. 181, p. 514-526, 2016.

DE JONG VAN LIER, Q.; LIBARDI, P. L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, 1999.

DE SOUZA, L. G. A.; DE MORAES, M. A. F. D. Externalidades sociais da produção de combustíveis no estado do Paraná. **Economia & Região**, v. 2, n. 2, p. 115-134, 2015.

DEL NERY, V.; ALVES, I.; DAMIANOVIC, M. H. R. Z.; PIRES, E. C. Hydraulic and organic rates applied to pilot scale UASB reactor for sugar cane vinasse degradation and biogas generation. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 411-417, 2018.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A.; GATE, O.P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n.2, p. 185-189, 2004.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR., P. J. **Model-Based geostatistics**. Springer, p. 228, 2007.

DOELSCH, E.; MASION, A.; CAZEVIEILLE, P.; CONDOM, N. Spectroscopic characterization of organic matter of a soil and vinasse mixture during aerobic or anaerobic incubation. **Waste Management**, n. 6, v. 29, p. 1929-1935, 2009.

DUFFERA, M.; WHITE, J. G.; WEISZ, R. Spatial variability of Southeastern US Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management. **Geoderma**, v. 137, n. 3, p. 327-339, 2007.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. Vinhaça de cana-de-açúcar. **Agropecuária**, 2000.

FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. **Journal of environmental management**, v. 145, p. 210-229, 2014.

FUESS, L. T.; GARCIA, M. L.; ZAIAT, M. Seasonal characterization of sugarcane vinasse: Assessing environmental impacts from fertirrigation and the bioenergy recovery potential through biodigestion. **Science of The Total Environment**, v. 634, p. 29-40, 2018.

GAJEM, Y. M. Spatial structure of physical properties of a typic torrifluvent. **Repository UA Campus**. The university of Arizona. University Libraries, 1980.

GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. Assessment of spatial variability of soil physical and hydraulic properties in Netravati catchment, Karnataka State, India. In: **ICTSD - International Conference on**. IEEE, p. 1-6, 2015.

GIORGI, E.; DIGGLE, P. J.; SNOW, R. W.; NOOR, A. M.Geostatistical Methods for Disease Mapping and Visualisation Using Data from Spatio-temporally Referenced Prevalence Surveys. **International Statistical Review**, 2018.

GONZALO, D. D. P.; CASA GRANDE, J. C.; SOARES, M. R. Lixiviação de potássio em solos adubados com vinhaça. **Congresso brasileiro de ciência do solo (SBCS)**, 30, 2005, Recife. Anais. Recife, 2005.

GÜRKAN, G. A. K.; DEMIREL, B.; SELVI, K. Ç.; KABAS, Ö.; VLADUT, V. Evaluation of waste biomass from oat cultivation for energy. **Acta Technica Corviniensis**, v. 9, n. 3, p. 163, 2016.

HAJRASULIHA, S.; BANIABBASSI, N.; METTHEY, J.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil sampling for salinity studies in southwest Iran**. Irrigation Science**, v. 1, n. 4, p. 197-208, 1980.

HAMPTON, K. H.; SERRE, M. L.; GESINK, D. C.; PILCHER, C. D.; MILLER, W. C. Adjusting for sampling variability in sparse data: geostatistical approaches to disease mapping. **International journal of health geographics**, v. 10, n. 1, p. 54, 2011.

HOANG, N. V.; FURTADO, A.; DONNAN, L.; KEEFFE, E. C.; BOTHA, F. C.; HENRY, R. J. High-throughput profiling of the fiber and sugar composition of sugarcane biomass. **BioEnergy Research**, v. 10, n. 2, p. 400-416, 2017.

HUF DOS REIS, A. M.; ARMINDO, R. A.; DURÃES, M. F.; DE JONG VAN LIER, Q. Evaluating pedotransfer functions of the Splintex model. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 4, p. 685-697, 2018.

HUANG, M.; ZETTL, J. D.; BARBOUR, S. L.; PRATT, D. Characterizing the spatial variability of the hydraulic conductivity of reclamation soils using air permeability. **Geoderma**, v. 262, p. 285-293, 2016.

IPEA 2015. **Instituto de pesquisa econômica aplicada**. IPEADATA. Disponível em: http://www.ipeadata.gov.br. Acesso em: 20 junho de 2017

IQBAL, J.; THOMASSON, J. A.; JENKINS, J. N.; OWENS, P. R.; WHISLER, F. D. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 4, p. 1338-1350, 2005.

JARVIS, N.; FORKMAN, J.; KOESTEL, J.; KÄTTERER, T.; LARSBO, M.; TAYLOR, A. Long-term effects of grass-clover leys on the structure of a silt loam soil in a cold climate. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 247, p. 319-328, 2017.

JIANG, Z. P.; LI, Y. R.; WEI, G. P.; LIAO, Q.; SU, T. M.; MENG, Y. C.; LU, C. Y. Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. **Sugar Tech**, v. 14, n. 4, p. 412-417, 2012.

KALAVATHI, D. F.; UMA, L.; SUBRAMANIAN, G. Degradation and metabolization of the pigment — Melanoidin in distillery effluent by the marine cyanobacterium Oscillatoria boryana BDU 92181. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 29, n. 4-5, p. 246-251, 2001.

KELSALL, J.; WAKEFIELD, J. Modeling spatial variation in disease risk: a geostatistical approach. **Journal of the American Statistical Association**, v. 97, n. 459, p. 692-701, 2002.

KUNCORO, P. H.; KOGA, K.; SATTA, N.; MUTO, Y. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 172-179, 2014.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e didática**. v. 2, p. 19-33, 2006.

LEWIS, C.; ALBERTSON, J.; XU, X.; KIELY, G. Spatial variability of hydraulic conductivity and bulk density along a blanket peatland hillslope. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 10, p. 1527-1537, 2012.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 2 ed. São Paulo – SP. 2012.

LIMA, F. A.; DOS SANTOS JUNIOR, A. C.; MARTINS, L. C.; SARROUH, B.; LOFRANO, R. C. Z. Revisão sobre a toxicidade e impactos ambientais relacionados à vinhaça, efluente da indústria sucroalcooleira. **Cadernos UniFOA**, v. 11, n. 32, p. 27-34, 2016.

LOPEZ PANTOJA, D. E.; MERCADO SAMANEZ, C. P.; GUTIERREZ CASTRO, J.; LUCENA AIUBE, F. A. Valoração econômica da flexibilidade de produção em diferentes regiões do setor sucroalcooleiro brasileiro. **Revista Brasileira de Gestão de Negócios**, v. 18, n. 60, p. 226-244, 2016.

LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. Toposseqüência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 525-532, 2003.

MA, Y.; QU, L.; WANG, W.; YANG, X.; LEI, T. Measuring soil water content through volume/mass replacement using a constant volume container. **Geoderma**, v. 271, p. 42-49, 2016.

MACEDO, S. D. F. S.; GRIMALDI, M.; MEDINA, C. C.; CUNHA, J. E. D.; GUIMARÃES, M. D. F.; TAVARES FILHO, J. Physical Properties of Soil Structures Identified by the Profil Cultural under Two Soil Management Systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, 2017.

MADEJÓN, E.; LÓPEZ, R.; MURILLO, J. M.; CABRERA, F. Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 84, n. 1, p. 55-65, 2001.

MARQUES, J. D. D. O.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W. G.; VITEL, C. M.; MARQUES, E. M. D. A. Soil Organic Carbon, Carbon Stock and Their Relationships to Physical Attributes Under Forest Soils in Central Amazonia. **Revista árvore**, v. 40, n. 2, p. 197-208, 2016.

MATHERON, G. Random functions and their application in geology. In: **Geostatistics**. Springer US, p. 79-87, 1970.

MARTÍNEZ, E. A.; DOS SANTOS, J. F.; ARAUJO, G. S.; DE SOUZA, S. M. A.; RODRIGUES, R. D. C. L. B.; CANETTIERI, E. V. Production of Single Cell Protein (SCP) from Vinasse. **Fungal Biorefineries**. Springer. p. 215-238, 2018.

MELO, C. A.; JUNIOR, F. H. S.; BISINOTI, M. C.; MOREIRA, A. B.; FERREIRA, O. P. Transforming sugarcane bagasse and vinasse wastes into hydrochar in the presence of phosphoric acid: an evaluation of nutrient contents and structural properties. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, n. 4, p. 1139-1151, 2017.

MESQUITA, M. G. B.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, 2004.

MILLER, J. C. O Atlântico escravista: açúcar, escravos e engenhos. **Afro-Ásia**, n. 19-20, 2017.

MONTENEGRO, A. D. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 30-37, 2006.

MORADI, F.; MOOSAVI, A. A.; MOGHADDAM, B. K. Spatial variability of water retention parameters and saturated hydraulic conductivity in a calcareous

Inceptisols (Khuzestan province of Iran) under sugarcane cropping. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 62, n. 12, p. 1686-1699, 2016.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable energy reviews**, v. 44, p. 888-903, 2015.

MOREIRA, J. R.; ROMEIRO, V.; FUSS, S.; KRAXNER, F.; PACCA, S. A. Potential in Brazil: achieving negative emissions in ethanol and electricity production based on sugar cane bagasse and other residues. **Applied Energy**, v. 179, p. 55-63, 2016.

MORO, C. C.; RODRIGUES, JÁ. A.; DA SILVA, M. C. Utilização da vinhaça como fertilizante no cultivo da cana de açúcar. **Cognitio**, n. 1, 2013.

NAGY, L.; TABÁCKS, A.; HUSZÁK, T.; VARDA, G. Comparison of permeability testing methods. Comité Français de Mécanique des sols (CFMS). **Budapest University of Technology and Economics**, p. 399-402, 2013.

NIELSEN, D. R. J. W.; BIGGAR, J. W.; ERH, K. T. Spatial variability of field-measured soil-water properties. **California Agriculture**, v. 42, n. 7, p. 215-259, 1973.

NUNES NESI, C.; RIBEIRO, A.; BONAT, W. H.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. Verossimilhança na seleção de modelos para predição espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, 2013.

NOVA CANA. Usinas de Açúcar e Álcool no Estado: Paraná. 2016. Disponível em https://www.novacana.com/usinas-brasil/sul/parana Acesso em 17.09.2017.

OLIVEIRA, B. G.; CARVALHO, J. L. N.; CHAGAS, M. F.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. Methane emissions from sugarcane vinasse storage and transportation systems: comparison between open channels and tanks. **Atmospheric environment**, v. 159, p. 135-146, 2017.

OLIVEIRA, M. C. N. **Métodos de estimação de parâmetros em modelos geoestatísticos com diferentes estruturas de covariâncias: uma aplicação ao teor de cálcio no solo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2003.

OLIVEIRA, I. A. D.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; AQUINO, R. E. D., TEIXEIRA, D. D. B.; SILVA, D. M. P. D. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil chemical properties in Southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 31-39, 2015.

ORTEGÓN, G. P.; ARBOLEDA, F. M.; CANDELA, L.; TAMOH, K.; VALDES-ABELLAN, J. Vinasse application to sugar cane fields. Effect on the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). **Science of the Total Environment**, v. 539, p. 410-419, 2016.

PAHLAVAN-RAD, M. R.; AKBARIMOGHADDAM, A. Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from eastern Iran). **Catena**, v. 160, p. 275-281, 2018.

PARANÁ. Portaria Nº 239, de 30 de novembro de 2010. **Diário Oficial do Estado**. 2010

PARANÁ. Decreto Nº 10.068, de 6 de fevereiro de 2014. **Diário Oficial do Estado**. 2014

PASTELLI, V. Panorama do desenvolvimento do cultivo e do processamento da cana-de-açúcar no brasil. Cana-de-Áçúcar no Brasil. **Bepress**. 2014.

PAULINO, A. F.; MEDINA, C. D. C.; ROBAINA, C. R. P.; LAURANI, R. A. Produções agrícola e industrial de cana-de-açúcar submetida a doses de vinhaça. **Ciências Agrárias**, v. 23, n.2, p. 145-150, 2002.

PAZUCH, F. A.; NOGUEIRA, C. E. C.; SOUZA, S. N. M.; MICUANSKI, V. C.; FRIEDRICH, L.; LENZ, A. M. Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. **Renewable and Sustainable energy reviews**, v. 76, p. 34-42, 2017.

PELUCO, R. G.; JÚNIOR, J. M.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. D. B.; CORTEZ, L. A. Suscetibilidade magnética na identificação de áreas para aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 661-672, 2013.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 355 p.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do Solo com Problemas Resolvidos**. 2º edição. Curitiba. P. 473, 2015.

REICHERT, J. M. Fire-Free Fallow Management by Mechanized Chopping of Biomass for Sustainable Agriculture in Eastern Amazon: Effects on Soil Compactness, Porosity, and Water Retention and Availability. **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 5, p. 1403-1412, 2016.

REZENDE, J. O. Vinhaça: outra grande ameaça ao meio ambiente. **Revista Magistra**, Vol. 1, Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, 1984.

RIBEIRO, JR, P. J.; DIGGLE, P. J. **geoR: A package for geostatistical analysis**. R news, v. 1, n. 2, p. 14-18, 2001.

RIENZNER, M.; GANDOLFI, C. Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale. **Soil and Tillage Research**, v. 135, p. 28-40, 2014.

RIPLEY, B. et al. **Package 'MASS'**. CRAN Repos. R-Proj. 2013.

ROCHA, M. H.; NETO, A. E.; SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; OLMO, O. A.; RAMBLA, M. A. O. Resíduos da produção de biocombustíveis: vinhaça e glicerina. In: LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. Biocombustíveis: vol. 2. RJ. **Interciência**, Cap. 12. p. 691-809, 2012.

ROCIO, L. B. M. Determinação dos coeficientes de permeabilidade do solo ao fluxo de água e vinhaça em uma área de cana-de-açúcar. Universidade Federal do Paraná. **Trabalho de Conclusão de Curso**. 2015.

RODRIGUES, C. S.; NETO, A. R.; DUDA, R. M.; DE OLIVEIRA, R. A.; BOAVENTURA, R. A.; MADEIRA, L. M. Combination of chemical coagulation, photo-Fentonoxidation and biodegradation for thetreatment of vinasse from

sugar cane etanol distillery. **Journal of Cleaner Production**, v.142, p.3634-3644, 2016.

RODRIGUES, D.; ORTIZ, L. Em direção à sustentabilidade da produção de etanol de cana de açúcar no Brasil. **Brazil: Amigos da Terra.** Brasil, 2006.

SÁ, M. A. C. D.; JUNIOR, S.; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Soil physical quality and sugarcane yield with the use of inter-row chiseling. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1610-1622, 2016.

SADEGHI, S. H.; HAZBAVI, Z.; HARCHEGANI, M. K. Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar. **Science of the Total Environment**, v. 541, p. 483-490, 2016a.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C.; ADRIANI JOHANN, J. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum**. Agronomy, v. 32, n. 1, 2010.

SEIXAS, F. L.; GIMENES, M. L.; FERNANDES-MACHADO, N. R. Treatment of vinasse by adsorption on carbon from sugar cane bagasse. **Química Nova**, v. 39, n. 2, p. 172-179, 2016.

SEVERINO, J. J. DIAS-ARIEIRA, C. R.; TESSMANN, D. J.; SOUTO, E. R. Identificação de populações de Meloidogyne spp. parasitas da cana-de-açúcar na região Noroeste do Paraná pelo fenótipo da isoenzimaesterase. **Nematologia Brasileira**, v. 33, n. 3, p. 206-211, 2008.

SILVA, P. C.; DA SILVA, A. A. F.; SANTOS, R. F.; BELTRAME, S. R. Physical soil in pastures in degraded vinasse application. **Acta Iguazu**, v. 5, n. 5, p. 57-66, 2016.

SILVA, W. P. D.; DE ALMEIDA, C. D.; ROLIM, M. M.; SILVA, Ê. F. D. F.; PEDROSA, E. M.; SILVA, V. G. Monitoring of groundwater salinity in low land under sugarcane cultivation fertigated with vinasse. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 394-401, 2014.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 52, n. 2, p. 305-316, 2009.

SYDNEY, E. B.; NOVAK, A. C.; ROSA, D.; MEDEIROS, A. B. P.; BRAR, S. K.; LARROCHE, C.; SOCCOL, C. R. Screening and bioprospecting of anaerobic consortia for biohydrogen and volatile fatty acid production in a vinasse based medium through dark fermentation. **Process Biochemistry**, v. 67, p. 1-7, 2018.

TEJADA, M.; GONZALEZ, J. L. Beet vinasse applied to wheat under dryland conditions affects soil properties and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 23, n. 4, p. 336-347, 2005.

TSEGAYE, T.; HILL, R. L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. **Soil Science**, v. 163, n. 2, p. 143-154, 1998.

UNICA. DataBase. **Histórico de moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etano**. Safra 2017/18. 2018

UYEDA, C. A.; MIRANDA, J. H. D.; DUARTE, S. N.; DE MEDEIROS, P. R.; DIAS, C. T. D. S. Influence of vinasse application in hydraulic conductivity of three soils. **Eng. Agricola Jaboticabal**, v. 33, n. 4, p. 689-698, 2013.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 6, p. 1040-1048, 1981.

WANG, Y. Q.; SHAO, M. A. Spatial variability of soil physical properties in a region of the Loess Plateau of PR China subject to wind and water erosion. **Land Degradation & Development**, v. 24, n. 3, p. 296-304, 2013.

WERISCH, S.; MÜLLER, M. Towards improved estimation of the unsaturated soil hydraulic conductivity in the near saturated range by a fully automated, pressure controlled unit gradient experiment. **EGU**, p. 14596, 2017.

WOJCIECHOWSKI, J. C.; EDUARDO ARCE, J.; HENRIQUE WEBER, S.; RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DA FONSECA PIRES, C. A. Abordagem borrowstrenght aplicada a modelo geoestatístico para estimativa de volume. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, 2017.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. Oficina de Textos, 2015.

YAMAGUCHI, C. S.; RAMOS, N. P.; SILVA CARVALHO, C.; MORENO PIRES, A. M.; ANDRADE, C. A. Decomposição da palha de cana-de-açúcar e balanço de carbono em função da massa inicialmente aportada sobre o solo e da aplicação de vinhaça. **Bragantia**, v. 76, n. 1, p. 135-144, 2017.

YANG, S. D.; LIU, J. X.; WU, J.; TAN, H. W.; LI, Y. R. Effects of vinasse and press mud application on the biological properties of soils and productivity of sugarcane. **Sugar Tech**, v. 15, n. 2, p. 152-158, 2013.

APÊNDICE

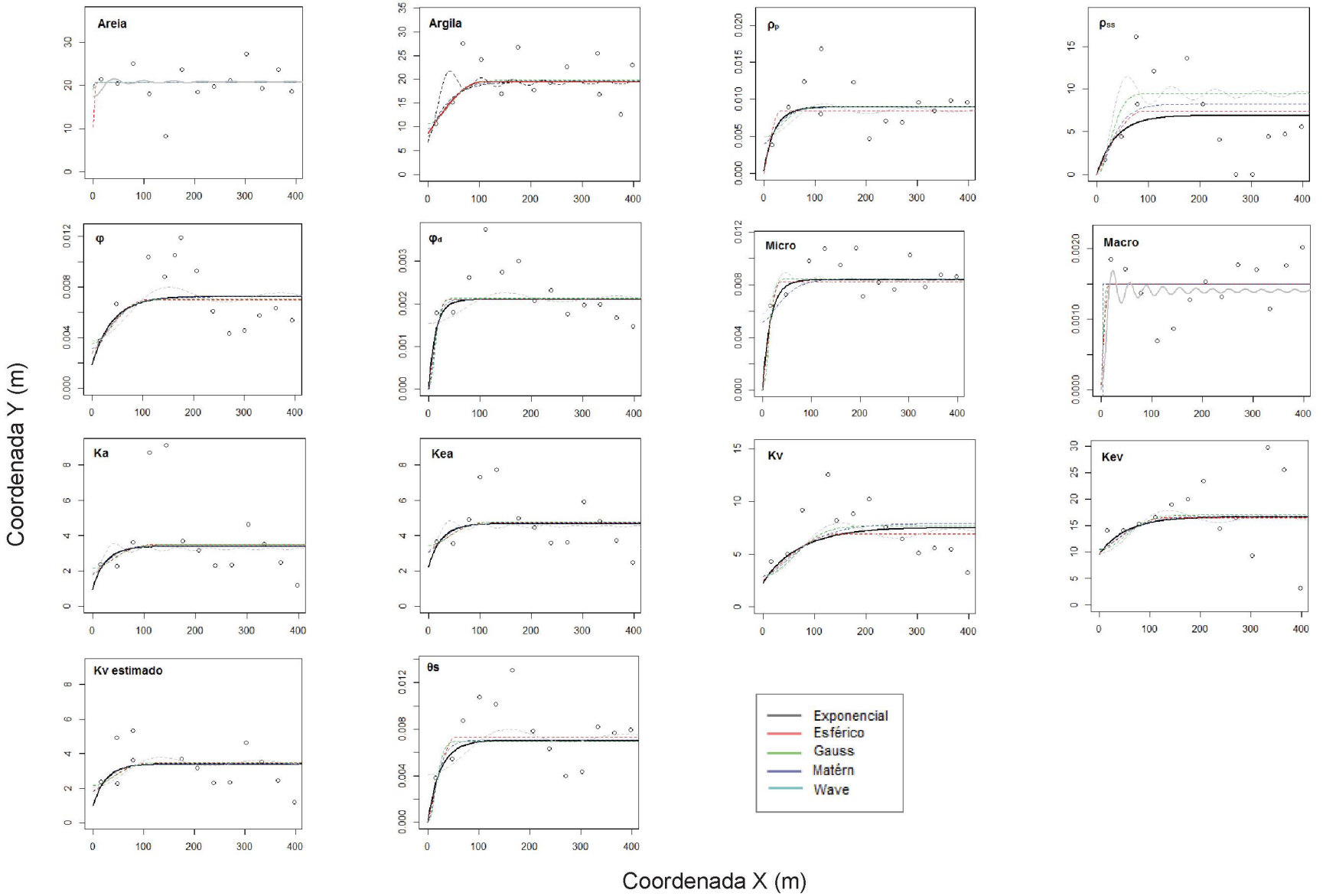


Figura 27 - Semivariograma ajustado da área CA para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm.

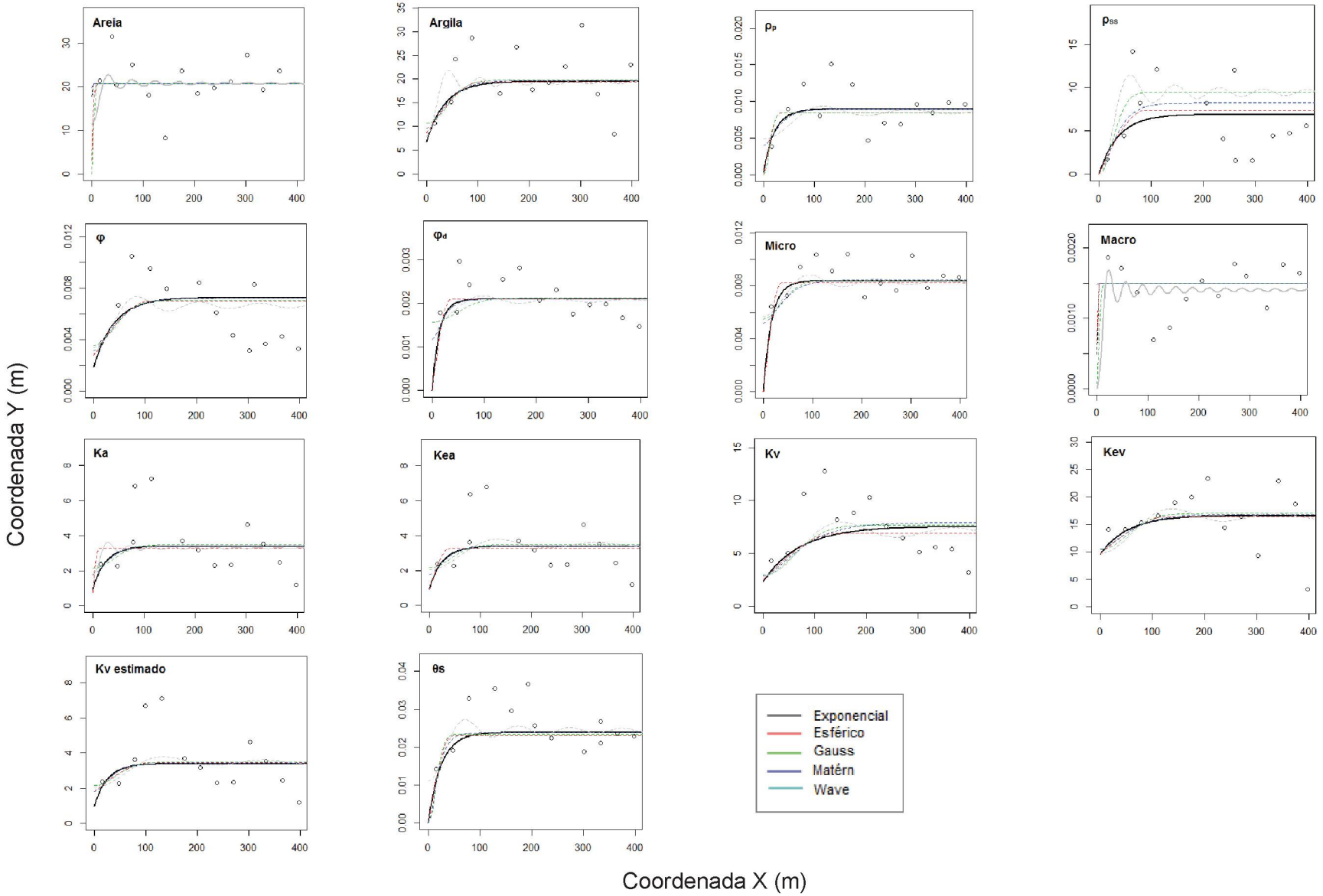


Figura 28 - Semivariograma ajustado da área PS para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm.

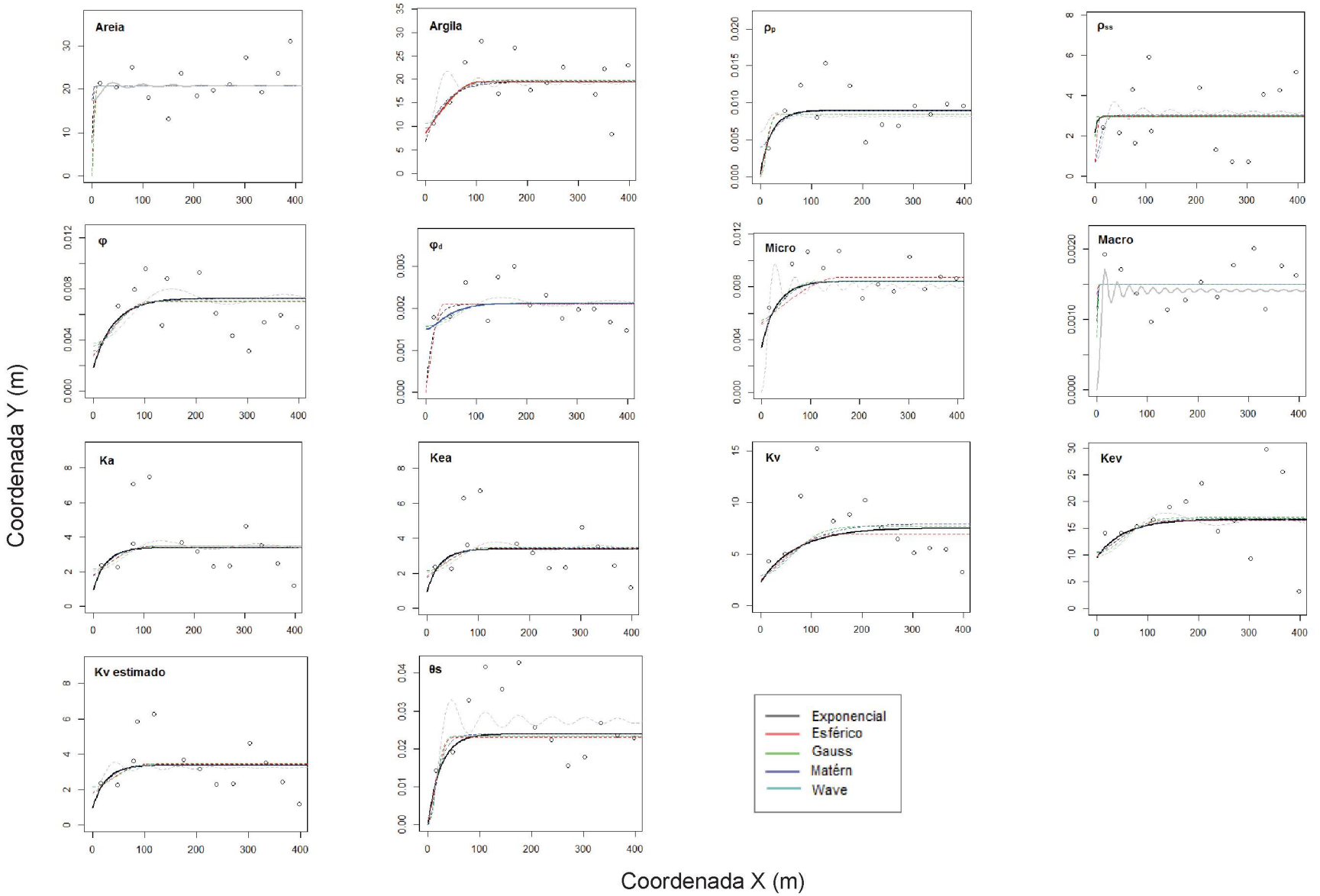


Figura 29 - Semivariograma ajustado da área MN para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm.

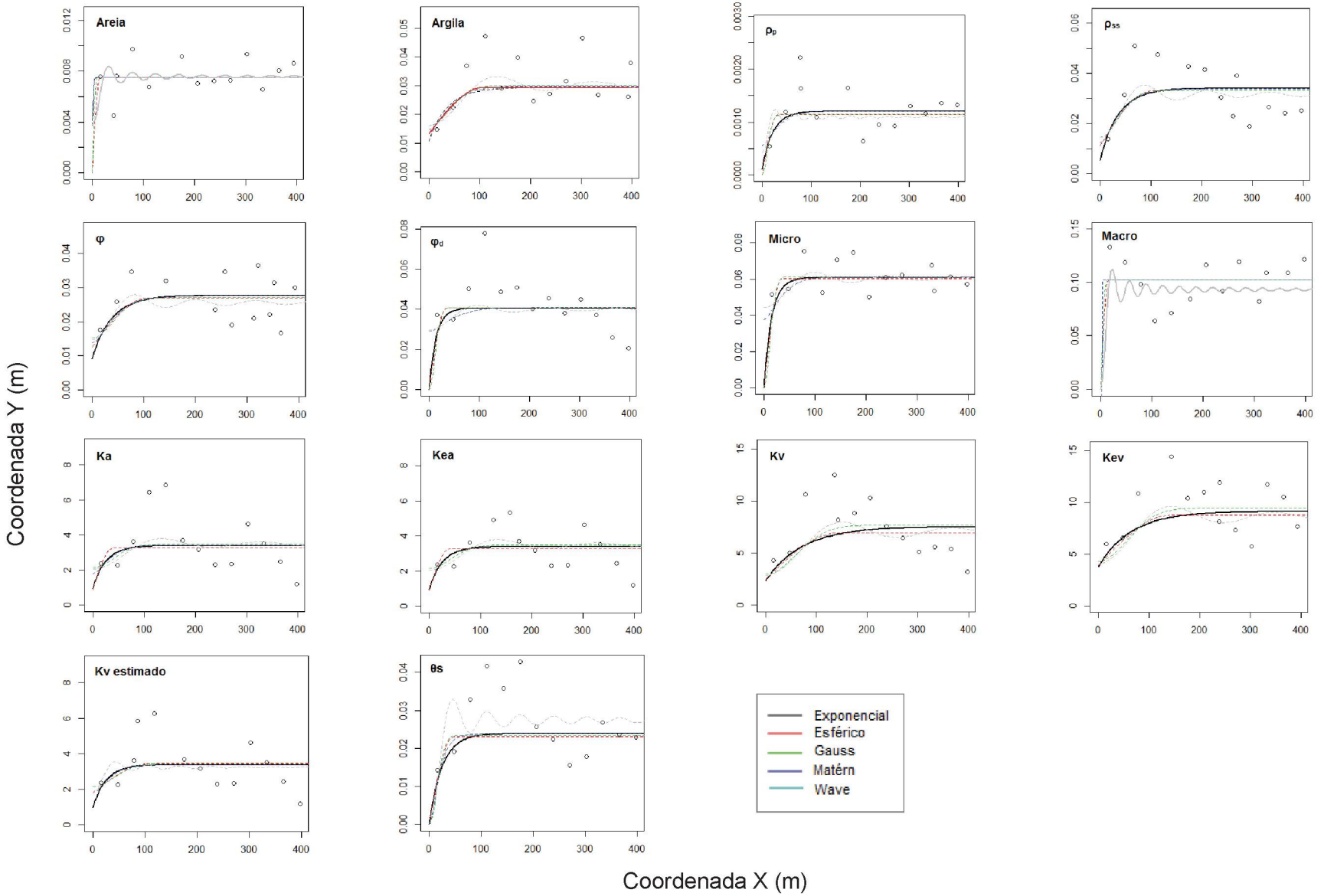


Figura 30 - Semivariograma ajustado da área PV para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 0 – 20 cm.

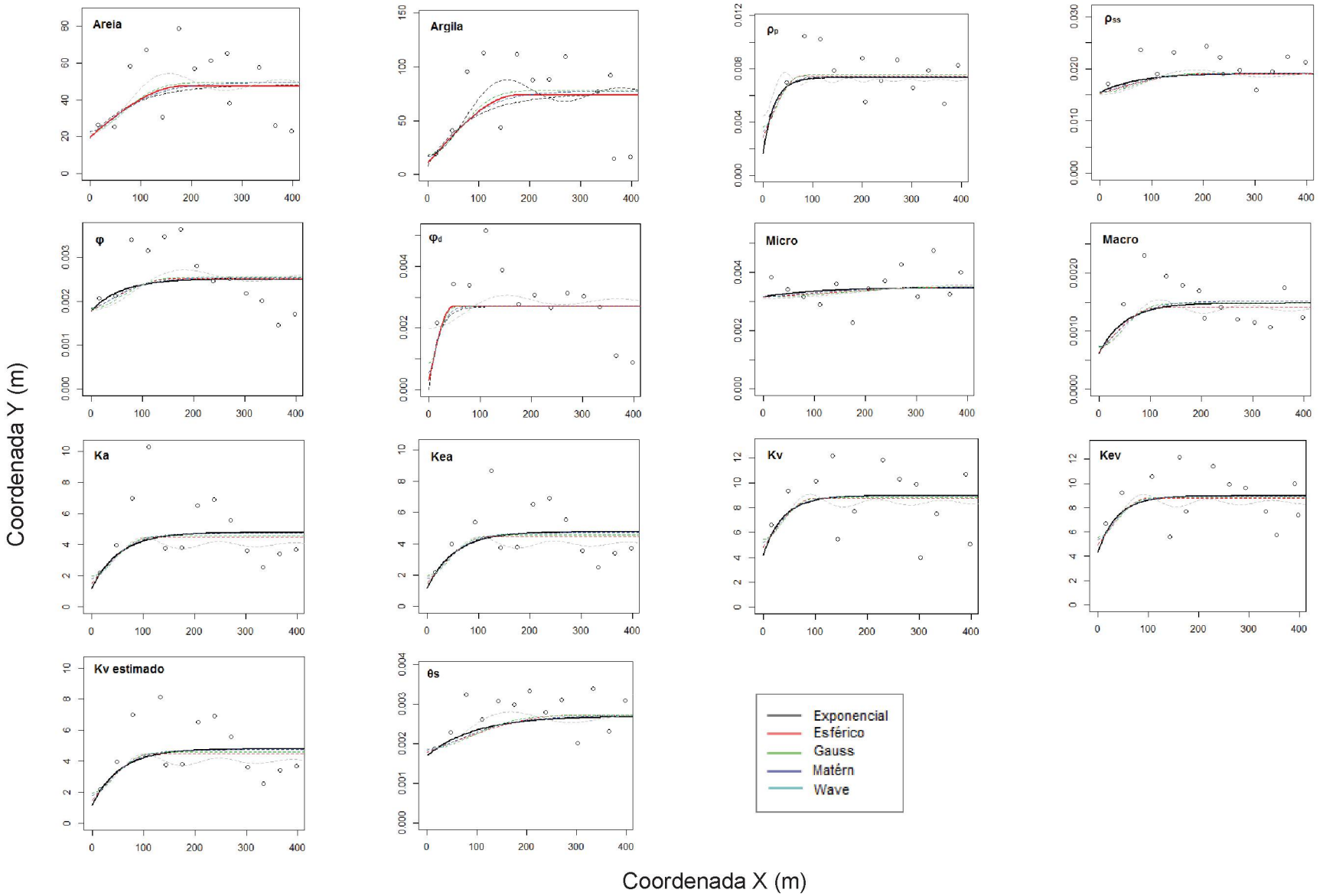


Figura 31 - Semivariograma ajustado da área CA para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 20 – 40 cm.

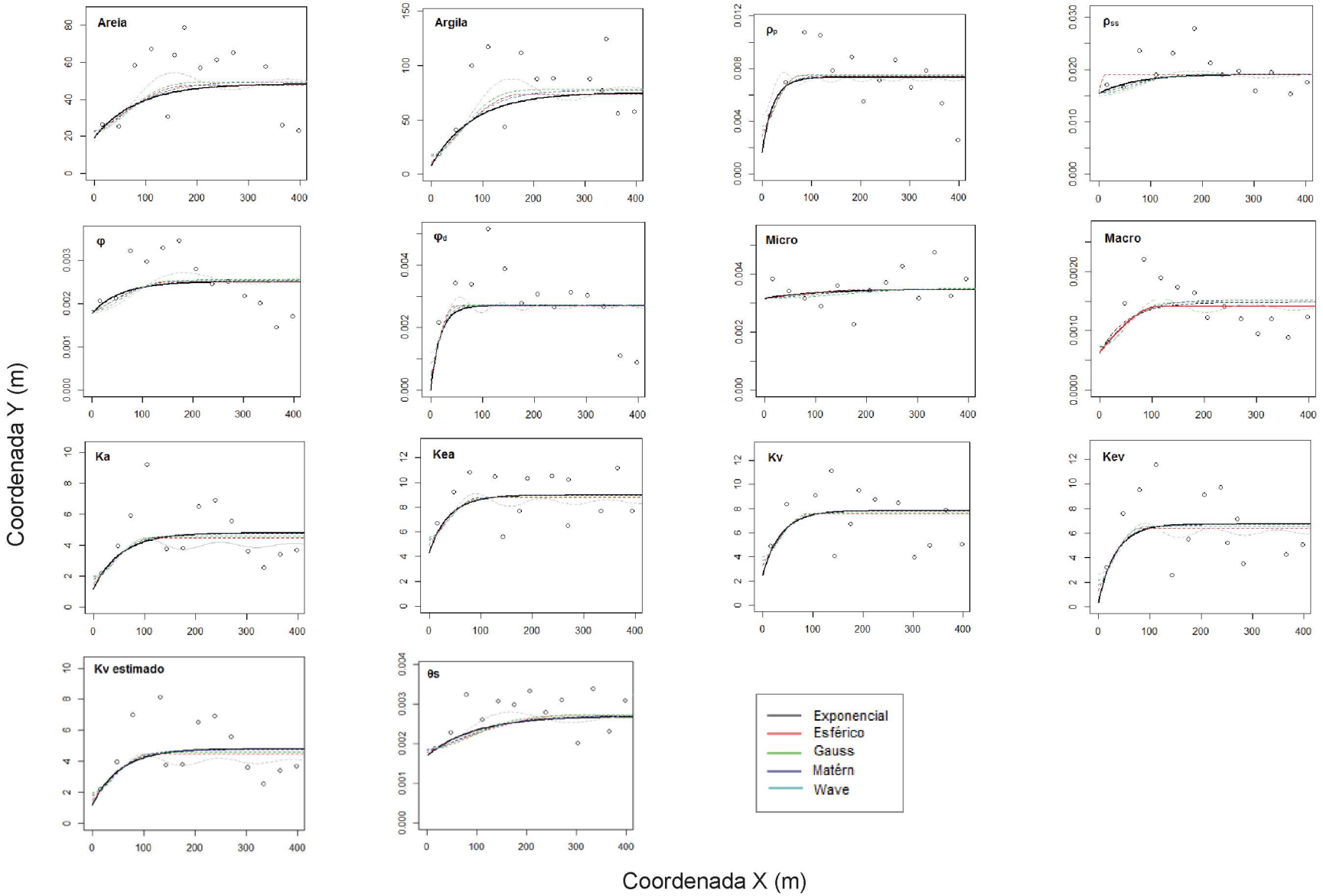


Figura 32 - Semivariograma ajustado da área PS para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 20 – 40 cm.

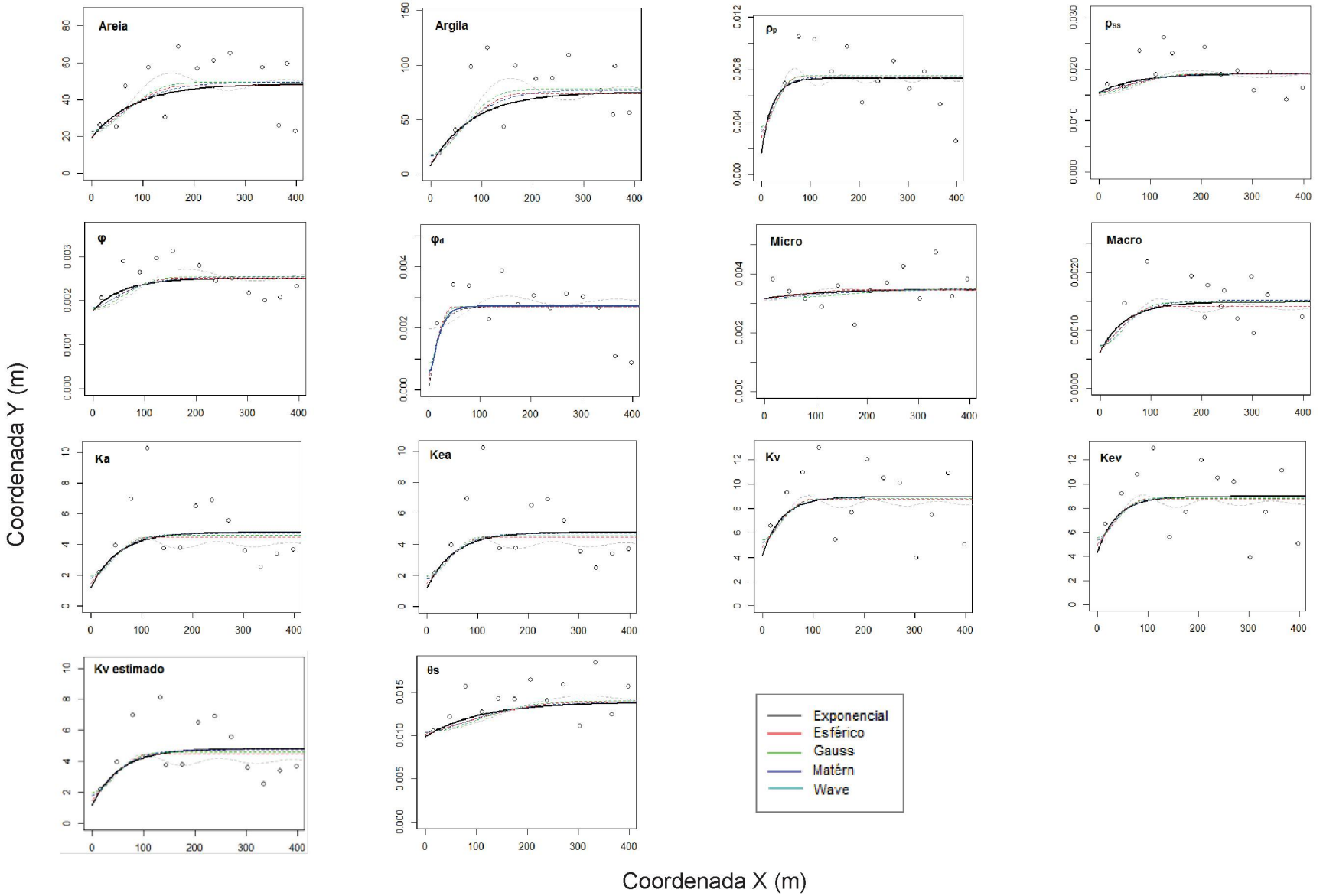


Figura 33 - Semivariograma ajustado da área MN para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 20 – 40 cm.

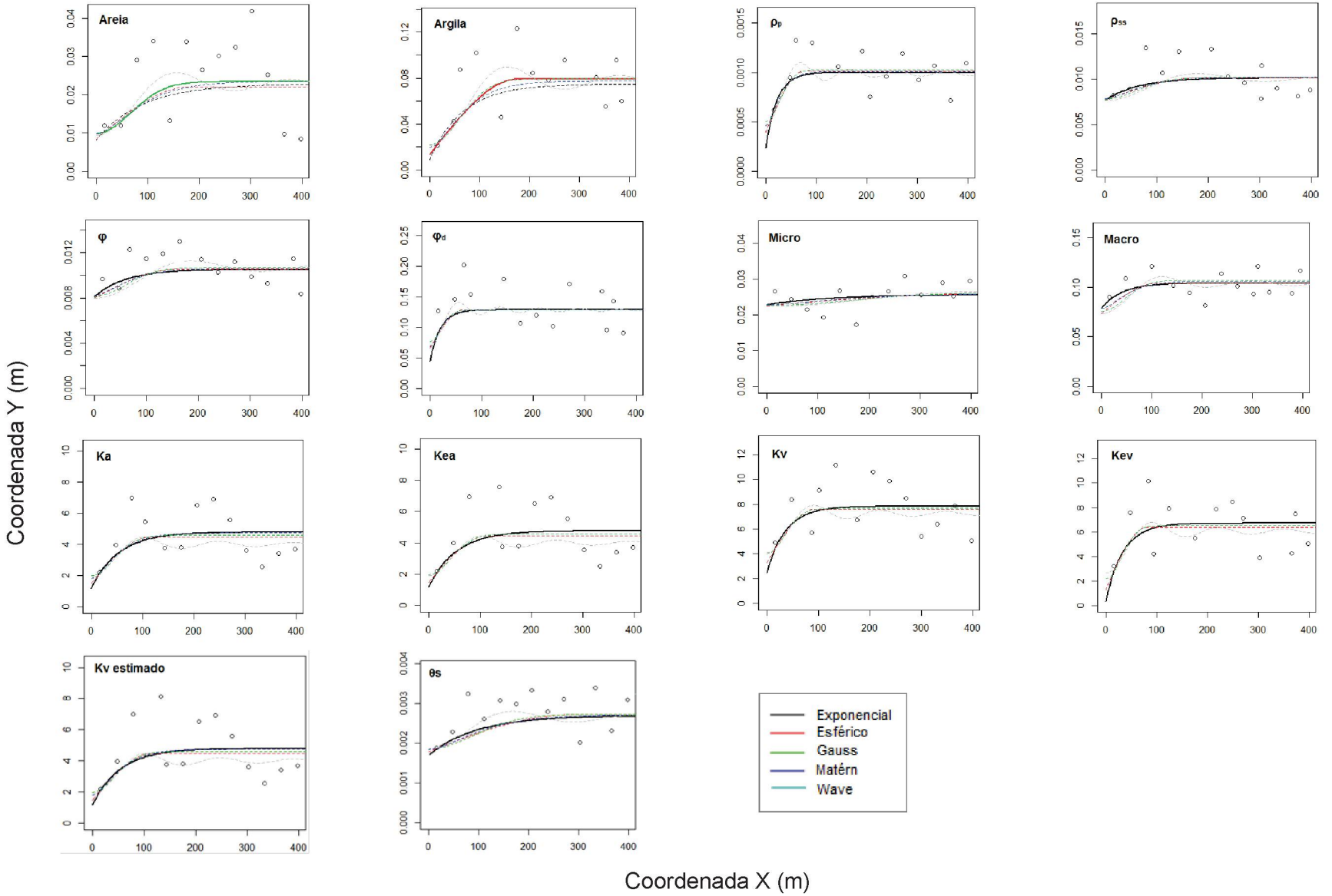


Figura 34 - Semivariograma ajustado da área PV para areia, argila, densidade das partículas (ρ_p), densidade do solo seco (ρ_{ss}), porosidade (φ), porosidade drenável (φ_d), microporosidade (micro), macroporosidade (macro), coeficientes de permeabilidade ao fluxo de água (K_a), específica para água (K_{ea}), ao fluxo de vinhaça (K_v), específica para vinhaça (K_{ev}), estimado com água ($K_{v\ estimado}$) e umidade volumétrica do solo na saturação (θ_s) na camada de 20 – 40 cm.