

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**Bruno Campos Mantovanelli**

**GEOESTATÍSTICA APLICADA NO DESENVOLVIMENTO DE  
DIAGRAMAS TERNÁRIOS PARA A ESTIMATIVA DO CONTEÚDO  
DE ÁGUA E QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS TROPICAIS E  
SUBTROPICAIS DO BRASIL**

Santa Maria, RS

2021



**Bruno Campos Mantovanelli**

**Geoestatística aplicada no desenvolvimento de diagramas ternários para a estimativa do conteúdo de água e qualidade física de solos tropicais e subtropicais do Brasil**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração de Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. PhD. Reimar Carlesso

Santa Maria, RS

2021

Mantovanelli, Bruno Campos

GEOESTATÍSTICA APLICADA NO DESENVOLVIMENTO DE  
DIAGRAMAS TERNÁRIOS PARA A ESTIMATIVA DO CONTEÚDO  
DE ÁGUA E QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS TROPICAIS E  
SUBTROPICAIS DO BRASIL / Bruno Campos

Mantovanelli.- 2021.

118 p.; 30 cm

Orientador: Reimar Carlesso

Coorientador: Mirta Teresinha Petry

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2021

1. Parâmetros hidráulicos 2. irrigação 3.  
diagramas ternários 4. compactação 5. solo-planta  
I. Carlesso, Reimar II. Petry, Mirta Teresinha III.  
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

© 2021

Todos os direitos autorais reservados a Bruno Campos Mantovanelli. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: [brunomantovanelli21@gmail.com](mailto:brunomantovanelli21@gmail.com)

**Bruno Campos Mantovanelli**

**Geoestatística aplicada no desenvolvimento de diagramas ternários para a estimativa do conteúdo de água e qualidade física de solos tropicais e subtropicais do Brasil**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFSM, em cumprimento às exigências acadêmicas para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

**Aprovado em 18 de fevereiro de 2021**

**Banca examinadora**

---

Reimar Carlesso, PhD. (UFSM) (Videoconferência)  
Presidente/Orientador

---

Mirta Teresinha Petry, Dr<sup>a</sup>. (UFSM) (Videoconferência)

---

Juliano Dalcin Martins, Dr. (UFSM) (Videoconferência)

---

Cleudson José Michelon, Dr. (IFFar) (Videoconferência)

---

Brivaldo Gomes de Almeida, PhD. (UFRPE) (Videoconferência)

Santa Maria, RS

2021



### **Dados curriculares do autor**

BRUNO CAMPOS MANTOVANELLI – nascido no dia 14 de novembro de 1989 em São Gabriel da Palha, estado do Espírito Santo, graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Amazonas – no Instituto de Educação, Agricultura e Meio Ambiente, Campus UFAM de Humaitá, AM (2015). Foi bolsista de iniciação científica PIBIC no período de 2011-2014. Foi contemplado com o prêmio Professor Abraham Moysés Cohen (Melhor Bolsista do Projeto de Iniciação Científica - PIBIC), concedido pela Universidade Federal do Amazonas em 2013. Fez Mestrado no programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Recife-PE (Bolsista do CNPq). Atualmente é aluno de Doutorado do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria - RS (Bolsista do CNPq). Membro do grupo de pesquisa Manejo da água em sistemas agrícolas – UFSM, atuando na linha de pesquisa física e conservação do solo e da água e membro do grupo de pesquisa Solos e Ambientes Amazônicos.





*Em especial a minha esposa e companheira, Daiane,  
Aos meus pais, Ana Lúcia e José Antônio,  
A minha família*

**Dedico e Ofereço**



## AGRADECIMENTOS

À DEUS, pelo dom da vida, por quem sou hoje e por abençoar meu caminho em todos os momentos;

À minha esposa Daiane Mantovanelli, por me acompanhar em todos os bons e maus momentos e ser a minha grande inspiração;

À minha família, por todo o incentivo, amor e carinho nos momentos mais difíceis. Em especial a minha mãe, por ser exemplo e fortaleza na minha vida e sempre ter as palavras certas de aconchego e carinho;

A todos os meus familiares que acreditaram em meu potencial e me deram forças para que conseguisse alcançar meus objetivos;

Ao Prof. Reimar Carlesso por ter me aberto as portas para um novo conhecimento em minha vida acadêmica e pela amizade;

À Prof<sup>a</sup>. Mirta Petry por toda a atenção, disponibilidade, ensinamentos que me fortaleceram cientificamente, além da grande amizade que levarei;

Ao Prof. Brivaldo Gomes de Almeida da Universidade Federal Rural de Pernambuco, pela amizade, oportunidades, ensinamentos e ser um mentor em minha evolução nos estudos de física de solos;

Ao Prof. Milton Campos da Universidade Federal do Amazonas, pelas oportunidades, ensinamentos, amizade e pelo despertar e incentivo nos estudos voltados à Ciência do Solo;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo/UFSM: Ricardo Dalmolin, Fabrício Pedron, Danilo Rheinheimer, Ricardo Schenatto, Jean Minella, Paulo Gubiani, José M. Reichert e Arno Heldwein, pelos ensinamentos adquiridos;

À grande amiga Elenice Weiler, pela amizade, conversas, discussões científicas e parceria em trabalhos acadêmicos, e principalmente pela sua capacidade em compartilhar informações e conhecimento;

Aos amigos de jornada da Pós-graduação pela amizade e companheirismo: Lueni Terra, Carlos Alberto, Max Kléber, Robson Giacomeli, Leonardo Chechi, Lethícia Rosa, Cassiane Rosário, Marília Antonello, Augusto César (UFRPE), Laudénir Basso, Luís Antônio (UEA), Thiago Schossler e Rosiney Mendes (UFAC).

À turma da graduação do Sistema Irriga: Diego, Cassio, Anderson, Guilherme, Anderson, Matheus e Andressa;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos;

À Universidade Federal do Amazonas, por ter me aberto as portas ao conhecimento e o despertar científico;

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo;

À Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo;

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

A todos, meu muito OBRIGADO!!

## RESUMO

### **GEOESTATÍSTICA APLICADA NO DESENVOLVIMENTO DE DIAGRAMAS TERNÁRIOS PARA A ESTIMATIVA DO CONTEÚDO DE ÁGUA E QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS DO BRASIL**

AUTOR: Bruno Campos Mantovanelli

ORIENTADOR: Reimar Carlesso

O Sul, Centro-Oeste, Sudeste e parte do Nordeste são responsáveis por mais de 70% da produção agrícola brasileira. Muitas dessas áreas são irrigadas por aspersão e intensivamente cultivadas, podendo levar a uma diminuição da qualidade estrutural desses solos. A água no solo e a textura controlam uma série desses processos, incluindo a infiltração e drenagem, e o balanço de energia no sistema solo-planta. A variabilidade dos atributos físicos é função dos fatores de formação pedológica, entretanto, essa variabilidade pode ser induzida por práticas de manejo. É atribuição da pesquisa desenvolver índices de qualidade adaptados a cada ecossistema, como forma de identificar seu status e definir limites críticos que podem funcionar como indicadores para diferentes solos. Assim, o presente teve como objetivos, os quais foram divididos em dois capítulos: (i) avaliar a qualidade física de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais a partir de índices indicadores da qualidade de solos e atributos físicos e; (ii) desenvolver diagramas ternários de pedotransferência que estimem o conteúdo de água no solo a partir da abordagem geoestatística. O trabalho foi realizado a partir da base de dados físico-hídricos de áreas irrigadas do Sistema Irriga®, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria. O banco de dados contém 11.200 observações referentes aos Estados de Rio Grande do Sul (RS), Paraná (PR), Bahia (BA), Mato Grosso (MT), São Paulo (SP), Minas Gerais (MG) e Goiás (GO). Os resultados obtidos demonstram a importância de estudos em macro escala, pertinentes a avaliação física de solos, principalmente associando atributos físicos e índices de qualidade física de solo. O desenvolvimento de diagramas ternários para estimar a retenção de água representou e fortaleceu a ideia sobre a aplicabilidade e extrapolação de informações locais para onde há a carência de dados de retenção de água no solo.

**Palavras-chave:** Parâmetros hidráulicos; irrigação; diagramas ternários; compactação; solo-planta.



## **ABSTRACT**

### **GEOSTATISTICS APPLIED IN THE DEVELOPMENT OF TERNARY DIAGRAMS FOR THE ESTIMATION OF WATER CONTENT AND PHYSICAL QUALITY OF TROPICAL AND SUBTROPICAL SOILS IN BRAZIL**

**AUTHOR:** Bruno Campos Mantovanelli

**ADVISOR:** Reimar Carlesso

The South, Midwest, Southeast and part of the Northeast are responsible for more than 70% of Brazilian agricultural production. Many of these areas are irrigated by sprinkling and intensively cultivated, which may lead to a decrease in the structural quality of these soils. Soil water and texture control a number of these processes, including soil infiltration and drainage, the organic-matter dynamics and the energy balance of the soil-plant system. The spatial variability of physical attributes is a function of pedological formation factors, however, much of this variability can be induced by management practices. It is research attribution to develop soil quality indexes adapted to each ecosystem, as a way of identifying their status and defining critical limits that might suit as indicators for different soils. Thus, the present study had as objectives, which were split into two chapters: (i) assess the physical quality of soils in sprinkling irrigated areas in tropical and subtropical regions from index that indicate soil quality and physical attributes and; (ii) develop pedotransfer ternary diagrams to estimate the soil water content from a geostatistical approach. This study was developed using the physical-hydric database of irrigated areas of the Sistema Irriga®, belonging to the Department of Rural Engineering, of the Federal University of Santa Maria. The database contains approximately 11,200 observations regarding the physical characterization of soils in the states of Rio Grande do Sul (RS), Paraná (PR), Bahia (BA), Mato Grosso (MT), São Paulo (SP), Minas Gerais and, Goiás (GO). The results obtained in this research demonstrate the importance of studies on a macro scale, pertinent to physical soil evaluation, mainly the association between physical attributes and soil physical quality indexes, thus representing a significant advance in these studies. The development of ternary diagrams for estimating soil water retention represented and strengthened the idea about the applicability and extrapolation of local information, to where is a lack of soil water retention data.

**Keywords:** Hydraulic parameters; irrigation; ternary diagrams; compaction; soil-plant.





## LISTA DE FIGURAS

### ESTUDO I – USO DE ATRIBUTOS E ÍNDICES PARA CARACTERIZAR A QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS EM ÁREAS IRRIGADAS POR ASPERSÃO EM REGIÕES TROPICAIS E SUBTROPICAIS NO BRASIL

- Figura 1. Localização das áreas de estudo. Fonte: Autor ..... 53
- Figura 2. Variação média da textura de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais do Brasil. (A) Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e (B) região Nordeste..... 58
- Figura 3. Distribuição espacial da textura de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais do Brasil..... 59
- Figura 4. Variação média da porosidade de solos em áreas irrigadas por aspersão nos estados do Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso (A) e Bahia (B). ..... 61
- Figura 5. Distribuição espacial da porosidade de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais do Brasil ..... 63
- Figura 6. Valores médios da Densidade do solo ( $D_s$ ), Densidade crítica ( $D_{sc}$ ) e Índice S em áreas irrigadas por aspersão nos estados do Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo e Minas Gerais. A linha tracejada na horizontal (---) representa o limite da Energia Integral ..... 64
- Figura 7. Valores médios da Densidade do solo ( $D_s$ ), Densidade crítica ( $D_{sc}$ ) e Índice S em áreas irrigadas por aspersão nos estados de Goiás, Mato Grosso e Bahia. A linha tracejada na horizontal (---) representa o limite da Energia Integral ..... 65
- Figura 8. Variação da Energia Integral para os potenciais matriciais de -10 e -33 kPa, em áreas irrigadas por aspersão em Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo e Minas Gerais ..... 67
- Figura 9. Variação da Energia Integral para os potenciais matriciais de -10 e -33 kPa, em áreas irrigadas por aspersão em Goiás, Mato Grosso e Bahia ..... 68
- Figura 10. Descrição multivariada a partir da combinação entre gráficos biplot de componentes principais (A) e agrupamento hierárquico de cluster (B) em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais do Brasil..... 71

### ESTUDO II – GEOSTATISTICAL INTERPOLATION BASED TERNARY DIAGRAMS FOR ESTIMATING WATER RETENTION PROPERTIES IN SOILS IN THE CENTER-SOUTH REGIONS OF BRAZIL

- Figura 1. Localização da representatividade de distribuição do banco de dados ..... 86
- Figura 2. Distribuição textural do conjunto de dados utilizado no desenvolvimento e validação dos diagramas ternários (A); conversão das coordenadas de textura em coordenadas cartesianas (B). Adaptado de Ramos et al. (2014) ..... 89
- Figura 3. Diagramas ternários interpolados por Krigagem ordinária para a distribuição geral do banco de dados englobando todas as classes de subgrupos ..... 96

Figura 4. Gráficos de dispersão da previsão do teor de água do solo nos potenciais matriciais de $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ e $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ para a abrangência geral do banco de dados. Histograma com densidade de distribuição (lado esquerdo) e Frequência de distribuição (lado direito) .....	99
Figura 5. Diagramas ternários para a distribuição nos subgrupos de porosidade total ..	101
Figura 6. Gráficos de dispersão da previsão do teor de água do solo nos potenciais matriciais de $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ e $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ para a subdivisão de porosidade total. Porosidade total 30-45% (A, B); Porosidade Total > 45% (C, D) .....	102
Figura 7. Diagramas ternários para a distribuição nos subgrupos de densidade do solo .....	105
Figura 8. Gráficos de dispersão da previsão do teor de água do solo nos potenciais matriciais de $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ e $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ para a subdivisão de densidade do solo. Densidade do Solo 0,7-1,2 Mg m <sup>-3</sup> (A, B); Densidade do Solo 1,2-1,5 Mg m <sup>-3</sup> (C, D); Densidade do Solo > 1,5 Mg m <sup>-3</sup> (E, F) .....	106
Figura 9. Diagramas ternários para a distribuição de ASW nos subgrupos de densidade do solo .....	108
Figura 10. Gráficos de dispersão da ASW para a subdivisão de densidade do solo. Densidade do Solo 1,2-1,5 Mg m <sup>-3</sup> (A, B); Densidade do Solo > 1,5 Mg m <sup>-3</sup> (C, D) .....	109

## LISTA DE TABELAS

### ESTUDO I – USO DE ATRIBUTOS E ÍNDICES PARA CARACTERIZAR A QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS EM ÁREAS IRRIGADAS POR ASPERSÃO EM REGIÕES TROPICAIS E SUBTROPICAIS NO BRASIL

Tabela 1. Variação percentual de áreas com limitações em relação aos níveis críticos de densidade e macroporosidade ..... 69

Tabela 2. Matriz de correlação de Pearson de atributos físicos, índices de qualidade física e parâmetros hidráulicos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais no Brasil..... 73

### ESTUDO II – GEOSTATISTICAL INTERPOLATION BASED TERNARY DIAGRAMS FOR ESTIMATING WATER RETENTION PROPERTIES IN SOILS IN THE CENTER-SOUTH REGIONS OF BRAZIL

Tabela 1. Principais propriedades físicas dos conjuntos de dados utilizados no desenvolvimento e validação dos diagramas ternários ..... 87

Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas experimentais determinados com a abordagem de krigagem ordinária ..... 93

Tabela 3. Resultados da análise estatística entre  $\theta$ -33 kPa,  $\theta$ -1500 kPa e água disponível no solo (ASW) nas estimativas obtidas a partir dos diagramas ternários desenvolvidos com krigagem ordinária ..... 98



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- $\varnothing_{eq}$  – Diâmetro equivalente
- .sph – Arquivo shape file
- a – Alcance espacial
- ASW – Água disponível no solo
- BA – Bahia
- C0 – Efeito pepita
- C0 + C1 – Patamar
- C1 – Variância estrutural
- CC – Capacidade de campo
- CRAS – Curva de retenção de água no solo
- Desv. Padrão – Desvio padrão
- Dp – Densidade de partículas
- Ds – Densidade do solo
- D<sub>sc</sub> – Densidade crítica do solo
- EBLUP - Preditivo empírico linear não empírico
- EI – Energia Integral
- MAE – Erro médio absoluto
- Esf – Modelo esférico de semivariograma
- PTFs – Funções de Pedotransferência
- GDE – Grau de dependência espacial
- GO – Goiás
- IDW – Inverse Distance Weighted
- IHO – Intervalo hídrico ótimo
- IWC - Integral Water Capacity
- J kg<sup>-1</sup> – Joule por kg
- km – Quilômetro
- kPa – Quilopascal
- L<sub>Ds</sub> – Limitações a partir da densidade do solo

$L_{Macro}$  – Limitações a partir da macroporosidade

Macro – Macroporosidade

MG – Minas Gerais

$Mg\ m^{-3}$  – Mega grama

Mha – Mega hectare

Micro – Microporosidade

MT – Mato Grosso

n e m - são parâmetros de forma da curva de retenção de água no solo

OK – Krigagem ordinária

PMP – Ponto de murcha permanente

PR – Paraná

Pt – Porosidade total

$R^2$  - Coeficiente de determinação

RM<sub>s</sub> – Regressões múltiplas

RMSE – Raiz do erro médio quadrático

RNAs – Redes neurais artificiais

RS – Rio Grande do Sul

SP – São Paulo

VC – Validação cruzada

Z – Profundidade efetiva do perfil

$\mu m$  – Micrometro

$\theta_r$  - umidade volumétrica residual ( $cm^3\ cm^{-3}$ )

$\theta_s$  - Umidade volumétrica de saturação ( $cm^3\ cm^{-3}$ )

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	25
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	28
2.1 OCUPAÇÃO AGRÍCOLA DE SOLOS NO BRASIL .....	28
2.2 ÍNDICES DE QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS .....	30
2.3 QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS NO BRASIL .....	33
2.4 FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DO CONTEÚDO DE ÁGUA.....	35
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38
4. OBJETIVOS .....	47
4.1 Objetivo Geral .....	47
4.2 Objetivos específicos .....	47
5. ESTUDO I - USO DE ATRIBUTOS E ÍNDICES PARA CARACTERIZAR A QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS EM ÁREAS IRRIGADAS POR ASPERSÃO EM REGIÕES TROPICAIS E SUBTROPICAIS NO BRASIL.....	49
5.1 Resumo .....	49
5.2 Abstract.....	49
5.3 Introdução.....	50
5.4 Material e métodos .....	52
5.4.1 Composição do banco de dados .....	52
5.4.2 Procedimentos analíticos – atributos físicos .....	53
5.4.3 Índices físicos de qualidade do solo.....	54
5.4.4 Descrição e distribuição espacial dos atributos físicos.....	56
5.4.5 Procedimentos estatísticos .....	56
5.5 Resultados e discussão.....	57
5.5.1 Variação média e distribuição espacial de atributos texturais.....	57
5.5.2 Variação média e distribuição espacial da porosidade do solo .....	60
5.5.3 Índice S, D <sub>s</sub> , D <sub>sc</sub> e Energia Integral .....	63
5.5.4 Distribuição de áreas com indícios de compactação.....	68
5.5.5 Descrição multivariada e correlação de Pearson .....	70
5.6 Conclusões.....	74

5.7 Referências bibliográficas.....	74
6. ESTUDO II - GEOSTATISTICAL INTERPOLATION BASED TERNARY DIAGRAMS FOR ESTIMATING WATER RETENTION PROPERTIES IN SOILS IN THE CENTER-SOUTH REGIONS OF BRAZIL .....	81
6.1 Resumo .....	81
6.2 Abstract.....	82
6.3 Introdução .....	82
6.4 Material e métodos.....	85
6.4.1 Composição do banco de dados .....	85
6.4.2 Descrição metodológica no processamento de amostras de solo .....	87
6.4.3 Abordagem geoestatística para a previsão de valores de retenção de água .....	88
6.4.4 Incerteza das estimativas .....	91
6.5 Resultados e discussão.....	92
6.5.1 Distribuição espacial de $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ e $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ .....	92
6.5.2 Diagramas ternários – Distribuição geral.....	95
6.5.3 Diagramas ternários - Efeitos da estrutura do solo na retenção de água .....	99
6.5.4 Capacidade de água disponível (ASW) .....	107
6.6 Conclusões .....	109
6.7 Referências.....	110
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	117



## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A qualidade de um solo inclui aspectos físicos, químicos e biológicos, que podem ser aplicados para avaliar a degradação ou melhorias em suas capacidades funcionais de manutenção dos sistemas agrícolas, além de indicar práticas de manejo para o uso sustentável do solo. Neste ponto, a qualidade física do solo desempenha papel fundamental nas pesquisas que avaliam a qualidade de solo (WALIA & DICK, 2018).

No Brasil, as regiões Sul, Centro-Oeste, Sudeste e parte do Nordeste representam quase toda a produção agrícola nacional, apresentando em sua grande extensão de terras agrícolas, solos intensamente manejados em função das práticas de cultivos. Estes mecanismos vêm ocasionando impactos na estrutura do solo, principalmente o aumento da densidade do solo, desestruturação dos agregados, redução da porosidade, etc., além de afetar diretamente a capacidade de armazenamento e retenção de água. Também nesse eixo produtivo concentra-se a maior parte da área irrigada do Brasil, devido a um período típico com limitada precipitação pluvial, elevando a necessidade de irrigação e intensificando o uso desses solos. A irrigação, associada ao uso intensivo do solo, evidencia algum tipo de limitação física nesses solos, levando em consideração a intensidade de uso e manejo a que estes solos são submetidos.

O conhecimento da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera aumentou significativamente nas últimas décadas, assim como o efeito das propriedades estruturais na qualidade de solos sob diferentes manejos. Porém, ainda são necessários avanços na quantificação das propriedades hidráulicas do solo, as quais desempenham um papel importante na produção agrícola, destacando o planejamento da irrigação, infiltração e drenagem, estresse hídrico e evapotranspiração (RAMOS et al., 2014; SILVA et al., 2017).

Existe uma forte correlação entre as propriedades estruturais, a capacidade de retenção e armazenamento de água nos solos. Nesse sentido, alguns métodos e índices para avaliar a capacidade estrutural de solos foram desenvolvidos, podendo-se destacar o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), desenvolvido por Silva et al. (1994); o Índice S, proposto por Dexter (2004); “Integral Energy” ou Energia Integral, proposto por Minasny & McBratney (2003). Em tentativa de quantificar a energia requerida pelas plantas para remover uma unidade de água ( $J\ kg^{-1}$ ), destaque também para a Curva de Retenção de Água no Solo (CRAS), que fornece valiosas informações a respeito da relação entre o conteúdo de água no solo e os seus respectivos potenciais. E, por fim, atributos físicos amplamente conhecidos e difundidos na área de física de solos, como a densidade do solo, porosidade, estabilidade de agregados, resistência tênsil de agregados e resistência mecânica do solo à penetração, que podem fornecer indícios

da baixa qualidade física a partir de suas medições, possibilitando inferir sobre a compactação dos solos agrícolas em geral.

Sabe-se da influência direta dos atributos físicos sobre o armazenamento e retenção de água no solo, e das dificuldades enfrentadas nas medições de tais atributos. Diante disso, Funções de Pedotransferência (FPTs) oferecem uma alternativa indireta para estimar as propriedades hidráulicas relacionadas a retenção de água no solo, a partir de propriedades de solo medidas em rotinas de laboratórios. As FPTs podem ser definidas como métodos que predizem variáveis do solo que são difíceis de medir diretamente, aplicando então correlações com atributos do solo que estão amplamente disponíveis ou podem ser determinados de forma simples e de baixo custo (OTTONI et al., 2018; HAGHVERDI et al., 2014). McBratney et al. (2002); Botula et al. (2014); Haghverdi et al. (2014) desenvolveram FPTs para estimar o armazenamento e retenção de água fazendo uso de uma série de técnicas estatísticas, que relacionam propriedades físicas e químicas do solo (textura, porosidade, densidade do solo e matéria orgânica) com parâmetros que caracterizam a CRAS.

Nos últimos anos, um grande número de FPTs foram geradas em regiões tropicais e temperadas, destacando-se aquelas baseadas em modelos de Regressão Múltipla (RMs) (FIDALSKI & TORMENA, 2007; MICHELON et al., 2010; MEDRADO & LIMA, 2017; MCNEILL et al., 2018); modelos baseados em Redes Neurais Artificiais (RNAs) (VERECKEN et al., 2010); e/ou estimativas por técnicas de krigagem baseadas em diagramas ternários (RAMOS et al., 2014; RAMOS et al., 2017).

No campo da ciência do solo, houve um acelerado avanço no desenvolvimento de FPTs para as estimativas de retenção de água, sobretudo àquelas oriundas de modelos por RMs. Entretanto, o uso de interpoladores geoestatísticos nas estimativas de retenção de água ainda é pouco frequente no Brasil, especialmente se considerar aquelas áreas que necessitam dessas informações, como aquelas com práticas de irrigação, onde as variações no conteúdo de água no solo são grandes em diferentes classes texturais, devido às alterações em propriedades estruturais e de textura.

Os solos brasileiros, nas diversas regiões (Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste) e que são intensamente agricultáveis, em geral, tendem a apresentar baixa qualidade física, principalmente pelas práticas adotadas, necessitando de uma avaliação mais complexa, abordando ferramentas e técnicas que possam descrever a sua variabilidade e capacidade em sustentar a produção agrícola. Assim, estimar a retenção de água no solo, agrupando os atributos físico-hídricos mais influentes com base em suas variações espaciais, de forma a gerar

estimativas mais confiáveis é essencial. Sendo assim, a elaboração de uma base de informações acerca da qualidade física atual dos solos nas principais regiões agrícolas irrigadas, e o desenvolvimento de FPTs, faz-se necessário para orientar na tomada de decisão relativas ao manejo dessas áreas irrigadas. Propiciar o melhor manejo do solo e da água, evitar o acelerado processo de degradação física dos solos, além de aumentar o rendimento das culturas, reduzir os custos de produção, e buscar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas irrigados é um desafio a ser alcançado.

Diante do exposto, objetivou-se com este estudo: (i) avaliar a qualidade física de solos em áreas irrigadas por aspersão a partir de índices físicos de qualidade do solo e atributos físicos e; (ii) desenvolver diagramas ternários de pedotransferência que descrevam o conteúdo de água e o armazenamento de água no solo a partir de técnicas geoestatísticas.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 OCUPAÇÃO AGRÍCOLA DE SOLOS NO BRASIL

O território brasileiro dispõe de uma imensa variedade de tipos de solos nas diversas regiões de interesse agrícola, correspondendo, diretamente, as diferentes formas e tipos de relevo, clima, material de origem, vegetação e organismos, os quais, por sua vez, condicionam diferentes processos formadores dos solos. Em virtude desta variabilidade de solos, associados a práticas exercidas nos cultivos agrícolas, as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e parte do Nordeste representam praticamente quase que a totalidade da agricultura brasileira em termos de produção (CONAB, 2020). A particularidade produtiva destas regiões está associada diretamente a dois fatores, (i) ao sistema de cultivo exercido (preparo convencional do solo ou plantio direto com pouco ou nenhum resíduo cultural na superfície) e; (ii) práticas de irrigação (CONAB, 2020).

Na região Sul, os solos originados de rochas básicas e de sedimentos diversos, se encontram distribuídos em uma paisagem com relevo diversificado, onde predomina o clima subtropical, com estações bem definidas e solos predominantemente férteis, com elevado potencial agrícola (STRECK et al., 2008). Associado a estas características, a região Sul é caracterizada por dois aspectos, a irrigação por contemplar uma área irrigada de aproximadamente da área irrigada no Brasil (49%), predominante por aspersão, em virtude do elevado crescimento no número de pivôs centrais (ANA, 2019) e sistemas de cultivo com adoção de plantio direto, principalmente aos estados de Rio Grande do Sul e Paraná, representando pouco mais de 90% dos 11,9 Mha cultivados (IBGE, 2017).

A região Centro-Oeste, com vasta superfície aplainada, com predominância de um clima tropical quente com veranicos acentuados, favorecem extensões de solos profundos, bem drenados, com baixa fertilidade natural, porém, com características físicas favoráveis, além das condições topográficas que permitem intensa mecanização agrícola das lavouras (COELHO et al., 2002). As práticas de cultivo do solo nessa região, caracterizam-se principalmente pelo sistema convencional de preparo do solo, visto que, estudos desenvolvidos na Embrapa Cerrados, mostraram menor desenvolvimento inicial de plantas de soja sob plantio direto em comparação ao plantio convencional com irrigação suplementar em ambos os sistemas (EMBRAPA, 2006). O avanço produtivo da região Centro-Oeste no cenário agrícola, além de uma melhor correção da acidez e fertilidade, parte também do uso das técnicas de irrigação. Destacou-se como a região de maior expansão nos últimos 20 anos, quadruplicando a área

irrigada para 1,2 Mha (ANA, 2019), em grande parte pela expansão de pivôs centrais para a produção de grãos.

A região Sudeste é representada por planaltos e áreas serranas com variadas altitudes, e em algumas situações superiores a 2.000 metros, com clima tropical de verões quentes nas baixadas e mais amenos nas áreas altimontanas, predominância de solos bem desenvolvidos e geralmente com baixa fertilidade natural, representam uma enorme variabilidade e impactos quanto a aplicabilidade aos sistemas de cultivos praticados nesta região do território brasileiro (COELHO et al., 2002). Assim como no Centro-Oeste, existe predominância aos métodos convencionais de manejo do solo, no qual apenas 2,9 Mha são praticadas no sistema de plantio direto (IBGE, 2017). Em termos de uso e aplicabilidade de irrigação, São Paulo e Minas Gerais dispõem de 34,0% da área irrigada do País e 87,9% da área da região, deixando o Sudeste a responder pela maior área irrigada, com 39,0% do total (ANA, 2019).

Na região Nordeste, a variabilidade climática representa faixas do quente e úmido ao quente e seco (semiárido), passando por uma faixa de transição semiúmida (Zona da Mata). Nessa região, em grande parte ocorrem solos de média a alta fertilidade natural, em geral pouco profundos, em decorrência de seu baixo grau de intemperismo. O déficit hídrico e, em menor proporção, a ocorrência de salinidade e/ou sodicidade em alguns solos nordestinos são os principais fatores condicionantes à produção agrícola nesta região do país (COELHO, 2002). Neste caso, práticas voltadas a irrigação se fazem necessárias para elevar os índices produtivos, tanto que em 2006 a região ultrapassou 1 Mha de áreas irrigadas (ANA, 2019). A região é impulsionada pelo estado da Bahia, o qual apresenta forte crescimento atualmente, em especial em áreas de Cerrado do oeste (região Oeste da Bahia), com forte adoção de pivôs centrais (ANA, 2019).

As diferentes regiões do território brasileiro apresentam peculiaridades ambientais e culturais que refletem a ocorrência, a distribuição, a aptidão agrícola de suas terras, o uso e manejo diferenciados de seus solos. Nesta perspectiva, estudos se propuseram a medir os impactos a partir de diferentes formas de se praticar a agricultura, seja pela irrigação (MICHELON et al, 2008; MICHELON et al, 2009; MICHELON et al, 2010; MANTOVANELLI et al., 2017), ou manejo do solo em função de sistemas convencionais ou plantio direto (CHERUBIN et a., 2016; SILVA et al., 2021; LOVERA et al., 2021; VIZIOLI et al., 2021). Desta forma, surge a necessidade de mais estudos que contemplem e caracterizem os impactos exercidos sobre a enorme variabilidade existente no território brasileiro,

caracterizando assim, regiões com possíveis limitações e que necessitam de medidas que atenuem o processo de degradação dos solos.

## 2.2 ÍNDICES DE QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS

A qualidade física de solos é definida como a capacidade de um determinado solo em atender às exigências da planta, favorecer condições de aeração, apresentar resistência a processos antrópicos e se recuperar dos processos que possam diminuir essa capacidade (MCKENZIE et al., 2014). Dessa forma, a qualidade física do solo é fortemente afetada pelo manejo do solo, incluindo o monocultivo, adubação e tráfego de máquinas agrícolas (KIBBLEWHITE et al., 2008; VALIPOUR, 2014).

Alguns dos indicadores mais importantes da qualidade física do solo são a capacidade de campo, capacidade de água disponível às plantas, porosidade de aeração, macroporosidade, densidade do solo e índice de estabilidade de agregados, pois quantificam (direta ou indiretamente) a capacidade do solo em armazenar ou fornecer água, ar e nutrientes necessários para as culturas (REYNOLDS et al., 2009). As limitações quanto à qualidade física de solos podem ser evidenciadas de diferentes maneiras. Por exemplo, pela infiltração incipiente da água, escoamento superficial, encrustamento da superfície, aeração deficiente, pouco enraizamento. Enquanto que um solo em boa condição física apresenta o inverso das condições listadas acima (DEXTER, 2004).

Dos indicativos da degradação física de solos, a compactação, ocasionada principalmente pelo excesso de tráfego de implementos agrícolas, é uma das principais ameaças à produtividade e ao bom funcionamento das funções do solo na agricultura mecanizada moderna. A compactação modifica a arquitetura de poros, com impactos negativos em muitas funções do solo, principalmente na redistribuição de água, e, portanto, reduzindo a qualidade física do solo. A maioria das propriedades e processos físicos, químicos e biológicos do solo são afetados pela compactação do solo (DEXTER, 2004; ZORNOZA et al., 2015; VIZIOLI et al., 2021).

Diante dessas condições, pesquisas vem sendo desenvolvidas com o propósito de quantificar os efeitos das práticas de manejo adotadas e a sua influência nas propriedades físico-hídricas dos solos em nível nacional e mundial, com o critério de correlacionar propriedades físicas do solo com índices de qualidade, mas nem sempre os métodos aplicados correspondem as expectativas de se medir a real condição estrutural dos solos (CHERUBIN et al., 2016; MOREIRA et al., 2016; LIMA et al., 2020; ERKTAN et al., 2020).

Vários indicadores para detectar a degradação física do solo foram identificados, testados e aplicados em todo o mundo (ZORNOZA et al., 2015; BÜNEMANN et al., 2018; PAIVA et al., 2020). Propriedades do solo relacionadas com o fluxo de água (armazenamento de água, condutividade hidráulica e infiltração), arejamento do solo (porosidade), compactação (densidade do solo e resistência à penetração) e a estrutura do solo (agregação) são os indicadores frequentemente abordados nas avaliações da qualidade física do solo (ZORNOZA et al., 2015). Além disso, muitos estudos incluíram indicadores biológicos, tais como macroinvertebrados (abundância de minhoca, coleópteros, cupins), que afetam propriedades e processos físicos fundamentais do solo, principalmente aqueles inter-relacionados à formação dos poros biológicos que aumentam a macroporosidade e assim favorecem a maior difusão de oxigênio (ROSA, et al., 2015; SANTOS et al., 2016; LEHMANN et al., 2017).

Conforme destacado na justificativa desse trabalho, para se melhor compreender sobre a qualidade física de um solo, uma série de índices físicos foram propostos, destacando-se a curva de retenção de água no solo (CRAS), intervalo hídrico ótimo (IHO), Índice S, e até os conceitos relativos à energia integral de água no solo, além de medições físicas tradicionais dos atributos físicos, como densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total. Todos estes índices apresentam influência direta sobre a retenção de água no solo e relação envolvendo os fenômenos de adsorção e capilaridade, que regem a dinâmica da água no solo, associando-a com a estruturação de solos.

A eficiência do Índice S em refletir as funções físicas críticas do solo foi demonstrada em muitos estudos (DEXTER & CZYŻ, 2007; KELLER et al., 2007; XU et al., 2017). Basicamente, um maior valor de S indica melhor qualidade física do solo; categoricamente em termos de valores, estes se enquadram em qualidade muito boa ( $S \geq 0,050$ ), boa ( $0,050 > S \geq 0,035$ ), pobre ( $0,035 > S \geq 0,020$ ) e muito pobre ( $0,020 > S$ ) (DEXTER, 2004).

Avaliando o índice S, Li et al. (2011) constataram que esta medida foi negativamente e significativamente correlacionada com a resistência do solo à penetração, e positivamente correlacionado com o carbono orgânico do solo. Naderi-Boldaji & Keller (2016) apontaram uma forte correlação positiva entre o grau de compactação e o índice S. Estes autores evidenciam a valiosa informação que o Índice S representa, favorecendo a identificação de propriedades físicas ou químicas de solos que mais atuam nos processos de avaliação da qualidade. Nesse sentido, o Índice S é uma alternativa no critério de inferir acerca da qualidade física de um solo, principalmente sobre as limitações impostas pela compactação, visto que, a partir do índice S é possível observar as possíveis mudanças na arquitetura dos poros do solo,

com impactos negativos em várias funções do solo e, portanto, reduzindo a qualidade física desses, conforme associação com demais atributos físicos do solo.

Em outra perspectiva de índices físicos, a disponibilidade de água no solo para as plantas é um importante campo de estudo nas relações solo-planta-atmosfera, partindo da condição lógica de que um solo em condições físicas adequadas propicia um adequado ambiente para que a planta possa suprir suas necessidades. A água prontamente disponível às plantas, a faixa de água não-limitante, a faixa de água com menor limitação e a capacidade integral de água fornecem estimativas da quantidade de água disponível às plantas, calculada com base em diferentes suposições (ASGARZADEH et al., 2010; ASGARZADEH et al., 2011; ASGARZADEH et al., 2014).

Com isso, a abordagem do “*Integral Energy*” ou Energia Integral (EI) proposta por Minasny & McBratney (2003), surge como um novo conceito para relacionar os efeitos da estrutura do solo e disponibilidade hídrica as plantas. O conceito da energia integral foi inicialmente sugerido para quantificar a energia específica ( $\text{J kg}^{-1}$  de água) que é necessária para absorver a água do solo no intervalo entre a capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Minasny & McBratney (2003) analisaram um conjunto de dados de retenção de água em solos da Austrália e do mundo para correlacionar a energia integral com as propriedades físicas do solo. Os autores observaram que a energia integral aumentou consideravelmente com o aumento do teor de argila, de forma que, mais energia foi necessária para as plantas absorverem a massa unitária de água disponível em um solo com textura fina. Leon et al. (2019) constataram que o preparo do solo não influenciou a energia integral, associando esse parâmetro com a granulometria do solo e suas propriedades estruturais, com destaque para a densidade do solo.

Diante dos métodos de avaliação da qualidade física de solos apresentados até o momento, a CRAS é destacada como um método clássico de avaliação, e que associa a relação entre o potencial matricial e a respectiva faixa de conteúdo de água, podendo prever uma série de processos, com destaque para a distribuição de tamanho de poros. A CRAS é fundamental na caracterização das propriedades hidráulicas do solo, destacando estudos do balanço e disponibilidade de água às plantas, dinâmica da água e solutos no solo, infiltração e manejo da irrigação (TORMENA & SILVA, 2002; CICHOTA & JONG VAN LIER, 2004).

A CRAS é um método que explica de forma complexa a retenção de água no solo, associando condições em diferentes potenciais matriciais, entretanto, é uma determinação demorada e, por isso, formas alternativas para sua estimativa têm sido continuamente



desenvolvidas. Essas formas associam os atributos do solo, principalmente a granulometria, porosidade, densidade do solo e demais propriedades físico-hídricas como principais preditores (BOUMA & VAN LANEN, 1987). Diante da importância desse método, uma série de pesquisas relacionam à influência da CRAS com as práticas de manejo associadas à qualidade estrutural de solos, além da aplicabilidade de estudos que se propõem em modelagens baseadas em atributos do solo (MANTOVANELLI, 2017; BORDONI et al., 2017; WANG et al., 2018).

### 2.3 QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS NO BRASIL

Historicamente, a expansão agrícola se concentrou no Centro-Sul do Brasil, com 70% dessa expansão ocorrendo em pastagens degradadas. Ao longo do tempo houve uma migração para demais regiões no eixo Sudeste, Centro-Oeste e parte do Nordeste (ADAMI et al., 2012). O desenvolvimento da agricultura brasileira está atrelado ao uso e ocupação de extensas áreas, associadas com práticas de manejo muitas vezes não adequadas, resultando em uma série de fatores, tal como a perda da qualidade física (CHERUBIN et al., 2017).

No Brasil, nas últimas décadas, a comunidade científica vem se propondo a desvendar vários desses problemas físicos em solos, associando estratégias de manejo a índices de qualidade física, conforme destacado no item 2.1. Comparações entre efeitos dos sistemas de cultivo, associadas ou não as práticas de irrigação, têm sido abordadas na literatura e demonstram alterações nos atributos físicos do solo ocasionados pelas diferentes formas de cultivo conforme já destacado em Michelin et al. (2009); Oliveira et al. (2015); Arcoverde et al. (2015).

Ao avaliar a qualidade física de solos sob uso e irrigação em algumas regiões do Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, Michelin et al. (2009), propuseram avaliar a textura, densidade do solo e de partículas e porosidade, identificando que, na camada superficial, cerca de 14% das áreas do Estado de Goiás, 9,5% das áreas de Minas Gerais e 34% das áreas de São Paulo. Essa deterioração da qualidade física, a partir de um aumento na densidade do solo e diminuição da macroporosidade, evidencia há indícios de compactação em função desses parâmetros, podendo se caracterizar como um importante indicativo de como e quanto o manejo do solo pode afetar esses atributos. Em um trabalho anterior, Michelin et al. (2008), avaliaram a qualidade física de solos irrigados por aspersão no Brasil, mais especificamente aos estados de Goiás, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia, quando identificaram que, todas essas localidades estão suscetíveis a compactação a algum tipo de degradação física, sobretudo no Rio Grande do Sul, onde 66,5% das áreas apresentaram viés de degradação. Andrade & Stone (2009), aplicando o

índice S como indicador da qualidade física de solos do Cerrado brasileiro, definindo índice pontual para o parâmetro físico do índice S, concluíram que o valor limite de  $S = 0,045$  mostrou-se adequado à divisão entre solo de boa qualidade estrutural e solo com tendências a se tornar degradado, enquanto valores de  $S \leq 0,025$  indicam solos degradados fisicamente.

Verificando a conversão de vegetação nativa para sistemas agrícolas, Cherubin et al. (2016) identificaram que houve aumento na compactação do solo (valores mais altos de densidade do solo e resistência a penetração), reduzindo a porosidade de aeração e a condutividade hidráulica e, conseqüentemente, criando uma relação desequilibrada entre o espaço de poros preenchido com água e ar no solo. Nunes et al. (2016), avaliando a qualidade física de solos sob irrigação do Rio Grande do Sul, identificaram que 39% das áreas avaliadas apresentaram alguma indicação de compactação do solo, considerando apenas a densidade e a macroporosidade do solo. Em áreas de cana-de-açúcar, Scarpore et al. (2019), avaliando os efeitos do preparo do solo na condição física do solo e crescimento de raízes no Estado de São Paulo, identificaram algumas diferenças entre as propriedades físicas do solo com o resultado das práticas de preparo do solo, o que influenciou diretamente na disponibilidade de água para o desenvolvimento da cultura. Cavalcanti et al. (2020), em solos no nordeste do país, destacaram que o cultivo da cana-de-açúcar no bioma Mata Atlântica induziu impactos negativos na porosidade do solo e estabilidade de agregados, embora a resistência à penetração do solo tenha sido reduzida.

A literatura apresenta uma série de pesquisas em diversas regiões do Brasil, porém, mais estudos são necessários, pois, em sua grande maioria, os solos agrícolas no Brasil tendem a uma deterioração na sua estrutura, em função da adoção de sistemas de cultivo que favorecem tal condição. Sendo assim, a associação de índices físicos com demais atributos do solo, como os do atual estudo, representaria um avanço em descrever se uma determinada região avaliada apresenta riscos e quais os limites críticos que estes solos suportariam. Além disto, o crescente e acelerado aumento nas áreas irrigadas, principalmente no Rio Grande do Sul, Paraná, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e Bahia, a delimitação e o estudo das áreas críticas, pode trazer subsídios ao planejamento do uso de áreas agrícolas e a capacidade de carga que estes solos suportariam.

## 2.4 FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DO CONTEÚDO DE ÁGUA

O objetivo da modelagem hidráulica do solo é fornecer uma visão simplificada e abstrata dos complexos padrões hidráulicos em uma amostra de solo (BROWN & HEUVELINK, 2006). Propriedades hidráulicas do solo e os seus modelos são associados em uma vasta gama de aplicações, incluindo a irrigação (GRASHEY-JANSEN, 2014), modelagem de manejo em áreas agrícolas (HORNE & SCOTTER, 2016) e estudos de longo prazo sobre o efeito do clima e da mudança no uso da terra (SULIS et al., 2011). Os dados necessários para modelos hidráulicos de solo usados em uma determinada aplicação usualmente são difíceis ou impossíveis de se obter diretamente a partir de detalhadas medições de campo, sendo caro e demorado coletar amostras para cada nova aplicação.

Uma abordagem diferente é estimar as propriedades hidráulicas do solo a partir de um conjunto representativo de solos com descrições e medidas associadas, que estão prontamente disponíveis a partir de observações de campo, juntamente com medições laboratoriais detalhadas correspondentes às propriedades hidráulicas do solo (MCNEILL et al., 2018). Em seguida, com base em dados de campo e laboratório, uma função matemática é escolhida para estimar os parâmetros hidráulicos do solo para outros solos com informações de campo semelhantes. Frequentemente, o modelo que descreve a relação entre as propriedades do solo e o modelo matemático é um modelo estatístico, e esse modelo é chamado de função de pedotransferência (VERECKEN et al., 1990).

As funções de pedotransferência (FPTs) estabelecidas para determinar a retenção de água no solo podem ser classificadas em três grupos (TIETJE & TAPKENHINRICHS, 1993): métodos de estimativa pontual, métodos de estimativa de parâmetros e métodos semi-físicos. FPTs pontuais preveem o conteúdo de água no solo em um potencial fixo (SALTER & WILLIAMS, 1965; RAWLS et al., 1982). Métodos de estimativa de parâmetros estabelecem relações empíricas entre propriedades do solo e parâmetros da curva de retenção de água, descrevendo a evolução contínua do conteúdo de água no solo em diferentes potenciais com equações matemáticas (VAN GENUCHTEN, 1980). Abordagens semi-físicas se baseiam em suposições mecanicistas sobre as relações entre retenção de água e estrutura do solo e distribuição do tamanho dos poros (ARYA & PARIS, 1981).

Desde 1970, um grande número de FPTs para prever propriedades hidráulicas foram desenvolvidas em todo o mundo em escala local, regional ou internacional (MICHELON et al., 2010; VERECKEN et al., 2010; SOUZA et al., 2014; MCNEILL et al., 2018; HAGHVERDI

et al., 2018, TUREK et al., 2020). Desta forma, a literatura dispõe de um grande número de FPTs disponíveis e calibradas com dados de solo para a estimativa da retenção de água em solos. Grande parte dessas FPTs disponíveis utilizam-se de informações baseadas na textura do solo como principal preditor para estimar o comportamento hidráulico dos solos, e não incluem informações sobre a estrutura, o que pode influenciar diretamente nas estimativas (WEYNANTS et al., 2009; TWARAKAVI et al., 2010).

Métodos baseados em regressões multivariadas (RMs) são questionados devido a confiabilidade no que se refere a correspondência com os dados aplicados na geração das FPTs, embora as RMs sejam destacadas como um dos inúmeros modelos estatísticos aplicados em séries temporais de dados. Sua base estatística advém da regressão linear e sua aplicação é especialmente importante, pois permite que se estime um valor de uma variável com base num conjunto de outras variáveis. Entretanto, em muitas condições, a entrada de uma determinada variável no modelo pode não apresentar significância e, mesmo assim, apresentar um alto coeficiente de determinação, ficando, portanto, restrito apenas àquela condição e localidade. Essa condição é justificável, pois os modelos baseados em redes neurais (RNAs) têm mostrado superioridade no desenvolvimento de algumas FPTs desenvolvidas quando comparadas aos modelos de RMs, sendo este desempenho atribuído principalmente à capacidade das RNAs de modelar as relações de entrada-saída dos dados e as camadas ocultas favorecerem a relação de sensibilidade com os dados de entrada e saída (HAGHVERDI et al., 2018). Desta forma, uma rede neural é uma estrutura adaptável de transferência de dados não-linear, que pode compreender dinamicamente as relações entre os dados de entrada e saída e, ao mesmo tempo, ser insensível ao ruído de medição (NIELSEN, 1990).

Desenvolvendo RNAs para a estimativa de retenção de água em solos de Santa Catarina, Mendes (2014), destacou que as FPTs geradas a partir de RNAs são mais eficientes do que RMs para estimar a retenção de água, principalmente quando se associa em suas estimativas demais pontos da CRAS e atributos físico-hídricos.

Recentemente, com base nas ferramentas e dados padrão disponíveis para a modelagem do solo, Turek et al. (2020) estimaram a capacidade de campo por critérios comuns, incluindo fluxo, potencial matricial e FPTs específicas, elaborando um mapa da capacidade de campo para o Brasil, com base nos dados globais disponíveis do solo nas funções Soil Grids e pedotransferência.

Seguindo os estudos de predição de propriedades hidráulicas do solo relacionados à retenção de água, técnicas baseadas na abordagem geoestatística, mais precisamente

interpolações por krigagem, vêm se destacando, principalmente por considerarem a estrutura de distribuição espacial dos atributos envolvidos nas estimativas (RAMOS et al., 2014; RAMOS et al., 2017). A geoestatística é um método eficiente de estudo para a distribuição espacial de propriedades do solo (LIU et al., 2014; BEHERA & SHUKLA, 2015). A estimativa de propriedades hidráulicas por meio de ferramentas estatísticas espaciais ajuda a prever valores em locais não amostrados, em função da associação geográfica entre pontos amostrados e reduzindo a variância do erro de avaliação (SAITO et al., 2005).

A aplicabilidade das técnicas geoestatísticas nos estudos voltados a ciência do solo tem sido relatada em uma série de pesquisas, principalmente aquelas que constataam a variabilidade espacial de atributos físicos. Entretanto, a aplicação das técnicas de krigagem ainda não foi estabelecida para o desenvolvimento de FPTs para derivar propriedades hidráulicas do solo a partir de propriedades físicas básicas e de fácil aquisição e que possam prever o comportamento da retenção de água com base no triângulo textural em solos brasileiros. Dos poucos estudos no desenvolvimento de FPTs aplicando aproximação geoestatística, destaca-se o trabalho de Ramos et al. (2014) aplicando técnicas de krigagem, baseando-se na continuidade espacial das propriedades texturais, concluindo que o método de krigagem foi útil para compreender as estimativas de retenção de água no solo baseando-se em diagramas ternários e, portanto, evitando as extrapolações para solos de Portugal.

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adami, M.; Rudorff, B.F.T.; Freitas, R.M.; Aguiar, D.A.; Sugawara, L.M.; Mello, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, v. 4, p. 574-585, 2012.

Andrade, R.S.; Stone, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 382-388, 2009.

Arcoverde, S.N.S.; Salviano, A.M.; Olszewski, N.; Melo, S.B.; Cunha, T.J.F.; Giongo, V.; Pereira, J.S. Qualidade física de solos em uso agrícola na região semiárida do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1473-1482, 2015.

Arya, L.M.; Paris, J.F. A physicoempirical model to predict the soil-moisture characteristic from particle-size distribution and bulk-density data. **Soil Science Society of American Journal**, v. 45, p. 1023-1030, 1981.

Asgarzadeh, H.; Mosaddeghi, M.R.; Mahboubi, A.A.; Nosrati, A.; Dexter, A.R. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. **Plant Soil**, v. 335, p. 229–244, 2010.

Asgarzadeh, H.; Mosaddeghi, M.R.; Mahboubi, A.A.; Nosrati, A.; Dexter, A.R. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. **Geoderma**, v. 166, p. 34-42, 2011.

Asgarzadeh, H.; Mosaddeghi, M.R.; Nikbakht, A.M. SAWCal: A user-friendly program for calculating soil available water quantities and physical quality indices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 109, p. 86–93, 2014.

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, p. 71–79, 2015.

Bordoni, M.; Bittelli, M.; Valentino, R.; Chersich, S.; Meisina, C. Improving the estimation of complete field soil water characteristic curves through field monitoring data. **Journal of Hydrology**, v. 552, p. 283-305, 2017.

Botula, Y.D.; Ranst, E.V.; Cornelis, W. M. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 679–698, 2014.

Bouma, J; Van Lanen, J.A.J. **Pedotransfer functions and threshold values, from soil characteristics to land qualities**. In: BEEK, K.J. (Ed). Quantified land evaluation. Enschede, The Netherlands, v. 6, p. 106-110, ITC. International Institute of Aerospace Survey and Earth Science, 1987.

Brown, J.D.; Heuvelink, G.B.M. 79 Assessing uncertainty propagation through physically based models of soil water flow and solute transport. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**, v. 32, p. 1-15, 2006.

Bünemann, E.K.; Bongiorno, G.; Bai, Z.; Creamer, R.E.; De Deyn, G.; Goede, R.; Fleskens, L.; Geissen, V.; Kuyper, T.W.; Mäder, P.; Pulleman, M.; Sukkel, W.; Van Groenigen, J.W.; Brussaard, L. Soil quality – a critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018.

Cavalcanti, R.Q.; Roli, M.M.; Lima, R.P.; Tavares, U.E.; Pedrosa, E.M.R.; Cherubin, M.R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, p. 114353, 2020.

Cherubin, M.R.; Franco, A.L.C.; Guimarães, R.M.L.; Tormena, C.A.; Cerri, C.E.P.; Karlen, D.L.; Cerri, C.C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil & Tillage Research**, v. 173, p. 64-74, 2017.

Cherubin, M.R.; Karlen, D.L.; Franco, A.L.C.; Tormena, C.A.; Cerri, C.E.P.; Davies, C.A.; Cerri, C.C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156-168, 2016.

Cichota, R.; Jong Van Lier, Q. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 585-596, 2004.

Coelho, M.R.; Santos, H.G.; Silva, E.F.; Aglio, M.L.D. **O recurso Natural Solo**. IN: Uso Agrícola dos Solos Brasileiros. Manzatto, C.V.; Freitas Junior, E.; Peres, J.R.R. (Edrs). Embrapa. 2002, 184p.

Dexter, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.120, p.201-214, 2004.

Dexter, A.R.; Czyż, E.A. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. **Land Degradation & Development**, v. 18, p. 369–381, 2007.

Erktan, A.; Or, D.; Scheu, S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 148, p. 107876, 2020.

Fidalski, J.; Tormena, C.A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1316-1322, 2007.

Grashey-Jansen, S. Optimizing irrigation efficiency through the consideration of soil hydrological properties – examples and simulation approaches. **Erdkunde**, v. 68, p. 33-48, 2014.

Haghverdi, A.; Öztürk, H.S.; Cornelis, W.M. Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: impact of data quality and data mining method. **Geoderma**, v. 227, p. 31–38, 2014.

Haghverdi, A.; Öztürk, H.S.; Durner, W. Measurement and estimation of the soil water retention curve using the evaporation method and the pseudo continuous pedotransfer function. **Journal of Hydrology**, v. 563, p. 251-259, 2018.

Horne, D.J.; Scotter, D.R. The available water holding capacity of soils under pasture. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 165-171, 2016.

Keller, T.; Arvidsson, J.; Dexter, A. Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. **Soil & Tillage Research**, v. 92, p. 45–52, 2007.

Kibblewhite, M.G.; Ritz, K.; Swift, M.J. Soil health in agricultural systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 363, p. 685–701, 2008.

Lehmann, A.; Zheng, W.; Rillig, M.C. Soil biota contributions to soil aggregation. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, p. 1828–1835, 2017.



Leon, H.N. **Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar sob sistemas de preparo do solo**. 2016. 120p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

Leon, H.N.; Almeida, B.G.; Almeida, C.D.G.C.; Freire, F.J.; Souza, E.R.; Oliveira, E.C.A.; Silva, E.P. Medium-term influence of conventional tillage on the physical quality of a Typic Fragiudult with hardsetting behavior cultivated with sugarcane under rainfed conditions. **Catena**, v. 175, p. 37-46, 2019. Doi: 10.1016/j.catena.2018.12.005.

Li, L.; Chan, K.Y.; Niu, Y.; Li, G.; Oates, A.; Dexter, A.; Huang, G. Soil physical qualities in an Oxic Paleustalf under different tillage and stubble management practices and application of S theory. **Soil & Tillage Research**, v. 113, p. 82–88, 2011.

Lima, R.P.; Tormena, C.A.; Figueiredo, G.C.; Silva, A.R.; Rolim, M.M. Least limiting water and matric potential ranges of agricultural soils with calculated physical restriction thresholds. **Agricultural Water Management**, v. 240, p. 106299, 2020.

Liu, J.H.; Yang, M.; Zhao, X.; Zhang, H. Spatial distribution patterns of benthic microbial communities along the Pearl Estuary, China. **Systematic and Applied Microbiology**, v. 37, p. 578–589, 2014.

Lovera, L.H.; Souza, Z.M.; Esteban, D.A.A.; Oliveira, I.N.; Farhate, C.V.V.; Lima, E.S.; Panosso, A.R. Sugarcane root system: Variation over three cycles under different soil tillage systems and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 208, p. 104866, 2021. Doi: 10.1016/j.still.2020.104866.

Mantovanelli, B.C. **Distribuição espacial de atributos físicos e quantificação de poros via tomografia computadorizada em solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos**. 2017. 95p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

Mcbratney, A.B.; MINASY, B.; CATTLE, S.R.; VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v. 109, p. 41–73, 2002.

Mckenzie, B.M.; Tisdall, J.M.; Vance, W.H. Soil physical quality. **Encyclopedia of Earth Sciences Series**, v. 770–777, p. 325-336, 2014.

Mcneill, S.J.; Lilburne, L.R.; Carrick, S.; Webb, T.H.; Cuthill, T. Pedotransfer functions for the soil water characteristics of New Zealand soils using S-map information. **Geoderma**, v. 326, p. 96-110, 2018.

Medrado, J.; Lima, J.E.F.W. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. **Geoderma Regional**, v. 1, p. 59-66, 2017.

Mendes, R.B. **Predição da retenção de água em solos de Santa Catarina através de redes neurais artificiais**. 2014. 147p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Estadual de Santa Catarina, Lages.

Michelon, C. J.; Carlesso, R.; Oliveira, Z.B.; Knies, A.B.; Petry, M.T.; Martins, J.D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, p. 848-853, 2010.

Michelon, C.J.; Carlesso, R.; Petry, M.T.; Fiorin, T.T.; Gubiani, P.I. Qualidade física de solos irrigados por aspersão no Brasil. **Ingenieria del Agua**, v. 15, p. 95-105, 2008.

Minasny, B.; Mcbratney, A.B. Integral energy as a measure of soil water availability. **Plant and Soil**, v. 249, p. 253-262, 2003.

Moreira, W.H.; Tormena, C.A.; Karlen, D.L.; Silva, A.P.; Keller, T.; Betioli Júnior, E. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no- tillage. **Soil & Tillage Research**, v. 160, p. 53-64, 2016.

Naderi-Boldaji, M.; Keller, T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. **Soil & Tillage Research**, v. 159, p. 41–46, 2016.

NIELSEN, H. R. **Neurocomputing**. Addison-Wesley, Reading, M.A. 1990. 433p.

Nunes, J.N.V. **Avaliação da qualidade física de solos irrigados do Rio Grande do Sul e de funções de pedotransferência para a estimativa da retenção de água**. 2016. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Oliveira, D.M.S.; Lima, R.P.; Jan Verburg, E.E. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos líquidos suíno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 280-285, 2015.

Paiva, I.A.; Rita, Y.L.; Cavalieri, K.M. Knowledge and use of visual soil structure assessment methods in Brazil – A survey. **Soil & Tillage Research**, v. 204, p. 104704, 2020.

Ramos, T.B.; Horta, A.; Gonçalves, M.C.; Martins, J.C.; Pereira, L.S. Development of ternary diagrams for estimating water retention properties using geostatistical approaches. **Geoderma**, v. 230-231, p. 229-242, 2014.

Ramos, T.B.; Horta, A.; Gonçalves, M.C.; Pires, F.P.; Duffy, D.; Martins, J.C. The INFOSOLO database as a first step towards the development of a soil information system in Portugal. **Catena**, v. 158, p. 390-412, 2017.

Rawls, W.J.; Brakensiek, D.L.; Saxton, K.E. Estimation of soil water retention properties. **Transactions of the ASAE**, v. 25, p. 1316-1320, 1982.

Reynolds, W.D.; Drury, C.F.; Tan, C.S.; Fox, C.A.; Yang, X.M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, p. 252–263, 2009.

Rosa, M.G.; Klauberg Filho, O.; Bartz, M.L.C.; Sousa, J.P.F.A.; Baretta, D. Macrofauna edáfica e atributos físicos e químicos em sistemas de uso do solo no planalto Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1545-1553, 2015

Saito, H.; Mckenna, A.; Zimmerman, D.A.; Coburn, T.C. Geostatistical interpolation of object counts collected from multiple strip transects: ordinary kriging versus finite domain kriging, **Stoch. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 19, p. 71–85, 2005.

Salter, P.J.; Williams, J.B. Influence of texture on moisture characteristics of soils. 2. Available-water capacity and moisture release characteristics. **European Journal of Soil Science**, v. 16, p. 310-317, 1965.

Santos Júnior, J.D.G.; Sá, M.A.C.; Rein, T.A. **Qualidade Física do Solo em Sistema de Preparo Convencional e Plantio Direto em Latossolo de Cerrado**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 171. Embrapa, 2006, 27p.

Santos, D.P.; Santos, G.G.; Santos, I.L.; Schossler, T.R., Niva, C.C.; Marchão, R.L. Caracterização da macrofauna edáfica em sistemas de produção de grãos no Sudoeste do Piauí. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1467-1475, 2016.

Scarpore, S.V.; De Jong Van Lier, Q.; Camargo, L.; Pires, R.C.M.; Ruiz Corrêa, S.T.; Bezerra, A.H.F.; Gava, G.J.C.; Dias, C.T.S. Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. **Soil & Tillage Research**, v. 187, p. 110-118, 2019.

Silva, A.C.; Armindo, R.A.; Brito, A.S.; Schaap, M.G. SPLINTEX: A physically-based pedotransfer function for modeling soil hydraulic functions. **Soil & Tillage Research**, v. 174, p. 261-272, 2017.

Silva, A.P.; Kay, B.D.; Perfect, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society American Journal**, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

Silva, M.F.; Fernandes, M.M.H.; Silva, A.M.R.; Ferraudo, A.S.; Coelho, A.P. Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104924, 2021. Doi: 10.1016/j.still.2020.104924.

Souza, J.M.; Bonomo, R.; Pires, F.R.; Bonomo, D.Z. Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido a subsolagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, p. 606-613, 2014.

Streck, E.V.; Kämpf, N.; Dalmolin, R.; Klamt, E.; Nascimento, P.C.; Schneider, P.; Giasson, E.; Pinto, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Emater-RS. 2ª edição. 2008, 222p.

Sulis, M.; Paniconi, C.; Rivardi, C.; Harvey, R.; Chaumont, D. Assessment of climate change impacts at the catchment scale with a detailed hydrological model of surface-subsurface interactions and comparison with a land surface model. **Water Resources Research**, v. 19, p. 1-22, 2011.

Tietje, O.; Tapkenhinrichs, M. Evaluation of pedo-transfer functions. **Soil Science Society of American Journal**, v. 57, p. 1008-1095, 1993.

Tormena, C.A.; Silva, A.P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 305-314, 2002.

Turek, M.E.; Jong van Lier, Q.; ARMINDO, R.A. Estimation and mapping of field capacity in Brazilian soils. **Geoderma**, v. 376, p. 114557, 2020.

Twarakavi, N.K.C.; Šimůnek, J.; Schaap, M.G. Can texture-based classification optimally classify soils with respect to soil hydraulics?. **Water Resources Research**, v. 46, p. 1-11, 2010.

Valipour, M. Drainage, waterlogging, and salinity. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 60, p. 1625–1640, 2014.

Van Genuchten, M.T.A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M.G., Van Genuchten, M. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: a review. **Vadose Zone Journal**, v. 9, p. 795–820, 2010.

Vereecken, H.; Maes, J.; Feyen, J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. **Soil Science**, v. 149, p. 1-12, 1990.

Vizioli, B.; Polizeli, K.M.V.C.; Tormena, C.A.; Barth, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104935, 2021. Doi: 10.1016/j.still.2021.104935.

Walia, M.K.; Dick, W.A. Selected soil physical properties and aggregate-associated carbon and nitrogen as influenced by gypsum, crop residue, and glucose. **Geoderma**, v. 320, p. 67-73, 2018.

Wang, L.; Huang, C.; Huang, L. Parameter estimation of the soil water retention curve model with Jaya algorithm. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 151, p. 349-353, 2018.

Weynants, M.; Vereecken, H.; Javaux, M. Revisiting Vereecken pedotransfer functions: introducing a closed-form hydraulic model. **Vadose Zone Journal**, v. 8, p. 86–95, 2009.

Xu, C.; Xu, X.; Liu, M.; Yang, J.; Zhang, Y.; Li, Z. Developing pedotransfer functions to estimate the S-index for indicating soil quality. **Ecological Indicators**, v. 83, p. 338-345, 2017.

Zornoza, R.; Acosta, J.A.; Bastida, F.; Domínguez, S.G.; Toledo, D.M.; Faz, A. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. **Soil**, v. 1, p. 173–185, 2015.



## 4. OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo Geral

i) Avaliar a qualidade física de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais do Brasil a partir de índices indicadores da qualidade de solos e atributos físicos;

ii) Desenvolver diagramas ternários de pedotransferência para estimar o conteúdo de água no solo a partir de técnicas geoestatísticas.

### 4.2 Objetivos específicos

i) Avaliar a relação entre índices físicos e atributos físicos de solos em áreas irrigadas;

ii) Desenvolver mapas de distribuição espacial de atributos físicos de solos;

iii) Caracterizar o percentual de áreas com possíveis limitações físicas;

iv) Desenvolver diagramas ternários a partir de estimativas por krigagem relacionando a retenção de água com as frações granulométricas;

v) Analisar a distribuição espacial e parâmetros geoestatísticos da retenção e armazenamento de água para toda a área do triângulo textural.





## 5. ESTUDO I - USO DE ATRIBUTOS E ÍNDICES PARA CARACTERIZAR A QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS EM ÁREAS IRRIGADAS POR ASPERSÃO EM REGIÕES TROPICAIS E SUBTROPICAIS NO BRASIL<sup>1</sup>

### 5.1 Resumo

O potencial agrícola brasileiro tem crescido de forma acelerada, demandando mais tecnologias e fatores de produção, sobretudo a irrigação. O uso intensivo do solo em áreas irrigadas por aspersão no Centro-Sul do Brasil tem impactado as características físicas desses solos, causando danos à sua estrutura física, afetando a sua capacidade produtiva. Assim, o principal objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade física de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais no Brasil. Para isso, utilizou-se a base de dados de características físico-hídricas de áreas irrigadas do Sistema Irriga®, vinculado ao Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria. O banco de dados contém propriedades físico-hídricas de solos de áreas irrigadas dos estados de Rio Grande do Sul, Paraná, Bahia, Mato Grosso, São Paulo, Minas Gerais e Goiás, totalizando aproximadamente 11.200 observações. Os atributos físicos: areia, silte, argila, densidade do solo, densidade crítica, porosidade total, macroporosidade e microporosidade foram utilizados. Potenciais matriciais foram aplicados, e a partir dos parâmetros da curva de retenção de água foram determinados índices de qualidade física do solo: Índice S e Energia Integral. Mapas de distribuição espacial correspondentes às áreas irrigadas do banco de dados foram elaborados usando o software ArcGIS 10.4.1. São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul apresentaram limitações e indícios de compactação a partir dos valores de macroporosidade e Índice S. A avaliação da qualidade do solo a partir de atributos físicos associados com índices físicos de qualidade do solo (Índice S e Energia Integral), possibilitou compreender o comportamento e variações existentes em diferentes locais, podendo serem usadas como ferramentas para melhor caracterizar o grau de limitação física desses solos.

Palavras-chave: Índice S; Energia Integral; Qualidade do solo; Sistema Irriga.

### 5.2 Abstract

The Brazilian agricultural potential has grown at an accelerated rate, demanding more technologies and production factors, especially irrigation. The intensive use of the soil in

---

<sup>1</sup> Artigo elaborado de acordo com as normas da Revista Soil and Tillage Research.

sprinkling irrigates areas in the Center-South of Brazil has impacted the physical characteristics of these soils, causing damage to their physical structure, affecting their productive capacity. Thus, the main objective of this study was to evaluate the physical quality of soils in sprinkling irrigated areas in tropical and subtropical regions in Brazil. For this, we used the database of physical-hydric characteristics of irrigated areas of the Sistema Irriga®, linked to the Department of Rural Engineering, of the Federal University of Santa Maria. The database contains physical-hydric properties of soils in irrigated areas in the states of Rio Grande do Sul, Paraná, Bahia, Mato Grosso, São Paulo, Minas Gerais, and Goiás, totaling approximately 11,200 observations. The physical attributes: sand, silt, clay, soil bulk density, critical bulk density, total porosity, macroporosity, and microporosity were used. Matrix potentials were applied and based on the parameters of the water retention curve, soil physical quality indexes were determined: Index S and Integral Energy. Spatial distribution maps corresponding to the irrigated areas of the database were constructed using ArcGIS 10.4.1 software. São Paulo, Paraná, and the Rio Grande do Sul showed limitations and evidence of compaction from the values of macroporosity and Index S. The evaluation of soil quality from physical attributes associated with physical indexes of soil quality (Index S and Integral Energy), made it possible to understand the behavior and variations existing in different locations, which can be used as tools to better characterize the degree of physical limitation of these soils.

Keywords: S-index; Integral Energy; Soil quality; Irrigation Systems.

### 5.3 Introdução

A qualidade física do solo no decorrer dos anos vem recebendo diversos conceitos, mas de maneira geral, destaca-se como a capacidade de um determinado solo em atender aos requisitos exigidos pela planta, tais como a água, aeração, além de resistir e se recuperar de processos que possam diminuir essa capacidade (MCKENZIE et al., 2014; NADERI-BOLDAJI & KELLER, 2016). A capacidade de campo, a capacidade de água disponível às plantas, aeração, macroporosidade, densidade do solo e o índice de estabilidade estrutural, destacam-se como os principais atributos que descrevem a qualidade física de um solo, pois quantificam (direta ou indiretamente) a capacidade do solo em fornecer suporte estrutural necessário para o desenvolvimento das plantas (REYNOLDS et al., 2009; BANGITA & RAJASHEKHAR RAO, 2012; PÖHLITZ et al., 2018; MOHIEDDINNE et al., 2019).

Nesta perspectiva, definir o melhor atributo ou índice que descreva a qualidade física do solo, tem sido reportada e estudada na literatura por diversos cientistas de solos. Conforme

destacado por Naderi-Boldaji & Keller (2016), um índice apropriado para a qualidade física do solo deve fornecer uma medida comparável, independente da textura, mesmo quando algumas das condições mencionadas acima ocorrerem juntas, ou seja, deve refletir os efeitos resultantes na qualidade física do solo de maneira significativa. Constituem exemplos de índices indicadores de qualidade física do solo: Índice S (Dexter,2004), “*Integral Energy*” ou Energia Integral proposto por Minasny & McBratney (2003) e o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) (Silva et al. 1994). Estes índices, associados a um parâmetro hidráulico do solo, definido com base em seus valores de densidade e textura, possibilitam agrupar estas informações e definir um conceito conjunto acerca da qualidade física de um solo. Isoladamente, a densidade do solo como componente da qualidade física do solo nem sempre é um indicador apropriado para comparações entre as texturas do solo. Isso ocorre porque um valor de densidade que indica um estado compacto em um solo (solo argiloso) pode indicar um estado menos compacto ou nenhum em outro (solo arenoso). Assim, para seu uso e aplicabilidade na diferenciação e indicação de áreas com limitações, necessita ser agrupada de forma adequada (HÅKANSSON & LIPIEC 2000).

No cenário atual, praticamente 90% da produção agrícola brasileira com as principais culturas de interesse econômico se concentram nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e em pequena parte na região Nordeste (CONAB, 2020). O avanço da produção de commodities agrícolas nesses cenários intensificou o uso solo, sendo que, muitas vezes o uso da irrigação é necessário para prover produções satisfatórias, seja pelo clima árido ou semiárido em algumas dessas regiões, ou pela distribuição irregular das precipitações pluviais em outras.

Segundo levantamento da ANA (2019), o Brasil detém uma área irrigada de aproximadamente 7 milhões de hectares, tendendo a alcançar 10 milhões em 2030, com predomínio de equipamentos pivô central. O crescimento contínuo no uso da irrigação (entre 4 e 8% por ano), associado ao intensivo uso, com manejo muitas vezes inadequado do solo, como parte integrante das práticas agrícolas, acarreta mudanças na estrutura do solo, que podem ser benéficas ou prejudiciais às propriedades físicas do solo e ao crescimento das culturas. Solos úmidos podem ser mais susceptíveis à degradação de sua estrutura, sobretudo pelo manejo e intenso tráfego de maquinários em solos com conteúdo de água elevado, podendo afetar o crescimento radicular, devido ao adensamento e maior resistência à penetração.

Apesar das elevadas produtividades constatadas em nível de campo para as principais culturas de interesse econômico, não se descarta a ocorrência de indícios de degradação física e compactação do solo nas áreas irrigadas no Centro-Sul do Brasil. Atrelado a estas condições,

o Centro-Sul foi a região de maior expansão nos últimos 20 anos, quadruplicando sua área para 1,4 Mha (ANA, 2019), somando 78% da área irrigada por pivô central no Brasil. O Sul, apresentou ganhos expressivos em áreas irrigadas na última década, entretanto, com o crescente desenvolvimento da região Nordeste, sua participação relativa sofreu decréscimo, atingindo níveis de 24% da área total irrigada no Brasil (ANA, 2019). O Sudeste vem apresentando incrementos sucessivos e expressivos desde a década de 1970, sendo que São Paulo e Minas Gerais concentram 34,0% da área irrigada do país (ANA, 2019).

Em função do uso e manejo do solo, Michelin et al. (2008); Michelin et al. (2009); Michelin et al. (2010), estudando áreas irrigadas por aspersão no Brasil Central, já haviam destacado que áreas nesse eixo apresentaram indícios de compactação em função da densidade e macroporosidade do solo. Associado a maior tecnificação aplicada nestas áreas, em função das práticas de irrigação, regiões tropicais e subtropicais no Brasil apresentam diferenças quanto ao uso e manejo do solo, seja em função do cultivo convencional, ou para neutralizar os efeitos nocivos do sistema convencional, ou o uso do SPD. Nesse segmento, com o critério em avaliar os efeitos de sistemas de cultivo na qualidade física do solo em diferentes regiões de cultivo agrícola, Barbosa et al. (2019); Secco et al. (2021); Silva et al. (2021); Lovera et al. (2021); Vizioli et al. (2021), destacam diferentes condições de uso e manejo do solo e os impactos sobre a qualidade física do solo, reforçando a necessidade em uma avaliação em macro escala.

Diante das perspectivas e conceitos apresentados, percebe-se que ainda existe uma carência em informações em macroescala sobre o comportamento físico dos solos nos principais centros agrícolas no Brasil. Tendo em vista a expansão da fronteira agrícola brasileira, o conhecimento atual destes atributos de modo que se possa direcionar o planejamento de uso e manejo com os menores impactos possíveis a estrutura do solo se faz necessário. Deste modo, o principal objetivo deste estudo foi aplicar atributos e índices físicos para caracterizar a qualidade física de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais no Brasil, associando conjuntamente com mapas de distribuição espacial.

## **5.4 Material e métodos**

### *5.4.1 Composição do banco de dados*

O trabalho foi realizado utilizando-se a base de dados físico-hídricos de áreas irrigadas do Sistema Irriga®, vinculado ao Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria. O banco de dados disponibiliza informações referentes a caracterização física

de solos de áreas irrigadas dos estados de Rio Grande do Sul (RS), Paraná (PR), Bahia (BA), Mato Grosso (MT), São Paulo (SP), Minas Gerais (MG) e Goiás (GO) (Figura 1). As áreas amostradas para a caracterização física foram georreferenciadas no momento da coleta, com a determinação da Latitude e Longitude, além da altitude do local. O banco de dados dispõe de 11.193 observações de atributos físico-hídricos e texturais. As áreas irrigadas estão sob o domínio de solos nas seguintes classes: Nitossolo Vermelho Eutrófico (NV); Latossolo Vermelho Distrófico (LV); Latossolo Bruno Distrófico (LB); Latossolo Vermelho Amarelo (LVA); Argissolo Vermelho Amarelo (PVA); Argissolo Acinzentado Distrófico (PAC).

O banco de dados é composto pelas frações granulométricas (areia grossa, areia fina, silte e argila), atributos físico-hídricos (densidade do solo, densidade de partículas, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, conteúdo de água nos potenciais de 0; -1; -6; -10; -33; -100; -500 e -1500 kPa) de amostras do solo de áreas irrigadas das regiões nas regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste.

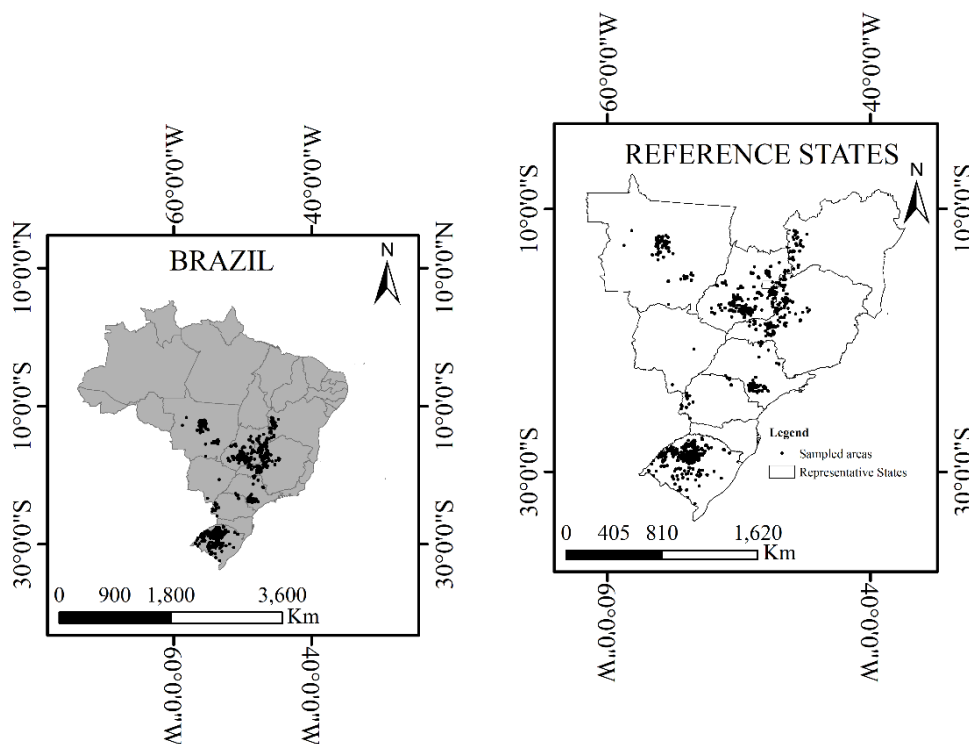


Figura 1. Localização georreferenciada das áreas de estudo. Fonte: Autor

#### 5.4.2 Procedimentos analíticos – atributos físicos

Mini trincheiras de aproximadamente 50 cm de comprimento, 50 cm de largura e 75 cm de profundidade foram abertas para a amostragem de solos. Os perfis dos solos foram divididos em três camadas: 0,0-0,2 m; 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m. A coleta de amostras com estrutura

preservada foi realizada com o auxílio de extrator, o qual foi acoplado um cilindro de metal de aproximadamente 5,5 cm de diâmetro e 3 cm de altura, resultando no volume médio de 73 cm<sup>3</sup>. Nos mesmos perfis de solo, amostras de aproximadamente 0,5 Kg de solo úmido foram coletadas, para a quantificação das frações granulométricas e densidade de partículas.

Para a análise granulométrica, aplicou-se o método do densímetro (VETTORI, 1969). A densidade de partículas foi obtida pelo método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006). A densidade do solo (Ds) foi realizada conforme descrito em Grossman & Reinsch (2002), onde o solo contido em anel volumétrico foi seco em estufa à 105°C, até massa constante. Para a quantificação da porosidade total (PT), aplicou-se a relação entre Densidade do solo (Ds) e Densidade de partículas (Dp) conforme Equação (1).

$$PT = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (1)$$

Ao definir macroporos como poros com  $\varnothing_{eq} > 300 \mu\text{m}$ , a macroporosidade (Macro) foi calculada pela razão entre o volume de macroporos (volume de água drenado entre 0 e -1 kPa) e o volume do solo (cilindro volumétrico usado na amostragem do solo); a microporosidade (Micro, cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) foi então determinada, definida como a razão entre o volume de microporos (Micro) ( $\varnothing_{eq} < 50 \mu\text{m}$ ), obtido pelo volume de água drenada de -6 kPa e o volume do solo.

As amostras indeformadas ainda foram transferidas para câmara extratora de Richards (Richard, 1949), no qual aplicou-se tensões de -33 kPa e -100 kPa, por um período mínimo de 96 horas para cada potencial. O conteúdo de água dos solos dos potenciais de -500 kPa e -1500 kPa foram determinados por psicrometria, com a utilização de um WP4 (DECAGON DEVICES, Inc.) A avaliação foi realizada com o processamento de cinco a sete amostras desestruturadas, previamente secas ao ar, borrifadas com água, pesadas e levadas ao WP4, onde se realizou a leitura do potencial em que a amostra se encontrava. Ao final, as amostras foram levadas à estufa para secagem até massa constante. A diferença entre as duas pesagens correspondeu ao conteúdo de água no potencial indicado pelo WP4.

#### 5.4.3 Índices físicos de qualidade do solo

A função para calcular o Índice S (Dexter, 2004) para avaliar a qualidade física do solo, teve como base os parâmetros obtidos a partir da curva de retenção de água no solo (VAN GENUCHTEN, 1980). O índice S foi determinado com base nos parâmetros obtidos a partir da

Curva de Retenção de Água no Solo (CRAS), tangente no ponto de inflexão, segundo a equação proposta por (Dexter, 2004) (Equação 2).

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (2)$$

em que:  $\theta_{sat}$  - umidade volumétrica na saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\theta_{res}$  - umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $n$  e  $m$  - são parâmetros de forma da curva de retenção de água no solo;  $m = 1 - 1/n$ ,  $0 < m < 1$ , de acordo com Van Genuchten (1980).

A quantificação da energia requerida pela planta, para a retira de água no solo ( $\text{J kg}^{-1}$  de água), foi quantificada a partir da abordagem do “*Integral Water Capacity*” (IWC) ou apenas Energia Integral (EI). A teoria está baseada no trabalho de Groenevelt et al. (2001); Groenevelt et al. (2004); Asgarzadeh et al. (2014), utilizando o modelo de van Genuchten-Mualem para a estimativa da curva de retenção de água. Sua determinação foi realizada a partir do software R (R Core Team, 2016), utilizando o pacote “*soil physics*” (LIMA et al., 2016).

A função de retenção de água no solo a partir da CRAS foi integrada nas correspondentes faixas de água disponíveis para calcular os valores de EI. A EI ( $\text{J kg}^{-1}$ ) para os valores de água disponíveis definidos pela CRAS foram calculadas usando uma equação modificada e generalizada de Minasny & McBratney (2003) (Equação 3).

$$EI = \frac{1}{10W} \int_{h_i}^{h_f} h \left( \prod_{i=1}^m w_i(h) \right) C(h) dh \quad (3)$$

em que:  $h_i$  e  $h_f$  são potencias matriciais (hPa) estabelecidos (segundo a abordagem utilizada na CRAS);  $W$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) é a quantidade volumétrica de água disponível no solo calculada pelas diferentes abordagens;  $w_i(h)$  são funções de ponderação multiplicativa que representam as várias propriedades físicas limitantes do solo;  $C(h)$  é a capacidade de água diferencial absoluta ( $\text{hPa}^{-1}$ ), que é a inclinação da curva de retenção de água no solo (ou seja,  $|d\theta/dh|$ ) de acordo com a equação de Van Genuchten (1980); e  $d$  e  $h$  significam teor volumétrico de água e potencial matricial, respectivamente. A constante 10 é para converter as unidades de EI de hPa para  $\text{J kg}^{-1}$ .

Com o critério de estabelecer limites críticos de  $D_s$ , foi utilizada a Equação definida em Jones (1983), fixando assim a faixa de  $D_s$  crítica associada ao teor de argila (Equação 4).

$$Dsc = 1,77 - 0,00063 * Argila \quad (4)$$

A macroporosidade considerada como crítica foi estabelecida em 10%, conforme descrito em Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998).

#### 5.4.4 Descrição e distribuição espacial dos atributos físicos

Foram elaborados mapas dos atributos texturais (areia, silte e argila), densidade do solo, densidade crítica, macro, micro e porosidade total, com o intuito de descrever a distribuição espacial e comportamento destes atributos nas diferentes regiões de estudo. Desta forma, foi utilizado o método “*Inverse Distance Weighted*” (IDW), o qual prediz um valor para um local não medido utilizando-se os valores amostrados à sua volta, que terão um maior peso do que os valores mais distantes, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, que diminui na medida em que a distância aumenta, conforme apresentado na Equação 5 (JAKOB & YOUNG, 2006).

$$Z = \frac{\sum_i^n \frac{z_i}{\beta h_{ij}}}{\sum_n^n \frac{1}{\beta h_{ij}}} \quad (5)$$

em que: Z é valor interpolado para o nó do reticulado; Zi o valor do ponto amostrado vizinho ao nó; hij é a distância entre o nó da grade e Zi, β é o expoente de ponderação, n é o número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

O tratamento dos dados e elaboração dos mapas foi desenvolvido no software ArcGIS 10.4.1, que possui ferramentas geoestatísticas com o interpolador escolhido para este estudo. Para aumentar a precisão na discriminação, este estudo utilizou máscaras, com base em arquivos (.shp) disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A critério, os mapas elaborados representam um perfil de solo de 0,6 m.

#### 5.4.5 Procedimentos estatísticos

Para considerar a estrutura multivariada dos dados, foram utilizadas técnicas estatísticas para verificar semelhanças de relação entre os atributos físicos avaliados com os índices de qualidade física, na tentativa de agrupar aqueles atributos mais influentes para cada índice aplicado. Um gráfico "scree-plot" de autovalores foi criado para determinar o número de



componentes que devem ser excluídos. Esse gráfico ordena os autovalores de acordo com os principais componentes, planejando a porcentagem de variância por cada atributo. Notadamente, esta análise de componentes deve explicar mais de 70% da variância total (HAIR et al., 2005), e estas constituem as variáveis de resposta escolhidas para a análise de componentes principais (ACP). Foi realizada a análise dos fatores, que permite que as relações entre as variáveis sejam explicadas como um número limitado de novas variáveis, extraíndo os principais componentes calculados a partir da matriz de correlação de Pearson entre as variáveis. Todas as análises estatísticas foram realizadas usando o software Statistica versão 7.0 (STASOFT, 2004).

## **5.5 Resultados e discussão**

### *5.5.1 Variação média e distribuição espacial de atributos texturais*

A partir dos resultados médios de variação textural nas áreas irrigadas, é possível compreender a variação existente nos diferentes estados do eixo Centro-Sul (Figura 2a e 2b). O conteúdo de areia é predominante na Bahia nas três profundidades avaliadas, situando se em faixas de 78,3%, 76,1% e 76%, respectivamente, nas profundidades de 0,0-0,2 m, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m; para os demais estados, a variação no conteúdo de areia ocorre na faixa de 16,4% (Paraná) até 44,6% (Mato Grosso). Os teores de argila são predominantes aos estados do Paraná, com 50,7%, 53,14% e 54,5%; São Paulo com 42%, 44,1% e 45,2% e Rio Grande do Sul com 37,05%, 39,42% e 41,46%, nas profundidades de 0,0-0,2 m, 0,2-0,4 m, respectivamente; quanto a distribuição entre os estados, a faixa de amplitude é de 12,2% (Bahia) até 39,01% (Minas Gerais). Pela variação em profundidade nos teores de argila, houve incremento médio ao máximo de 5%. Assim, nas práticas associadas a irrigação é importante conhecer a magnitude do gradiente textural, pois a ocorrência de grandes contrastes de argila no perfil está associada a elevada presença de microporos, sendo este fator determinante de uma série de processos hidráulicos.

A variabilidade textural nos diferentes locais é evidenciada na Figura 3. Os dados ocorrentes nas diferentes regiões foram distribuídos espacialmente. Dessa forma, das áreas amostradas pela variação no conteúdo de areia, 25,18% e 22,61% se enquadram respectivamente as faixas de distribuição entre 20%-37% e 37%-54%; pelos teores de silte, 26,54% e 29,77 % estão situados na faixa de 16%-29% e 29-42%; a variação nos teores de argila predominou principalmente na faixa entre 29%-42% com distribuição de 28,35%.

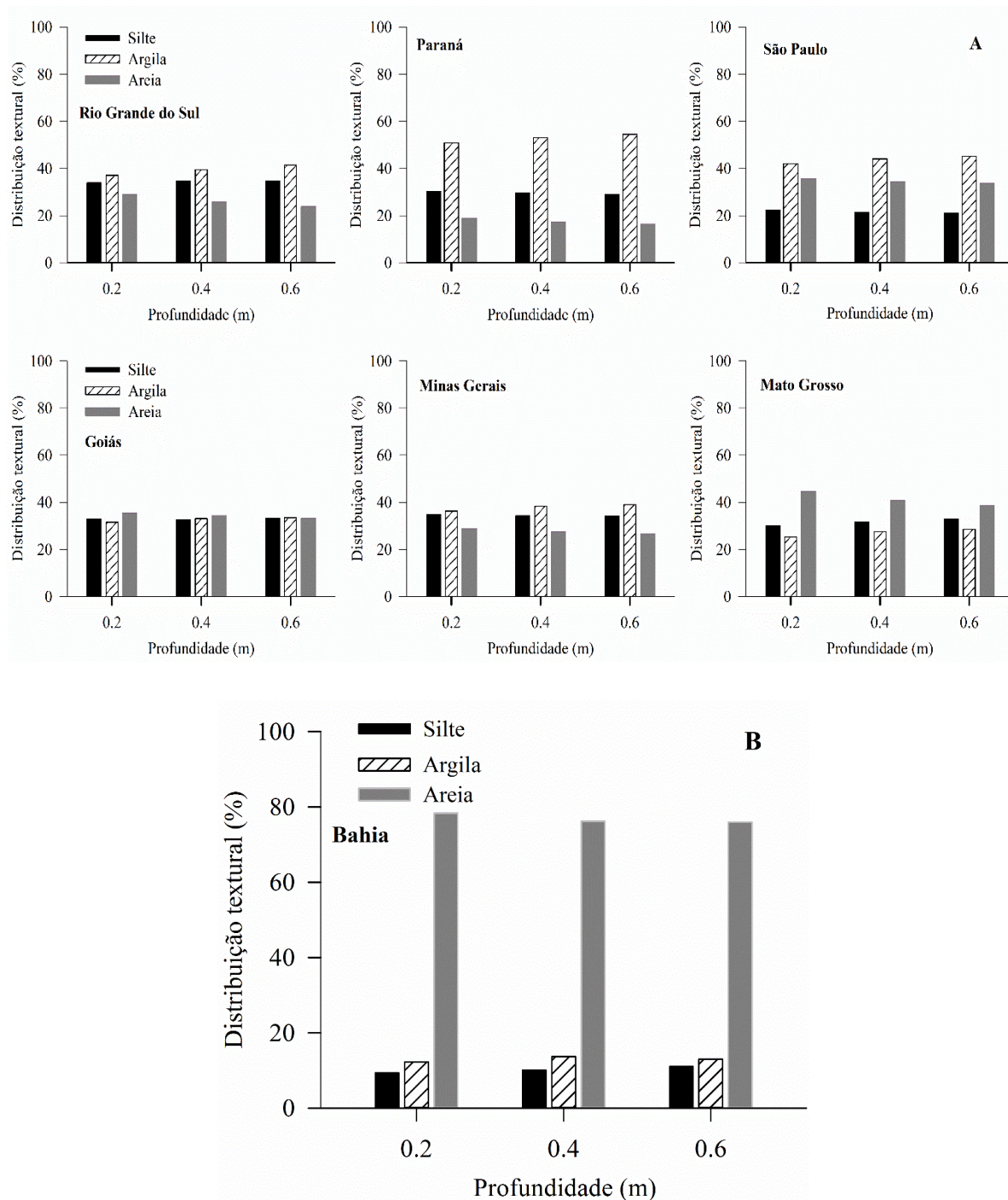


Figura 2. Variação média da textura de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais do Brasil. (A) Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e (B) região Nordeste.

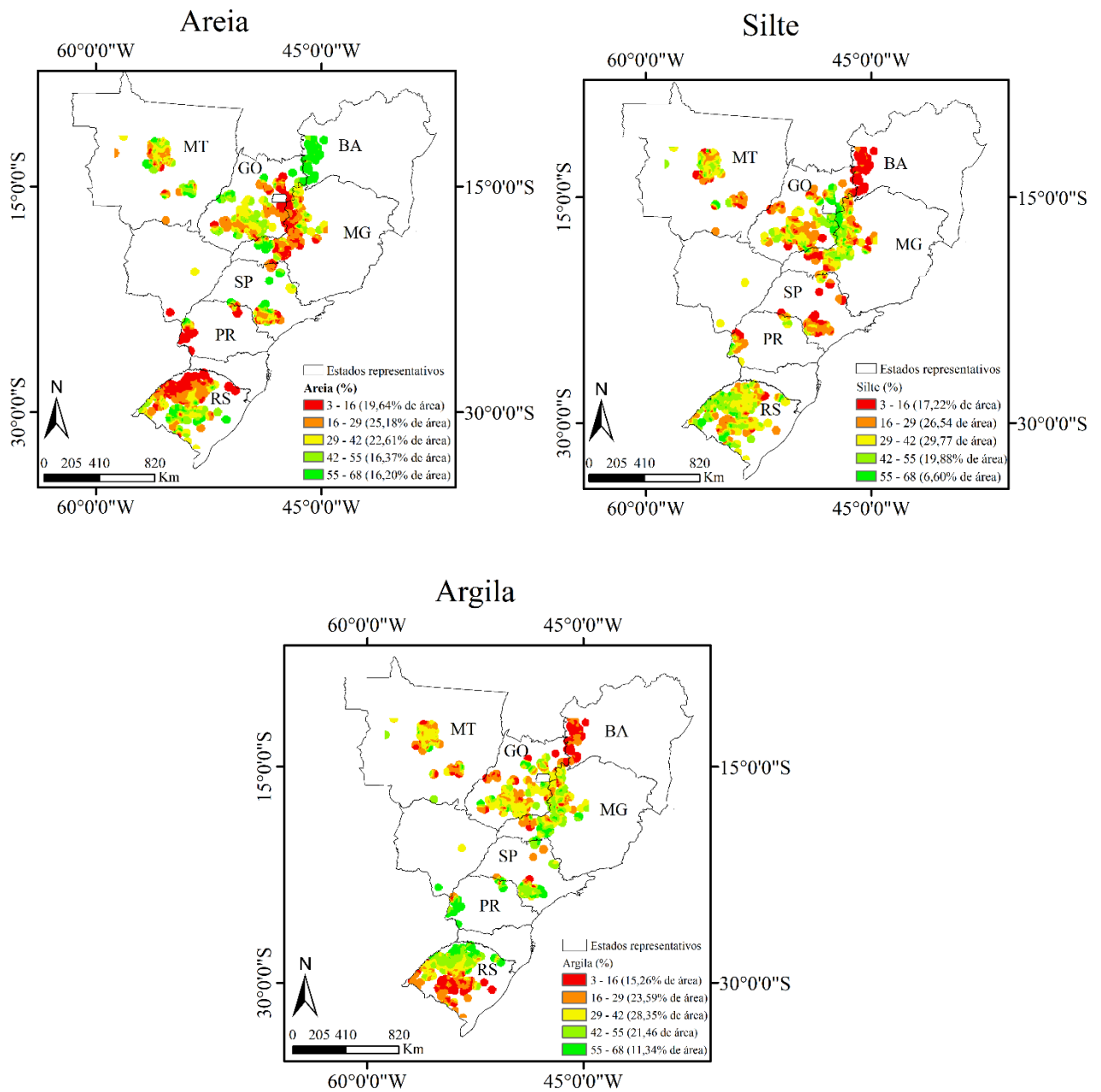


Figura 3. Distribuição espacial da textura de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais do Brasil.

Apesar de não haver extrapolação para as demais localidades dentro de um mesmo estado em função das dimensões territoriais e pontos amostrados, Paterson et al. (2018), destacam que, aproximadamente metade da variabilidade continental da textura do solo é realizada em 10 km, enquanto que, um terço é realizado no primeiro 1 km, então, localidades próximas a estas distâncias podem ser correlatas aos valores espacializados para regiões não amostradas.

Pela maior variação nos conteúdos de areia, as áreas da região Oeste da Bahia estão propícias e sujeitas a influências pela compactação, em virtude da natureza menos coesa dos solos arenosos e, principalmente, por se tratar de uma região com intensa expansão da fronteira agrícola. A variação espacial com base nos teores de argila corrobora o que já foi apresentado na Figura 2, ou seja, os estados de São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul apresentam as maiores faixas relativas de distribuição. Com base na distribuição espacial dos teores de argila, pode-se expor que, solos argilosos, predominante em função do uso e manejo do solo no Rio Grande do Sul e Paraná, são capazes de suportar maiores pressões, porém, são mais susceptíveis à compactação, decorrente da capacidade que estes apresentam em manter maior umidade a maiores tensões, e a umidade acima da capacidade de campo, ser um fator relacionado com a susceptibilidade do solo à compactação (SILVA et al., 2002).

#### *5.5.2 Variação média e distribuição espacial da porosidade do solo*

A porosidade representa o espaço em que ocorrem processos dinâmicos do ar e da solução do solo, caracterizando-se como um dos indicativos da ocorrência de possíveis limitações físicas ao solo. A variação média da macroporosidade foi superior ao limite crítico de 10% estabelecido em Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998), nas áreas localizadas em Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e Bahia, com valores entre 10,44% e 18,15% nas profundidades avaliadas, indicando que esses solos apresentam adequada aeração (Figura 4a e 4b). Para as áreas localizadas em São Paulo, apenas na profundidade de 0,0-0,20 m houve valor inferior aos 10%, estando este na média de 8,97%, entretanto, para o Rio Grande do Sul (6,99%, 8,05% e 8,62%) e Paraná (7,68%, 8,65%, 9,74%), para as profundidades de 0,0-0,2 m, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m, respectivamente, os valores médios foram inferiores aos limites críticos, representando evidências de limitações físicas a partir deste atributo.

Para a Bahia verifica-se a maior variação média de macroporosidade (16,55%, 16,32% e 18,15%) nas profundidades de 0,0-0,2 m, 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m (Figura 4b). Esta variação é decorrente da predominância característica da fração areia nas áreas amostradas; apesar de se constituir valores superiores aos estabelecidos na literatura, ou seja, ótima aeração, a elevada macroporosidade afeta a retenção ou armazenamento de água, visto que, a ocupação predominante de macroporos, pode interferir na conexão de microporos e posterior redistribuição de água; além de alterar o fluxo e retenção de calor no solo (MÜLLER et al., 2018; GALDOS et al., 2019).

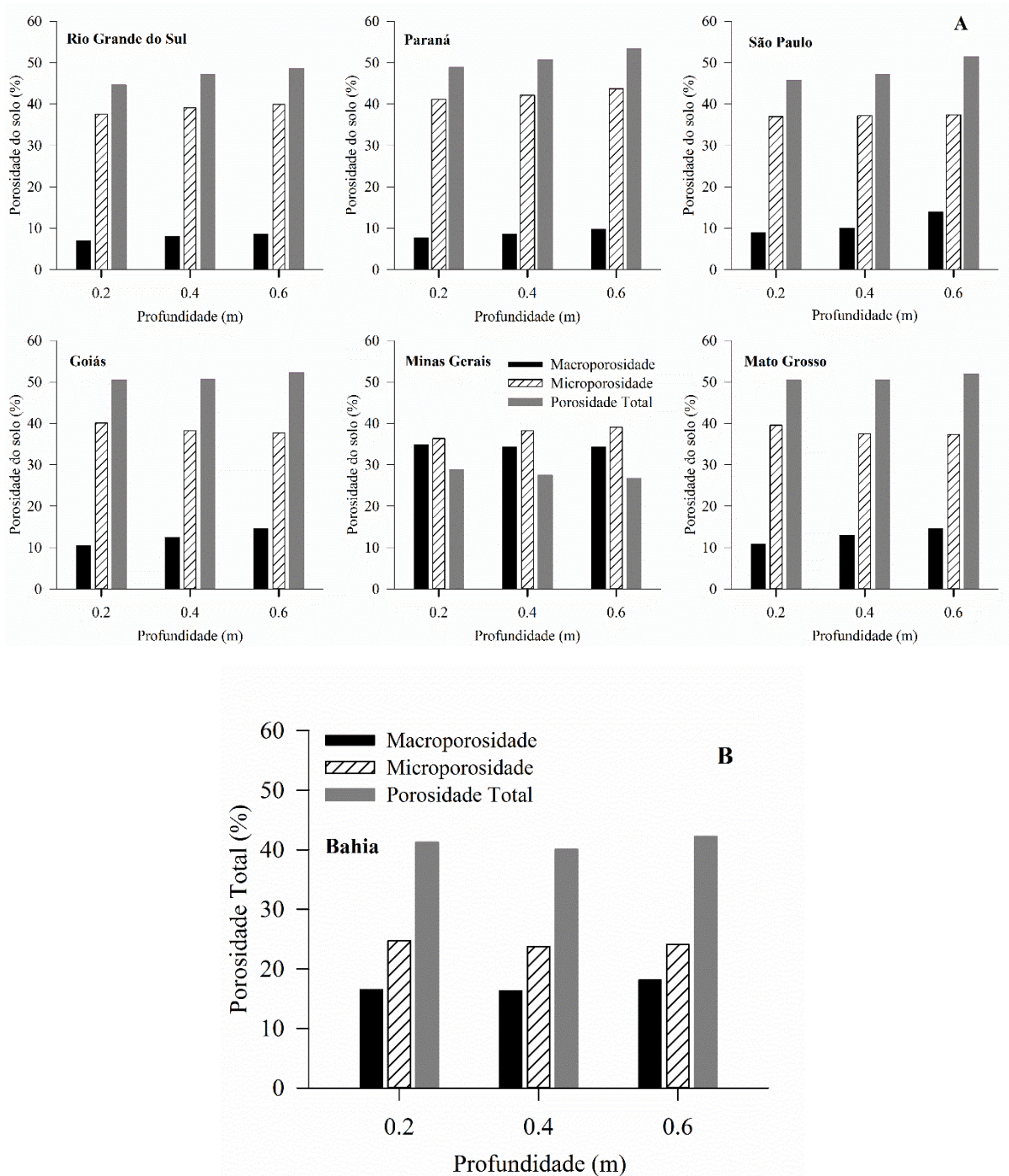


Figura 4. Variação média da porosidade de solos em áreas irrigadas por aspersão nos estados do Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso (A) e Bahia (B).

Em um cenário inverso, áreas localizadas em Paraná e Rio Grande do Sul, apresentam limitações em todas as profundidades avaliadas, principalmente a camada superficial, tornando-se evidente que os aspectos relacionados ao uso e manejo do solo e tipos de culturas implantadas (monocultivo ou sucessão de cultivos de inverno + verão), induzem a redução na distribuição e tamanho de poros. No Rio Grande do Sul, estes relatos de variação nos índices de macroporos

associados a mesma condição textural já foram constatados em Michelin et al. (2007), em áreas irrigadas; Suzuki et al. (2012), em áreas de pastagem cultivada; Collares et al. (2011) em Latossolos no noroeste do estado.

Assim, as perdas na porosidade associadas às diferentes formas de uso do solo podem ser explicadas tanto pela carga ao qual é exercida sobre o solo, como no SPD, ou em sistemas convencionais, pela quebra de ligações entre as partículas que conferem uma estrutura estável do solo. Por este critério, no novo arranjo de partículas, os antigos espaços intra-agregados (macroporos) são preenchidos com partículas sólidas, reduzindo a porosidade e aumentando a densidade.

A partir da distribuição espacial da porosidade do solo (Figura 5), percebe-se grande variabilidade e condições variadas de distribuição. Nota-se que a macroporosidade representa o atributo de maior influência na distinção e caracterização de limitações físicas, sendo que a faixa de distribuição de 3%-7% ocupa praticamente todas as áreas amostradas no Rio Grande do Sul e Paraná. Vizioli et al. (2021) avaliando efeitos de sistemas de cultivo no Paraná, destacaram que a distribuição dos poros entre macroporos e microporos foi afetada pelos sistemas de cultivo (convencional e SPD), devido às diferentes distribuições de tensões ao solo por implementos agrícolas. A região Oeste da Bahia, em função das características de solos arenosos, apresentou as maiores faixas de variação (15%-19% e 19-23%).

Nestas condições, a confecção de mapas de distribuição espacial, possibilita uma real noção acerca da variação física dos solos nos diferentes eixos do Centro-Sul, partindo desde uma pequena parte do Nordeste com poucas limitações, mas que necessita de manejo adequado, pois as condições atuais mostram riscos eminentes de degradação física; o eixo Sul, em que as principais regiões agricultáveis e que apresentam as maiores áreas irrigadas do país com valores restritivos quanto às variações físicas de solo; enquanto que Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais apresentam condições adequadas quanto a estas variações.

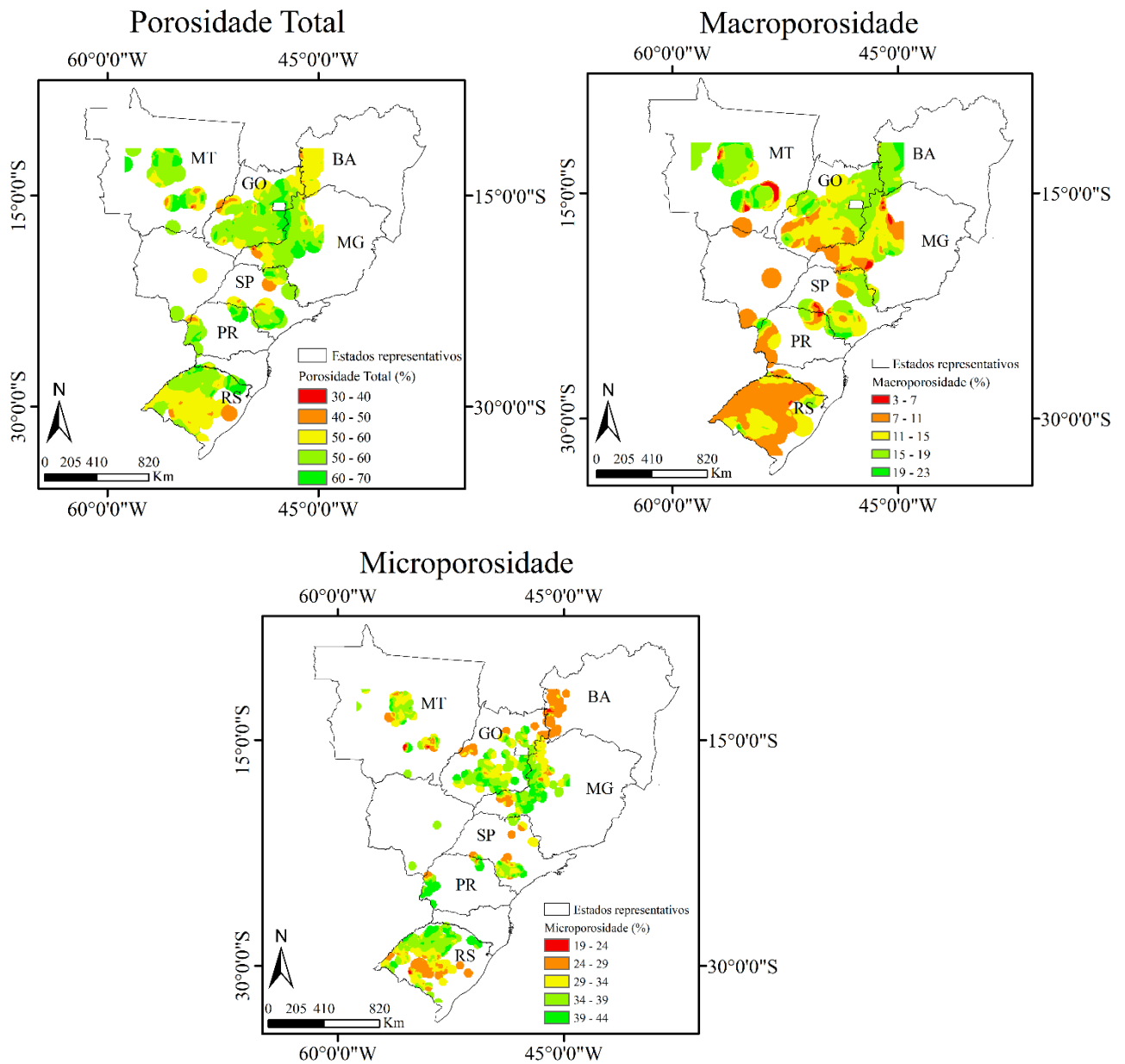


Figura 5. Distribuição espacial da porosidade de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais do Brasil.

### 5.5.3 Índice $S$ , $D_s$ , $D_{sc}$ e Energia Integral

Valores adequados de índice  $S$  equivalem a maior inclinação da curva de retenção de água no solo (DEXTER, 2004), indicando melhor distribuição e maior quantidade de poros com maior diâmetro. Pelos resultados obtidos de Índice  $S$ , áreas amostradas no estado de Mato Grosso, Minas Gerais e Bahia apresentaram valores superiores aos estabelecidos em Dexter (2004), estando situadas nas faixas de boa qualidade física ( $S = 0,05 > S \geq 0,035$ ) e muito boa ( $S > 0,05$ ) nas camadas avaliadas (Figura 6 e 7). Entretanto, em Goiás apenas as camadas de

0,40-0,60 m apresentaram boa qualidade física estando superior ao limite de 0,035 (Figura 7). Estes resultados corroboram Silva et al. (2012); Andrade & Stone (2009) que, estudando o índice S em solos de Minas Gerais sob uso intensivo e Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro, respectivamente, destacaram a capacidade deste índice em diferir áreas com limitações físicas associada a demais atributos do solo.

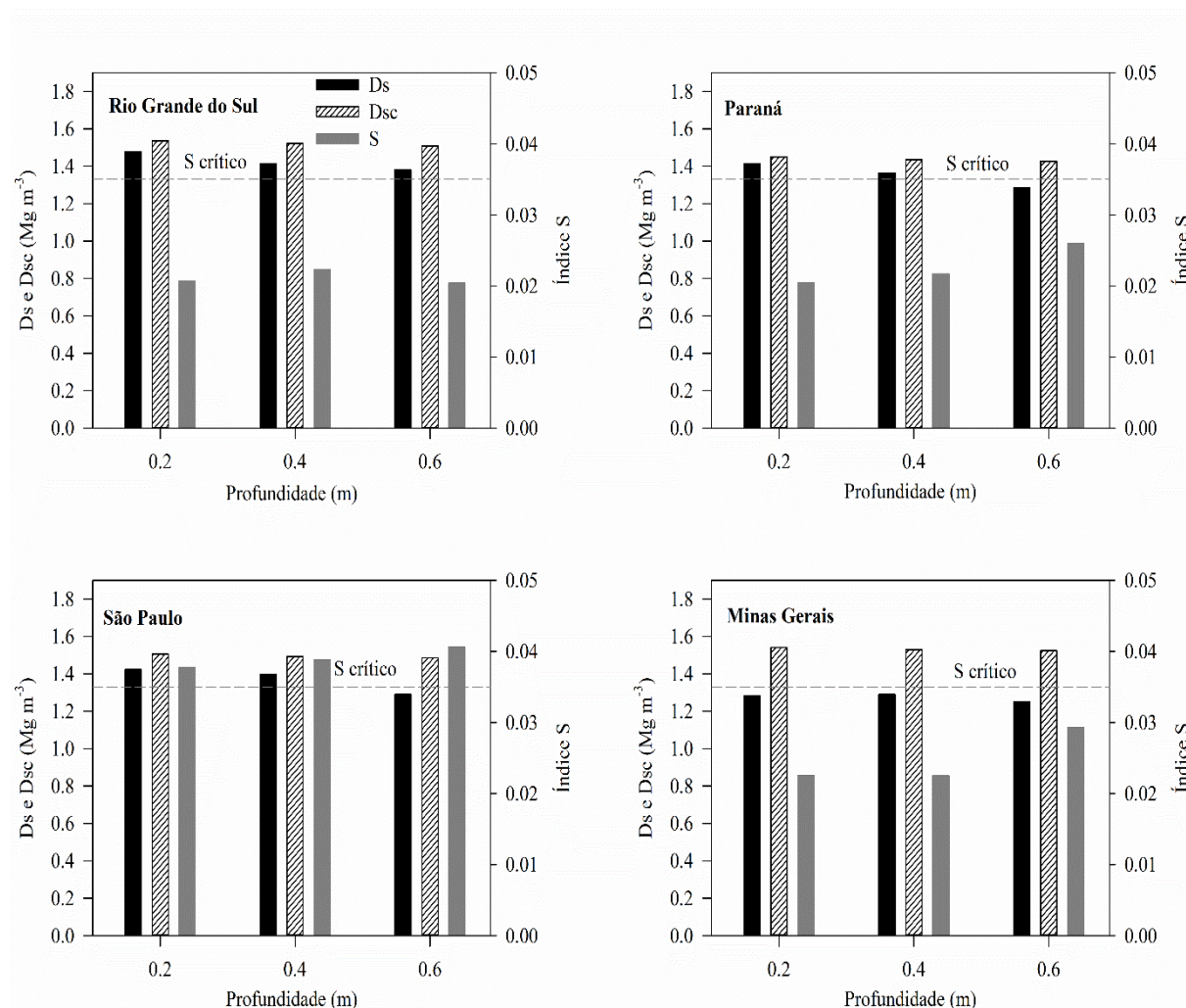


Figura 6. Valores médios da Densidade do solo ( $D_s$ ), Densidade crítica ( $D_{sc}$ ) e Índice S em áreas irrigadas por aspersão nos estados do Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo e Minas Gerais. A linha tracejada na horizontal (---) representa o limite da Energia Integral.



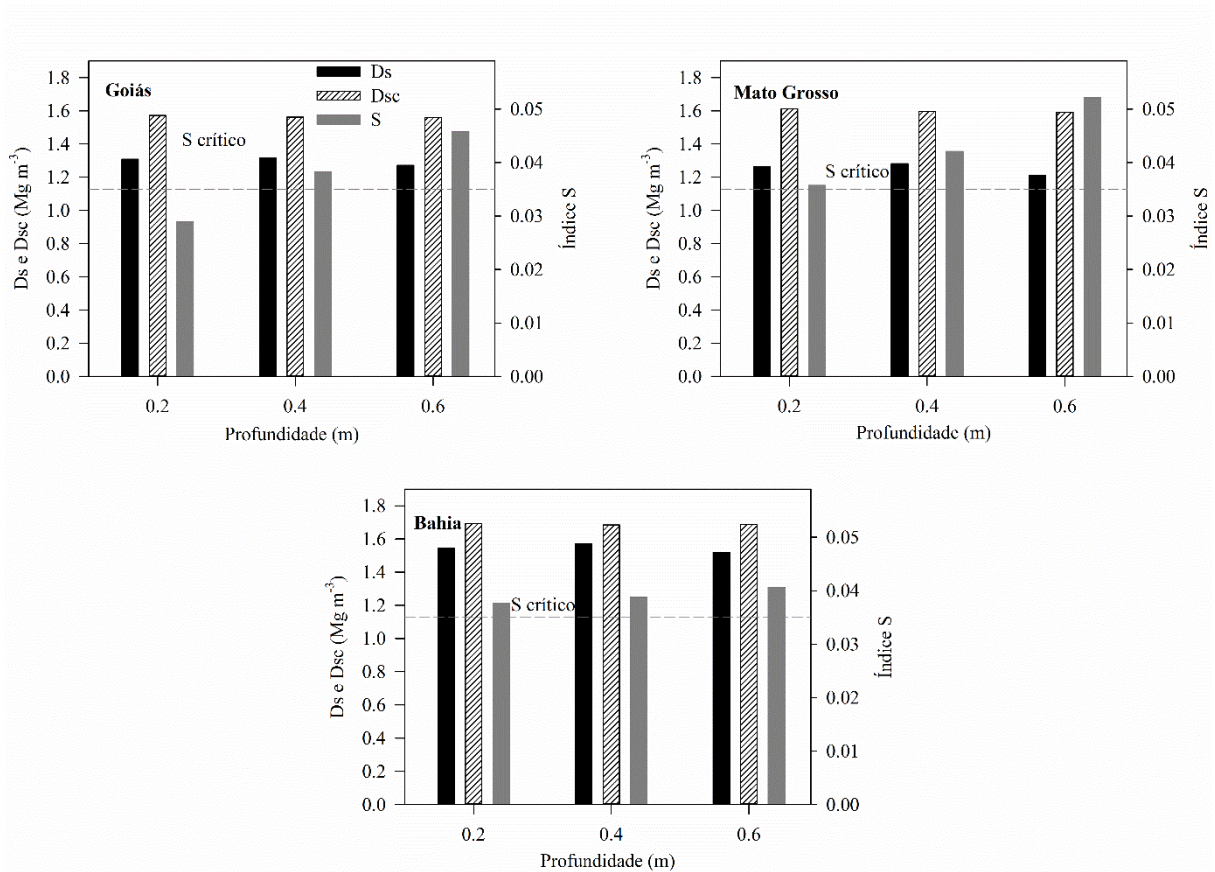


Figura 7. Valores médios da Densidade do solo ( $D_s$ ), Densidade crítica ( $D_{sc}$ ) e Índice S em áreas irrigadas por aspersão nos estados de Goiás, Mato Grosso e Bahia. A linha tracejada na horizontal (---) representa o limite da Energia Integral.

O limite crítico de S foi observado para áreas em São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul, os quais se enquadraram na classe “pobre” ( $S = 0,035 > S \geq 0,020$ ) (Figura 6). Os baixos valores de S encontrados nesses locais, corroboram justamente com maior variação no conteúdo de argila, estando sujeitas às evidências de compactação ou em início do estágio de degradação dos solos agrícolas, sujeitos aos efeitos indiretos das práticas associadas a irrigação que levam ao uso intenso do solo.

Correlacionado a estas ocorrências, a associação entre os valores de S e  $D_s$  possibilitaram descrever melhor o comportamento físico do solo. A variação no aumento de S ocorre à medida em que a  $D_s$  reduz (Figuras 6 e 7), estando este comportamento em todas as áreas de estudo, destacando assim a sensibilidade do índice S como indicador da mudança estrutural do solo, mesmo sendo em pequena escala de variação. Assim, este comportamento é explicado por Santos et al. (2011) que destacam os efeitos de porosidade e densidade do solo

no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, e o impacto do diâmetro de poros e seu comportamento em solos compactados e não compactados.

A partir dos valores de  $D_s$  e  $D_{sc}$ , observa-se que a distribuição média nos valores de  $D_s$  nas áreas de estudo não ultrapassaram os limites críticos nas profundidades avaliadas, entretanto, a proximidade nos valores é evidente no solos de São Paulo, com  $D_s = 1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ ;  $D_{sc} = 1,50 \text{ Mg m}^{-3}$  (0,0-0,20 m) e  $D_s = 1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ ;  $D_{sc} = 1,49 \text{ Mg m}^{-3}$  (0,20-0,40 m); Paraná com  $D_s = 1,41 \text{ Mg m}^{-3}$ ;  $D_{sc} = 1,45 \text{ Mg m}^{-3}$  (0,0-0,20 m) e  $D_s = 1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ ;  $D_{sc} = 1,43 \text{ Mg m}^{-3}$  (0,20-0,40 m); Rio Grande do Sul com  $D_s = 1,47 \text{ Mg m}^{-3}$ ;  $D_{sc} = 1,53 \text{ Mg m}^{-3}$  (0,0-0,20 m) e  $D_s = 1,41 \text{ Mg m}^{-3}$ ;  $D_{sc} = 1,52 \text{ Mg m}^{-3}$  (0,20-0,40 m). Os demais locais apresentaram amplitudes de distribuição superior a  $0,3 \text{ Mg m}^{-3}$  entre a  $D_s$  e a  $D_{sc}$ , corroborando assim os resultados já apresentados na qualidade física do solo nessas regiões.

Diante do contexto de que indicadores adicionais são necessários para quantificar a qualidade física do solo mais detalhadamente. Nas Figura 8 e 9 é apresentada a dinâmica de distribuição da Energia Integral, associando-a a dois diferentes pontos da curva de retenção de água no solo (10 kPa e 33 kPa), representando a energia necessária ( $\text{J kg}^{-1}$ ) para as plantas absorverem uma unidade de massa de água do solo com uma faixa de sucção matricial definida.

A partir dos resultados obtidos, a primeira relação evidente se refere a EI versus Argila; áreas com maiores representatividades no conteúdo de argila, apresentaram maior variação em EI nos dois intervalos definidos. As variações obtidas em São Paulo (251,3-245,7  $\text{J kg}^{-1}$  em 10 kPa e 344,2-339,7  $\text{J kg}^{-1}$  em 33 kPa), Paraná (259,4-255,6  $\text{J kg}^{-1}$  em 10 kPa e 351,4-347,9  $\text{J kg}^{-1}$  em 33 kPa) e Rio Grande do Sul (253,4-257,9  $\text{J kg}^{-1}$  em 10 kPa e 345,0-350,8  $\text{J kg}^{-1}$  em 33 kPa) retratam estas evidências. A menor variação obtida contrasta com as áreas amostradas no estado da Bahia (153,2-138,9,9  $\text{J kg}^{-1}$  em 10 kPa e 253,0-238,8,8  $\text{J kg}^{-1}$  em 33 kPa), onde, em virtude da natureza arenosa, a energia integral é bem inferior aos resultados relatados anteriormente.

O aumento no conteúdo de argila ou diminuição nos teores de areia na EI (10 kPa e 33 kPa) mostra que uma planta precisa de mais energia para absorver a massa unitária de água em um solo com textura fina do que de um solo com textura grossa. Assim, as relações entre EI e os teores de argila ou areia indicam dependência de EI nas propriedades texturais do solo e não estruturais. Desta forma, os resultados corroboram os de Minasny & McBratney (2003), destacando que a EI aumenta com o aumento do teor de argila, mostrando que mais energia é

necessária pelas plantas para absorver unidade de massa de água disponível a partir de um solo de textura fina.

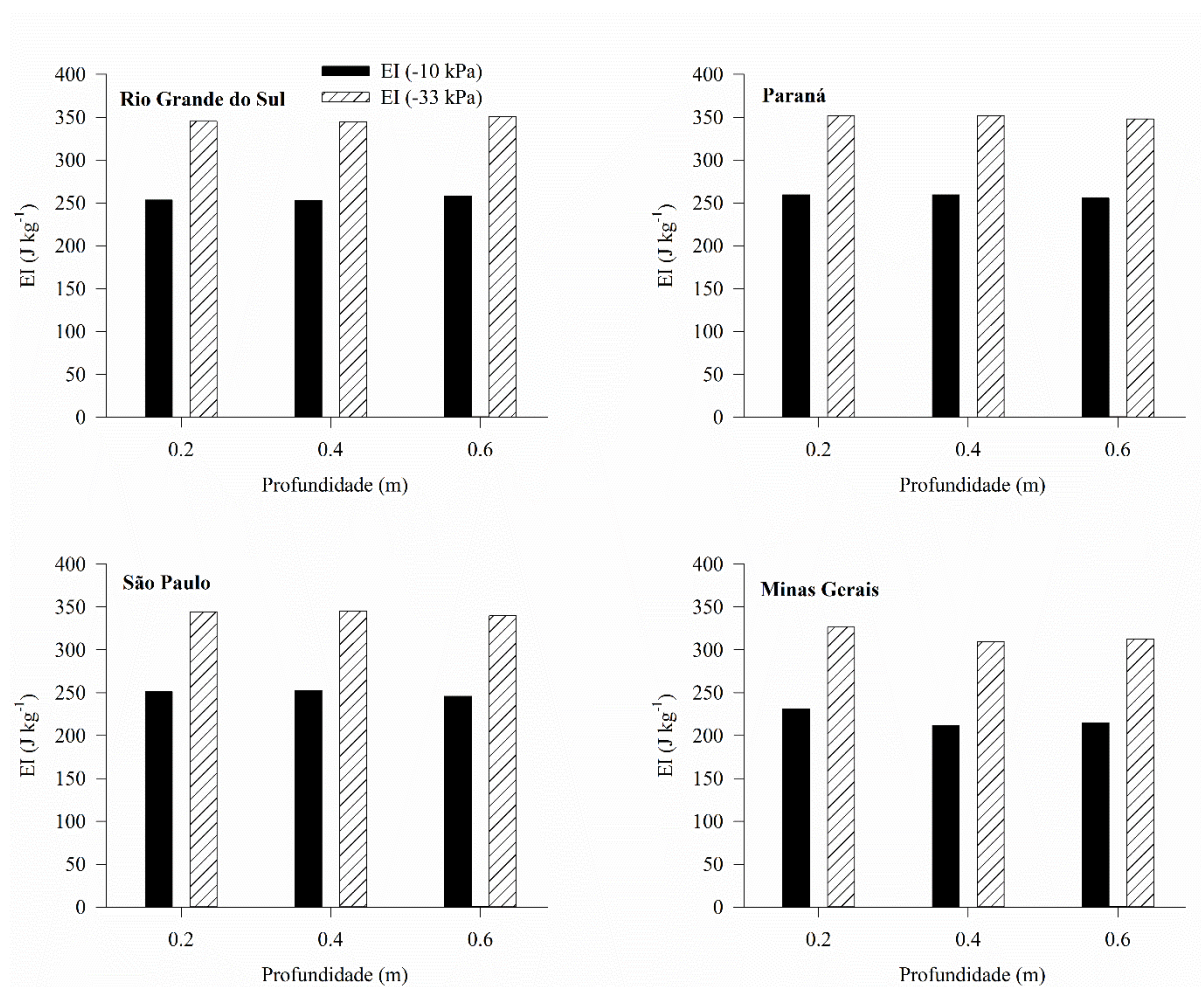


Figura 8. Variação da Energia Integral para os potenciais matriciais de -10 e -33 kPa, em áreas irrigadas por aspersão em Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo e Minas Gerais.

A segunda evidência constada mostra a redução da EI quando comparada às variações em macroporosidade (Figura 4a e 4b) e densidade do solo (Figuras 6 e 7), visto que ocorre uma pequena redução nos valores observados de EI. Asgarzadeh et al. (2011) relatam que a  $D_s$  afeta todos os limites críticos estabelecidos para a maioria dos atributos do solo, não ficando evidente a tendência de que a qualidade física do solo aumenta quando a EI diminui a partir de valores de  $D_s$ . Estes pressupostos foram evidenciados em nossos resultados, visto que a variação no aumento da qualidade física do solo ocorre em mínima escala. Os mesmos autores ainda relatam que, apesar do fácil cálculo e relações com os atributos estruturais e texturais do solo, podem levar a seu uso extensivo nos campos da física do solo e das relações solo-água-plantas, além de outros aspectos da qualidade física do solo.

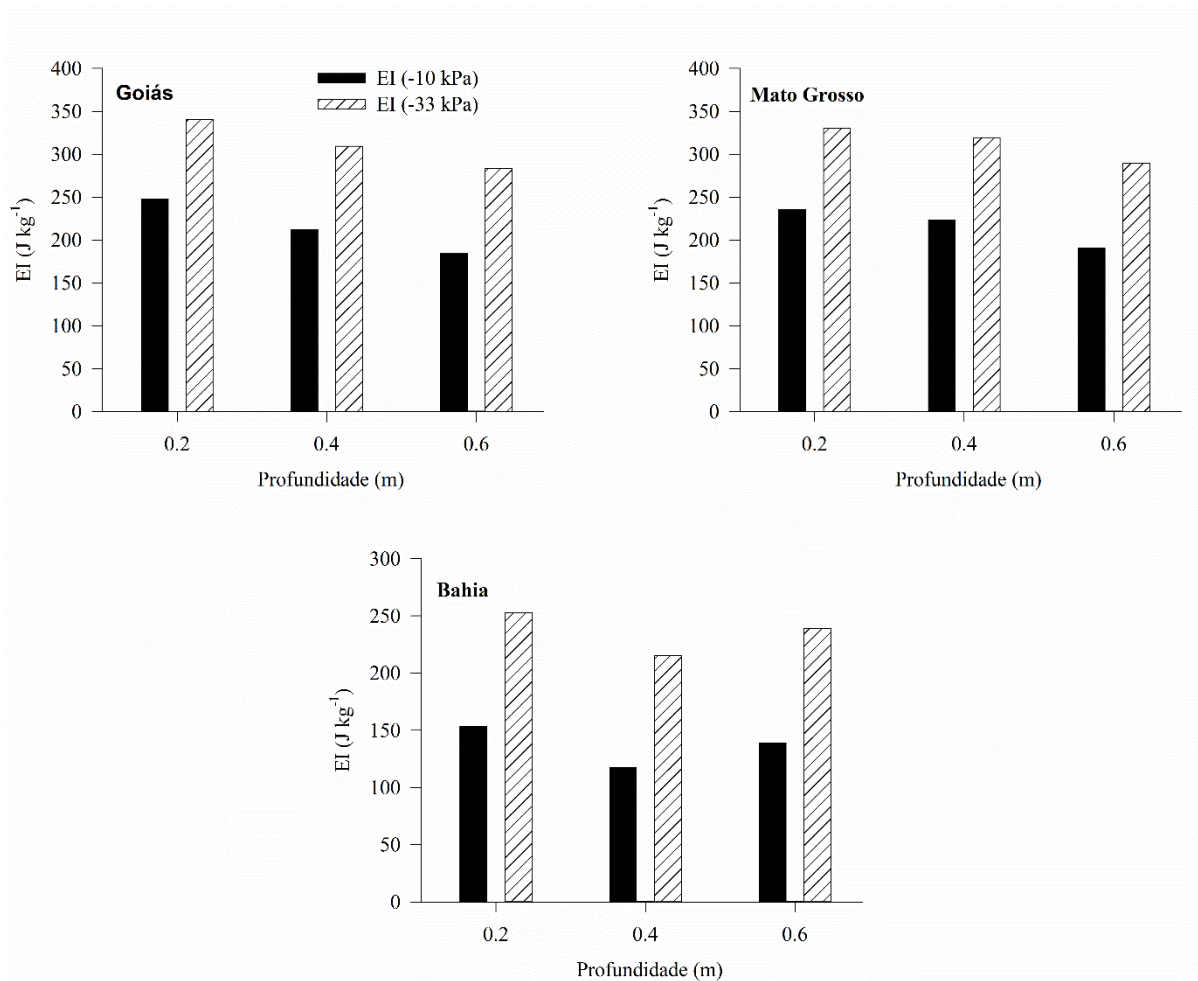


Figura 9. Variação da Energia Integral para os potenciais matriciais de -10 e -33 kPa, em áreas irrigadas por aspersão em Goiás, Mato Grosso e Bahia.

#### 5.5.4 Distribuição de áreas com indícios de compactação

A partir dos valores médios de  $D_s$  apresentados, não houve evidências de limitações com base na  $D_{sc}$ , conforme apresentado na Figura 6. No entanto, em várias áreas amostradas, os valores de densidade do solo foram superiores ao limite crítico, indicando a presença de possíveis limitações com base neste atributo. Desta forma, a Tabela 1 apresenta a distribuição de áreas com limitações a partir dos limites críticos de  $D_{sc}$  e macroporosidade do solo, sendo os valores de macroporosidade já fixados na Figura 4, e definida como limite crítico a faixa de 10%.

Pela distribuição de áreas com limitações a partir da  $D_s$ , ocorre decréscimo em profundidade em todos os locais amostrados, a exceção dos Estados de Minas Gerais, em que ocorre um aumento em aproximadamente 6% das áreas e Bahia, com menos de 0,2%. Todos estes correspondentes a variação nas camadas de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m. O destaque negativo

é notado novamente aos eixos São Paulo (28,86% e 22,08%), Paraná (34% e 31,37%) e Rio Grande do Sul (32,68% e 15,55%), respectivamente, nas profundidades de 0,0-0,20 m e 0,20 m-0,40 m. Michelin et al. (2009) encontraram indicação de compactação em função da densidade do solo e macroporosidade do solo em 14,2% em Goiás; 9,5% em Minas Gerais e 34% no estado de São Paulo, na camada superficial do perfil do solo.

A distribuição de áreas com limitação em macroporos, situa-se principalmente no Paraná (76%, 64,71% e 58,82%), Rio Grande do Sul (79,77%, 73,75% e 68,63%) e São Paulo (62,64%, 54,11% e 29,87%), nas camadas de 0,0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente. Os demais locais apresentam áreas com limitações na ordem de 1,71% a 53,86% nas profundidades avaliadas. As maiores variações observadas para o Rio Grande do Sul, já foram constatadas em Michelin et al. (2007), no qual concluíram que, do total das áreas amostradas 66,5% apresentaram indicação de compactação do solo na camada superficial, 20,5% na camada intermediária e 9,5% na camada inferior. Essa variação na macroporosidade e os valores abaixo do limite crítico (10%), são atribuídas a uma redução na estabilidade agregada, menor número de bioporos originários de minhocas e crescimento radicular e aumento contínuo na frequência do tráfego de implementos agrícolas passando pelo solo, o que altera coletivamente a distribuição de macroporos, afetando diretamente as trocas gasosas e o rendimento das culturas (HAGHIGHI et al., 2010; GALDOS et al., 2019).

Tabela 1. Variação percentual de áreas com limitações em relação aos níveis críticos de densidade e macroporosidade.

Localidades	0,0-0,2 m			0,2-0,4 m			0,4-0,6 m		
	L <sub>Ds</sub>	L <sub>Macro</sub>	Total	L <sub>Ds</sub>	L <sub>Macro</sub>	Total	L <sub>Ds</sub>	L <sub>Macro</sub>	Total
	%		n	%		n	%		n
São Paulo	28,86	62,64	447	22,08	54,11	231	9,52	29,90	231
Paraná	34,00	76,00	100	31,40	64,71	51	17,65	58,82	51
Mato Grosso	1,03	32,82	582	1,03	7,19	292	0,68	1,71	292
Goiás	7,84	53,86	791	7,04	36,18	398	3,53	26,95	397
Rio Grande do Sul	32,68	79,80	1686	15,55	73,75	823	11,10	68,63	813
Minas Gerais	4,24	51,06	566	10,80	36,60	287	7,70	24,0	287
Bahia	14,30	8,70	161	14,50	8,81	159	10,76	13,30	158

L<sub>Ds</sub> – Limitações em densidade do solo; L<sub>macro</sub> – Limitações em macroporosidade

### 5.5.5 Descrição multivariada e correlação de Pearson

A análise multivariada a partir da descrição de componentes principais e agrupamento hierárquico de cluster, é uma ferramenta potencial para abordar os problemas acima descritos acerca da influência de atributos e índices de qualidade de solos associados a limitações físicas, além de avaliar escolhas entre os elementos de referência e relação com demais localidades amostradas. As propriedades físicas, índices físicos e parâmetros hidráulicos explicam 82,77% da variação dos dados para os dois componentes principais ( $F1 = 63,41\%$  e  $F2 = 19,36\%$ ) (Figura 10a), evidenciando a suficiência no conjunto em caracterizar e sumarizar a variabilidade existente quando agrupados em um único conjunto de informações.

Padrões podem ser discernidos no primeiro biplot (Figura 10a), onde se evidencia que a  $D_s$  se alinha inversamente aos parâmetros hidráulicos ( $\Theta_R$ ,  $\Theta_S$ ) e atributos físicos (PT, silte e micro). Também a estas condições, seu raio individual traça geralmente opostos aos demais atributos e parâmetros. Associado ao exposto, merece atenção o comprimento do raio da  $D_s$  comparado aos demais elementos na Figura 10a, e a e seu alinhamento geral com a tendência de maior enriquecimento em peso nas cargas fatoriais. Conforme destacado em Bocard et al. (2011), quanto maior for o comprimento de um vetor, mais influente o mesmo será para a análise. Então, apesar de não tão contrastantes, e apresentarem relações inversas a  $D_s$ , destacam-se também a Macro, Índice S,  $\Theta_R$ ,  $\Theta_S$  e PT como as propriedades de maior expansão vetorial. A descrição multivariada também aponta outro resultado relevante já apontado anteriormente, a relação entre a  $D_s$  e os índices de energia integral (EI 10 kPa e EI 33 kPa), os quais mostraram relação de afastamento, evidenciando assim o que já foi exposto por Asgarzadeh et al. (2011) sobre a  $D_s$  afetar todos os limites críticos estabelecidos para a maioria dos atributos do solo.

Na Figura 10b, foi admitido um corte na distância de dissimilaridade na faixa de 400, que permitiu uma divisão clara de grupos, no qual o G1, engloba os dados formados pelas áreas localizadas no estado da Bahia (BA); o G2 formado pelas áreas localizadas aos estados de São Paulo (SP), Paraná (PR) e Rio Grande do Sul (RS); e o G3 compostos pelos estados de Goiás (GO), Mato Grosso (MT) e Minas Gerais (MG). Isso indica que, com o uso conjunto dos atributos expostos, foi possível ordenar os dados em três grupos. As subdivisões retratam o que já foi exposto anteriormente, ficando evidente o comportamento e agrupamento das áreas com maiores tendências a limitações físicas do solo (PR, RS e SP), e justamente em quadrantes inversos com atributos e propriedades hidráulicas do domínio que caracteriza os indícios de compactação dos solos (Macro, Índice S e  $D_s$ ).

O isolamento em um grupo ao estado da Bahia (BA), refere-se à tendência arenosa dos solos nas áreas amostradas, deixando a impressão de que são áreas relativamente propícias a alguma limitação física. Os resultados relativos a esta avaliação ao Estado da Bahia, se tornam relevante em função do que é descrito em Arcoverde et al. (2015), destacando que no geral, a qualidade física dos solos avaliadas no Estado da Bahia, não é considerada ideal, fato atribuído à aptidão agrícola das terras e ao manejo adotado, denotando fragilidade, principalmente em razão da textura extremamente arenosa. Assim a associação com demais índices que descrevam esta variação se faz relativamente importante em estudos que frisam a qualidade física de solos agrícolas.

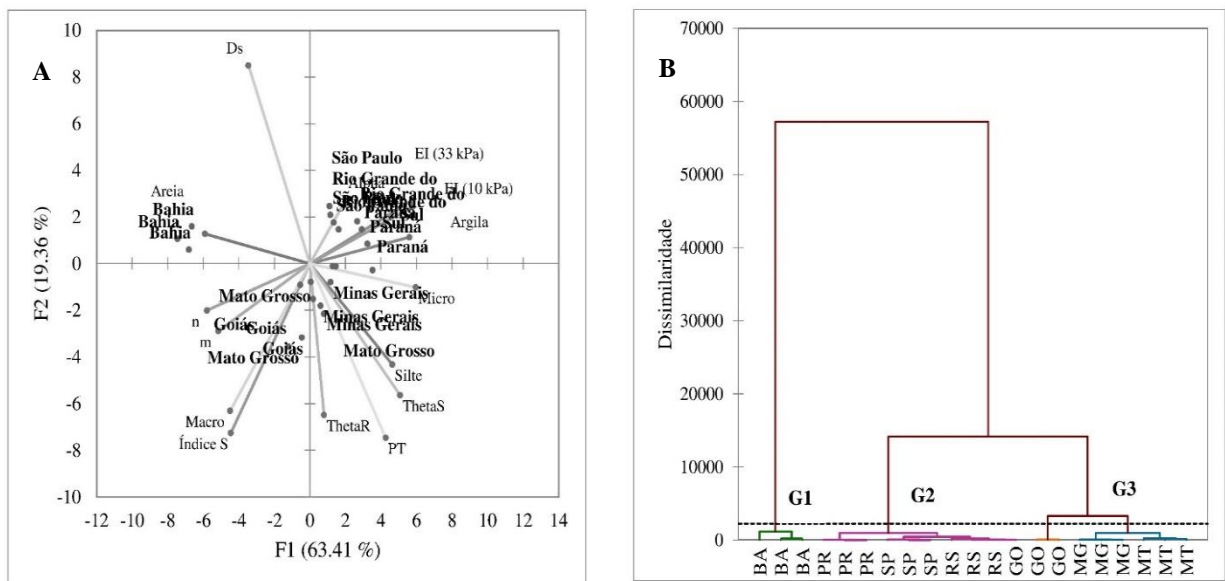


Figura 10. Descrição multivariada a partir da combinação entre gráficos biplot de componentes principais (A) e agrupamento hierárquico de cluster (B) em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais do Brasil.

Os coeficientes de correlação foram calculados entre cada par de atributos físicos, índices de qualidade do solo e parâmetros hidráulicos para criar a matriz de correlação mostrada na Tabela 2. Considerando as correlações de maior interesse, destacam-se os pares S Vs. Argila ( $r = -0,753$ ); S Vs. EI 10 kPa ( $r = -0,851$ ); S Vs. EI 33 kPa ( $r = -0,836$ ); Macro Vs. EI 10 kPa ( $r = -0,808$ ); Macro Vs. EI 33 kPa ( $r = -0,794$ ); Ds Vs. ThetaS ( $r = -0,902$ ); Ds Vs. PT ( $r = -0,964$ ); n Vs. EI 10 kPa ( $r = -0,997$ ); n Vs. EI 33 kPa ( $r = -0,999$ ).

As relações negativas com n (inclinação da zona não saturada na curva de retenção de água) são comparáveis às correlações relatadas por Minasny e McBratney (2003); Asgarzadeh et al. (2011); Asgarzadeh et al. (2014), sugerindo assim a possibilidade de expansão e

elaboração de um índice específico associando o parâmetro  $n$  com um grande número de atributos intrínsecos do solo, ou até mesmo de medições e diagnósticos visuais a campo. O parâmetro  $n$ , correlacionado com altos valores (positivo ou negativo) aos atributos físicos e índices físicos, evidencia sua natureza facilmente alterável no sistema solo, sendo está, uma condição aceita, pelo fato deste parâmetro, governar os índices da distribuição dos poros por tamanho, portanto, relacionado com a inclinação da curva característica de água no solo.

A correlação entre parâmetros hidráulicos ( $D_s$  Vs.  $\Theta_s$ ), reforça também a necessidade de agrupar de forma mais ampla as tendências de um novo índice que possa ser composto de uma propriedade que depende principalmente de propriedades intrínsecas (texturais) do solo e de uma propriedade que depende principalmente das propriedades estruturais do solo (ou seja, valor  $S$  ou  $D_s$ ) como um índice de qualidade física do solo, conforme destacado em Asgarzadeh et al. (2011).



Tabela 2. Matriz de correlação de Pearson de atributos físicos, índices de qualidade física e parâmetros hidráulicos em áreas irrigadas por aspersão em regiões de clima tropical e subtropical do Brasil.

Propriedades	Areia	Silte	Argila	EI (10 kPa)	S	EI (33 kPa)	n	m	Theta R	Theta S	Alpha	Ds	Macro	Micro	PT
Areia	1	-0.828	-0.920	-0.862	0.637	-0.868	0.876	0.816	-0.284	-0.853	-0.292	0.598	0.685	-0.968	-0.734
Silte	-0.828	1	0.542	0.634	-0.290	0.648	-0.669	-0.374	0.303	0.792	0.225	-0.715	-0.426	0.807	0.750
Argila	-0.920	0.542	1	0.848	-0.753	0.848	-0.845	-0.962	0.212	0.724	0.281	-0.396	-0.730	0.886	0.574
EI (10 kPa)	-0.862	0.634	0.848	1	-0.851	0.999	-0.997	-0.823	-0.151	0.678	0.335	-0.394	-0.808	0.898	0.516
S	0.637	-0.290	-0.753	-0.851	1	-0.836	0.812	0.810	0.221	-0.261	-0.386	-0.107	0.941	-0.668	-0.061
EI (33 kPa)	-0.868	0.648	0.848	0.999	-0.836	1	-0.999	-0.817	-0.139	0.695	0.335	-0.418	-0.794	0.903	0.537
n	0.876	-0.669	-0.845	-0.997	0.812	-0.999	1	0.805	0.119	-0.718	-0.322	0.450	0.776	-0.910	-0.565
m	0.816	-0.374	-0.962	-0.823	0.810	-0.817	0.805	1	-0.125	-0.584	-0.250	0.240	0.745	-0.784	-0.413
ThetaR	-0.284	0.303	0.212	-0.151	0.221	-0.139	0.119	-0.125	1	0.321	-0.060	-0.356	0.096	0.206	0.386
ThetaS	-0.853	0.792	0.724	0.678	-0.261	0.695	-0.718	-0.584	0.321	1	0.128	-0.902	-0.295	0.868	0.962
Alpha	-0.292	0.225	0.281	0.335	-0.386	0.335	-0.322	-0.250	-0.060	0.128	1	-0.036	-0.307	0.269	0.093
Ds	0.598	-0.715	-0.396	-0.394	-0.107	-0.418	0.450	0.240	-0.356	-0.902	-0.036	1	-0.088	-0.615	-0.964
Macro	0.685	-0.426	-0.730	-0.808	0.941	-0.794	0.776	0.745	0.096	-0.295	-0.307	-0.088	1	-0.718	-0.076
Micro	-0.968	0.807	0.886	0.898	-0.668	0.903	-0.910	-0.784	0.206	0.868	0.269	-0.615	-0.718	1	0.749
PT	-0.734	0.750	0.574	0.516	-0.061	0.537	-0.565	-0.413	0.386	0.962	0.093	-0.964	-0.076	0.749	1

EI – Energia Integral; Macro – Macroporosidade; Micro – Microporosidade; S – Índice S; Ds – Densidade do solo; PT – Porosidade total; ThetaR – umidade residual; ThetaS – umidade de saturação; n; m e alpha – parâmetros de ajuste de Van Genuchten.

## 5.6 Conclusões

i. Diante dos resultados apresentados, áreas irrigadas por aspersão em São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul apresentam limitações físicas e indícios de compactação, a partir dos valores de macroporosidade, Índice S e quantificação da proporção relativa de áreas com valores acima dos limites considerados críticos para a macroporosidade e densidade do solo. Por outro lado, Goiás, Mato Grosso, Minas Gerais e Bahia apresentaram valores médios satisfatórios na distribuição física, evidenciando assim, as boas condições físicas nas áreas irrigadas nesses locais.

ii. A avaliação da qualidade do solo a partir de atributos físicos e associados com índices físicos de qualidade do solo (Índice S e Energia Integral), possibilitou compreender o comportamento e variações existentes em diferentes localidades, podendo assim melhor expor sobre o grau de limitação física destes solos. Entretanto, a Energia Integral correspondeu abaixo do esperado, visto que, as variações foram em pequenas escalas e dependentes principalmente do domínio textural.

iii. Mapas de distribuição espacial possibilitaram um melhor acompanhamento da variabilidade existente nas localidades amostradas, servindo assim como um excelente diagnóstico para alavancar estudos futuros em áreas irrigadas.

iv. O agrupamento a partir da análise de componentes principais possibilitou a separação em 3 grupos de localidades com representatividades semelhantes, além também de indicar a influência e peso de atributos do solo, parâmetros hidráulicos e índices de qualidade física, subsidiando assim a possibilidade futura de elaboração de índices que possam descrever a qualidade física sendo de fácil determinação.

v. Em uma perspectiva futura, a distribuição por microrregiões dentro de um Estado, associado a variação de produção média das principais culturas de interesse econômico, possibilitaria e alavancaria resultados ainda mais satisfatórios acerca do tema abordado nesta pesquisa, de modo que as evidências de limitações impostas pela compactação poderiam ser mais bem elucidadas.

## 5.7 Referências bibliográficas

Agência Nacional de Águas – ANA. **Atlas da Irrigação - Uso da água na Agricultura Irrigada**. Ministério do Meio Ambiente. 86p., 20197. Disponível em: <https://www.http://atlasirrigacao.ana.gov.br>. (Acesso em 01/07/2020).

Andrade, R.S.; Stone, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 382-388, 2009. Doi: 10.1590/S1415-43662009000400003.

Arcoverde, S.N.S.; Salviano, A.M.; Olszewski, N.; Melo, S.B.; Cunha, T.J.F.; Giongo, V.; Pereira, J.S. Qualidade física de solos em uso agrícola na Região semiárida do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1474-1482, 2015. Doi: 10.1590/01000683rbc20140282.

Asgarzadeh, H.; Mosaddeghi, M.R.; Mahboubi, A.A.; Nosrati, A.; Dexter, A.R. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. **Geoderma**, v. 166, p. 34-42, 2011. Doi: 10.1016/j.geoderma.2011.06.009.

Asgarzadeh, H.; Mosaddeghi, M.R.; Nikbakht, A.M. SAWCal: A user-friendly program for calculating soil available water quantities and physical quality indices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 109, p. 86–93, 2014. Doi: 10.1016/j.compag.2014.09.008.

Bangita, B.; Rajashekhar Rao, B.K. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system. **Geoderma**, v. 189-190, p. 351-356, 2012. Doi: 10.1016/j.geoderma.2012.07.002.

Barbosa, L.C.; Magalhães, P.S.G.; Bordonal, R.O.; Cherubin, M.R.; Castioni, G.A.F.; Tenelli, S.; Franco, H.C.J.; Carvalho, J.L.N. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104383, 2019. Doi: 10.1016/j.still.2019.104383.

Borcard, D.; Gillet, F.; Legendre, P. **Numerical Ecological with R**. New York: Springer, 2011. 306p.

Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Kaiser, D.R. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura – pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 41, p. 246-250, 2011. Doi: 10.1590/S0103-84782011000200011.

Companhia Nacional De Abastecimento – CONAB, 2020. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 7 - Safra 2019/20, n. 10, Décimo Levantamento, Brasília. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra>. (Acesso em 14/07/2020).

Dexter, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201-214, 2004. Doi: 10.1016/j.geoderma.2003.09.004.

Galdos, M.V.; Pires, L.F.; Cooper, H.V.; Calonego, J.C.; Rosolem, C.A.; Mooney, S.J. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma**, v. 337, p. 1126-1135, 2019. Doi: 10.1016/j.geoderma.2018.11.031.

Groenevelt, P.H.; Grant, C.D.; Murray, R.S. On water availability in saline soils. **Australian Journal Soil Research**, v. 42, p. 833–840, 2004. Doi: 10.1071/SR03054.

Groenevelt, P.H.; Grant, C.D.; Semetsa, S. A new procedure to determine soil water availability. **Australian Journal Soil Research**, v. 39, p. 577–598, 2001. Doi: 10.1071/SR99084.

Grossman, R.B., Reinsch, T.G. **Bulk density and linear extensibility**. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science of Society of America, p. 201-228, 2002.

Gubiani, P.I.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v. 36, p. 664-668, 2006. Doi: 10.1590/S0103-84782006000200049.

Haghighi, F.; Gorji, M.; Shorafa, M. A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. **Land Degradation & Development**, v. 21, p. 496-502, 2010. Doi: 10.1002/ldr.999.

Hair, J.F.; Anderson, R.E.; Tatham, R.L.; Black, W.C. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

Håkansson, I.; Lipiec, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil & Tillage Research**, v. 53, p. 71, 2000. Doi: 10.1016/S0167-1987(99)00095-1.

Jakob, A.A.E.; Young, A.F. **O uso do método de interpolação espacial das análises sociodemográficas**. IN: *Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais*, Caxambu-MG: ABEP, 2006, p. 1-22.

Jones, C.A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p. 1208–1211, 1983. Doi: 10.2136/sssaj1983.03615995004700060029x.

Lima, R.P.; Silva, A. R.; Silva, A.P.; Leão, T.P.; Mosaddeghi, M.R. Soil physics: An R package for calculating soil water availability to plants by different soil physical indices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 120, p. 63-71, 2016. Doi: 10.1016/j.compag.2015.11.003.

Lovera, L.H.; Souza, Z.M.; Esteban, D.A.A.; Oliveira, I.N.; Farhate, C.V.V.; Lima, E.S.; Panosso, A.R. Sugarcane root system: Variation over three cycles under different soil tillage systems and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v. 208, p. 104866, 2021. Doi: 10.1016/j.still.2020.104866.

Mckenzie, B.M.; Tisdall, J.M.; Vance, W.H. Soil physical quality. **Encyclopedia of Earth Sciences Series**, v. 770–777, p. 325-336, 2014.

Michelon, C.J.; Carlesso, R.; Petry, M.T.; De David, G.; Dalla Santa, C. Qualidade física de solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1308-1315, 2007.

Michelon, C.J.; Carlesso, R.; Petry, M.T.; Fiorin, T.T.; Gubiani, P.I. Qualidade física de solos irrigados por aspersão no Brasil. **Ingenieria del Agua**, v. 15, p. 95-105, 2008.

Michelon, C.J.; Carlesso, R.; Petry, M.T.; Melo, G.L.; SPOHR, R.B.; ANDRADE, J.G. Qualidade física dos solos irrigados de algumas regiões do Brasil Central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 39-45, 2009. Doi: 10.1590/S1415-43662009000100006.

Minasny, B.; Mcbratney, A.B. Integral energy as a measure of soil water availability. **Plant and Soil**, v. 249, p. 253-262, 2003. Doi: 10.1023/A:1022825732324.

Mohieddinne, H.; Brasseur, B.; Spicher, F.; Gallet-Moron, E.; Buridant, J.; Kobaissi, A.; Horen, H. Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. **Forest Ecology and Management**, v. 449, p. 117472, 2019. Doi: 10.1016/j.foreco.2019.117472.

Müller, K.; Katuwal, S.; Young, I.; McLeod, M.; Moldrup, P.; de Jonge, L.W.; Clothier, B. Characterising and linking X-ray CT derived macroporosity parameters to infiltration in soils

with contrasting structures. **Geoderma**, v. 313, p. 82-91, 2018. Doi: 10.1016/j.geoderma.2017.10.020.

Naderi-Boldaji, M.; Keller, T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. **Soil & Tillage Research**, v. 159, p. 41–46, 2016. Doi: 10.1016/j.still.2016.01.010.

Paterson, S.; Minasny, B.; Mcbratney, A. Spatial variability of Australian soil texture: A multiscale analysis. **Geoderma**, v. 309, p. 60-74, 2018. Doi: 10.1016/j.geoderma.2017.09.005.

Pöhlitz, J.; Rücknagel, J.; Koblenz, B.; Schlüter, S.; Jörg Vogel, H.; Christen, O. Computed tomography and soil physical measurements of compaction behaviour under strip tillage, mulch tillage and no tillage. **Soil & Tillage Research**, v. 175, p. 205-216, 2018. Doi: 10.1016/j.still.2017.09.007.

Reynolds, W.D.; Drury, C.F.; Tan, C.S.; Fox, C.A.; Yang, X.M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, p. 252–263, 2009. Doi: 10.1016/j.geoderma.2009.06.009.

Richards, L.A. Methods of measuring moisture tension. **Soil science**, v. 58, p. 95-112, 1949.

Santos, G.G.; Silva, E.M.; Marchão, R.L.; Silveira, P.M.; Bruand, A.; James, F.; Becquer, T. Analysis of physical quality of soil using the water retention curve: Validity of the S-index analyse de la qualité physique du sol à partir de la courbe de rétention de l'eau : validité de l'indice S. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 343, p. 295-301, 2011. Doi: 10.1016/j.crte.2011.02.001.

Secco, D.; Bassegio, D.; de Villa, B.; Marins, A.C.; Zanão Júnior, L.A.; Silva, T.R.B.; Souza, S.N.M. Crambe oil yield and soil physical properties responses to no-tillage, cover crops and chiseling. **Industrial Crops and Products**, v. 161, p. 113174, 2021. Doi: 10.1016/j.indcrop.2020.113174.

Silva, A.P.; Kay, B.D.; Perfect, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society American Journal**, v. 58, p. 1775-1781, 1994. Doi: 10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x.

Silva, B.M.; Oliveira, G.C.; Serafim, M.E.; Silva, E.A.; Oliveira, L.M. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 338-345, 2012.

Silva, M.F.; Fernandes, M.M.H.; Silva, A.M.R.; Ferraudo, A.S.; Coelho, A.P. Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104924, 2021. Doi: 10.1016/j.still.2020.104924.

Silva, V.R.; Reinert, D.J. & Reichert, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 9-15, 2002. Doi: 10.1590/S0100-06832002000100002.

Statsoft. **Statistica 7.0**. Tulsa: StatSoft, 2004. p. 250.

Suzuki, L.E.A.S.; Lima, C.L.R.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Pillon, C.N. Condição estrutural de um Argissolo no Rio Grande do Sul, em floresta nativa, em pastagem cultivada e em povoamento com eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 833-843, 2012. Doi: 10.5902/198050987564.

Tormena, C.A.; Silva, A.P.; Libardi, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998. Doi: 10.1590/S0100-06831998000400002.

Van Genuchten, M.T.A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980. Doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

Vettori, L. **Métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 34p, 1969.

Vizioli, B.; Polizeli, K.M.V.C.; Tormena, C.A.; Barth, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104935, 2021. Doi: 10.1016/j.still.2021.104935.





## 6. ESTUDO II - GEOSTATISTICAL INTERPOLATION BASED TERNARY DIAGRAMS FOR ESTIMATING WATER RETENTION PROPERTIES IN SOILS IN THE CENTER-SOUTH REGIONS OF BRAZIL<sup>2</sup>

### 6.1 Resumo

O objetivo deste estudo foi desenvolver diagramas ternários para estimar a retenção de água no solo  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  correspondentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha, respectivamente e água disponível no solo (ASW) usando abordagem geoestatística. Os dados foram extraídos da base físico-hídrica de áreas irrigadas vinculada ao Sistema Irriga® pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria. O banco de dados disponibiliza informações referentes a caracterização física de solos de áreas irrigadas dos estados de Rio Grande do Sul, Paraná, Goiás, Mato Grosso, São Paulo, Minas Gerais e Bahia. Os dados incluíram 11193 observações abrangendo textura (areia, silte e argila), propriedades de retenção de água ( $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ ) e propriedades estruturais (densidade do solo e porosidade total). Os valores medidos do conteúdo de água no solo foram exibidos no diagrama ternário de acordo com as coordenadas fornecidas pela distribuição de tamanho de partículas determinada nas amostras de solo. As estimativas do conteúdo de água ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) pelo método de krigagem, foram realizadas aplicando apenas a distribuição do tamanho de partículas (areia, silte e argila). Para obter a distribuição espacial dos valores de retenção de água no solo no triângulo de textura, foi proposto o uso do estimador por krigagem ordinária. A análise de incerteza resultou em um erro quadrático médio (RMSE) abaixo de  $0,048 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ao comparar o conteúdo de água interpolado e observado nos valores de  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ , sendo as subdivisões por faixas de densidade do solo as que apresentaram as menores incertezas, destacando a importância da subdivisão do banco de dados por classes a partir de propriedades estruturais. Diagramas ternários podem atuar como ferramentas úteis e simplificadas para estimar essas propriedades apenas aplicando a distribuição de tamanho de partículas.

**Palavras-chave:** Diagramas ternários;  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ ; Geoestatística; Krigagem ordinária.

---

<sup>2</sup> Artigo publicado na Revista Soil and Tillage Research. DOI: 10.1016/j.still.2021.104973.

## 6.2 Abstract

The aim of this study was to develop ternary diagrams to estimate water retention in the soil  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  and  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  corresponding to the field capacity and wilting point, respectively and available soil water (ASW) using geostatistical approach. The data were extracted from the physical-water base of irrigated areas linked to the Irriga® System belonging to the Rural Engineering Department of the Federal University of Santa Maria. The database provides information regarding the physical characterization of soils in irrigated areas in the states of Rio Grande do Sul, Paraná, Goiás, Mato Grosso, São Paulo, Minas Gerais and Bahia. The data included 11,193 observations covering texture (sand, silt and clay), water retention properties ( $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  and  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ ) and structural properties (bulk density and total porosity). The measured values of the water content in the soil were displayed in the ternary diagram according to the coordinates provided by the particle size distribution determined in the soil samples. Estimates of water content ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) using the kriging method were performed using only the particle size distribution (sand, silt and clay). To obtain the spatial distribution of soil water retention values in the texture triangle, the use of the ordinary kriging estimator was proposed. The uncertainty analysis resulted in an Root mean square error (RMSE) below  $0.048 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  when comparing the interpolated water content and observed in the values of  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  and  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ , with the subdivisions by ranges of bulk density having the lowest uncertainties, highlighting the importance of subdividing the database by classes based on structural properties. Ternary diagrams can act as useful and simplified tools to estimate these properties just by applying the particle size distribution.

**Keywords:** Ternary diagrams;  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ ; geoestatistics; ordinary kriging.

## 6.3 Introdução

Questões importantes como a falta de água para a agricultura devido às mudanças climáticas, a poluição do solo e das águas subterrâneas devido à aplicação contínua de fertilizantes e pesticidas, aumentando os custos dos sistemas de irrigação associados ao aumento do preço do combustível, colocam os agricultores sob alta pressão no cenário agrícola mundial, e em escala nacional as condições são semelhantes. Para sustentar suas atividades, eles precisam aumentar a eficiência no uso e na produtividade da água. Para ajudá-los nessa tarefa, os cientistas desenvolveram modelos de vários níveis de complexidade, como SPAW (SAXTON & WILLEY, 2006), AquaCrop (STEDUTO et al., 2009) e SIMDualKc (ROSA et

al., 2012), os quais são aplicados em escala global nos estudos relacionados ao manejo da água na agricultura. Esses modelos necessitam de dados sobre as propriedades hidráulicas do solo, particularmente o teor de água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP). Na literatura, CC e PMP representam dois pontos importantes da curva de retenção de água no solo (CRAS).

Propriedades hidráulicas de solos, são utilizadas em diversas aplicações, incluindo a irrigação (GRASHEY-JANSEN, 2014), lixiviação (WHEELER et al., 2003), manejo de solos (BODNER et al., 2013; HORNE & SCOTTER, 2016). Informações sobre as propriedades hidráulicas do solo estão aumentando em importância com a acelerada automação agrícola, sendo exigidos modelos cada vez mais sofisticados que suportem a agricultura moderna (PATIL & SINGH, 2016; GUNARATHNA et al., 2019). Medidas diretas dessas propriedades por métodos de campo ou laboratório são onerosas, apresentam custo elevado e demoradas (RUSTANTO et al., 2017). Assim, o desenvolvimento de métodos indiretos rápidos e baratos para estimar as propriedades hidráulicas do solo é uma área de pesquisa ativa no campo da ciência do solo e áreas afins.

Neste contexto surgem as Funções de Pedotransferência (FPTs), que são funções preditivas usadas para estimar propriedades do solo difíceis de medir, aplicando propriedades de solo facilmente mensuráveis, os quais apresentam-se como alternativas aos métodos clássicos (BOUMA, 1989). Infelizmente, o principal problema com as PTFs é que seu desempenho está altamente relacionado às características dos dados utilizados para seu desenvolvimento, portanto, tendem a ser em muitas condições específicas do local (NGUYEN et al., 2015; ZHANG & SCHAAP, 2017) e a maioria das FPTs não foi validada usando conjuntos de dados independentes do solo, tornando assim um grande empecilho quanto a sua aplicação nos estudos hidráulicos do solo.

Um grande número de FPTs disponíveis na literatura aplicam a textura do solo como o principal preditor para estimar o comportamento hidráulico dos solos, isto justifica-se pelo fato de que as características da textura do solo estão entre as propriedades do solo mais facilmente medidas e pelo pressuposto de que a textura do solo é a variável dominante na determinação das propriedades hidráulicas, enquanto outras propriedades como densidade do solo ou matéria orgânica, tem um efeito secundário (TWARAKAVI et al., 2009). FPTs simples, baseadas apenas na textura do solo, foram desenvolvidas em diversas regiões para fornecer estimativas das propriedades médias de retenção de água no solo ou propriedades hidráulicas para diferentes classes de textura (BOTULA et al., 2014; ZHANG & SCHAAP, 2017; DOBARCO

et al., 2019). Funções mais complexas associando propriedades estruturais do solo, matéria orgânica e condutividade elétrica, usando técnicas de regressão, geoestatística e mineração de dados também foram desenvolvidas apresentando resultados satisfatórios (MERDUN et al., 2006; RAMOS et al., 2014; PHAM et al., 2019). As abordagens mencionadas nestes estudos mostraram que a precisão das FPTs melhorou consideravelmente quando outras variáveis foram inseridas, em vez de apenas a textura do solo. No entanto, mais estudos são recomendados com base em um conjunto maior de dados de solos não perturbados, sendo que esses estudos podem incluir o desenvolvimento de FPTs específicos para retenção de água.

Geralmente representada em um diagrama ternário, a textura do solo, que inclui areia, argila e conteúdo de silte, é uma das importantes propriedades físicas do solo que influencia fortemente muitas outras propriedades do solo, como curva de retenção de água, fertilidade, drenagem, conteúdo de carbono orgânico e porosidade (LIAO et al., 2013; AKPA et al., 2014). O triângulo textural também foi aplicado para prever e estimar propriedades hidráulicas do solo conforme apresentado em Saxton et al. (1986) e Ramos et al. (2014), os quais incluíram um banco de dados associando coordenadas ao plano cartesiano do triângulo textural. Entretanto, ambas as pesquisas destacam que a incerteza em regiões do diagrama de textura em que as informações eram mais escassas ainda continuam sendo um dos entraves na busca por resultados mais consistentes. Assim, um banco de dados mais complexo na estrutura das estimativas ao longo do triângulo textural, acarreta resultados mais confiáveis, associado ao uso de ferramentas que caracterizam a variabilidade espacial dos dados ao longo do triângulo textural, além da subdivisão de propriedades estruturais do solo.

Desta forma, a aplicabilidade e uso de métodos geoestatísticos são reconhecidos como técnicas adequadas para avaliar e prever a variabilidade espacial, além de estimar variáveis regionalizadas (ISAAKS & SRISVASTAVA, 1989; WEBSTER & OLIVIER, 2002; SHAHRIARI et al., 2019). Muitos estudos aplicaram diferentes tipos de métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade, como krigagem comum e cokrigagem para estimativa espacial das propriedades do solo (KNOTTERS et al., 1995; ELDEIRY & GARCIA, 2010; DELBARI et al., 2011), no entanto, poucos estudos utilizaram métodos geoestatísticos para predição espacial do conteúdo de água para a faixa do triângulo textural. Ramos et al. (2014) modelaram diagramas ternários para estimar valores específicos de retenção de água em pontos (capacidade de campo e ponto de murcha) de solos portugueses usando duas abordagens geoestatísticas: krigagem ordinária comum (OK) e o melhor preditivo empírico linear não empírico (EBLUP). Eles mostram que técnicas geoestatísticas podem melhorar a precisão das

estimativas do padrão de distribuição espacial do conteúdo de água associado ao triângulo textural. A aplicação de métodos geoestatísticos também é limitada a escalas regionais, onde o tamanho da amostra é pequeno e a amostragem geralmente não é homogênea (WEBSTER & OLIVER, 2001).

Com base nos estudos sobre a previsão das propriedades hidráulicas do solo para todo o espaço do triângulo textural, foi proposto neste trabalho o uso de técnicas geoestatísticas, mais precisamente a krigagem ordinária comum para obter a distribuição espacial dos valores de retenção de água (capacidade de campo, ponto de murcha e água disponível) associados a um banco de dados de propriedades físicas de solos em áreas irrigadas na região Centro-Sul do Brasil. A textura do solo foi considerada o principal preditor para estimar as propriedades hidráulicas do solo. Como mencionado anteriormente, esse é o principal pressuposto que sustenta todas as FPTs baseados em textura, pois esta propriedade do solo normalmente exibe alta correlação com propriedades hidráulicas. Além, optou-se pela subdivisão de propriedades do domínio estrutural (densidade do solo e porosidade total) como critério de tornar ainda mais homogênea as estimativas.

O objetivo deste estudo foi, portanto, desenvolver diagramas ternários para estimar valores específicos de retenção de água em pontos (capacidade de campo, ponto de murcha e o intervalo de água disponível) de solos em áreas irrigadas na região Centro-sul do Brasil usando a abordagem geoestatística: krigagem ordinária comum.

## **6.4 Material e métodos**

### *6.4.1 Composição do banco de dados*

Diagramas ternários foram elaborados para estimar a capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível em solos do eixo Centro-Sul do Brasil. Os dados foram extraídos da base físico-hídrica de áreas irrigadas vinculada ao Sistema Irriga® pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria. O banco de dados disponibiliza informações referentes a caracterização física de solos de áreas irrigadas dos estados de Rio Grande do Sul, Paraná, Goiás, Mato Grosso, São Paulo, Minas Gerais e Bahia (Figura 1). As áreas amostradas para a caracterização física foram georreferenciadas com a determinação da Latitude e Longitude, além da altitude do local.

Os dados incluíram 11193 observações abrangendo textura (areia, silte e argila), propriedades de retenção de água ( $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ ) e propriedades estruturais (densidade do solo e porosidade total). Os perfis dos solos compreendem três camadas, definidas em 0,0-0,2

m (superficial); 0,2-0,4 m (intermediária) e 0,4-0,6 m (subsuperficial). Os grupos de referência de solos representados abrangem principalmente Argissolos e Latossolos em sua grande maioria. Os dados foram divididos aleatoriamente em dois subconjuntos, um conjunto de desenvolvimento composto por dois terços dos dados (7462 amostras) e um conjunto de validação com o terço restante dos dados (3731 amostras). A partir da Tabela 1 são apresentados resultados descritivos das propriedades físico-hídricas do banco de dados descrito no presente estudo.

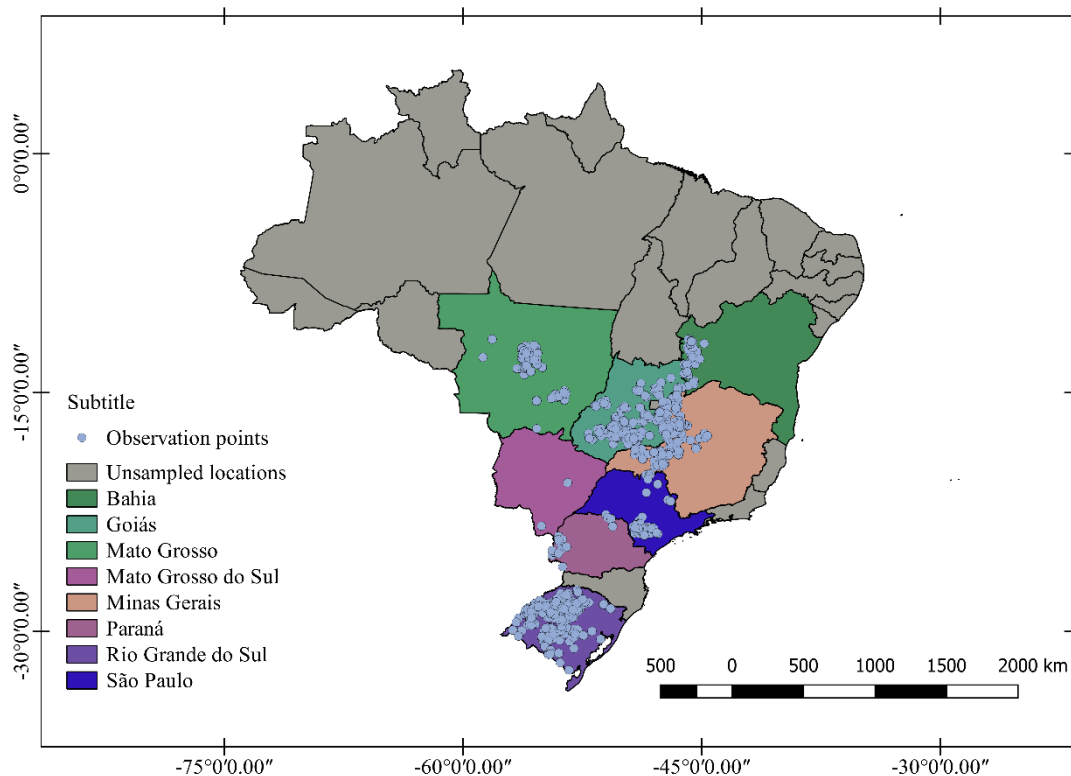


Figura 1. Localização da representatividade de distribuição do banco de dados.

Tabela 1. Principais propriedades físicas dos conjuntos de dados utilizados no desenvolvimento e validação dos diagramas ternários.

Estatística	Textura			Ds Mg m <sup>-3</sup>	Conteúdo de Água		Macro cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	Micro cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	Pt
	Areia	Silte	Argila		θ <sub>-33 kPa</sub>	θ <sub>-1500 kPa</sub>			
	-----%-----				-----cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> -----				
Dados de desenvolvimento (n=7462)									
Média	34,87	26,37	38,76	1,33	0,31	0,19	0,12	0,37	0,49
Mediana	28,89	23,63	36,47	1,32	0,33	0,21	0,11	0,39	0,50
Desv. P	23,70	14,89	19,26	0,18	0,08	0,06	0,06	0,07	0,07
Mínimo	1,14	0,17	0,50	0,80	0,03	0,005	0,03	0,08	0,07
Máximo	94,70	75,28	88,68	1,94	0,64	0,38	0,49	0,58	0,70
Dados de validação (n=3731)									
Média	36,41	24,19	39,40	1,42	0,34	0,20	0,08	0,38	0,46
Mediana	34,87	23,98	39,47	1,42	0,35	0,22	0,07	0,39	0,47
Desv. P	14,50	17,07	16,74	0,16	0,07	0,06	0,05	0,06	0,07
Mínimo	3,96	0,35	1,26	0,77	0,09	0,02	0,03	0,14	0,11
Máximo	90,81	81,06	81,06	2,08	0,52	0,38	0,37	0,53	0,71

Ds = Densidade do solo; Pt = Porosidade total; Macro = Macroporosidade; Micro = Microporosidade. Desv. P = Desvio padrão

#### 6.4.2 Descrição metodológica no processamento de amostras de solo

Para a análise granulométrica, aplicou-se o método do densímetro (VETTORI & PIERANTONI, 1968). A distribuição de partículas seguiu a classificação < 0.002 mm (argila) e entre 0.005–2 mm (silte) e partículas entre 0,2 e 0,05 mm (areia fina) e entre 2 e 0,2 mm. (areia grossa). Densidade de partículas foi obtida pelo método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006). A densidade do solo foi realizada conforme descrito em Grossman & Reinsch (2002), onde o solo contido em anel volumétrico foi seco em estufa à 105° C, até massa constante.

A Porosidade total (Pt) foi calculada a partir da Densidade do solo (Ds) e Densidade de partículas (Dp) através da Equação 1.

$$Pt = 1 - \left( \frac{Ds}{Dp} \right) \quad (1)$$

Amostras indeformadas foram transferidas para câmara extratora de Richards (Richard, 1949), na qual aplicou-se tensão de -33 kPa por um período mínimo de 96 horas. O conteúdo de água no potencial de -1500 kPa foi determinado por psicrometria, com a utilização de equipamento WP4 (DECAGON DEVICES, Inc.). A avaliação foi realizada com o processamento de cinco a sete amostras desestruturadas, previamente secas ao ar, borrifadas com água, pesadas e levadas ao WP4, onde se realizou a leitura do potencial. Ao final, as

amostras foram levadas à estufa para secagem até massa constante. A diferença entre as duas pesagens correspondeu ao conteúdo de água no potencial indicado.

### 6.4.3 Abordagem geoestatística para a previsão de valores de retenção de água

#### 6.4.3.1 Domínio da interpolação

Estimativas do conteúdo de água ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) pelo método de krigagem, foram realizadas aplicando-se apenas a distribuição do tamanho de partículas (areia, silte e argila) considerando o conjunto de dados em um perfil de amostragem de 0,6 m. Com base na textura, foram estimados os pontos para a capacidade de campo ( $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ ), ponto de murcha permanente ( $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ ) e água disponível no solo (ASW). A capacidade efetiva de armazenamento de água no solo, definida como a diferença entre o conteúdo de água retido no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, foi estimada com base neste conceito diagramas que associam ao armazenamento de água no solo, considerando sua base em milímetros ( $\text{mm m}^{-1}$ ) (Equação 2).

$$\text{ASW}(\text{mm m}^{-1}) = 1000 \times (\theta_{\text{CC}} - \theta_{\text{PMP}}) \times Z \quad (2)$$

A faixas de umidade em ( $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ ) foram agrupadas por faixas de distribuição a partir da densidade do solo e porosidade total. Assim, a interpolação geoestatística foi aplicada ao conjunto geral de distribuição das observações, um segundo grupo de distribuição constituiu em porosidade total nas seguintes faixas (Pt 30-45% e Pt > 45%), o terceiro grupo constituído pelas faixas de densidade do solo ( $0,7-1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ ;  $1,2-1,5 \text{ Mg m}^{-3}$  e  $> 1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ ).

Os resultados foram apresentados para o triângulo textural, e assim, os triângulos hidráulicos desenvolvidos assumiram que cada valor de conteúdo de água e armazenamento no conjunto de dados pode ser representado em um diagrama de textural, nas coordenadas dadas pela distribuição de tamanho de partícula das amostras correspondentes.

Conforme apresentado em Bolton & Brewer (1987), primeiramente deve-se assumir que as coordenadas são dadas pela proporção relativa dos constituintes (areia, silte e argila), logo, estas devem ser transformadas em um domínio cartesiano (variação de comprimento no domínio cartesiano foi equivalente a % de variação de massa no triângulo textural) conforme as Equações 3 e 4 e Figura 2.

$$y = \frac{h \times \text{argila}(\%)}{100} \quad (3)$$



$$x = \left( \text{areia}(\%) + \text{argila}(\%) * \tan\left(\alpha * \frac{\pi}{180}\right) \right) \quad (4)$$

em que:  $y$  - é a coordenada vertical, dependente apenas do conteúdo de argila (%);  $x$  - é a coordenada horizontal, função dos teores de areia e argila (%);  $h$  - é a altura do triângulo (obtida aplicando o teorema de Pitágoras); e  $\alpha$  o ângulo de  $30^\circ$  formado entre a direção vertical e a direção diagonal comumente usada para representar o conteúdo de areia em um triângulo de textura equilátero.

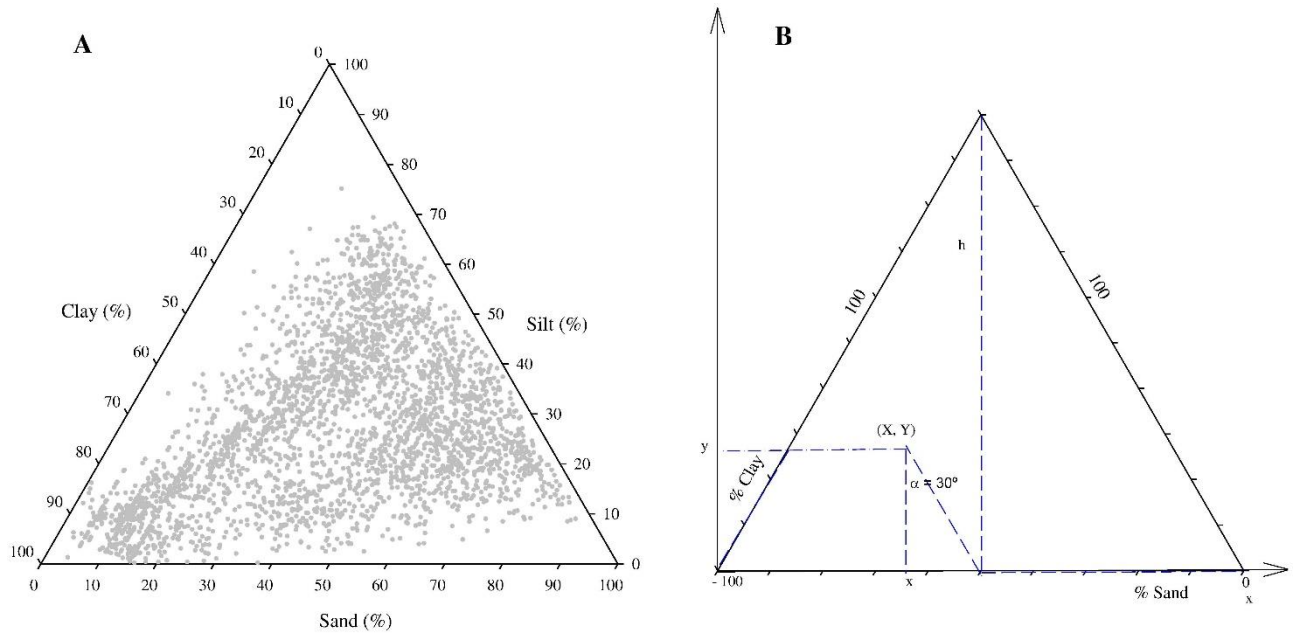


Figura 2. Distribuição textural do conjunto de dados utilizado no desenvolvimento e validação dos diagramas ternários (A); conversão das coordenadas de textura em coordenadas cartesianas (B). Adaptado de Ramos et al. (2014).

#### 6.4.3.2 Descrição dos semivariogramas

Para obter a distribuição espacial dos valores de retenção de água no triângulo textural, foi proposto o uso do estimador por krigagem ordinária comum (OK). Portanto, o primeiro passo foi obter um modelo espacial válido, capaz de descrever a variação dos valores de retenção de água observados. Isso geralmente é obtido inferindo-se um semivariograma ao qual um modelo é ajustado, fornecendo os parâmetros necessários para prever a retenção de água em locais não amostrados dentro do triângulo. O semivariograma foi calculado para examinar a correlação espacial dentro dos pontos de dados medidos. A inconsistência espacial foi estimada como um semivariograma que retrata a variabilidade quadrada média entre os dois locais de amostras vizinhas da distância  $h$  (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca, o semivariograma foi estimado pela Equação 5. Neste estudo, o modelo esférico, descrito em Isaaks & Srivastava (1989), foi ajustado para obter o conjunto de parâmetros a serem utilizados na estimativa via krigagem comum. Esse modelo foi escolhido porque demonstra um desempenho desejável para quantidades elevadas de observações, evitando assim a tendência de dados com distribuição espacial aleatória ou contínua. O ajuste do modelo foi realizado por mínimos quadrados ponderados. Esses ajustes foram feitos usando o software GS<sup>+</sup> (ROBERTSON, 1998).

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

em que:  $g(h)$  é o valor da semivariância para uma distância  $h$ ;  $N(h)$ , o número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;  $Z(x_i)$ , o valor da propriedade  $Z$  na posição  $x_i$ ; e  $Z(x_i+h)$ , o valor da propriedade  $Z$  separado por uma distância  $h$  da posição  $x_i$ .

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$  são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (efeito pepita,  $C_0$ ; variância estrutural,  $C_1$ ; patamar,  $C_0 + C_1$ ; e alcance,  $a$ ). O efeito pepita é o valor da semivariância para uma distância maior do que zero e menor do que a menor distância de amostragem e representa o componente da variação ao acaso; o patamar é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante; e o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando a distância além da qual as amostras não são correlacionadas (TRANGMAR et al., 1985).

Para analisar o grau da dependência espacial (GDE) das estimativas, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados dependência espacial forte os semivariogramas que têm efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca quando for maior que 75%.

Após a interpolação por krigagem dos valores de retenção de água, o triângulo textural foi utilizado para limitar a área do domínio cartesiano relevante para este estudo e para auxiliar na compreensão das estimativas de teor de água, relacionando à textura do solo. Assim, triângulos hidráulicos compostos por estimativas de  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ ,  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  e ASW foram obtidos no final para uma grade de 1% da textura do solo, resultando em 52332 diferentes texturas de solo

(diferentes combinações de areia, silte e argila com base nas interpolações via krigagem) e estimativas correspondentes ao teor de água.

Os diagramas foram elaborados pelo programa Surfer 6.0 (Golden Software, 1995). Segundo Smith et al. (1993), o valor esperado em um local não amostrado, derivado das variáveis indicadoras, é equivalente à distribuição cumulativa da variável. Assim, estimativas calculadas para locais não amostrados proporcionam uma medida da incerteza de que o valor nestes locais estará abaixo ou acima do valor de corte, desta forma considerou-se somente a área do triângulo textural para o cálculo das variâncias amostrais, evitando assim a aplicação das áreas extrapoladas fora do domínio cartesiano em que não havia coordenadas amostrais a partir das relações entre areia, silte e argila.

#### 6.4.4 Incerteza das estimativas

A incerteza de previsão das estimativas foi dada pela variância de krigagem obtida para cada célula da grade dos diagramas ternários, associado ao coeficiente de validação cruzada (VC) após as interpolações via krigagem. Os diagramas ternários foram validados comparando os valores medidos de  $\theta_{-33}$  kPa,  $\theta_{-1500}$  kPa e ASW incluídos no conjunto de dados de validação pelas estimativas de krigagem. Para averiguar o desempenho e acurácia foi realizada uma análise estatística através dos seguintes parâmetros: Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e erro médio absoluto (EMA), conforme equações 6; 7 e 8, respectivamente.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (6)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (8)$$

## 6.5 Resultados e discussão

### 6.5.1 Distribuição espacial de $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ e $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$

Os parâmetros dos semivariogramas experimentais obtidos para  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  utilizados com a abordagem OK para a distribuição geral do banco de dados (Krigagem todos os dados) e os subgrupos (Pt 30-45%; Pt >45%; Ds 0,7-1,2 Mg m<sup>-3</sup>; Ds 1,2-1,5 Mg m<sup>-3</sup> e Ds > 1,5 Mg m<sup>-3</sup>) são apresentados na Tabela 2. O modelo esférico de semivariograma apresentou o melhor ajuste para todos os agrupamentos de dados, com variações no R<sup>2</sup> entre 0,67-0,87. A variação das propriedades de retenção de água foi teoricamente baixa, sendo a maior variação em efeito pepita (Co) observada em  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  no subgrupo de Ds > 1,5 Mg m<sup>-3</sup> e a menor em  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  no subgrupo de Ds 0,7-1,2 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente representando 29,32% e 1,87% da variância total. O elevado número de observações e a grande variabilidade podem exercer influência substancial nos resultados de previsão da análise do semivariograma.

Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas experimentais determinados com a abordagem de krigagem ordinária.

Parâmetros Geoestatísticos								
Krigagem (Todos os dados)			Pt 30-45%			Pt > 45%		
Parâmetros	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	Parâmetros	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	Parâmetros	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$
Co	1,019E <sup>-3</sup>	4,01E <sup>-4</sup>	Co	9,61E <sup>-4</sup>	1,56E <sup>-4</sup>	Co	1,252E <sup>-3</sup>	2,31E <sup>-4</sup>
Co+c	2,873E <sup>-3</sup>	1,463E <sup>-3</sup>	Co+c	2,898E <sup>-3</sup>	1,712E <sup>-3</sup>	Co+c	2,146E <sup>-3</sup>	1,196E <sup>-3</sup>
GDE (%)	35,46	27,31	GDE (%)	33,16	9,11	GDE (%)	58,34	19,31
Alcance (%)	11,76	11,01	Alcance (%)	9,41	10,87	Alcance (%)	10,42	11,92
Modelo	Esf.	Esf.	Modelo	Esf.	Esf.	Modelo	Esf.	Esf.
R <sup>2</sup>	0,74	0,82	R <sup>2</sup>	0,71	0,78	R <sup>2</sup>	0,77	0,82
Ds 0,7-1,2 Mg m <sup>-3</sup>			Ds 1,2-1,5 Mg m <sup>-3</sup>			Ds > 1,5 Mg m <sup>-3</sup>		
Parâmetros	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	Parâmetros	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	Parâmetros	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$
Co	9,26E <sup>-4</sup>	3,30E <sup>-4</sup>	Co	1,387E <sup>-3</sup>	3,67E <sup>-4</sup>	Co	9,32E <sup>-4</sup>	2,932E <sup>-3</sup>
Co+c	1,878E <sup>-3</sup>	8,39E <sup>-4</sup>	Co+c	2,871E <sup>-3</sup>	1,542E <sup>-3</sup>	Co+c	2,769E <sup>-3</sup>	5E <sup>-3</sup>
GDE (%)	72,82	39,33	GDE (%)	48,31	23,80	GDE (%)	33,65	58,64
Alcance (%)	11,24	13,39	Alcance (%)	18,07	15,43	Alcance (%)	10,38	48,55
Modelo	Esf.	Esf.	Modelo	Esf.	Esf.	Modelo	Esf.	Esf.
R <sup>2</sup>	0,75	0,82	R <sup>2</sup>	0,85	0,87	R <sup>2</sup>	0,77	0,67

Co – Efeito pepita; Co+c – Patamar; GDE – Grau de dependência espacial; R<sup>2</sup> - Coeficiente de determinação – Esf. Modelo esférico de ajuste; Ds – Densidade do solo; Pt – Porosidade total.

A grande variação em efeito pepita encontrado para o semivariograma de  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  no subgrupamento de  $D_s > 1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ , pode estar relacionado a procedimentos metodológicos usados para medir a retenção de água neste potencial, principalmente se tratando de solos de textura fina e densidade elevada, em que a variação de tempo na câmara extratora de Richards é longa, e a extração de água não é totalmente removida, considerando principalmente a estrutura microagregada, ou fatores relacionados a indícios de compactação, em que a transformação de macroporos em microporos é comum, ainda mais em áreas com históricos de irrigação e ocupação do solo por intensas práticas de cultivo agrícola.

Para todos os subgrupamentos selecionados, uma forte e moderada correlação espacial foi encontrada (GDE < 25% e GDE 25% - 75%, respectivamente), sendo que,  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  sempre esteve relacionada a forte dependência espacial na grande maioria dos subgrupamentos, principalmente nas faixas de porosidade total e  $D_s$  (1,2-1,5  $\text{Mg m}^{-3}$ ). Este é um indicativo de que a subdivisão por propriedades estruturais é uma forma de minimizar e identificar as causas de variações, principalmente considerando as práticas de manejo do solo. Ainda, a forte dependência espacial pode ter sido dominada por características intrínsecas, como classe de solo, processos de formação do solo e propriedades geomorfológicas (GUAN et al., 2017; LIU et al., 2018; DUAN et al., 2020). Neste sentido, a correlação espacial torna-se um indicativo de eficiência no ajuste dos dados, agrupando assim a influência das propriedades estruturais na geração de FPTs, possibilitando verificar a influência destas propriedades e sua relação com características intrínsecas e extrínsecas do solo. No desenvolvimento de FPTs tradicionais, o agrupamento de dados considerando a correlação espacial, provavelmente seria vantajoso para reduzir a variabilidade inexplicável, conforme foi evidenciada no desenvolvimento dos diagramas ternários (WÖSTEN et al., 2001; RAMOS et al., 2014).

Nos semivariogramas esféricos, a continuidade espacial (alcance) de  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  nos diferentes subgrupamentos atingiu uma faixa de 9,41% de massa ( $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  Pt 30-45%) e 48,55%

( $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$   $D_s > 1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ ), valores estes representativos a distância além da qual a variável era espacialmente independente. Isso indica que o sistema de coordenadas no plano cartesiano do triângulo textural foi suficientemente adequado para detectar a heterogeneidade espacial das propriedades de retenção de água nos diferentes subgrupamentos. Este é um indicativo de que os valores de retenção de água foram, portanto, correlacionados com amostras localizadas em classes de textura vizinhas (até o limite de distância (h) fornecido pelo semivariograma), mas, áreas mais distantes do triângulo de textura não apresentaram correlação com esses valores

medidos. Assim, a extrapolação dos dados para regiões em que não ocorrem medições (Figura 2), tendem a ser menos confiáveis, restringindo principalmente as faixas de textura mais fina. Conforme destacado em Wösten et al. (2001), estas variações parecem ser muito úteis para visualizar as limitações das FPTs baseadas apenas em propriedades texturais ao estimar propriedades de retenção de água para diferentes classes de textura do solo. A confiabilidade na continuidade espacial é um fator que deve ser acrescido de limitações, principalmente em função das características peculiares de solo que formam o agrupamento de dados, pois estas FPTs estimam propriedades médias de retenção de água no solo para diferentes classes de textura com base em coordenadas espaciais aritméticas, sendo que, nem sempre a correspondência das coordenadas no plano cartesiano representa a tendência das estimativas da retenção de água, atribuindo assim pequenas variações no alcance espacial (BRUAND et al., 2003; AL MAJOU et al., 2008).

#### *6.5.2 Diagramas ternários – Distribuição geral*

A Figura 3 apresenta os diagramas ternários desenvolvidos para estimar  $\theta_{-33kPa}$  e  $\theta_{-1500kPa}$  a partir da distribuição do tamanho de partículas com a abordagem da krigagem ordinária agrupando todas as classes de subgrupos. A variação de previsão resultante é mostrada na Figura 4. As previsões de disponibilidade de água nos diferentes potenciais revelaram que, a fração mais fina (argila e silte) apresentaram relações diretas com valores elevados de conteúdo de água, valores contrários podem ser observados para frações grosseiras (areia).

É possível observar nas diferentes regiões do triângulo textural microvariações na distribuição das isolinhas em algumas classes texturais, este fator pode ser decorrente da variabilidade exercida pela distribuição dos dados, associados a fatores intrínsecos do solo. Desta forma, conforme destacado em Ramos et al. (2014), esta condição pode ser decorrente devido ao uso de uma tendência espacial baseada apenas na textura do solo, combinada com resíduos espacialmente correlacionados, que também podem ser responsáveis pelas informações de textura que não foram incluídas no modelo de tendência a partir do plano cartesiano.

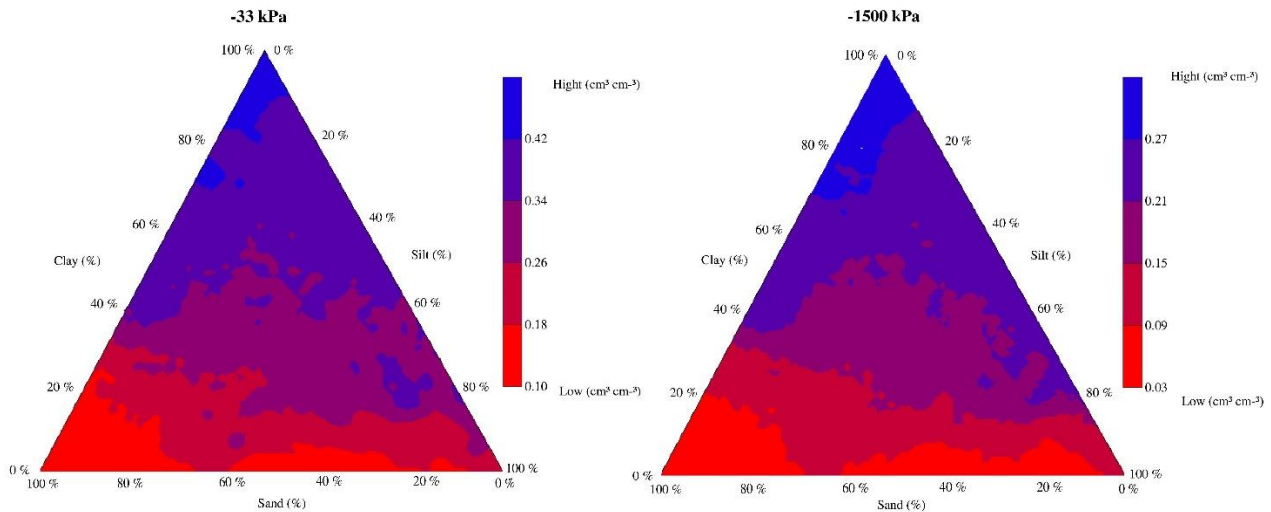


Figura 3. Diagramas ternários interpolados por Krigagem ordinária para a distribuição geral do banco de dados englobando todas as classes de subgrupos.

Os valores médios e do desvio padrão do diagrama ternário  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  interpolado, foram de  $0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  respectivamente, enquanto que, para  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  os valores médios foram de  $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e desvio padrão de  $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . É possível observar que os valores médios interpolados para ambos os potenciais apresentaram alta similaridade aos registrados no conjunto de dados de desenvolvimento (Tabela 1). Esta observação é um indicativo de que, apesar da interpolação englobar coordenadas no plano cartesiano gerando novas estimativas de retenção de água, os valores são relativamente confiáveis, mesmo em função da microvariabilidade existente no conjunto amostral. Entretanto, as diferenças entre o número de observações utilizados no desenvolvimento deste estudo, comparados com os de Ramos et al. (2014) foram substancialmente superiores, evidenciando assim a importância em se utilizar um grande número de observações nas interpolações geoestatísticas mesmo tendo conhecimento da influência da variabilidade amostral do conjunto.

Os resultados dos indicadores estatísticos entre os valores de retenção de água medidos e previstos em ambos os potenciais matriciais são apresentados na Tabela 3. A Figura 4 mostra os gráficos de dispersão associados a distribuição de frequência correspondentes entre os valores medidos e previstos. Considerando as interpolações pela krigagem com os dados gerais, é possível verificar que o EMA foi relativamente baixo, com valores próximos a zero, evidenciando que, os valores observados e estimados expressam o mesmo fenômeno. Valores de RMSE para  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  ( $0,047 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  ( $0,031 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) indicam previsões relativamente precisas. Considerando apenas o uso de frações texturais, os indicadores estatísticos são extremamente inferiores quando comparados as FPTs elaboradas por Arruda et



al. (1987), Tomasella & Hodnett (1998), Oliveira et al. (2002), os quais associaram propriedades estruturais, obtendo assim valores de RMSE para  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  entre  $0,043 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  -  $0,093 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e para  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  entre  $0,049 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  -  $0,102 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , deixando evidente que, apenas a aplicação de frações texturais usando interpoladores geoestatísticos podem ser indicativos de previsões aceitáveis quando comparadas aos métodos clássicos aplicando regressões múltiplas. Valores de  $R^2$  indicam de razoável a boa concordância entre os valores observados e estimados, situando-se na faixa de 0,64 ( $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ ) e 0,75 ( $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ ), demonstrando a partir da Figura 4 uma leve tendência de dispersão para a retenção de água de  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ .

A partir da Figura 4 pelos gráficos de densidade e distribuição de frequência das estimativas, é notória a tendência de subestimação nos dados estimados para ambos os potenciais nas zonas de conteúdo de água elevado (gráfico esquerda), corroborando assim as informações (gráfico direita). Este resultado pode ser um indicativo da interdependência de que  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  acaba se tornando uma propriedade hidráulica dependente do domínio estrutural do solo, desta forma, apenas a associação com propriedades do domínio textural, conduziu a um erro (RMSE) relativamente mais elevado nas estimativas e concordância ( $R^2$ ) inferiores.

Esta interferência apresentou-se menos impactante para  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  a qual pertence e tem influência ao domínio textural, evidenciando assim RMSE menor, e praticamente sobreposições na distribuição entre os dados observados e estimados. Em termos de número de preditores, os diagramas ternários parecem ser bastante úteis, mesmo apesar das escalas de variações de erros das estimativas, pois são as únicas FPTs que não requerem a inserção da densidade do solo ou demais atributos estruturais conforme FPTs apresentadas na literatura. Mais adiante será apresentado o desempenho de diagramas a partir da subdivisão de agrupamentos e classes para porosidade total e densidade do solo, com o critério de correlacionar e interpretar a real influência entre os domínios texturais e estruturais na previsão da retenção e disponibilidade de água.

Tabela 3. Resultados da análise estatística entre  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ ,  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  e água disponível no solo (ASW) nas estimativas obtidas a partir dos diagramas ternários desenvolvidos com krigagem ordinária.

Estatística	Conteúdo volumétrico de água		
	Krigagem geral		
	$\theta_{-33 \text{ kPa}}$	$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	ASW ( $\text{mm m}^{-1}$ )
$R^2$	0,64	0,75	-
MAE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	-0,0002	-0,0003	-
RMSE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,047	0,031	-
Agrupamento de Dados			
Pt 30% - 45%			
$R^2$	0,67	0,86	-
MAE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	-0,00002	-0,0002	-
RMSE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,027	0,022	-
Pt > 45%			
$R^2$	0,70	0,79	-
MAE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,0001	-0,0001	-
RMSE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,041	0,027	-
Ds 0,7 - 1,2 $\text{Mg m}^{-3}$			
$R^2$	0,57	0,61	-
MAE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,00007	-0,00023	-
RMSE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,044	0,038	-
Ds 1,2 - 1,5 $\text{Mg m}^{-3}$			
$R^2$	0,77	0,84	0,99
MAE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,00015	-0,00005	0,008
RMSE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,039	0,031	2,26
Ds > 1,5 $\text{Mg m}^{-3}$			
$R^2$	0,83	0,88	0,94
MAE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	-0,00004	-0,00002	0,0074
RMSE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	0,035	0,032	2,17

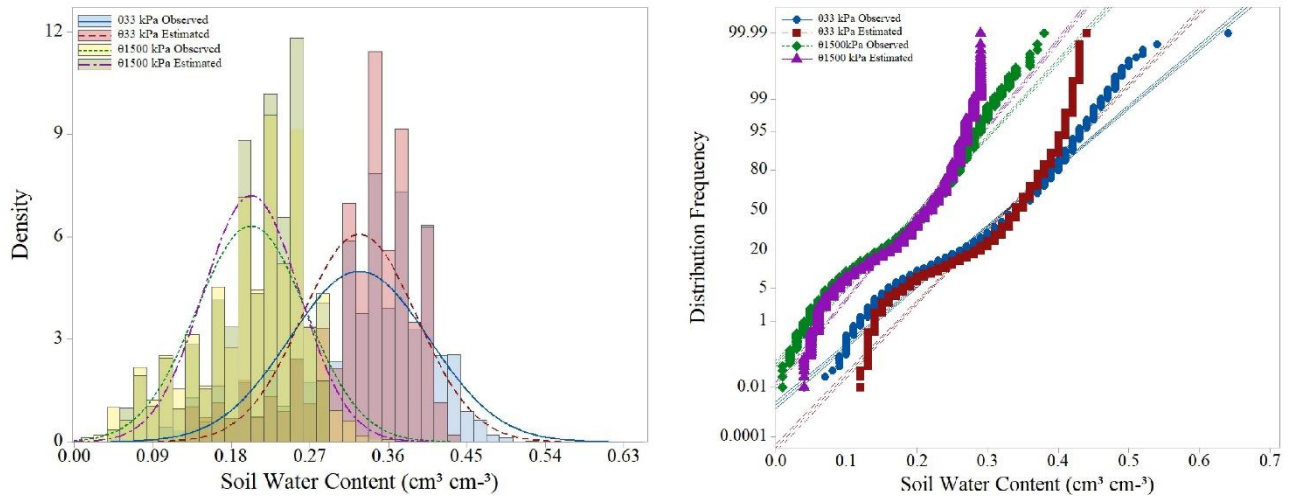


Figura 4. Gráficos de dispersão da previsão do teor de água do solo nos potenciais matriciais de  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  para a abrangência geral do banco de dados. Histograma com densidade de distribuição (lado esquerdo) e Frequência de distribuição (lado direito).

### 6.5.3 Diagramas ternários - Efeitos da estrutura do solo na retenção de água

De acordo com estudos, Botula et al. (2012) e Nyguyen et al. (2015), o desempenho da previsão de FPTs pode ser influenciado pela preferência geográfica do conjunto de dados de origem, além também da distribuição e agrupamento por interferências do domínio estrutural do solo. Além disso, Hodnett & Tomasella (2002) observaram diferenças marcantes entre os parâmetros que descrevem o comportamento de retenção de água no solo. Tais diferenças foram atribuídas à discrepância em termos de propriedades químicas, físicas e mineralógicas entre os solos. Desta forma, realizamos o agrupamento de dados por densidade do solo e porosidade total, com o critério de reduzir a variabilidade do conjunto de dados, gerando estimativas mais precisas da retenção de água no solo nos determinados potenciais matriciais.

As Figuras 5 e 6 mostram respectivamente os diagramas ternários de retenção de água e a dispersão e frequência das estimativas para a faixa de subgrupos pela porosidade total (Pt 30% - 45% e Pt > 45%). Pelos triângulos texturais (Figura 5), nota-se que o subgrupo de Pt > 45% nesta amplitude, assemelhou-se com os diagramas desenvolvidos pela distribuição geral dos dados (Figura 3), possibilitando verificar uma variação no conteúdo de água nas zonas da fração silte, indicando que o efeito da relação do tamanho de partículas fica mais evidente nas estimativas. Os resultados mostram também, que houve leve aumento nas estimativas superiores de retenção  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  Pt 30% - 45% ( $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) para  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  Pt > 45% ( $0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Estes resultados reiteram o que é exposto na literatura sobre a relação de inserção de propriedades físicas do domínio estrutural, entretanto, no desenvolvimento de diagramas

ternários, uma das alternativas parte na separação do conjunto amostral, o que pode reduzir o banco de dados, influenciando diretamente nas estimativas geoestatísticas. Este critério não foi fator influenciador nestas estimativas, pois a partir das subdivisões para estas faixas de distribuição, houve o equivalente a 2580 observações ( $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ ) e 4958 ( $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ ).

Este cenário reforça o que foi exposto em Ramos et al. (2014) trabalhando com solos de Portugal, destacando que estimativas mais confiáveis na subdivisão por propriedades estruturais, devem ser testadas usando um banco de dados de solo muito maior e bem distribuído do que o atualmente disponível em Portugal e usado naquele estudo, que para aquelas pretensões abrangeu 432 observações. Desta forma, esta subdivisão pela porosidade total pode ser viável, principalmente se tratando da aplicabilidade em regiões em que o uso e ocupação do solo é intenso, semelhante aos abordados nas localidades deste estudo. Assim, a susceptibilidade à compactação pode ser minimizada mesmo aplicando somente a textura do solo como preditor nos efeitos associados à retenção de água.

Os resultados de RMSE mostram que o desempenho para  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  nos subgrupos por porosidade foram extremamente inferiores aos obtidos na distribuição geral dos dados (Tabela 3), com valores de  $0,022 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,027 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para Pt 30% - 45% e Pt > 45% respectivamente. Para  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  houve redução, sendo mais evidente para a faixa de Pt 30% - 45% ( $0,027 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Os valores de EMA (Tabela 3) evidenciaram-se baixos, variando entre positivos e negativos, mas sempre próximos da variação residual de 0, favorecendo verticalização na espacialização residual, favorecendo a não dispersão na linha de tendência dos dados observados e estimados.  $R^2$  situaram-se como bons, estando na faixa entre 0,67 e 0,86.

As densidades e frequências de distribuição (Figura 6), reiteram novamente tendência de subestimação, principalmente nas Figuras 6<sub>CD</sub>, mas ao contrário que foi abordado na distribuição geral dos dados, as curvas de distribuição de frequência acabam se tornando menos dispersas nas zonas mais úmidas, fortalecendo assim a questão do agrupamento de dados por propriedades estruturais em subdivisões de classes na elaboração de FPTs, principalmente nas Figuras 6<sub>AB</sub>. Por se tratar de dados englobando regiões de clima tropical e temperado, o efeito aleatório dos dados, nos valores previstos parece ser menor comparados aqueles apresentados na Figura 4. Parte da razão para a diferença relativamente pequena, é que a abordagem de agrupamentos por subdivisões em FPTs, modela as diferenças na resposta em vez dos valores absolutos, para os quais a variação do componente dentro do local é evidentemente baixa (McNEILL et al., 2018).

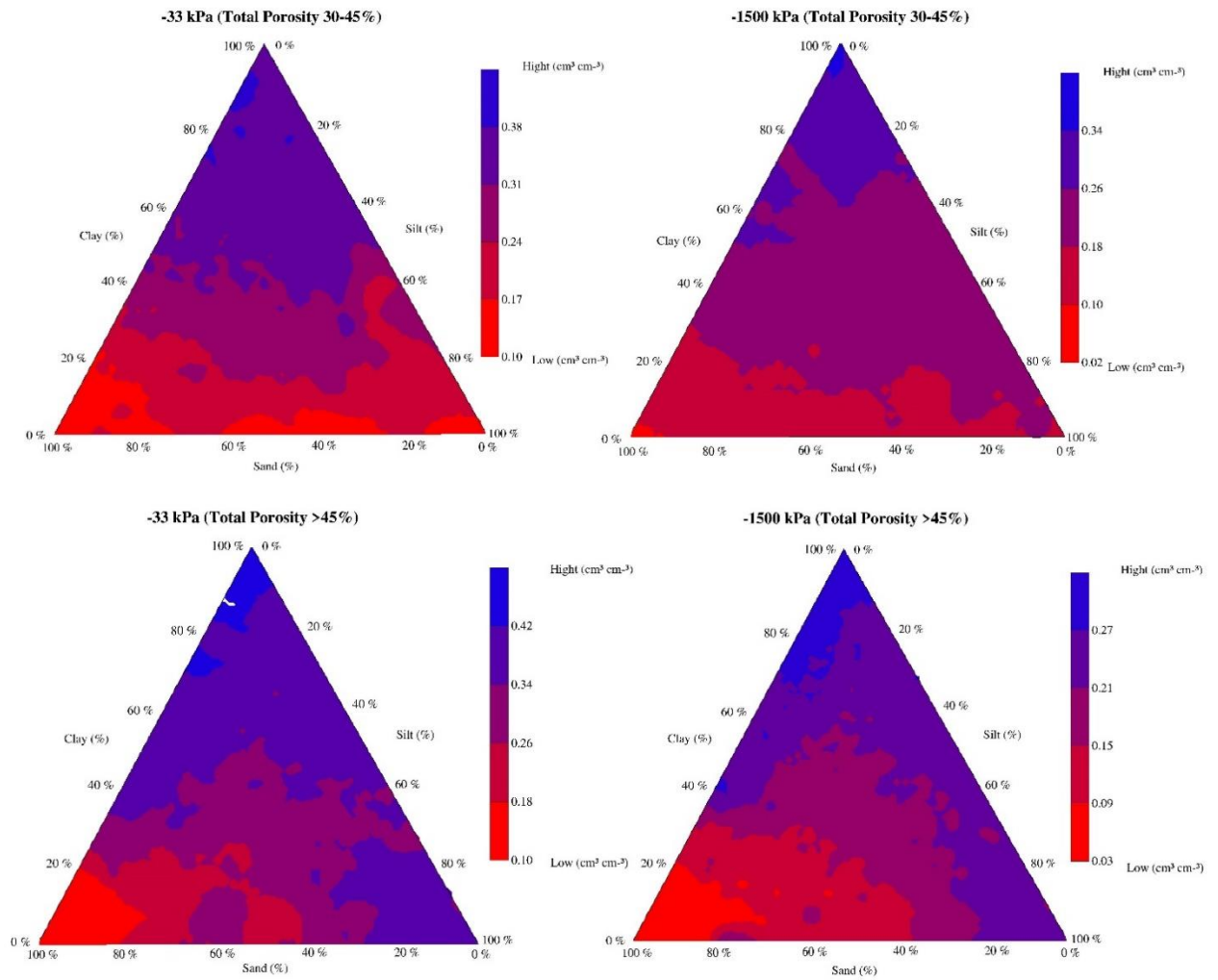


Figura 5. Diagramas ternários para a distribuição nos subgrupos de porosidade total.

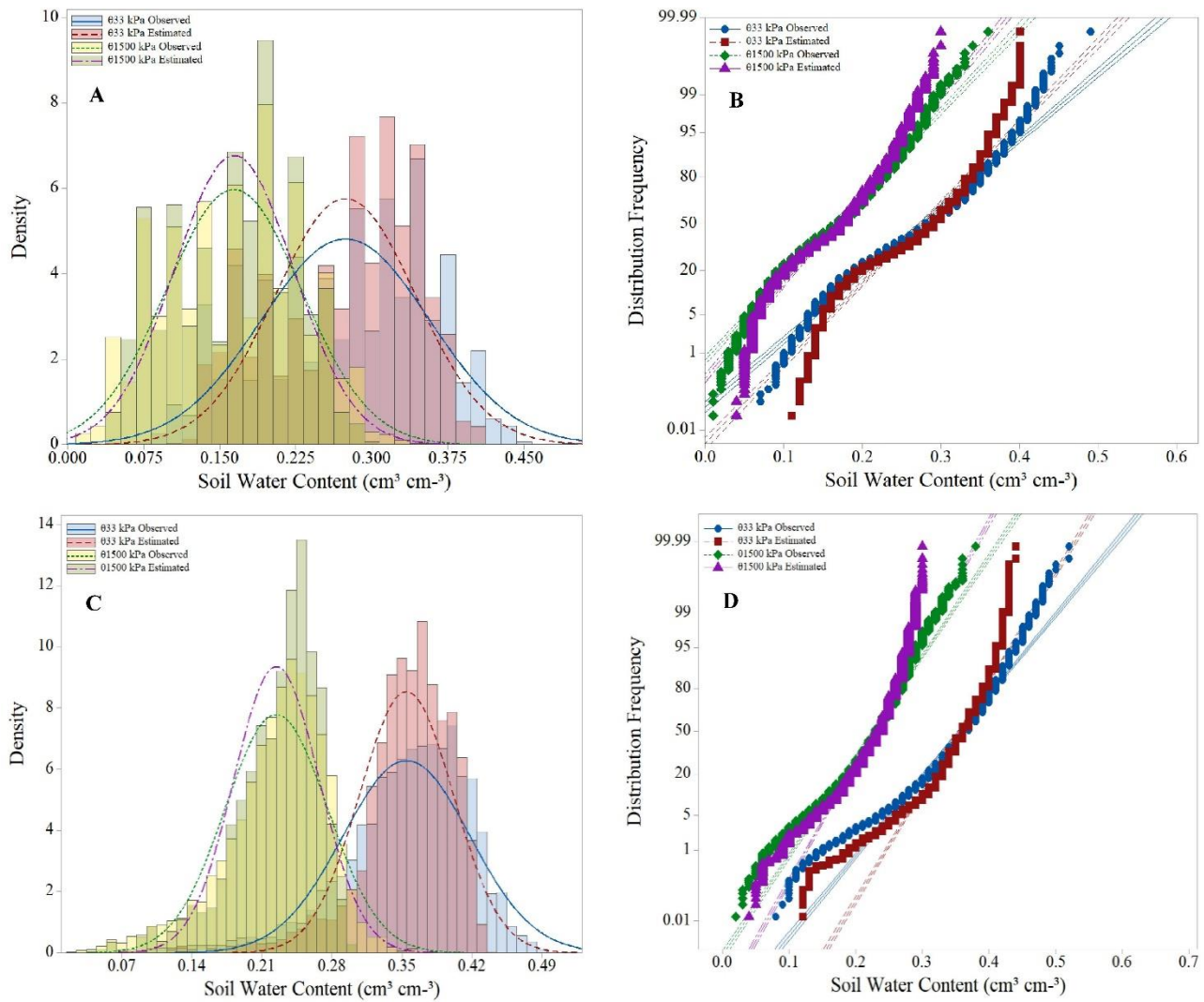


Figura 6. Gráficos de dispersão da previsão do teor de água do solo nos potenciais matriciais de  $\theta_{-33}$  kPa e  $\theta_{-1500}$  kPa para a subdivisão de porosidade total. Porosidade total 30-45% (A, B); Porosidade Total > 45% (C, D).

A Figura 7 mostra os diagramas ternários de  $\theta_{-33}$  kPa e  $\theta_{-1500}$  kPa após o subgrupamento do conjunto de dados de desenvolvimento por densidade do solo. A homogeneidade de distribuição das isolinhas nas diferentes faixas de umidade associadas as classes texturais nos diagramas, foi mais evidente quando comparados aos elaborados para a distribuição geral dos dados e porosidade total, ficando exposto desta forma a influência concreta da densidade do solo como caracterizador e influenciador direto na retenção de água, possibilitando assim estimativas mais confiáveis e minimizando os efeitos da compactação dos solos. Valores de distribuição máximos e mínimos também mostram que houve relação inversa entre os potenciais. Para  $\theta_{-33}$  kPa o aumento da densidade do solo impactou em redução nas faixas de retenção de  $0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  nos subgrupamentos de Ds  $0,7-1,2$  e  $1,2-1,5 \text{ Mg m}^{-3}$  (semelhantes em termos de

distribuição máxima e mínima), e  $0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para o subgrupo de  $D_s > 1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ . Enquanto que, para  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  os resultados indicam aumento gradual entre os subgrupos de distribuição, variando de  $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $D_s 0,7-1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ ),  $0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $D_s 1,2-1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ ) e  $0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $D_s 0,7-1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ ).

Pelos diagramas elaborados nos subgrupos por densidade do solo, estes evidenciam a sensibilidade e impacto que o manejo do solo pode exercer na retenção de água a pontos de alto potencial matricial na curva de retenção, principalmente por serem zonas que estão relacionadas fortemente ao domínio estrutural do solo. Fator contrário ocorreu para  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ , no qual, a possível redução na macroporosidade, e o aumento de microporos, tenham favorecido este aumento na retenção de água conforme elevação das faixas de densidade do solo. Assim, a densidade do solo tem efeito direto em algumas propriedades do solo, como porosidade, conteúdo de água disponível (ASW), e condutividade hidráulica e efeito indireto em algumas outras propriedades, como crescimento de raízes, influenciando diretamente na produção agrícola, ficando assim, estas subdivisões passíveis para a inserção de demais propriedades físicas que tenham impacto direto na retenção de água.

O desempenho estatístico dos diagramas usando as faixas de densidade do solo são apresentados na Tabela 3 e Figura 8. Para todas os diagramas, os resultados estatísticos mostraram que, novamente, ocorre subestimação nas zonas de maior umidade (Figura 8) com valores médios de erro (RMSE) variando de  $0,035-0,044 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $0,031-0,038 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  (Tabela 3). Os erros de distribuição ficam evidentes para a faixa do subgrupo por densidade do solo na classe de  $0,7-1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ , representados por RMSE mais elevado e pelas densidades e frequências de distribuição (Figura 8<sub>AB</sub>) mais destoantes da linha de tendência central, o qual indicam superestimação nos pontos de menor umidade e subestimação na faixa mais úmida. Este resultado pode ser esclarecedor em função do número de observações utilizadas no desenvolvimento para a faixa de classe (1593 observações), comparadas as demais 4455 observações ( $D_s 1,2-1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ ) e 2985 observações ( $D_s > 1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ ), influenciando assim na elaboração de coordenadas associadas ao plano cartesiano de domínio textural. Reforçando estes resultados, Al Majou et al. (2008) encontraram resultados satisfatórios agrupando FPTs por faixas de densidade, com melhor desempenho naquelas baseadas em textura e densidade do solo.

Conforme destacado em Abdelbaki (2018), a baixa relação entre dados observados e estimados nos diagramas de dispersão, pode estar relacionada à estrutura da função e dependência de propriedades do solo para aquela classe determinada, (por exemplo, teor de

carbono orgânico ou de matéria orgânica) que limita as previsões dessas funções, ou seja, a estimativa do erro da FPT reduz com o aumento do parâmetro de entrada até atingir os valores constantes de distribuição. O desempenho de distribuição pelas Figuras 8<sub>CD</sub> e 8<sub>EF</sub>, reforçam o excelente desempenho nas estimativas, os quais as densidades e frequência de distribuição apresentaram-se dentro do intervalo de confiança de 95%, com valores de R<sup>2</sup> entre 0,77 - 0,88 classificados de bons a excelentes, reforçado ainda pelos valores de MAE próximos a 0.

Pelo comportamento mais homogêneo de distribuição, e a associação com erros relativamente inferiores ao das estimativas da distribuição geral dos dados, as faixas de subgrupamentos por densidade, acabam se tornando de maior confiabilidade, principalmente pelo fato de ser uma propriedade física indicadora da qualidade do solo, e que também exerce influência na distribuição da porosidade. Ramos et al (2014), destacam que os diagramas ternários desenvolvidos por classe de propriedades do solo, podem potencialmente ser úteis para muitos domínios científicos e técnicos, mas parecem mais relevantes para o manejo da água em sistemas agrícolas, particularmente o manejo e programação de irrigação, reforçando também as informações já constatadas neste estudo, os quais o desempenho dos diagramas pela técnica geoestatística foi satisfatoriamente viável nas estimativas.



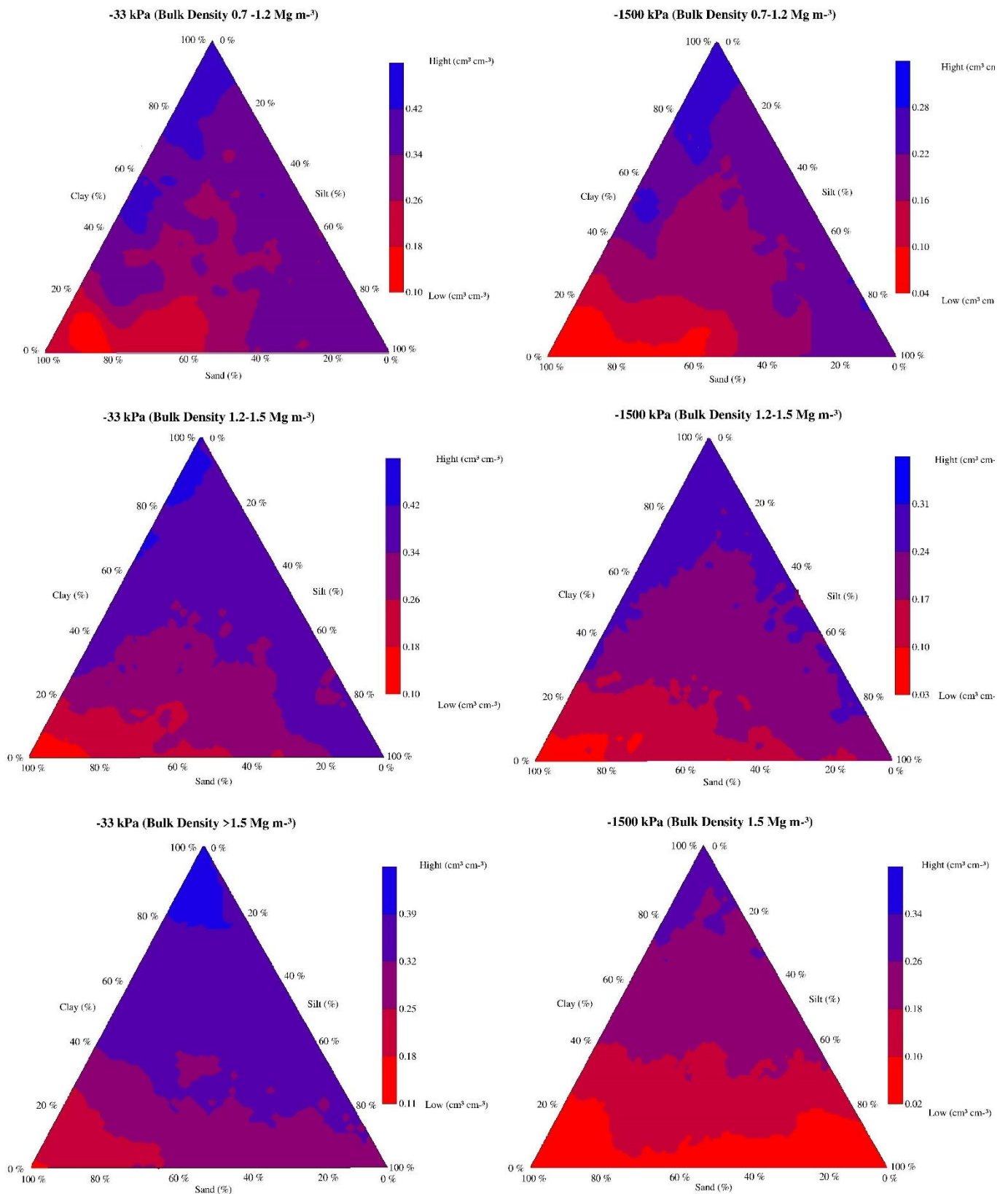


Figura 7. Diagramas ternários para a distribuição nos subgrupos de densidade do solo.

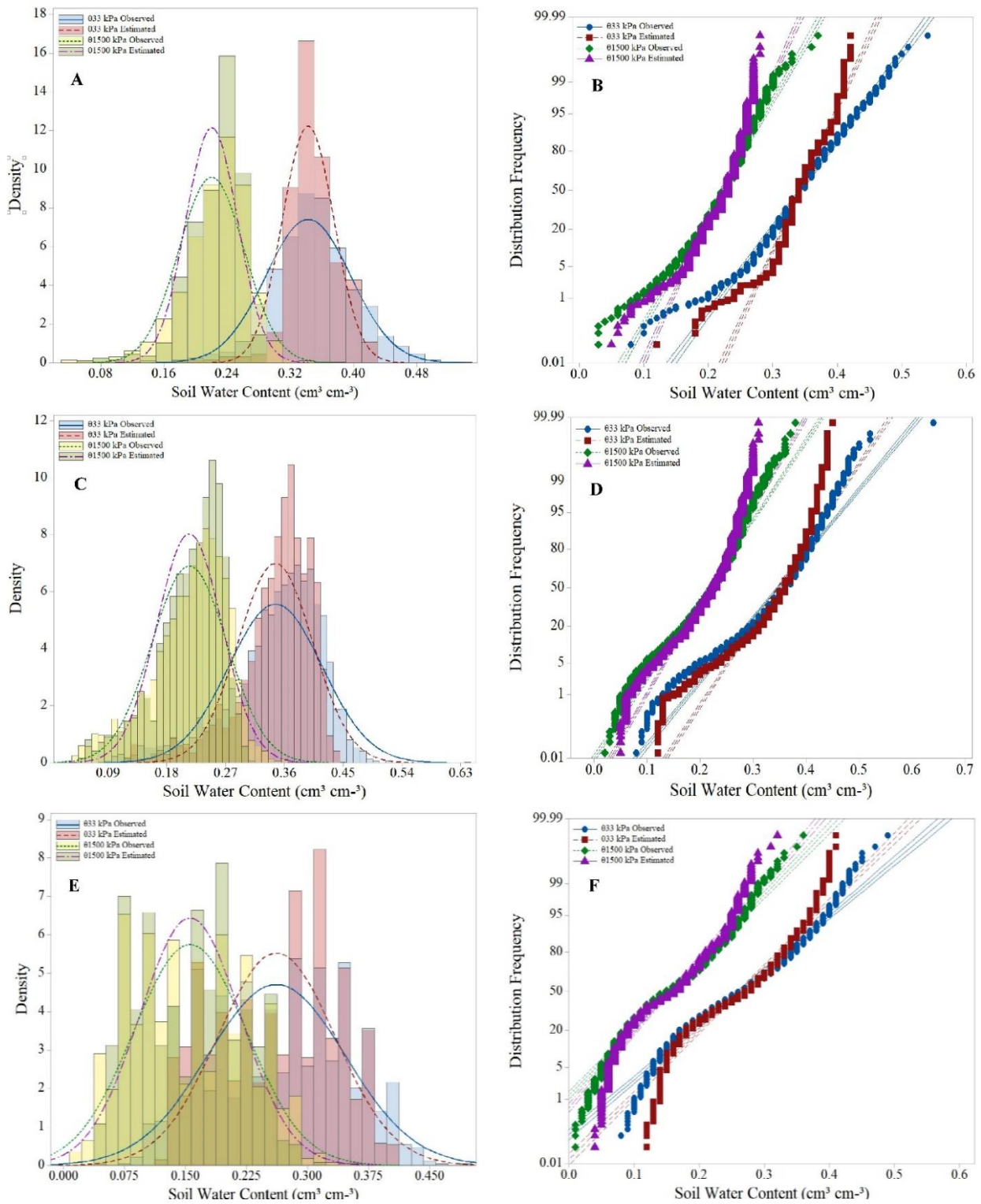


Figura 8. Gráficos de dispersão da previsão do teor de água do solo nos potenciais matriciais de  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  para a subdivisão de densidade do solo. Densidade do Solo 0,7-1,2 Mg m<sup>-3</sup> (A, B); Densidade do Solo 1,2-1,5 Mg m<sup>-3</sup> (C, D); Densidade do Solo > 1,5 Mg m<sup>-3</sup> (E, F).

#### 6.5.4 Capacidade de água disponível (ASW)

A Figura 9 apresenta as estimativas da disponibilidade de água no solo (ASW), calculada como a diferença entre os correspondentes  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$  e  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$ , definidos com a profundidade do solo para 1 metro como referência considerando o desenvolvimento do sistema radicular das culturas. Inicialmente destacamos que apenas as faixas relacionadas a subdivisão pela densidade do solo entre 1,2-1,5  $\text{Mg m}^{-3}$  e  $> 1,5 \text{ Mg m}^{-3}$  apresentaram estrutura espacial que puderam ser estimadas pelo interpolador de krigagem ordinária, as demais classes de subdivisões pela porosidade total e distribuição geral dos dados apresentaram efeito aleatório, ou seja, efeito pepita puro, que expressa à variabilidade não explicada pelas distâncias amostrais utilizadas no plano cartesiano (Figura 2).

Isto possivelmente pode ser explicado pelo teor elevado de água, condição que influenciou em resíduos relativamente altos, impossibilitando a distribuição espacial. Outra questão relevante para tais resultados, refere-se ao descrito por Trangmar et al. (1985), destacando que o variograma fornecido pelos dados pode ser um fator limitado, sendo um indicativo de não estacionariedade, ou seja, a variação presente nos dados pode não ser explicada por uma tendência espacial.

Pelos diagramas (Figura 9), fica evidente a influência textural associada a densidade do solo, nos quais é possível verificar que frações mais finas, com teor de argila ( $> 80\%$ ) nas faixas de Ds 1,2-1,5  $\text{Mg m}^{-3}$  e teor de argila ( $> 90\%$ ) para Ds  $> 1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ , mostram armazenamento total de água menor, esclarecendo desta forma que solos com elevadas proporções de argila, indicam também que esta água não está disponível para as plantas, representando um efeito que pode ser esclarecido pelas tendências de energia integral de disponibilidade hídrica. Nestas condições, a proximidade entre valores de capacidade de campo e ponto de murcha permanente em solos de textura fina, é um dos fatores que contribuem nesta baixa ASW obtida.

A Tabela 3 mostra a qualidade do ajuste entre os valores calculados e estimados da ASW, as inferências estatísticas apresentaram ajustes relativamente adequados, ficando evidente a partir da formação de zonas homogêneas de armazenamento de água. Valores de  $R^2$  entre 0,94 - 0,99 e EMA 0,074 - 0,008 reforçam a eficácia e confiabilidade dos estimadores geoestatísticos nas estimativas. Pelos valores de RMSE situados entre 2,26  $\text{mm m}^{-1}$  para Ds 1,2-1,5  $\text{Mg m}^{-3}$  e 2,17  $\text{mm m}^{-1}$  para Ds  $> 1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ , estes foram considerados extremamente baixos, considerando a magnitude e escala dos valores, sendo assim fator de confiabilidade e que pode direcionar nas estimativas futuras. Uma das questões que podem ter influenciado tais

resultados baixos de RMSE para ASW quando comparado aos obtidos em Ramos et al. (2014) que se situaram em faixas entre 29,23-35,8 mm m<sup>-1</sup>, pode ser a maior distribuição no número de observações, o qual minimiza o impacto na redução nas faixas em que o estimador começa a extrapolar informações em vez de interpolá-las.

Pelas Figuras 10<sub>BD</sub> representando a frequência de distribuição, fica evidente que valores situados em faixas < 50 mm m<sup>-1</sup> e maiores que 200 mm m<sup>-1</sup> tendem a seguir um padrão de correlação entre as linhas observadas e estimadas, entretanto estes fogem a distribuição pela linha de tendência, ficando estes valores associados ao domínio de incerteza e não confiabilidade pela faixa dos 95% de confiabilidade, esta tendência na confiabilidade é reforçada pelas Figuras 10<sub>AC</sub>, esclarecendo a possível interferência de outliers nestas faixas de estimativa.

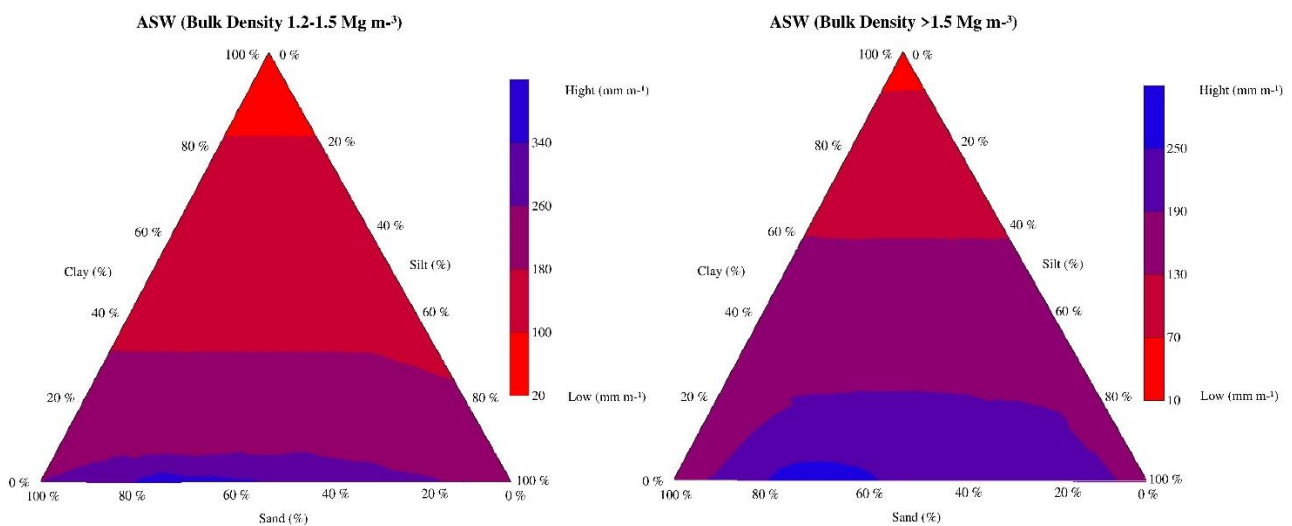


Figura 9. Diagramas ternários para a distribuição de ASW nos subgrupos de densidade do solo.

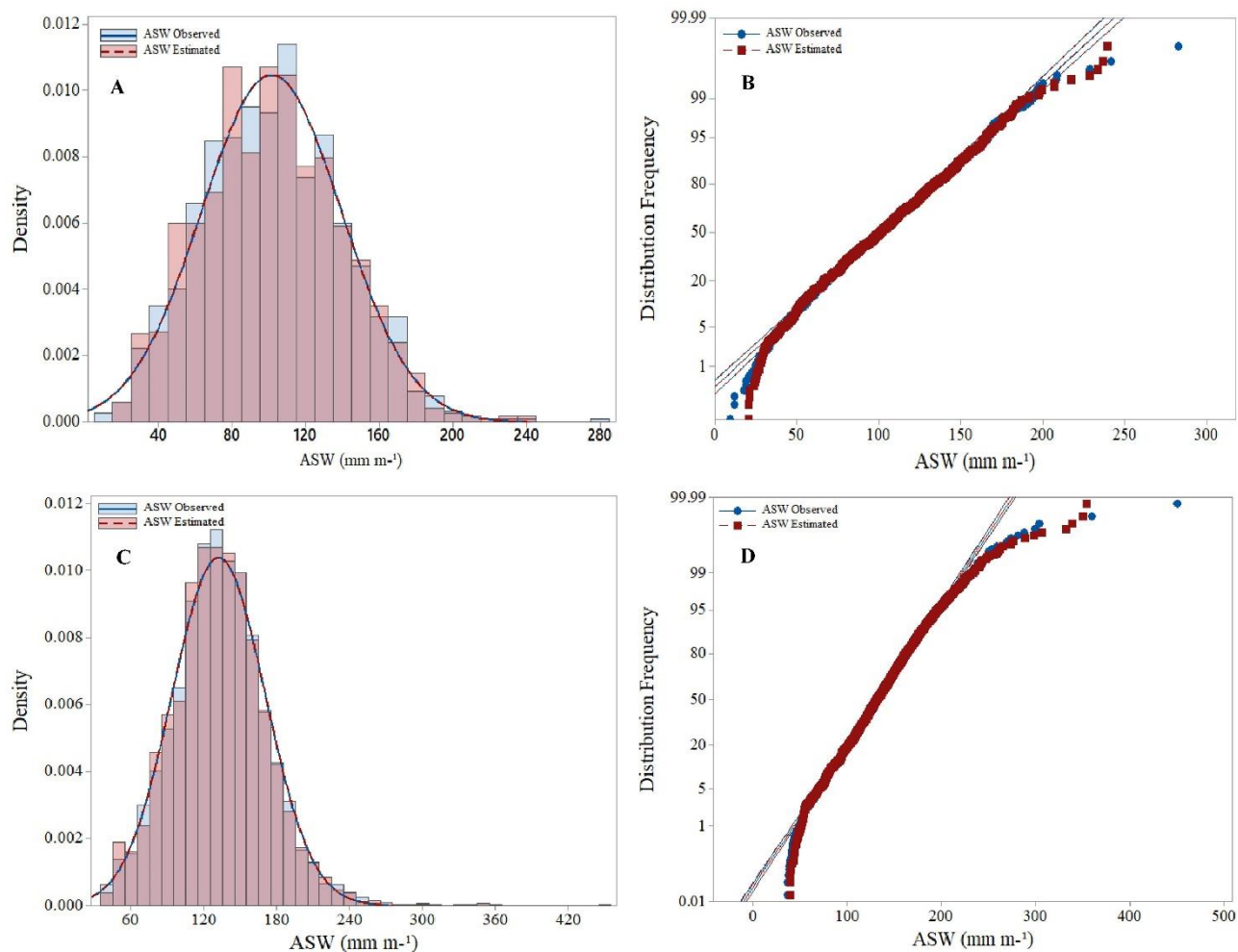


Figura 10. Gráficos de dispersão da ASW para a subdivisão de densidade do solo. Densidade do Solo 1,2-1,5 Mg m<sup>-3</sup> (A, B); Densidade do Solo > 1,5 Mg m<sup>-3</sup> (C, D).

## 6.6 Conclusões

Neste estudo, dados do solo das regiões Centro-Sul, onde predominam conteúdos de areia, silte e argila variados, foram utilizados para desenvolver diagramas ternários de  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ ,  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  e ASW usando apenas a proporção relativa de diferentes partículas de tamanho (areia, silte e argila) como dados de entrada para a previsão do conteúdo de água. A partir dos resultados, concluímos que:

- i. A utilização de um amplo banco de dados agrupando informações de diferentes estados do Brasil e com características variadas relacionadas a solos, possibilitou estimativas confiáveis. Tais resultados, indicam que pelos diagramas gerados, estes podem reduzir o tempo e os custos para obter dados de retenção para as localidades estudadas, potencializando e direcionando para estudos futuros.

ii. Os índices estatísticos de  $R^2$ , RMSE e EMA sempre se apresentaram relativamente inferiores nas subdivisões a partir da densidade do solo quando comparados a distribuição geral ou subdivisão por porosidade total, gerando assim estimativas com maior confiabilidade, e tornando-se sendo uma associação importante visando minimizar os possíveis impactos relacionados ao uso e ocupação do solo.  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  para todas as subdivisões e distribuição gerado dos dados, sempre apresentou erros relativamente inferiores, evidenciando que para esta propriedade hidráulica pertencente ao domínio textural, as proporções de areia, silte e argila são suficientemente adequadas para suas estimativas.

iii. Comparado aos métodos tradicionais nas elaborações de FPTs, a interpolação geoestatística é extremamente útil na compreensão do padrão espacial dos dados utilizados neste estudo, possibilitando reduzir o efeito aleatório (efeito pepita puro), permitindo assim estimativas de variâncias mais confiáveis quando comparadas as regressões.

iv. Diagramas ternários podem atuar como ferramentas úteis e simplificadas para estimar as propriedades hidráulicas  $\theta_{-33 \text{ kPa}}$ ,  $\theta_{-1500 \text{ kPa}}$  e ASW apenas aplicando a distribuição de tamanho de partículas, desde que ocorra um agrupamento por propriedades estruturais.

## 6.7 Referências

Abdelbaki, A. M. Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for U.S soils. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 9, p. 1611-1619, 2018. Doi: 10.1016/j.asej.2016.12.002Get.

Akpa, S.I.C.; Odeh, I.O.A.; Bishop, T.F.A.; Hartemink, A.E. Digital mapping of soil particle size fractions for Nigeria. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, p. 1953–1966, 2014. Doi: 10.2136/sssaj2014.05.0202.

Al Majou, H.; Bruand, A.; Duval, O.; Le Bas, C.; Vautier, A. Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. **Soil Use Management**, v. 24, p. 383–391, 2008. Doi: 10.1111/j.1475-2743.2008.00180.x.

Arruda, F.B.; Zullo, J.; de Oliveira, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 11–15, 1987.

Bodner, G.; Scholl, P.; Loiskandl, W.; Kaul, H.P. Environmental and management influences on temporal variability of near saturated soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 204-205, p. 120-129, 2013. Doi: 10.1016/j.geoderma.2013.04.015.

Bolton, J.C.; Brewer, R.C. A simple trigonometric method for extracting data from ternary diagrams. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 57, p. 773-774, 1987.

Botula, Y. D.; Ranst, E. V.; Cornelis, W. M. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 679–698, 2014.

Botula, Y.D.; Cornelis, W.M.; Baert, G.; Van Ranst, E. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). **Agricultural Water Management**, v. 111, p. 1-10, 2012. Doi: 10.1016/j.agwat.2012.04.006.

Bouma, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, v. 9, p. 177–213, 1989.

Bruand, A.; Pérez Fernandez, P.; Duval, O. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. **Soil Use Management**, v. 19, p. 232–242, 2003. Doi: 10.1111/j.1475-2743.2003.tb00309.x.

Cambardella, C.A.; Moorman, T.B.; Novak, J.M.; Parkin, T.B.; Karlen, D.L.; Turco, R.F.; Konopka, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994. Doi: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.

Delbari, M.; Afrasiab, P.; Loiskandl, W. Geostatistical analysis of soil texture fractions on the field scale. **Soil Water Research**, v. 6, p. 173-189, 2011. Doi: 10.17221/9/2010-SWR.

Dobarco, M.R.; Cousin, I.; Le Bas, C.; Martin, M.P. Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. **Geoderma**, v. 336, p. 81-95, 2019. Doi: 10.1016/j.geoderma.2018.08.022.

Duan, D.; Li, Z.; Xie, H.; Li, Z.; Zhang, L.; Zhou, Q. Large-scale spatial variability of eight soil chemical properties within paddy fields. **Catena**, v. 188, p. 104350, 2020. Doi: 10.1016/j.catena.2019.104350.

Eldeiry, A.A.; Garcia, L.A. Comparison of ordinary kriging, regression kriging, and cokriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT images. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 136, p. 355–364, 2010. Doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000208.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer for Windows: Surface mapping system**. Versão 6.01. Golden, 1995.

Grashey-Jansen, S. Optimizing irrigation efficiency through the consideration of soil hydrological properties: examples and simulation approaches. **Erdkunde**, v. 68, p. 33-48, 2014. Doi: 10.3112/erdkunde.2014.01.04.

Grossman, R. B.; Reinsch, T. G. **Bulk density and linear extensibility**. In: Dane, J.H. & Topp, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science of Society of America. 2002, p. 201-228.

Guan, F.; Xia, M.; Tang, X.; Fan, S. Spatial variability of soil nitrogen, phosphorus and potassium contents in Moso bamboo forests in Yong'an City, China. **Catena**, v. 150, p. 161–172, 2017. Doi: 10.1016/j.catena.2016.11.017.

Gubiani, P.I.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v. 36, p. 664-668, 2006. Doi: 10.1590/S0103-84782006000200049.

Gunarathna, M.H.J.P.; Sakai, K.; Nakandakari, T.; Mommi, K.; Kumari, M.K.N.; Amarasekara, M. G. T. S. Pedotransfer functions to estimate hydraulic properties of tropical Sri Lankan soils. **Soil & Tillage Research**, v. 190, p. 109-119, 2019. Doi: 10.1016/j.still.2019.02.009.

Horne, D.J.; Scotter, D.R. The available water holding capacity of soils under pasture. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 165-171, 2016. Doi: 10.1016/j.agwat.2016.07.012.

Isaaks, E.H.; Srivastava, M.R. **Applied Geostatistics** (No. 551.72 ISA), 1989.

Knotters, M.; Brus, D.J.; Voshaar, J.O. A comparison of kriging, co-kriging and kriging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. **Geoderma**, v. 67, p. 227–246, 1995. Doi: 10.1016/0016-7061(95)00011-C.

Liao, K.; Xu, S.; Wu, J.; Zhu, Q. Spatial estimation of surface soil texture using remote sensing data. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 59, p. 488–500, 2013. Doi: 10.1080/00380768.2013.802643.



Liu, Z.; Liu, Y.; Baig, M. Biophysical effect of conversion from croplands to grasslands in water-limited temperate regions of China. **Science of Total Environment**, v. 648, p. 315–324, 2018. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.128.

Mcneill, S.J.; Lilburne, L.R.; Carrick, S.; Webb, T.H.; Cuthill, T. Pedotransfer functions for the soil water characteristics of New Zealand soils using S-map information. **Geoderma**, v. 326, p. 96-110, 2018. Doi: 10.1016/j.geoderma.2018.04.011.

Merdun, H.; Çinar, Ö.; Meral, R.; Apan, M. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. **Soil & Tillage Research**, v. 90, p. 108-116, 2006. Doi: 10.1016/j.still.2005.08.011.

Nguyen, P.; Van Le, K.; Botula, Y.D.; Cornelis, W.M. Evaluation of soil water retention pedotransfer functions for Vietnamese Mekong Delta soils. **Agricultural Water Management**, v. 158, p. 126-138, 2015. Doi: 10.1016/j.agwat.2015.04.011.

Oliveira, L.B.; Ribeiro, M.R.; Jacomine, P.K.T.; Rodrigues, J.V.; Marques, F.A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 35-47, 2002.

Patil, N.G.; SINGH, S.K. Pedotransfer functions for estimating soil hydraulic properties: a review. **Pedosphere**, v. 26, p. 417-430, 2016. Doi: 10.1016/S1002-0160(15)60054-6.

Pham, K.; Kim, D.; Yoon, Y.; Choi, H. Analysis of neural network based pedotransfer function for predicting soil water characteristic curve. **Geoderma**, v. 351, p. 92-102, 2019. Doi: 10.1016/j.geoderma.2019.05.013.

Ramos, T. B.; Horta, A.; Gonçalves, M. C.; Martins, J. C.; Pereira, L. S. Development of ternary diagrams for estimating water retention properties using geostatistical approaches. **Geoderma**, v. 230-231, p. 229-242, 2014. Doi: 10.1016/j.geoderma.2014.04.017.

Robertson, G.P. **GS+: Geostatistics for the environmental sciences**. Version 5.03 Beta. Gamma Design Software, Plainwell, 1998.

Rosa, R.D.; Paredes, P.; Rodrigues, G.C.; Alves, I.; Fernando, R.M.; Pereira, L.S.; Allen, R.G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 1. Background and

computational strategy. **Agricultural Water Management**, v. 103, p. 8-24, 2012. Doi: 10.1016/j.agwat.2016.06.028.

Rustano, M.J.; Booij, M.J.; Wösten, H.; Hoekstra, A.Y. Application and recalibration of soil water retention pedotransfer functions in a tropical upstream catchment: case study in Bengawan Solo, Indonesia. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 65, p. 307-320, 2017. Doi: 10.1515/johh-2017-0020.

Saxton, K.E.; Rawls, W.J.; Romberger, J.S.; Papendick, R.I. Estimating generalized soil water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, p. 1031-1036, 1986. Doi: 10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x.

Saxton, K.E.; Willey, P.H. **The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation**. Singh, V.P.; Frevert, D.K. (Eds.), Watershed Models, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 401-435, 2006.

Shahriari, M.; Delbari, M.; Afrasiab, P.; Pahlavan-Rad, M.R. Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran. **Catena**, v. 182, p. 104149, 2019. Doi: 10.1016/j.catena.2019.104149.

Smith, J.L.; Halvorson, J.J.; Papendick, R.I. Using multiple-variable indicator kriging for evaluating soil quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 743-749, 1993. Doi: 10.2136/sssaj1993.03615995005700030020x.

Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Raes, D.; Fereres, E. AquaCrop - AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water. I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 426-437, 2009. Doi: 10.2134/agronj2008.0139s.

Tomasella, J.; Hodnett, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, p. 190–202, 1998. Doi: 10.1097/00010694-199803000-00003.

Trangmar, B.B.; Yost, R.S.; Wade, M.K.; Uehara, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45-94, 1985. Doi: 10.1016/S0065-2113(08)60673-2.

Twarakavi, N.K.C.; Šimůnek, J.; Schaap, M.G. Development of pedotransfer functions for estimation of soil hydraulic parameters using support vector machines. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, p. 1443-1452, 2009. Doi: 10.2136/sssaj2008.0021.

Vettori, L.; Pierantoni, H. **Análise granulométrica: novo método para determinar a fração argila**. Rio de Janeiro: Escritório de Pedologia e FertilidadedeSolos,1968. 8p. (Boletim Técnico 3).

Webster, R.; Oliver, M.A. **Geostatistics for Environmental Scientist**. John Wiley and Sons, 2001.

Wheeler, D.M.; Ledgard, S. F.; Klein, C.A.M.; Monaghan, R.M.; Carey, P.L.; McDowell, R.W.; Johns, K.L. OVERSEER<sup>®</sup> nutrient budgets: moving towards on-farm resource accounting. **NZ Grassland Association**, v. 65, p. 191-194.

Wösten, J.H.M.; Pachepsky, Y.A.; Rawls, W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 123–150, 2001. Doi:10.1016/S0022-1694(01)00464-4.

Zhang, Y.; Schaap, M.G. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). **Journal of Hydrology**, v. 547, p. 39-53, 2017. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.004.



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A intensificação da agricultura é um dos fatores que contribuem para aumentar a produção de alimentos e alavancar a lucratividade econômica. No entanto, o cultivo contínuo, as práticas convencionais de manejo, tendem a deteriorar a qualidade do solo, afetando diretamente processos que envolvem a qualidade física do solo. Concomitantemente ao exposto, a intensificação dos sistemas de uso e ocupação do solo, levam também ao uso de métodos que necessitem aprimorar as práticas de irrigação, junto a isto, é disponibilizado diversos modelos que necessitam de parâmetros ou variáveis hidráulicas de solo, e que em muitas situações, são de difícil mensuração, e nem sempre se encontram facilmente disponíveis na literatura e de forma pontual sem a necessidade de aplicação de equações. Neste trabalho, propomos dois objetivos, (i) Avaliar a qualidade física de solos em áreas irrigadas por aspersão em regiões tropicais e subtropicais do Brasil a partir de índices indicadores da qualidade de solos e atributos físicos; (ii) Desenvolver diagramas ternários de pedotransferência que estimem a retenção e armazenamento de água no solo a partir da abordagem geoestatística.

Estudar a qualidade física do solo em macro escala, se torna relevante em virtude da possibilidade de associação com práticas de cultivos que são praticadas nas diversas regiões do Brasil. Desta forma, este estudo, possibilitou identificar o comportamento físico do solo nos principais centros agrícolas no Brasil, os resultados mostraram que apesar da literatura apontar elevados níveis de produtividades, principalmente aos Estados de Paraná e Rio Grande do Sul, a qualidade física destes solos (macroporosidade, índice S, energia integral e o percentual de áreas com limitações em macroporosidade e densidade do solo) apontam a sérias limitações que podem vir a ocorrer nestas regiões em função da acelerada e crescente demanda produtiva associada as práticas de irrigação. Em conformidade a isto, Estados de Mato Grosso e Goiás na faixa Centro-Oeste, mostraram a partir das áreas amostradas comportamento físico suficientemente adequado, entretanto, não se descarta a possibilidade de áreas com limitações severas, principalmente pelo fato das limitações em macroporosidade possibilitar inferir sobre uma série de processos que venha a ocorrer nestas localidades.

A previsão do fluxo de água nos sistemas de cultivo e na zona radicular requer o conhecimento das propriedades de retenção de água no solo. Os bancos de dados, frequentemente contêm valores ausentes, especialmente em áreas remotas, devido à dificuldade, custo e problemas de tempo dos métodos de medição, que incluem amostras não perturbadas e equipamentos específicos de laboratório, como placas de pressão, câmeras extratoras ou equipamentos de ponto de orvalho. Aos objetivos propostos no desenvolvimento

de diagramas ternários, os resultados foram excelentes, em um primeiro ponto no que se refere a quantidade de observações referentes ao banco de dados utilizados; e em um segundo momento, referente a técnica estatística aplicada, possibilitar a espacialização para toda a faixa do diagrama textural, de modo que coordenadas não conhecidas associadas a valores de areia, silte e argila pudessem ser associadas a um valor de conteúdo de água; em um terceiro momento destaca-se a importância na subdivisão de grupo de diagramas por faixa de atributos físicos (porosidade total e densidade do solo), como visto no Estudo I, principalmente a densidade do solo sendo um dos fatores controladores das condições físicas atuais destes solos. Sendo assim, diagramas ternários podem atuar como ferramentas úteis e simplificadas para estimar essas propriedades hidráulicas do solo apenas aplicando a distribuição de tamanho de partículas, desde que ocorra um agrupamento por propriedades estruturais.