

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO
E DA ÁGUA



Dissertação

**Efeitos da sistematização nos atributos físico-hídricos em solo de Terras
Baixas, avaliados por meio de ferramentas de estatística clássica e de
geoestatística**

Alexssandra Dayanne Soares de Campos

Pelotas, 2018

Alexssandra Dayanne Soares de Campos

Efeitos da sistematização nos atributos físico-hídricos em solo de Terras Baixas, avaliados por meio de ferramentas de estatística clássica e de geoestatística

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências do Solo. (Área do conhecimento: Manejo e Conservação do Solo e da Água).

Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Timm

Coorientador: Pesq. Dr. José Maria Barbat Parfitt

Pelotas, 2018

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

C198e Campos, Alexssandra Dayanne Soares de

Efeitos da sistematização nos atributos físico-hídricos em solo de Terras Baixas, avaliados por meio de ferramentas de estatística clássica e de geoestatística/Alexssandra Dayanne Soares de Campos;Luís Carlo Timm, orientador;José Maria Barbat Parfitt, coorientador.

— Pelotas, 2018.

78f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

1. Arroz irrigado. 2. Terras Baixas. 3. Sistematização.
4. Geoestatística. 5. Correlação de Spearman. I. Timm, Luís Carlos, orient. II. Parfitt, José Maria Barbat, coorient. III. Título.

CDD: 633.18

Alexssandra Dayanne Soares de Campos

Efeitos da sistematização nos atributos físico-hídricos em solo de Terras Baixas, avaliados por meio de ferramentas de estatística clássica e de geoestatística

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 20 de Abril de 2018

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luís Carlos Timm (Presidente), Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP.

Prof^a. Dra. Tírzah Moreira Siqueira, Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^a. Dra. Luciana Marini Kopp, Doutora em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria.

Pesquisador Dr. Adilson Luis Bamberg, Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas.

Dedico:

À Deus

Aos meus avós Inácio e Luiza

À minha mãe Sebastiana e padrasto Carlos Alfredo

Aos meus tios Luciene e Noel

Ao meu irmão João Alfredo

À minha Prima Mayara

Ao meu namorado Adílson

AGRADECIMENTOS

À Deus em primeiro lugar, motivo da minha fé, por estar comigo em todos os momentos dessa caminhada e por tudo o que me concedeste, em especial por ter me agraciado com pessoas especiais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água (MACSA) e a Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), aos professores pelo conhecimento concedido e amizade.

A Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

A Embrapa Clima Temperado pelo apoio, disponibilidade de recursos e espaço físico, indispensáveis para execução deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Luís Carlos Timm, por ter me acolhido com todo respeito, mesmo não sendo da área agrônômica concedeu espaço para junto trabalhar, pelo ensinamentos acadêmicos e paciência, digo que foi um prazer e um grande aprendizado ter trabalhado com o senhor, diante disso só tenho a agradecer pelo grande profissional acadêmico.

Ao meu coorientador Pesquisador José Maria Barbat Parfitt, por todo tempo dispensado em transmitir seus conhecimentos na área de manejo de irrigação, pela amizade e apoio durante o tempo que precisei no entendimento do assunto do trabalho.

Agradeço aos meus familiares Jurê Soares, primeiramente pela minha educação, pelo carinho, pelo incentivo, apoio em todas as minhas decisões, principalmente minha vó Luiza Jurê Soares e vô Inacio Soares (*in memorian*) pelos ensinamentos, a minha mãe Sebastiana Jurê Bohlmann, Carlos Alfredo Bohlmann (Alemão), tia Luciene S. Jurê da Cunha, tio Noel da Cunha, mano João Alfredo Bohlmann e prima Mayara Soares, por sempre estarem na minha vida apoiando em todas as escolhas feitas na vida acadêmica e pessoal.

Ao meu namorado Adílson pela compreensão dos dias de desespero, pela amizade, sinceridade, respeito, confiança e dedicação em tudo que faz, da qual tenho grande admiração pelo profissional que a cada dia vem se tornando.

À família do meu namorado, na qual fui recebida com muito carinho e apoio em todas as escolhas que tenho feito na minha vida.

A equipe de projetos XISTO Agrícola, Agroenergia e funcionários da Embrapa Clima Temperado, agradeço pelos ensinamentos que tive durante a graduação e as amizades que carreguei até os dias de hoje, pois foram de grande ajuda durante os dois anos do mestrado.

Aos amigos da turma de ingresso de 2016 do PPG-MACSA e aos que foram das disciplinas ministradas no programa, agradeço ao companheirismo nos estudos, nas trocas de experiências e nas festas. Aos colegas do programa o meu “muito obrigada” pelo convívio do dia-a-dia. E aos funcionários do Departamento de Solos, pela amizade, companheirismo e auxílio técnico.

Aos amigos da graduação em Agronomia Jorge, Jackson, Pâmela, Cristiano, Thais Brod muito obrigada pela convivência, pelo apoio e das rodas de chimarrão durante os dois anos.

A todos aqueles que de alguma forma fizeram parte da minha caminhada, meu sincero, muito obrigada.

Resumo

CAMPOS, Alexssandra Dayanne Soares de. **Efeitos da sistematização nos atributos físico-hídricos em solo de Terras Baixas, avaliados por meio de ferramentas de estatística clássica e de geoestatística**. 2018. 78f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

O arroz irrigado tem sido cultivado em solos de terras baixas, em áreas sistematizadas e em condições de inundação na região sul do Brasil. Poucos estudos têm focado nas alterações causadas pela sistematização do solo nas características de retenção e disponibilidade de água no solo. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da sistematização sobre a magnitude das propriedades físico-hídricas ligadas às características de retenção e disponibilidade de água na camada de 0-0,20 m de profundidade de um solo de terras baixas, bem como sobre a estrutura de variabilidade espacial dessas propriedades. O trabalho foi conduzido em uma área experimental de 1,0 ha, pertencente a Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão-RS, onde foi estabelecida uma malha regular de 100 pontos, espaçados de 10 m entre si em ambas as direções. Em cada ponto, foram coletadas amostras de solo preservadas e não preservadas, camada de 0-0,20 m, antes e depois de três meses da sistematização, para determinação das frações texturais (conteúdos de argila e areia), macro e microporosidade do solo, densidade do solo e da curva de retenção de água no solo. Cada curva de retenção experimental foi ajustada ao modelo de van Genuchten (1980), obtendo-se os parâmetros de ajustes θ_s , θ_r , α e n . No intuito de avaliar os efeitos da prática de sistematização, os conjuntos de dados foram submetidos à estatística descritiva e à geoestatística. Também foi avaliado o efeito da sistematização sobre a correlação entre os parâmetros θ_s , θ_r , α e n e as propriedades físicas do solo por meio do coeficiente de correlação de Spearman. A sistematização alterou as medidas estatísticas descritivas de posição, de dispersão e de formato dos conjuntos de dados e a estrutura de variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas do solo. Houve alteração na magnitude do coeficiente de correlação de Spearman entre as propriedades físico-hídricas ligadas às características de retenção e disponibilidade de água na camada de solo avaliada.

Palavras-chave: arroz irrigado, terras baixas, sistematização, geoestatística, correlação de Spearman.

Abstract

CAMPOS, Alexssandra Dayanne Soares de. **Land levelling effects on the lowland soil hydro-physical attributes, evaluated through classical statistics and geostatistical tools.** 2018. 78f. Dissertation (Master) – Graduate Program in Management and Conservation of Soil and Water. Federal University of Pelotas, Pelotas.

The irrigated rice has been cultivated in lowland soils of Southern Brazil under land levelling and flood irrigation conditions. Few studies have focused on the effect of land levelling operations on retention characteristics and water availability of lowland soils, mainly under anaerobic conditions. The objective of this work was to evaluate the effect of land levelling on the magnitude of the hydro-physical lowland soil properties related to retention characteristics and water availability in the 0-0.20 m layer and on their spatial variability structure as well. The work was carried out in a 1.0 ha experimental area, belonging to Embrapa Temperate Climate, Capão do Leão, Rio Grande do Sul state, Brazil. A regular grid of 100 points, spaced 10 m apart from each other at both directions, was established. At each point, preserved and no-preserved soil samples were collected in the 0-0.20 m layer, before and after three months of land levelling operations, to determine contents of clay and sand, macro and microporosity, soil density and the experimental soil water retention curve. Each experimental soil water retention curve was adjusted to the van Genuchten's model (1980), obtaining θ_s , θ_r , α and n parameters. In order to evaluate the effects of land levelling on soil hydro-physical properties, all datasets were submitted to descriptive statistics and geostatistics tools. The Spearman correlation coefficient was used to evaluate the effects of land levelling on the linear correlation between θ_s , θ_r , α and n parameters and each soil physical property. Land levelling operations altered the statistical descriptive measures of position, dispersion and format of each data set as well as the spatial variability structure of all studied soil hydro-physical properties. Spearman correlation coefficient values and signals were affected by land levelling operations in the topsoil properties of the experimental area.

Keywords: irrigated rice, lowland, land levelling, geostatistical, Spearman correlation

Lista de Figuras

Figura 1 Ilustração de um semivariograma experimental e teórico com seus respectivos parâmetros de ajuste.....	25
Figura 2 Ilustração dos modelos teóricos de semivariogramas comumente usados para descrever a estrutura de variabilidade espacial das propriedades de um solo.....	27
Figura 3 Localização da área experimental no mapa do Brasil e no estado do Rio Grande do Sul e vista aérea da área experimental.....	29
Figura 4 Malha de 100 pontos georreferenciados, espaçados de 10 x 10 m, estabelecida na área experimental, antes e após a sistematização.....	30
Figura 5 Ilustração da operação de sistematização da área experimental antes (A) e depois (B) da sistematização.....	31
Figura 6 Ilustração da coleta das amostras deformadas e indeformadas em cada ponto da malha experimental.....	32
Figura 7 Distribuição dos parâmetros θ_s e θ_r antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	40
Figura 8 Distribuição dos parâmetros α e n antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	41
Figura 9- Distribuição dos atributos Argila (%), Areia (%) e D_s (g/cm^3) antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	42
Figura 10- Distribuição dos atributos Macro (%) e Micro (%) antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	43
Figura 11- Classificação textural do solo nos 100 pontos amostrais, camada de 0-0,20 m, por meio do triângulo textural: antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	44
Figura 12- Curvas experimentais de retenção de água no solo antes e depois (B) da sistematização.....	45
Figura 13 – Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de θ_s (conteúdo de água no solo na condição de saturação ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)), antes (A) e depois (B) da sistematização.....	48
Figura 14 - Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de θ_r (conteúdo de água residual($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)), antes (A) e depois (B) da sistematização.....	49
Figura 15 - Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de α , antes (A) e depois (B) da sistematização.....	50

Figura 16 - Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de n , antes (A) e depois (B) da sistematização.....	51
Figura 17 - Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de Argila (%), antes (A) e depois (B) da sistematização.....	52
Figura 18 - Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de Areia (%), antes (A) e depois (B) da sistematização.....	53
Figura 19- Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de Densidade do solo (g.cm^{-3}), antes (A) e depois (B) da sistematização.....	54
Figura 20- Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de Macroporosidade (%), antes (A) e depois (B) da sistematização.....	55
Figura 21- Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de Microporosidade (%), antes (A) e depois (B) da sistematização.....	56
Figura 22 – Distribuição espacial dos valores de θ_s (conteúdo de água no solo na condição de saturação ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	57
Figura 23 - Distribuição espacial dos dados de θ_r (conteúdo de água residual ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B)....	58
Figura 24 - Distribuição espacial dos dados de α (kPa^{-1}) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	59
Figura 25 - Distribuição espacial dos dados de n na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	60
Figura 26 – Distribuição espacial dos dados de Argila (%) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	61
Figura 27 - Distribuição espacial dos dados de Areia (%) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	62
Figura 28 – Distribuição espacial dos dados de Densidade do Solo (D_s (g.cm^{-3})) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	63
Figura 29 - Distribuição dos dados de macroporosidade do solo (Macro, %) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	64
Figura 30 - Distribuição dos dados de microporosidade do solo (Micro, %) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).....	65

Lista de Tabelas

Tabela 1- Resultados da estatística descritiva e teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov (K-S) aplicados aos parâmetros físico-hídricos, antes e depois de três meses da sistematização.....37

Tabela 2- Modelos teóricos de semivariogramas das propriedades físico-hídricas do solo e respectivos parâmetros de ajustes e grau de dependência espacial (GDE)...46

Tabela 3- Valores dos coeficientes de correlação de *Spearman* calculados entre os conjuntos de dados físico-hídricos do solo avaliados antes da sistematização da área experimental, camada de 0-0,20 m.....67

Tabela 4- Valores dos coeficientes de correlação de *Spearman* calculados entre os conjuntos de dados físico-hídricos do solo avaliados, nos mesmos pontos amostrais, depois da sistematização da área experimental, camada de 0-0,20 m.....69

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. HIPÓTESES E OBJETIVOS	16
2.1-HIPÓTESE.....	16
2.2-OBJETIVO GERAL.....	16
2.3-OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Solos de terras baixas.....	18
3.2 Manejo de irrigação.....	19
3.3 Sistematização.....	20
3.4 Propriedades físico-hídricos do solo.....	21
3.4.1 Curva de retenção de água no solo.....	22
3.5 Geoestatística no estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo.....	23
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4.1 Caracterização da área experimental.....	29
4.2 Implantação do experimento.....	31
4.3 Avaliação de atributos físico-hídricos do solo.....	31
4.4 Análise dos dados.....	33
4.4.1 Estatística clássica.....	33
4.4.2 Triângulo textural e curva de retenção de água no solo (CRA).....	33
4.4.3 Geoestatística.....	34
4.4.4 Análise de correlação de spearman.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
5.1 Estatística descritiva aplicada aos conjuntos de dados.....	36
5.2 Análise dos dados granulométricos.....	43
5.3 Estrutura de variabilidade espacial dos parâmetros físico-hídricas do solo.....	46
5.4 Correlação entre os parâmetros físico-hídricos.....	66
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural lentamente renovável encontrado em diferentes posições na paisagem, sendo que sua origem e desenvolvimento ocorreram por diversos fatores ambientais. O Rio Grande do Sul (RS) possui uma grande variedade de tipos de solo, decorrente da combinação dos diversos fatores de intemperismo, formando, assim, distintos padrões de ocupação das terras no uso agrícola por meio do desenvolvimento regional.

A região sul do estado do RS tem a cultura do arroz irrigado como uma grande fonte para a economia da região de terras baixas. Esses solos mostram-se aptos ao desenvolvimento do cultivo de arroz devido as suas características pedogenéticas, apresentando: profundidade efetiva ao desenvolvimento do sistema radicular da cultura; densidade alta; baixa porosidade; elevada relação micro/macroporosidade; baixa velocidade de infiltração da água no solo e drenagem deficiente, principalmente no horizonte B.

As áreas de terras baixas contêm áreas sistematizadas, a qual possui cerca de 200 mil ha, sendo adotada principalmente em áreas de cultivo arrozeiro, com intuito de melhorar as condições de infraestrutura da lavoura, ligadas à irrigação e à drenagem. A prática da sistematização consiste na uniformização da superfície do solo, através de cortes, nas partes mais elevadas, e aterro, nas partes mais baixas da área, proporcionando maior eficiência e rendimento nas operações mecanizadas.

No sul do Brasil e em outros países, o arroz tem sido cultivado em áreas sistematizadas e com condições de inundação do solo. Entretanto, tem aumentado o uso da irrigação por aspersão (sistema pivô central e sistema de irrigação de deslocamento lateral) na produção do arroz em áreas de terras baixas. Poucos estudos têm focado nas características da retenção e disponibilidade de água no solo nessas áreas da cultura de arroz, desenvolvido em ambiente de condições aeróbicas.

Desta forma, torna-se crucial quantificar as alterações causadas nas magnitudes das propriedades físico-hídricas (densidade do solo, macro/microporosidade, areia, argila e curva de retenção da água no solo) da camada superficial do solo, resultantes da prática da sistematização (corte, aterro e suavização da camada superficial), bem como nas suas estruturas de variabilidade espacial, no intuito de racionalizar o manejo da água e de nutrientes para a produção de arroz e de outras culturas (soja, milho, sorgo, etc.) em áreas de terras baixas do sul do Brasil. Neste sentido, ferramentas da Geoestatística (semivariogramas, semivariogramas cruzados, krigagem, etc.) permitem a identificação e quantificação da estrutura de variabilidade espacial das propriedades do solo visando um melhor entendimento da dinâmica da água no sistema solo em áreas de terras baixas já que consideram a posição no espaço e a possível dependência entre as observações da(s) variável(is) em estudo.

2. HIPÓTESES E OBJETIVOS

2.1- Hipótese

Os cortes e aterros, provocados pela prática da sistematização, alteram as propriedades físicas e hídricas relacionadas a retenção e disponibilidade de água na camada superficial do solo.

2.2- Objetivo Geral

Avaliar o efeito da sistematização sobre a magnitude das propriedades físico-hídricas ligadas às características de retenção e disponibilidade de água na camada de 0-0,20 m de um solo de terras baixas, bem como sobre a estrutura de variabilidade espacial dessas propriedades.

2.3- Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito da sistematização sobre as medidas estatísticas (medidas de posição, de dispersão e de formato), que caracterizam as distribuições das propriedades físico-hídricas ligadas às características de retenção e disponibilidade de água, da camada de 0-0,20 m, de um solo de terras baixas;

- Identificar qual(is) propriedade(s) físico-hídrica(s) da camada do solo de 0-0,20 m possui(em) semelhança entre si, depois da sistematização, a partir da análise do coeficiente de correlação de Spearman;

- Avaliar o efeito da sistematização na estrutura de variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas ligadas às características de retenção e disponibilidade de água de um solo de terras baixas, camada de 0-0,20 m, por meio de ferramentas geoestatísticas (semivariogramas);

- Analisar a modelagem da variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas, antes e depois da sistematização, no sentido de comparar o efeito da sistematização na distribuição espacial das propriedades do solo ligadas às

características de retenção e disponibilidade de água da camada de 0-0,20 m de um solo de terras baixas, por meio da técnica de interpolação geoestatística de krigagem ordinária.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- Solos de terras baixas

As terras baixas no Rio Grande do Sul (RS) ocupam 4,4 milhões de hectares, o que equivale a 16,5% da sua área total, desconsiderando as áreas de lagoas. As áreas de terras baixas apresentam principalmente as seguintes classes de solos: os Planossolos (incluindo Gleissolos associados) ocupam 54,3% do território, seguido dos Neossolos (17,2%), Chernossolos (15,1%), Gleissolos (7,3%), Argissolo (3,9%), Vertissolos (1,3%) e Organossolos (0,9%) (PINTO, MIGUEL E PAULETTO, 2017).

Segundo Denardin (2017), as classes de solo ocorrem em relevo plano a suave ondulado e possuem características comuns de hidromorfismo, oriundas tanto da posição topográfica quanto da presença de um horizonte subsuperficial adensado e hidromórfico, provindos da iluviação de argila. Sendo assim, esses solos, geralmente encontrados em cotas mais baixas no relevo, ficam sujeitos à saturação por água, a qual, por conseguinte, causa alterações nas características dos atributos do solo (BERNARDI, 2003).

É pertinente ressaltar que os atributos físicos do solo são os principais responsáveis pelas modificações, em determinadas condições, das propriedades químicas e biológicas do solo. Analisando a porosidade do solo em situação de saturação, por exemplo, a água adentra os macroporos, que outrora eram preenchidos por ar, e, nesta situação, ocorre redução do potencial redox, aumento da condutividade elétrica e aumento do pH (DENARDIN, 2017). Outro exemplo é a densidade do solo que está relacionada com a macroporosidade e microporosidade, e por isso ocorre a elevação, decorrente da dificuldade na drenagem, e a redução da condutividade hidráulica do solo, principalmente nas camadas subsuperficiais do solo.

Atualmente, no sul do Brasil, o uso da irrigação por aspersão na produção de arroz em áreas de terras baixas tem aumentado devido à diminuição da disponibilidade de água nessa região. Apesar disso, poucos estudos têm se concentrado nas condições hídricas do solo para a produção de arroz, mais

especificamente no efeito da sistematização no manejo da água em ambientes aeróbicos. Portanto, quantificar os efeitos da sistematização (operações de corte, aterro e suavização) nas propriedades físico-hídricas da camada superficial do solo relacionadas ao manejo da irrigação é crucial visando um melhor entendimento deste novo sistema de produção agrícola em terras baixas no intuito de uma produção agrícola sustentável de arroz e outras culturas (soja, sorgo, milho etc.) nessas áreas.

3.2- Manejo de irrigação

A irrigação tem como função principal corrigir o déficit hídrico do solo, permitindo que a planta mantenha o fluxo contínuo de água e nutrientes absorvidos no solo, favorecendo o crescimento e desenvolvimento das plantas e auxiliando no aumento da produtividade (COELHO et al., 2011). Nesse viés, García-Garizábal e Causapé (2010) afirmam que o manejo adequado da irrigação aumenta o rendimento agrícola. No entanto, quando realizado de maneira errônea, um dos principais impactos da prática de irrigação inadequada seria a redução dos fluxos naturais de água (JI et al., 2006).

O Rio Grande do Sul é responsável por mais de 80% da irrigação na região sul do Brasil, sendo o método de irrigação por superfície empregado em 89,66% das áreas irrigadas, seguido pelo de irrigação por aspersão (7,93%) e por outros métodos que tem sido adotados em 1,51% das áreas irrigadas (SARAIVA; SOUZA, 2012).

Na lavoura orizicola predominantemente tem sido empregado o método de irrigação por superfície (sistema de inundação) em que o consumo de água é elevado. Diante disso, o sistema de produção irrigado por aspersão tem sido apontado como uma alternativa para anos de poucas chuvas, sendo que sua aplicação resulta em um rendimento considerável na produtividade final (ARF et al., 2000). Kato e Katsura (2014) observaram uma economia aproximada de 50% no uso da água pela cultura do arroz irrigado por aspersão, comparando com o irrigado por inundação. A irrigação por aspersão também favorece o aproveitamento da água da chuva, em relação ao sistema inundado (PINTO et al., 2016).

De acordo com Bernardi (2003), a eficiência deste sistema de irrigação deve estar focada na adoção de tecnologias, práticas e procedimentos para a maior eficiência do uso da água, dada não apenas a limitação da disponibilidade hídrica como também de recursos financeiros. Neste sentido, a prática de sistematização do

terreno apresenta ser eficiente e bastante vantajosa em áreas de terras baixas já que possibilita uma maior uniformidade de aplicação e distribuição da água na lavoura.

3.3- Sistematização

A sistematização é uma técnica de preparo do solo que retorna algumas vantagens na produção de arroz, como o menor consumo de água, o manejo mais racional dos sistemas de irrigação e uma maior eficiência no uso de máquinas (PARFITT et al., 2014).

A quantidade de área sistematizada no RS está em torno de 200 mil ha, sem o gradiente de declividade, sendo conhecida por cota zero em lavouras de arroz irrigado (OLIVEIRA, 2006). Esta prática é aplicada para distribuir uniformemente a água na lavoura (BRYE et al., 2005; PETER et al., 2014) e melhorar a rentabilidade agrícola (JAT et al., 2009), uma vez que é usada para ajustar a superfície do solo e padronizar a sua inclinação, facilitando assim, a distribuição de água na irrigação e melhorando as condições de campo para outras práticas agrícolas (BRYE et al., 2006).

Sharifi et al. (2014) mostram que a sistematização do solo pode apresentar efeitos negativos nas propriedades do solo devido ao intenso movimento causado pelas operações de corte e aterro durante a sistematização. Parfitt et al. (2014) corroboram com esta afirmação, ao relatar que o movimento do solo pode afetar a produtividade da cultura, modificando as propriedades físicas do solo e prejudicando o desenvolvimento radicular das plantas.

Os efeitos da prática da sistematização na magnitude, variância e variabilidade espacial das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo tem sido avaliado por diversos pesquisadores (KUOTSU et al., 2014; PETER et al., 2014).

Os trabalhos desenvolvidos por Peter et al. (2014) indicaram maiores coeficientes de escoamento das perdas do solo em áreas sistematizadas, convertidos em terras cultivadas, quando comparados aos das áreas não sistematizadas. No entanto, a sistematização provoca alterações no ambiente físico de desenvolvimento das culturas, isto é, a degradação ou a alteração das propriedades do solo (BORSELLI et al., 2006).

Kosmas et al. (2000) afirmam que a movimentação do solo pode ocasionar diferença nas profundidades do perfil do solo útil às plantas e proporcionar fatores críticos para o desenvolvimento das plantas. Em contrapartida, de acordo com Martínez-CasasNovas e Ramos (2009), a prática de sistematização nas lavouras

agrícolas favorece a uniformidade do terreno, desse modo, facilitando o movimento da infiltração de água no solo e favorecendo as práticas de mecanização.

3.4- Propriedades físico-hídricas do solo

O solo é um sistema trifásico disperso que lhe confere um arranjo geométrico o qual é caracterizado pela sua porosidade total. Assim, a adoção de um manejo adequado do solo é de extrema importância, pois o sistema poroso está estreitamente ligado ao armazenamento e o movimento de solutos e na movimentação de gases dentro do solo (MION et al., 2012).

O manejo inadequado do solo pode modificar suas propriedades físicas. A utilização do solo na pecuária, através do pisoteio animal, ou quando utilizado na agricultura, por meio do uso de maquinários agrícolas e do sistema de cultivo, de modo inadequado, pode acarretar alterações como: diminuição do volume de macroporos e da taxa de infiltração de água no solo; e aumento da resistência à penetração de raízes, decorrente dentre outros fatores, da compactação do solo (REINERT et al., 2008).

Conforme Schäffer et al. (2007) e Portugal, Costa e Costa (2010), as principais alterações decorrentes da sistematização sobre as propriedades do solo estão relacionadas com a densidade do solo, a porosidade, a agregação, a infiltração e a capacidade de retenção de água no solo. Mantovani, Bernardo e Palaretti (2007) relatam que a sistematização pode ocasionar o aumento da densidade e, conseqüentemente, a redução da porosidade, o que, por conseguinte, dificulta a infiltração de água no solo.

Os atributos físicos do solo têm as seguintes divisões: mecânicos (textura, densidade do solo, agregação e porosidade) e os hidrológicos (capacidade de água disponível e de taxa de infiltração para o desenvolvimento das plantas) (ARSHAD; MARTIN, 2002). O efeito das práticas de manejo no solo pode causar aumento da densidade e, conseqüentemente, redução da porosidade, prejudicando, com isso, a infiltração de água no solo (MANTOVANI et al., 2007).

Segundo Hu et al. (2008), a variabilidade de umidade nas camadas do solo ocorre no espaço e no tempo, podendo assim, prejudicar o manejo adequado da água do solo. A densidade do solo (D_s) é uma propriedade usada para caracterizar a parte física da estrutura do solo, sendo um indicador do seu estado de compactação (GONÇALVES et al., 2013).

Neste contexto, cabe salientar que a infiltração de água no solo é um dos processos que melhor reflete as condições físico-hídricas do solo, pois a qualidade estrutural condiciona uma distribuição do tamanho de poros, favorecendo no crescimento de raízes, na aeração e na infiltração de água no solo (POTT; DE MARIA, 2003). A curva de retenção de água no solo (CRA) está intimamente relacionada com as condições físico-hídricas de um solo e tem sido utilizada para um melhor entendimento da dinâmica e manejo da água no solo (VAN GENUCHTEN, 1980; DEXTER; BIRD, 2001).

3.4.1- Curva de Retenção de água no solo

A curva de retenção de água (CRA) expressa a relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial, ou seja, a energia com que a água está retida no solo. Pode ser determinada experimentalmente no laboratório por meio de equipamentos (mesa de tensão e membranas de pressão de Richards) ou estimada por meio de modelos matemáticos. Quando determinada experimentalmente, o modelo matemático proposto por van Genuchten (1980) tem sido o mais usado para transformar seu comportamento discreto em contínuo. Libardi (2012) comenta que a CRA pode variar no tempo e no espaço.

A água se movimenta no solo devido a diferença de seu potencial total em diferentes pontos no seu interior. Para calcular o potencial total da água em um determinado ponto no solo, Libardi (2012) menciona que ele corresponde a somatória de cinco potenciais: temperatura (ψ_T), pressão (ψ_P), gravitacional (ψ_g), osmótica (ψ_{os}) e matricial (ψ_m), sendo que o potencial de temperatura é, muitas vezes, desprezível, deixando de ser utilizado.

Segundo Devalo (2013), o conjunto de dados experimentais (ψ_m versus conteúdo de água no solo θ) determinados por meio da mesa de tensão e da câmara de pressão de Richards é, geralmente, ajustado ao modelo matemático proposto por van Genuchten (1980) para descrever a curva de retenção da água em um solo, descrito na equação 1:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot |\psi_m|)^n]^m} \quad (1)$$

sendo:

θ : conteúdo de água do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

θ_r : conteúdo de água residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

θ_s : conteúdo de água no solo saturado ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

ψ_m : potencial matricial da água no solo (kPa);

α , n e m : parâmetros de ajustes do modelo de van Genuchten (1980) (α em kPa^{-1} ; n e m são adimensionais).

A determinação da curva de retenção de um solo é importante para descrever as suas características de retenção e disponibilidade de água, sobretudo para seu manejo sustentável por meio de práticas agrícolas adequadas (REICHARDT e TIMM, 2012). Cabe salientar que segundo Costa; Oliveira e Kato (2008), a curva de retenção é de grande importância na área de irrigação, pois fornece as informações necessárias para a determinação do conteúdo de água disponível no solo e outros dados básicos para o manejo da água de irrigação.

3.5- Geoestatística no estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo

A geoestatística tem como objetivo a caracterização espacial de uma variável de interesse, por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espacial, com determinação das incertezas associadas (VIEIRA, 2000; LANDIM, 2013).

Segundo Barrigossi et al. (2002), a Geoestatística é uma ferramenta que pode auxiliar na caracterização da variabilidade da propriedade a ser estudada, já que considera a posição da(s) variável(is) na estimativa da correlação espacial entre as variáveis em função da distância de separação entre elas.

Para obtenção do modelo que melhor descreve a estrutura de correlação espacial entre os pontos adjacentes de uma variável, calcula-se primeiramente o semivariograma experimental que expressa essa correlação em função da distância e, em seguida, ajusta-se um modelo matemático, denominado de semivariograma teórico da variável.

O semivariograma expressa a medida do grau de dependência espacial entre observações adjacentes da variável no domínio amostral onde a malha experimental foi estabelecida. Assume-se, assim, estacionariedade nos incrementos (LANDIM,

2006), sendo um estimador imparcial e sem tendência, contudo podendo ser afetado quando se têm observações atípicas (ISAACKS; SRIVASTAVA, 1989).

Entretanto, o semivariograma é uma função que relaciona a semivariância com a distância de separação (h) e a direção de qualquer par de localizações $Z(x)$ e $Z(x+h)$, caso o comportamento da variável seja anisotrópico. Ao semivariograma experimental ajusta-se um modelo teórico cujos principais parâmetros de ajustes são: alcance (a), efeito pepita (c_0) e patamar ($C+c_0$) (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

Contudo o semivariograma é um gráfico que representa a estimativa das semivariâncias (γ) dos dados em função da distância de separação entre os pares de observações da variável. A variância entre o par de observações $Z(x)$ e $Z(x+h)$ pode ser calculada por:

$$\{\text{Var}[Z(x_i) - Z(x_i+h)]\} \quad (3)$$

Note que $\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]$ é a variância dos dados separados por uma distância h , mas, na expressão abaixo (equação 4), esta variância é dividida por dois. Sob a suposição de tendência zero, temos: $E[Z(x+h)] = E[Z(x)]$ e, portanto:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \{E[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad (4)$$

e uma estimativa de $\gamma(h)$ chamada de $\hat{\gamma}(h)$ é dada pela equação 5:

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

em que:

$n(h)$ é o número de pares $Z(x)$ e $Z(x+h)$ separados pela distância h . A Equação 5 é denominada de estimador clássico de semivariância, o qual é atribuído a Matheron (1963). A Figura 1 apresenta uma ilustração de um semivariograma experimental e um teórico com os respectivos parâmetros de ajustes.

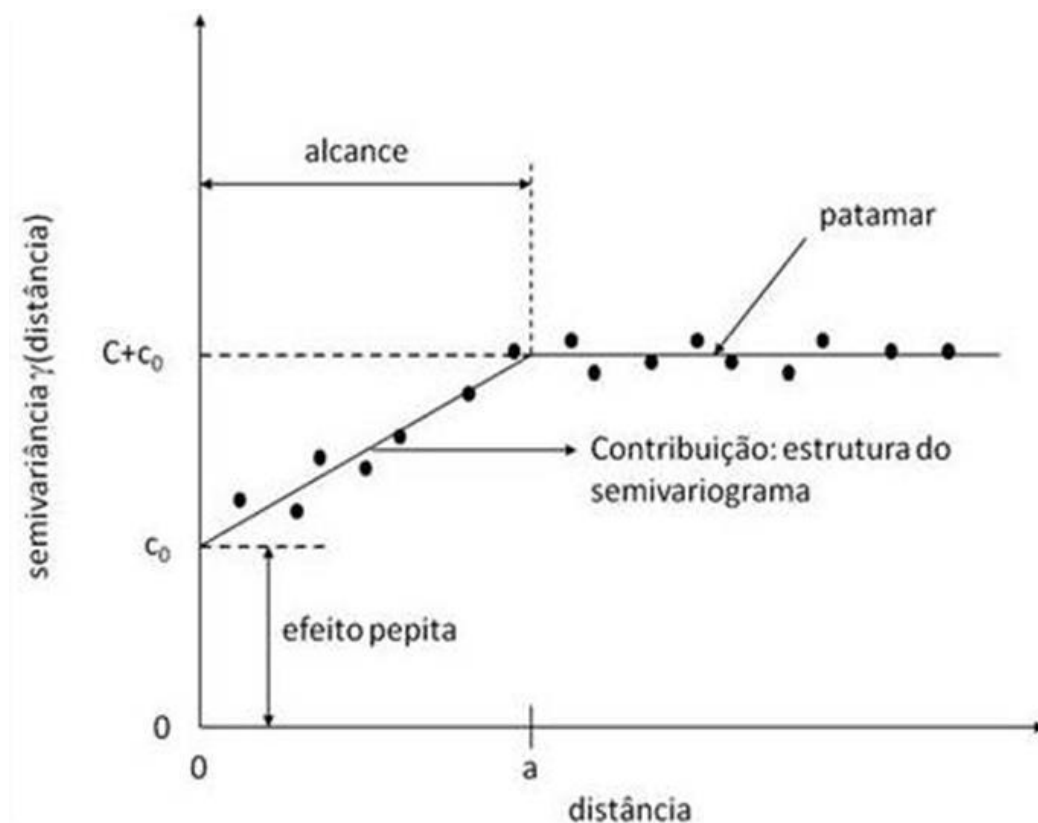


Figura 1- Ilustração de um semivariograma experimental e teórico com seus respectivos parâmetros de ajustes. Fonte: REICHARDT; TIMM (2012), p.372.

Antes de apresentar os modelos de semivariogramas teóricos com patamar mais comumente adotados na literatura, é pertinente conhecer o significado de cada um dos parâmetros de ajustes do semivariograma teórico, a saber: efeito pepita (c_0) - valor da semivariância para distância zero e representa o componente da variação ao acaso e pode ser atribuído a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados a intervalos suficientemente pequenos para mostrar o comportamento espacial subjacente do fenômeno em estudo; alcance (a) - distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando a distância além da qual os pares de observações não são correlacionados entre si, ou seja, o alcance de um processo espacial pode ser visto como a distância máxima de correlação entre as variáveis $Z(x)$ e $Z(x+h)$; patamar ($C+c_0$) - valor em que a semivariância se estabiliza em torno de um valor constante.

De acordo com Journel e Huijbregts (1978), alguns modelos teóricos de semivariograma são mais utilizados por explicarem a variabilidade da maioria dos fenômenos espaciais, os quais são apresentados a seguir:

a) Modelo esférico:

O modelo esférico, é representado pela seguinte equação 6 (REICHARDT; TIMM, 2012), apresenta um crescimento rápido da origem, sendo este modelo o de maior ocorrência no estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo (TRANGMAR; YOST; UEHARA ,1985).

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + C \left[\frac{3h}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{em } h \geq 0 \\ c_0 + C & \text{em } h > a \end{cases} \quad (6)$$

em que:

$\gamma(h)$: é a semivariância estimada para um determinado h ;

c_0 : efeito pepita;

C : contribuição (variância estrutural);

a : alcance da dependência espacial;

h : distância de separação entre os pares de observações.

b) Modelo exponencial

A diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que este modelo atinge o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância na qual o valor da semivariância corresponde a 95% do patamar (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Os parâmetros c_0 e C , para o modelo exponencial é representado pela seguinte equação 7 (REICHARDT; TIMM, 2012), são determinados da mesma maneira que para o esférico.

$$\gamma(h) = c_0 + C [1 - \exp(-h/a)] \text{ em } h \geq 0 \quad (7)$$

c) Modelo gaussiano:

O modelo gaussiano de semivariograma é representado pela seguinte equação 8 (REICHARDT; TIMM, 2012).

$$\gamma(h) = c_0 + C \{1 - \exp(-(h/a)^2)\} \text{ em } h \geq 0 \quad (8)$$

O modelo gaussiano também alcança o patamar assintoticamente, sendo o alcance prático definido como a distância na qual o valor da semivariância corresponde a 95% do patamar. O modelo gaussiano tem sido usado muitas vezes para modelar fenômenos extremamente contínuos. Na Figura 2 são ilustrados os 3 modelos teóricos de semivariogramas.

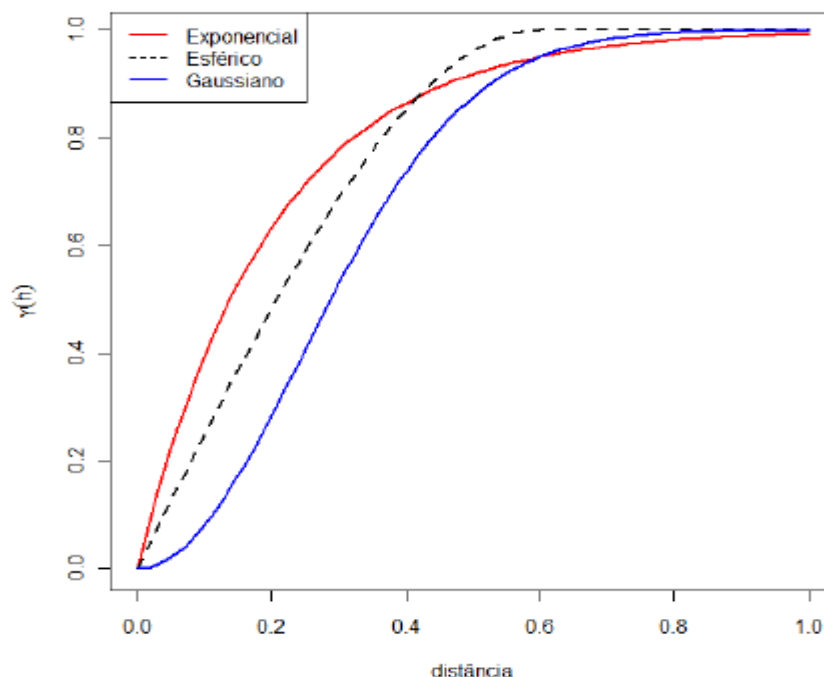


Figura 2- Ilustração dos modelos teóricos de semivariogramas comumente usados para descrever a estrutura de variabilidade espacial das propriedades de um solo.
Fonte: Rossoni (2011).

A geoestatística é, portanto, usada no mapeamento da variabilidade espacial de propriedades do solo. Isto se dá por meio da krigagem e da co-krigagem que são métodos de interpolação, cujas principais características são ausência de viés e variância mínima do conjunto de dados (VIEIRA, 2000).

A krigagem é um conjunto de técnicas de regressão linear generalizadas para minimizar uma variância de estimação, a partir de um modelo de covariância (DEUTSCH; JOURNAL, 1998).

Uma vez que a aplicação de sistemas de manejo na agricultura exige informações precisas sobre a variação espacial dos atributos do solo e da cultura (KERRY; OLIVER, 2008), a precisão das informações é adquirida quando se utiliza a interpolação por krigagem (SOARES DE SOUZA et al., 2010).

O interesse pode concentrar-se em um ou mais pontos específicos da área ou na obtenção de uma malha de pontos interpolados, de modo a permitir a visualização do comportamento da variável no espaço amostral, o que é obtido empregando-se a interpolação por krigagem (GOMES et al., 2007).

A krigagem é um método geoestatístico univariado, que utiliza um estimador linear não viciado com a variância mínima e que considera a estrutura da variabilidade espacial encontrada pela variável estudada, definido pela Equação 9.

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i, x_i + h) \quad (9)$$

onde:

$Z^*(x)$: valor da variável a ser estimado para um determinado ponto da região amostral;

λ_i : pesos atribuídos aos valores da variável (vizinhos) usados na estimativa de Z^* .

Desta forma, a krigagem pode ser utilizada para mapear a distribuição espacial das propriedades do solo e nortear a tomada de decisão sobre a localização dos experimentos e a interpretação dos resultados (MONTANARI et al., 2012).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1- Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado em uma área localizada no município de Capão do Leão, pertencente à Embrapa Clima Temperado (EMBRAPA) - Estação de Terras Baixas (ETB), situada nas coordenadas geográficas de 31°49'13" S e 52°27'59" O, (Figura 3). Em uma área de 1,0 ha foi estabelecida, antes e após a sistematização, uma malha experimental com 100 pontos georreferenciados, espaçados entre si de 10 por 10 m (Figura 4). Os dados experimentais usados neste trabalho foram obtidos a partir do trabalho de Parfitt (2009).

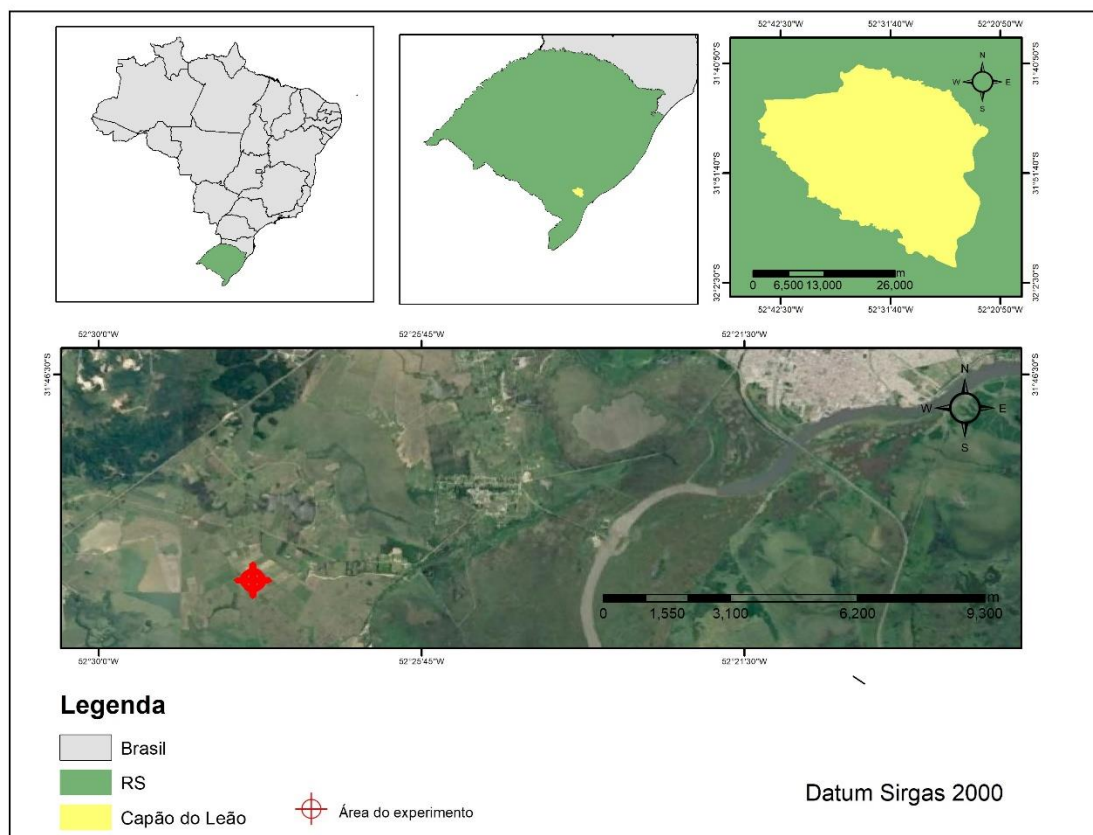


Figura 3 – Localização da área experimental no mapa do Brasil e no estado do Rio Grande do Sul e vista aérea da área experimental.

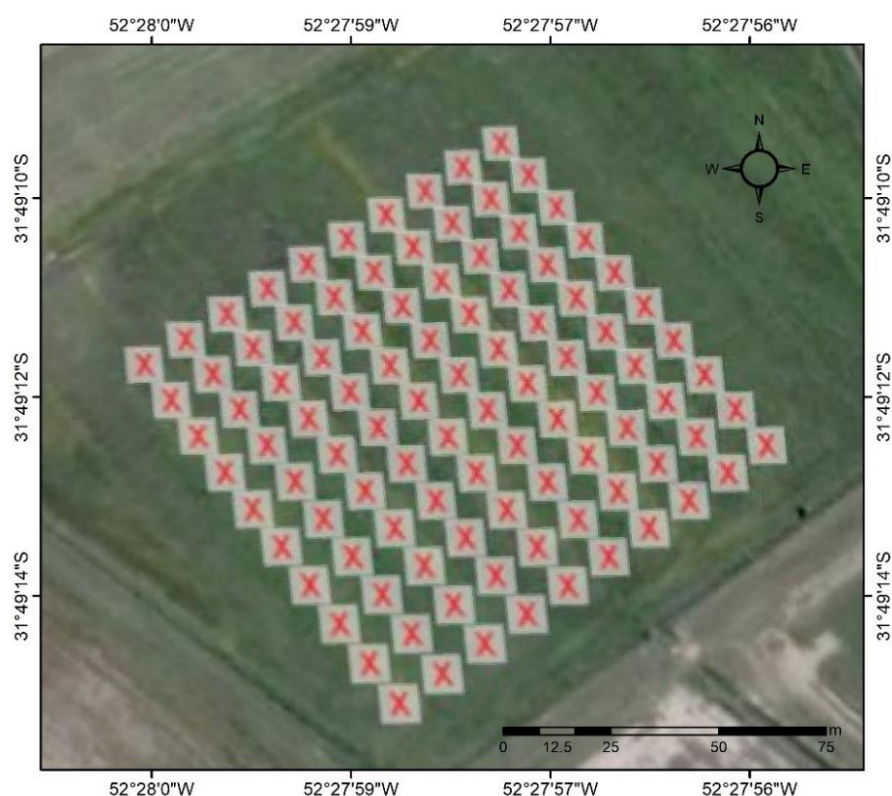


Figura 4- Malha de 100 pontos georreferenciados, espaçados de 10 x 10 m, estabelecida na área experimental, antes e após a sistematização.

O clima da região é do tipo Cfa, conforme a classificação de Köppen, sendo a área representativa de um ambiente marinho subtropical com verão subúmido e úmido, sendo as demais estações definidas como superúmidas (MORENO,1961).

Na área experimental foram encontrados dois tipos de solos: Planossolo Háplico Eutrófico Gleissólico na parte relativamente alta - agrupamento de solos minerais com horizonte B plânico, subjacente a qualquer tipo de horizonte A, podendo ou não apresentar horizonte E (álbico ou não); e Gleissolo Háplico Ta Eutrófico Solódico na parte relativamente mais baixa - solos que apresentam caráter solódico em um ou mais horizontes, dentro de 100 cm, a partir da superfície do solo (EMBRAPA, 2013). Entretanto, estes solos não apresentaram uma diferença nítida na área em estudo, sendo uma situação comum de áreas de terras baixas destinadas ao cultivo do arroz irrigado no RS.

Antes da sistematização, a área foi cultivada duas vezes com arroz irrigado por inundação e uma vez com sorgo (*Sorghum vulgare*) sob sistema de cultivo convencional, incluindo operações de aração e gradagem.

4.2- Implantação do experimento

A implantação do experimento foi realizada no início de 2008, quando foi feito o levantamento altimétrico dos 100 pontos demarcados. A partir do levantamento, foi realizado o cálculo da sistematização pelo método dos mínimos quadrados, adotando a declividade média de 0,15% na direção do Leste-Oeste. A magnitude máxima de corte foi de 20,8 cm e de aterro de 17,2 cm. O volume de solo movimentado foi de, aproximadamente, 519 m³ ha⁻¹, sendo que aproximadamente metade da área foi cortada (cotas superiores ao plano projeto) e metade da área aterrada. A execução da sistematização foi realizada com “Scraper” equipado com controle a raios laser.



Figura 5- Ilustração da operação de sistematização da área experimental antes (A) e depois (B) da sistematização. Fonte: José M. B. Parfitt

4.3- Avaliação das propriedades físico-hídricas do solo

O período entre as amostragens do solo, antes e depois da sistematização, foi de aproximadamente três meses. Para as avaliações das propriedades físico-hídricas do solo, foram retiradas amostras indeformadas em cada ponto georreferenciado da malha experimental na camada de 0-0,20 m de profundidade (Figura 6).



Figura 6- Ilustração da coleta das amostras deformadas e indeformadas em cada ponto da malha experimental. Fonte: José M. B. Parfitt

As amostras indeformadas foram coletadas em cada um dos 100 pontos, antes e depois da sistematização, na camada de 0-0,20 m de profundidade, usando anéis de 0,05 m de diâmetro e 0,03 m de altura. Foram determinadas as seguintes propriedades do solo: densidade do solo (D_s), Macroporosidade (Macro) e Microporosidade (Micro) e Curva de Retenção de Água no Solo (CRA) (conteúdo de água retido nas tensões de 1, 6, 10, 33, 100 e 1500 kPa). As metodologias adotadas para a determinação dessas propriedades são descritas em Embrapa (1997).

As amostras deformadas foram coletadas com pá de corte na camada de 0-0,20 m (Figura 6), identificadas e encaminhadas ao laboratório para determinação da granulometria (frações argila, silte e areia) (GEE; BAUDER, 1986). Todas as análises do solo foram realizadas no Laboratório do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

Os conteúdos de água retidos nas tensões de 1 e 6 kPa foram determinados na mesa de tensão e os de 10, 33, 100 e 1500 kPa na câmara de pressão de Richards. A porosidade total foi considerada como sendo o conteúdo de água volumétrico na condição de saturação do solo. Após a obtenção das curvas experimentais de retenção de água em cada ponto experimental, antes e depois da sistematização, foi usado o software SWRC – 3.0 (DOURADO NETO et al., 2001) para obtenção dos

parâmetros θ_s , θ_r , α e n do modelo matemático proposto por van Genuchten (1980), proposto pela Equação 1 (3.4.1).

4.4- Análise dos dados

4.4.1 Estatística Clássica

Todos os conjuntos de dados foram submetidos a estatística descritiva calculando as medidas de posição central (média e mediana), medidas de dispersão [valores máximos e mínimos e coeficiente de variação - C.V. (%)] e de forma da distribuição [coeficientes de assimetria (ASS) e de curtose (CURT)].

Os valores de C.V. (%) foram classificados conforme Wilding; Drees (1983): $CV \leq 15\%$ - baixa dispersão dos dados; $15\% < CV \leq 35\%$ - moderada dispersão; $CV > 35\%$ - alta dispersão. Os dados também foram submetidos ao teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (p -valor = 5%) no intuito de avaliar a tendência de normalidade de suas distribuições. A análise exploratória foi realizada ainda por meio de gráficos em caixas (*boxplot*) para a identificação de observações atípicas (*outliers*) e para avaliar o efeito da sistematização no número de dados discrepantes e no formato das distribuições.

A análise de teste de hipóteses é um procedimento estatístico pelo qual se rejeita ou não uma hipótese, associando-se à conclusão um risco máximo de erro (CALLEGARI-JACQUES, 2003). As hipóteses estatísticas são colocadas como:

a. Hipótese nula ou de nulidade (H_0): é sempre a primeira hipótese a ser formulada, é conservadora e não implica em mudanças. Se esta hipótese for aceita, conclui-se que existe correlação entre as variáveis.

b. Hipótese alternativa (H_1): é contrária à hipótese nula, é uma hipótese liberal, ou seja, implica em mudanças. Se esta hipótese for confirmada, conclui-se que não existe correlação entre as variáveis.

Foi aplicado o teste t de dados pareados onde os atributos foram comparados, individualmente, antes e depois da sistematização (FERREIRA, 2005), verificando-se assim o efeito da sistematização no teor médio de cada parâmetros físico-hídricos, a 1% de probabilidade, testando a verossimilhança da hipótese de nulidade (H_0), com auxílio do software R.

4.4.2 Triângulo Textural e Curva de retenção de água no solo (CRA)

A classe textural do solo, antes e depois da sistematização, foi determinada pela análise do triângulo textural que foi elaborado por meio do software Sigma Plot®. O mesmo software foi usado para a representação gráfica da curva de retenção de água no solo.

4.4.3. Geoestatística

A análise da variabilidade espacial de cada conjunto de dados foi realizada por meio dos softwares SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software, REMY et al., 2009) e GSLIB (Geostatistical Software Library; DEUTSCH; JOURNAL, 1998), calculando os semivariogramas experimentais para cada variável, teóricos e os respectivos parâmetros de ajustes.

O grau de dependência espacial (GDE em % - Equação 10) foi calculado e classificado de acordo com Cambardella et al. (1994), como: forte – $GDE \leq 25\%$; moderado – $25\% < GDE \leq 75\%$; e fraco – $GDE > 75\%$.

$$GDE = \left(\frac{c_0}{c_0 + C} \right) \times 100 \quad (10)$$

em que:

c_0 : efeito pepita;

C: contribuição (variância estrutural);

$c_0 + C$: patamar.

Para as propriedades físico-hídricas que apresentaram estrutura de variabilidade espacial adequadamente definida pelo semivariograma, foram elaborados mapas de distribuição espacial por meio da krigagem ordinária, Equação 10 (3.5.2).

4.4.4. Análise de correlação de Spearman

A estatística descritiva tem sido aplicada para verificar se ocorre influência da heterogeneidade espacial sobre os valores médios dos conjuntos de dados (CHAVES et al., 2009). As medidas de posição permitem a verificação de um possível ajuste dos

dados à distribuição normal, enquanto que o coeficiente de variação expressa a magnitude de variabilidade dos conjuntos de dados analisados (MOURÃO, 2014).

De acordo com Xavier (2014), o coeficiente de correlação de *Pearson* é usado para quantificar a correlação entre conjunto de dados que apresentem uma distribuição normal. Contudo, para dados que não seguem esta tendência de normalidade, deve-se utilizar de outros métodos, como os coeficientes de correlação de *Spearman* ou *Kendall*, por exemplo. O coeficiente de correlação de *Spearman* quantifica as inter-relações existentes entre dois conjuntos de dados e, assim, é usado para uma melhor compreensão, de forma holística, do sistema que está sendo analisado (SIGEL, 1975). Cabe destacar que o cálculo do coeficiente de correlação de *Spearman* (ρ) se baseia na mesma expressão do cálculo do coeficiente de *Pearson*, porém calculado entre pares de pontos ordenados de acordo com uma ordem crescente de classificação, representado na equação 11.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (11)$$

em que:

n = número de pares (x_i, y_i);

d_i = são as diferenças entre os postos (classificações ordinais) de cada elemento segundo cada classificação.

Se os valores de x_i são exatamente iguais aos valores de y_i , então todos os d_i serão iguais a zero e ρ será igual a 1. O coeficiente ρ de *Spearman* varia entre -1 e +1, sendo que, quanto mais próximo estiver destes extremos, maior será a correlação entre as variáveis. Cabe ressaltar que o sinal negativo da correlação significa que as variáveis possuem correlação inversa, isto é, as categorias mais elevadas de uma variável estão associadas a categorias mais baixas da outra variável.

Geralmente se deseja saber se o valor calculado do coeficiente ρ , para um dado tamanho de amostra e nível de significância, permite concluir que existe correlação entre duas variáveis.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1- Estatística descritiva aplicada aos conjuntos de dados

Os resultados das análises descritivas e o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov aplicadas a todos os conjuntos de dados físico-hídricos do solo, antes e depois de três meses da sistematização, são apresentados na Tabela 1. A sistematização afetou o comportamento da maioria das propriedades físico-hídricas do solo. Analisando o efeito da sistematização sobre os valores da média de cada conjunto de dados, observa-se que houve um aumento, em termos absolutos, dos seus valores para os dados de θ_r , n , Argila e Areia e D_s e uma diminuição para os de θ_s , α , Macro e Micro.

Os valores da média e mediana foram similares para todas as distribuições, antes e depois da sistematização, exceto para as distribuições das variáveis θ_r , α e n , indicando uma tendência de não-normalidade destas distribuições (Tabela 1). Houve efeito da sistematização na variância e na amplitude da faixa de variação (diferença entre o valor máximo e mínimo) de todos os conjuntos de dados. Campinas; Farias e De Lima (2013), em estudo realizado em uma área agrícola cultivada com laranja no município de Capitão Poço (estado do Pará), mencionaram que a amplitude de variação e o coeficiente de variação dos dados de D_s foram afetados pelo tráfego de máquinas na área de cultivo em época de plantio e de adubações.

A sistematização alterou, ao nível de 1% de significância, o valor médio dos conjuntos de propriedades físico-hídricas do solo (Tabela 1), exceto para o parâmetro " α ", baseado na aplicação do teste de comparação pareadas.

Tabela 1 - Resultados da estatística descritiva e teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov (K-S) aplicados aos parâmetros físico-hídricos, antes e depois de três meses da sistematização

Parâmetros	Média	Med	Max	Min	Var	C.V (%)	Ass	Cur	K-S	P-valor	
θ_s ¹	0,40	0,40	0,48	0,30	0,0010	7,77	-0,21	0,39	0,06	0,83	N
θ_s ²	0,38**	0,38	0,51	0,26	0,0012	8,94	-0,03	2,27	0,07	0,73	N
θ_r ¹	0,08	0,03	0,27	0,00	0,009	114,51	0,60	-1,21	0,29	$1,61 \times 10^{-07}$	NN
θ_r ²	0,14**	0,18	0,24	0,00	0,0063	55,15	-0,82	-0,84	0,20	$5,45 \times 10^{-04}$	NN
α ¹	0,78	0,63	3,43	0,02	0,4654	87,58	2,04	4,49	0,23	$3,41 \times 10^{-05}$	NN
α ²	0,75 ^{ns}	0,47	5,23	0,12	0,6589	108,89	2,77	10,09	0,23	$6,53 \times 10^{-05}$	NN
n ¹	1,23	1,17	1,85	1,03	0,0260	13,47	1,55	1,85	0,21	$2,00 \times 10^{-04}$	NN
n ²	1,52**	1,47	3,26	1,08	0,1172	22,57	1,54	5,37	0,10	0,26	N
Argila (%) ¹	14,34	14,43	18,13	11,66	1,7386	9,19	0,08	-0,21	0,05	0,69	N
Argila (%) ²	15,43**	15,31	22,68	12,26	3,0993	11,41	1,06	2,82	0,10	0,26	N
Areia (%) ¹	45,80	45,72	54,04	38,47	13,8544	8,13	0,19	-0,69	0,06	0,46	N
Areia (%) ²	47,13**	47,11	53,83	40,10	9,1020	6,40	0,085	-0,792	0,11	0,20	N
Ds (g/cm ³) ¹	1,60	1,61	1,75	1,36	0,00523	4,52	-0,54	0,52	0,06	0,55	N
Ds (g/cm ³) ²	1,67**	1,66	1,92	1,43	0,00855	5,55	0,33	0,003	0,08	0,59	N
Macro (%) ¹	9,59	9,52	15,60	4,72	4,20140	21,37	0,12	0,02	0,04	0,97	N
Macro (%) ²	5,93**	6,05	13,27	0,44	7,8974	47,39	-0,06	-0,39	0,07	0,73	N
Micro (%) ¹	34,26	34,17	41,50	30,32	3,5202	5,48	0,61	1,00	0,07	0,23	N
Micro (%) ²	30,78**	30,57	38,28	18,10	9,8475	10,20	-0,21	1,53	0,08	0,49	N

¹ - Antes da sistematização; ² - Depois de três meses da sistematização; θ_s = conteúdo de água no solo na condição de saturação (m³.m⁻³); θ_r = conteúdo de água residual (m³.m⁻³); α e n= são os parâmetros empíricos do modelo; Ds (g/cm³)= Densidade do Solo ;Macro e Micro = Macroporosidade e microporosidade do solo, respectivamente; Med= mediana; Max=Máximo; Min= Mínimo; Var= Variância; C.V(%)= Coeficiente de Variação; Ass= Assimetria; Curt= Curtose; N – normal ao nível ao 5% de significância; NN – não normal ao nível ao 5% de significância; D_{tab} = 0,136. **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; ns: Não significativo.

Parfitt (2009), trabalhando na mesma malha experimental do presente estudo, avaliou o efeito da sistematização sobre o comportamento médio e sobre a relação entre a magnitude dos cortes e/ou aterros com os atributos químicos e biológico determinados na camada de 0-0,20 m. Os resultados mostraram que a sistematização afetou negativamente a fertilidade do solo, pois causou uma maior necessidade de aplicação de calcário devido ao aumento do valor médio do índice SMP e de fertilizante devido à diminuição nos teores médios dos principais nutrientes tais como fósforo, cálcio, magnésio, enxofre e provavelmente do nitrogênio disponível, com exceção do valor médio do potássio que aumentou. O autor também concluiu que na zona em que o solo foi cortado a correção da acidez e da fertilidade, com a aplicação de fertilizantes químicos e/ou orgânicos, deverá ser realizada em função da magnitude dos cortes provocados pela sistematização do terreno.

Conforme a classificação de Wilding; Drees (1983), observou-se uma baixa dispersão dos dados em torno da média para os dados de θ_s , argila, areia, Ds e Micro, antes e depois da sistematização (Tabela 1). A classificação dos valores dos coeficientes de variação, antes e depois da sistematização, foi alterada para as distribuições dos dados de n e macroporosidade, i.e., C.V. dos dados de n antes da sistematização foi classificado como baixo e depois como moderado enquanto que o C.V. dos dados de Macro passou de moderado para alto. De uma maneira geral, os valores dos coeficientes de variação aumentaram após a sistematização, indicando que a sistematização aumentou a heterogeneidade dos conjuntos de dados.

A assimetria e a curtose das distribuições de todos os dados foram afetadas pela sistematização. Quanto mais próximo de zero os coeficientes de assimetria e de curtose, mais próximo da normalidade a distribuição dos dados se aproxima. Com relação aos coeficientes de assimetria das distribuições das variáveis, a sistematização provocou uma alteração no sinal dos coeficientes das distribuições de θ_r , Micro e Macro (a forma das distribuições passou de assimétrica positiva, antes da sistematização, para assimétrica negativa depois da sistematização) e Ds (a forma da distribuição passou de assimétrica negativa, antes da sistematização, para assimétrica positiva depois da sistematização). Já em termos de amplitude dos coeficientes, o coeficiente de assimetria da distribuição da variável argila foi o que teve a maior variação em magnitude, ou seja, de +0,08 antes da sistematização, para +1,06 depois da sistematização.

Quanto ao grau de achatamento das distribuições, pode ser constatado que a distribuição dos dados de argila, que antes da sistematização era classificada como platicúrtica (coeficiente de curtose < 0 , indicando um maior grau de achatamento) passou a ser classificada como leptocúrtica (coeficiente de curtose > 0 , indicando um menor grau de achatamento) depois da sistematização (Tabela 1). Já para os dados de Macro ocorreu o inverso, ou seja, sua distribuição era classificada como leptocúrtica, antes da sistematização, e passou a ser platicúrtica, depois da sistematização. Para as demais variáveis a classificação não foi alterada embora a magnitude dos valores dos coeficientes de curtose variou sem uma tendência definida.

A sistematização não alterou a tendência de normalidade da distribuição de todos os conjuntos de dados, exceto para a distribuição dos parâmetros de ajustes θ_r , α e n do modelo de curva de retenção de água no solo proposto por van Genuchten (1980), que permaneceu como não-normal antes e após a sistematização (Tabela 1).

Um valor discrepante (*outlier*) é uma observação que parece ser suspeita ao pesquisador devido a sua magnitude ser bem diferente das demais. Desta forma, quando um valor discrepante num conjunto de dados é encontrado, a sua origem deve ser investigada. Muitas vezes, os valores discrepantes, de fato, fazem parte do conjunto de dados. Mas eventualmente, esses valores podem ser oriundos de erros de aferição ou no registro de dados.

Uma cuidadosa inspeção nos dados e nas eventuais causas da ocorrência do(s) valor(es) discrepantes é sempre uma providência necessária antes que qualquer atitude seja tomada em relação a esses dados. O gráfico em caixa (*box plot*) agrega uma série de informações a respeito da distribuição de um conjunto de dados, tais como posição, dispersão, assimetria, caudas e dados discrepantes (REICHARDT; TIMM, 2012). Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 são apresentados os gráficos em caixa de todas as propriedades físico-hídricas do solo avaliadas antes e após a sistematização da área experimental. De uma maneira geral, a sistematização alterou o número de dados discrepantes e o formato da distribuição da maioria dos conjuntos de dados, a saber: para as distribuições de θ_s (Figura 7B), α (Figura 8B) e argila (Figura 9B) o número de dados discrepantes aumentou depois da sistematização; a sistematização alterou o formato da distribuição dos dados de θ_r (Figura 7B) e D_s (Figura 9B), Macro e Micro (Figura 10 B). O número de dados discrepantes e o formato da distribuição dos dados de n foi afetada pela sistematização (Figura 8B).

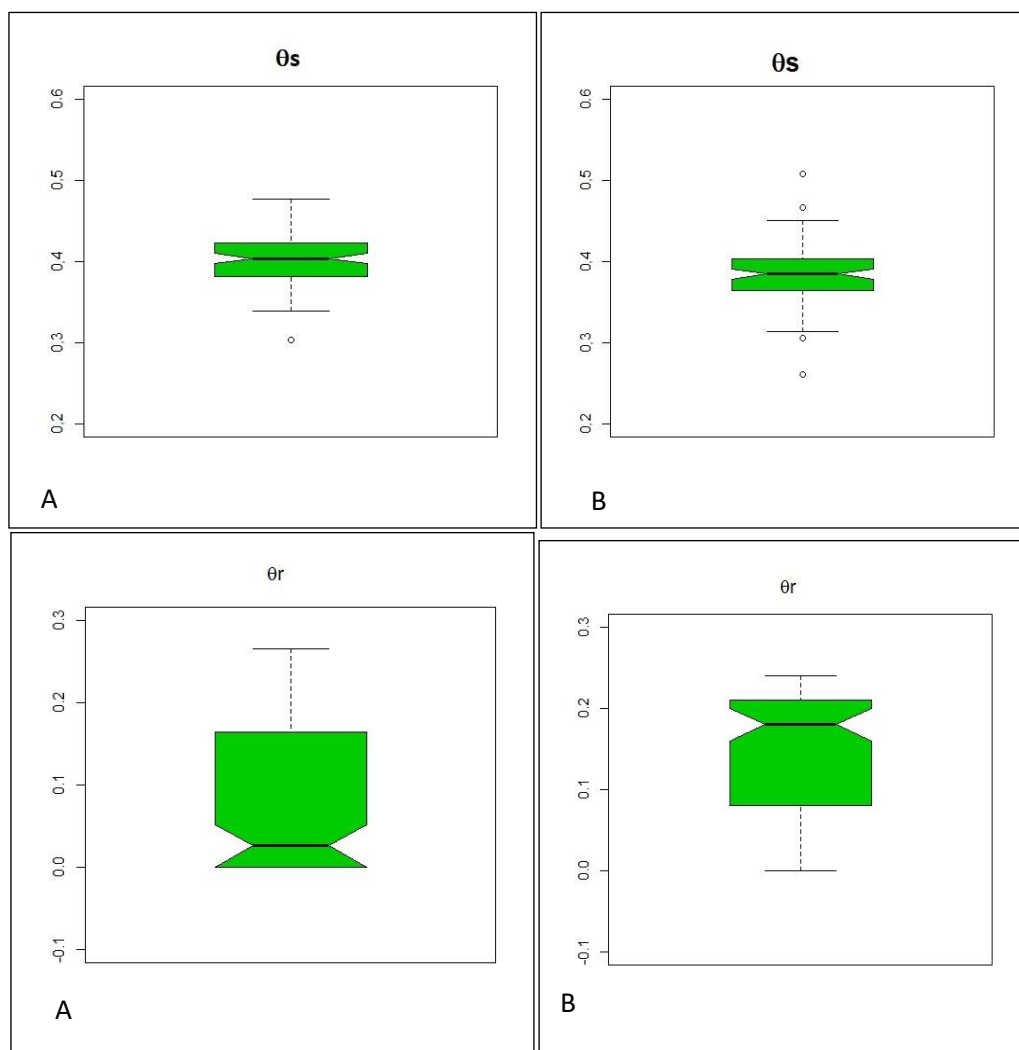


Figura 7- Distribuição dos parâmetros θ_s e θ_r antes (A) e depois de três meses da sistematização (B)

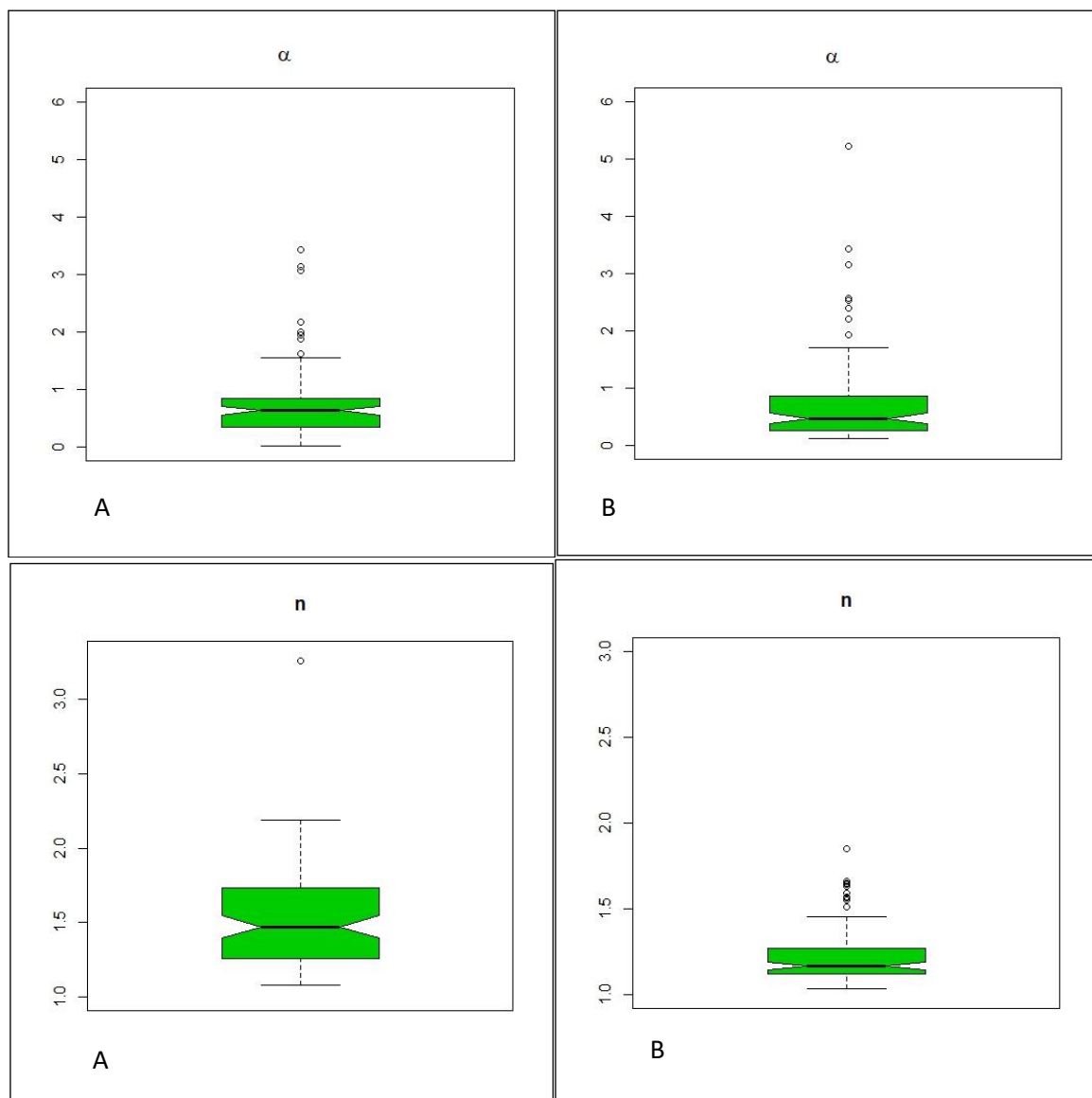


Figura 8- Distribuição dos parâmetros α e n antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

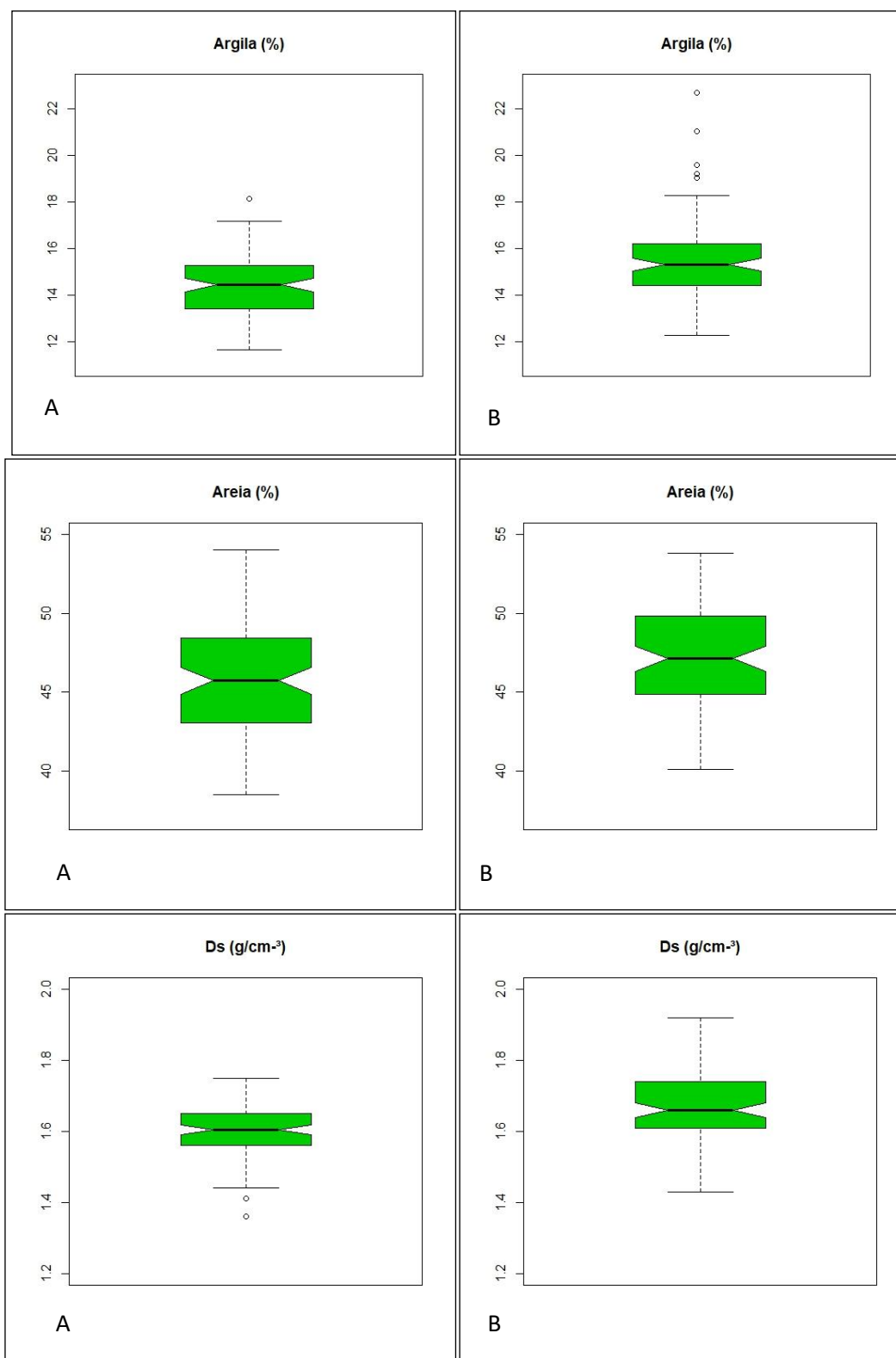


Figura 9- Distribuição dos atributos Argila (%), Areia (%) e Ds (g/cm³) antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

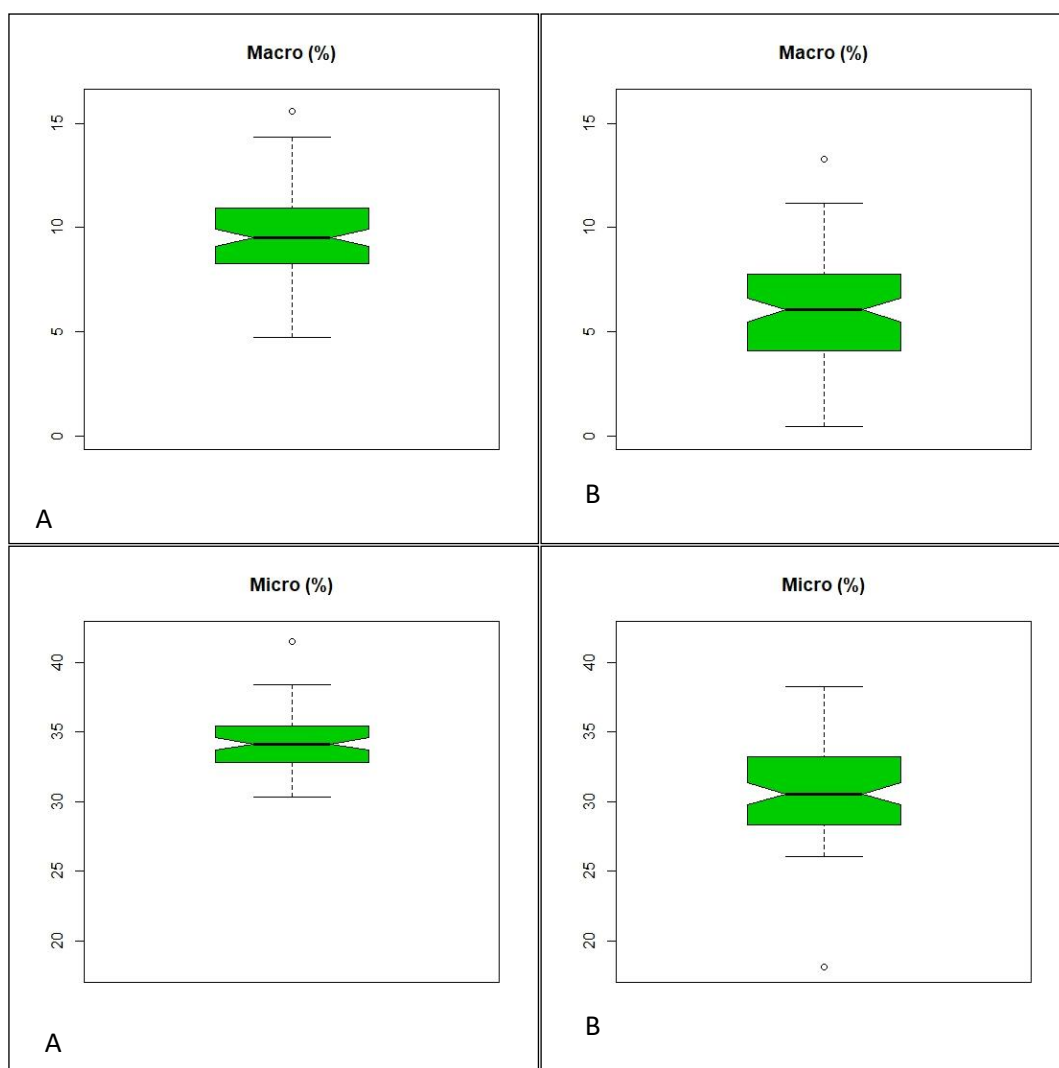


Figura 10- Distribuição dos atributos Macro (%) e Micro (%) antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

5.2 - Análise dos dados granulométricos

A sistematização não alterou a classificação textural do solo na camada de 0-0,20 m, permanecendo predominantemente classificada como franca (Figura 11B). Entretanto, os valores absolutos das frações argila, areia e silte foram afetados (Figuras 11A e 11B). Também pode ser observado que aumentou o número de pontos da malha experimental em que a classe textural foi classificada como Franco-Arenosa e que a classe de alguns pontos passou a ser classificada como Franco-Argilo-Arenosa após a sistematização.

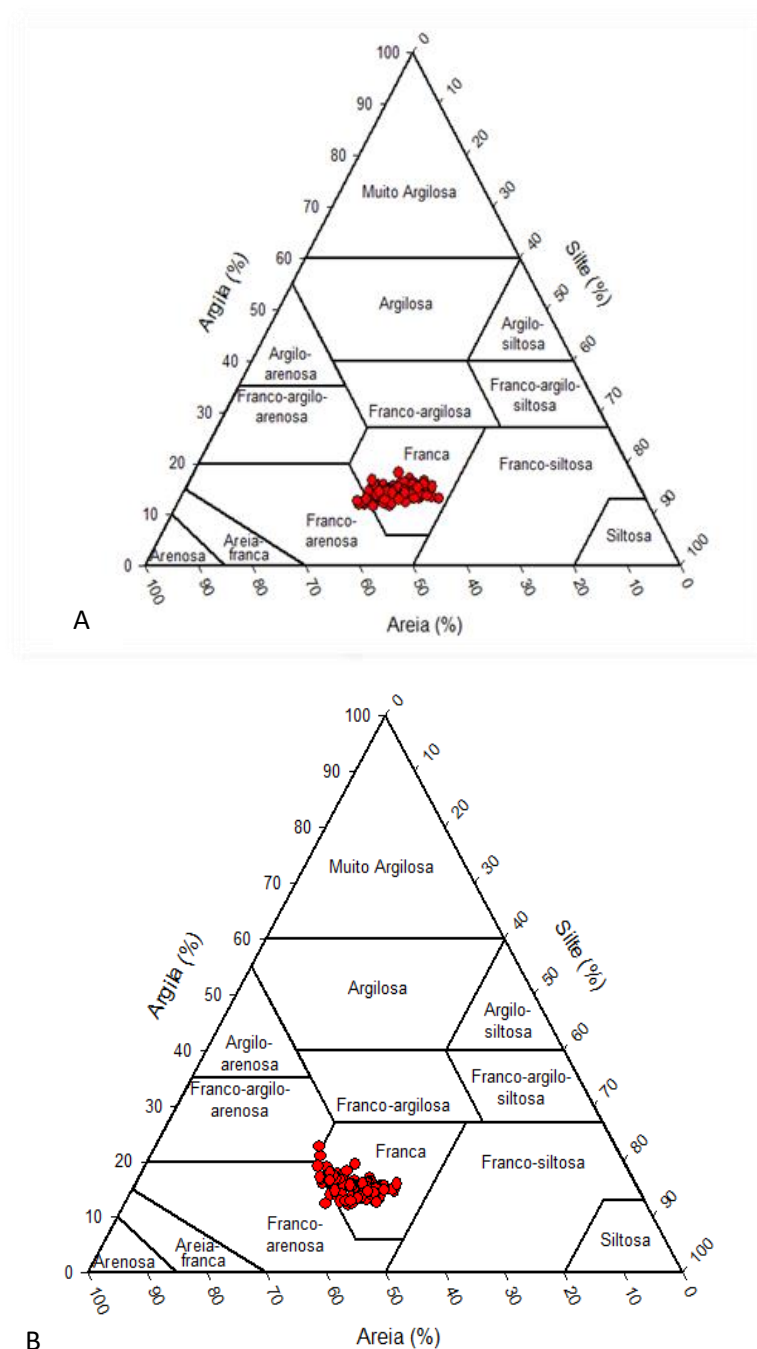


Figura 11- Classificação textural do solo nos 100 pontos amostrais, camada de 0-0,20 m, por meio do triângulo textural: antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

Reichert; Reinert e Braida (2003) mencionam que a classe textural franco-arenosa está abaixo do limite crítico para o crescimento das plantas, além de possivelmente auxiliar no processo inicial de erosão do solo, devido à menor capacidade de formação de agregados. A textura é uma característica que influencia diretamente a taxa de infiltração (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012).

O efeito da sistematização sobre o comportamento da curva de retenção de água no solo (CRA), antes e depois da sistematização, é apresentado na Figura 12.

Observa-se que a sistematização afetou a retenção e a capacidade de água disponível na camada de 0-0,20 m. Adotando a tensão de 10 kPa como a referente a capacidade de campo, verifica-se que o conteúdo de água retido nesta tensão e capacidade de água disponível [CAD = (Capacidade de Campo – Ponto de Murcha Permanente).0,20] diminuíram após a sistematização. Também se observa que o volume de água drenado na tensão de 6 kPa também foi menor após a sistematização já que devido a intensa movimentação de máquinas durante a sistematização, houve uma diminuição da quantidade de macroporos no solo.

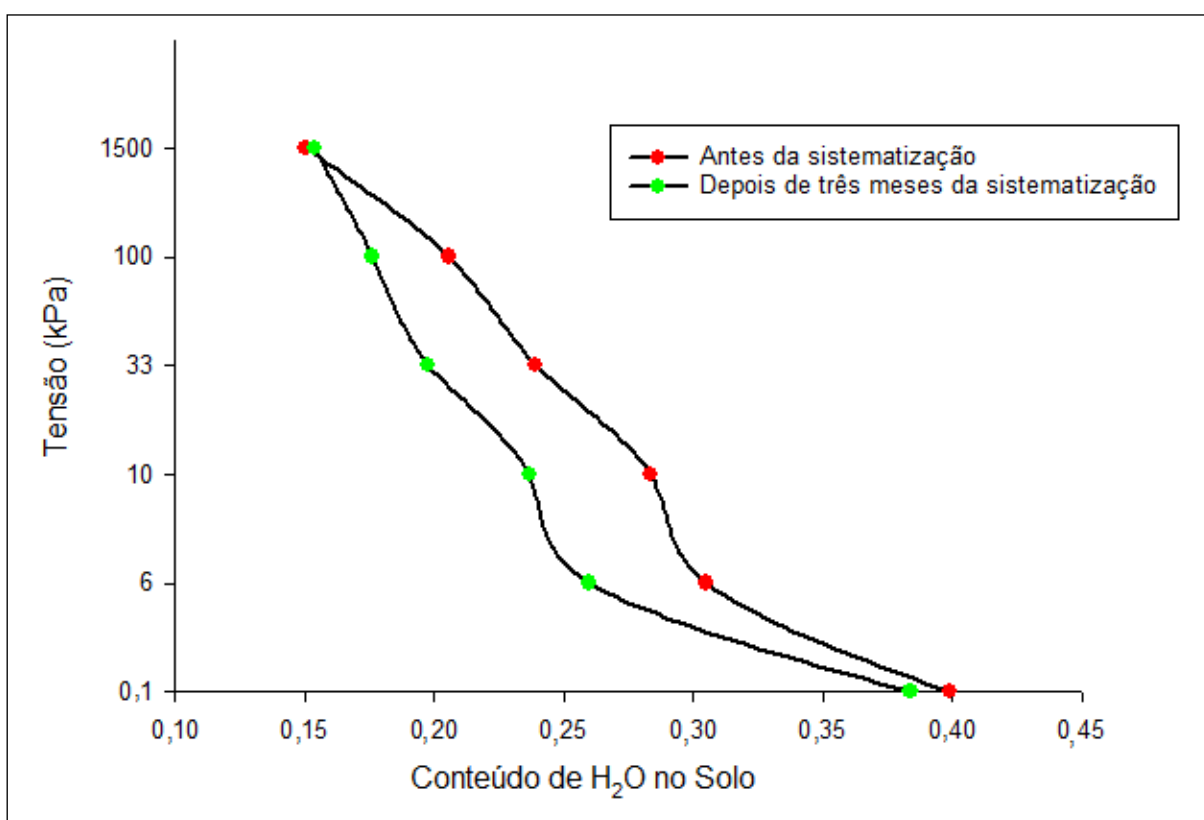


Figura 12- Curvas experimentais de retenção de água no solo antes e depois (B) da sistematização.

5.3 Estrutura de variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas do solo

A estrutura de variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas θ_s , n, Argila, Macro e Micro foi alterada pela sistematização (Tabela 2).

Tabela 2. Modelos teóricos de semivariogramas das propriedades físico-hídricas do solo e respectivos parâmetros de ajustes e grau de dependência espacial (GDE).

Parâmetros	Modelo	c_0	$C+c_0$	A (m)	GDE (%)
θ_s^1	Exponencial	0,0001	0,00095	24,0	10
θ_s^2	Gaussiano	0,0008	0,00119	22,5	67
θ_r^1	Exponencial	0,001	0,00944	27,0	11
θ_r^2	Exponencial	0,002	0,00634	64,5	32
α^1	Exponencial	0,3	0,46530	27,0	64
α^2	Exponencial	0,3	0,65892	30,0	46
n^1	Exponencial	0,007	0,02750	19,5	25
n^2	Esférico	0,06	0,11717	82,5	51
Argila (%) ¹	Gaussiano	1,07	1,55863	49,5	69
Argila (%) ²	Exponencial	1,5	3,09933	78,0	48
Areia (%) ¹	Gaussiano	2,0	13,85440	33,0	14
Areia (%) ²	Gaussiano	3,4	9,10200	63,0	37
Ds (g/cm ³) ¹	Exponencial	0,002	0,00523	39,0	38
Ds (g/cm ³) ²	Exponencial	0,001	0,07653	36,0	1,3
Macro (%) ¹	Gaussiano	3,2	4,20140	33,0	76
Macro (%) ²	Esférico	4,1	7,89743	66,0	52
Micro (%) ¹	Esférico	1,8	3,52023	37,5	51
Micro (%) ²	Exponencial	2,0	9,84751	45,0	20

¹ – Antes da sistematização; ² – três meses depois da sistematização da sistematização; θ_s = conteúdo de água no solo na condição de saturação (m³.m⁻³); θ_r = conteúdo de água residual (m.m); α e n= são os parâmetros empíricos do modelo; Ds (g/cm³) = Densidade do Solo; Macro e Micro = Macroporosidade e microporosidade do solo, respectivamente; C_0 =Efeito Pepita; C_0+C = Patamar; A= Alcance (m).

O modelo de semivariograma teórico ajustado para as variáveis θ_s , n, Argila, Macro e Micro passou de exponencial (θ_s e n), gaussiano (Argila e Macro) e esférico (Micro) para gaussiano (θ_s), esférico (n e Macro) e exponencial (Argila e Micro), respectivamente, após a sistematização da área experimental. Para as demais variáveis não houve efeito da sistematização sobre o tipo de modelo que melhor descreveu a estrutura de variabilidade espacial.

Os valores do efeito pepita (c_0) aumentaram para distribuição de todas as variáveis avaliadas, exceto para as variáveis α (permaneceu o mesmo) e Ds (diminuiu) após a sistematização. Os valores do patamar ($C+c_0$) seguiram a mesma

tendência dos de c_0 após as operações de sistematização, exceto para a distribuição espacial dos dados de θ_r , i.e., a sistematização causou um aumento dos valores do patamar. Este fato está em concordância com comportamento da variância das distribuições após a sistematização (Tabela 1).

Os valores de alcance (A) das distribuições de θ_r , α , n, Argila, Areia, Macro e Micro aumentaram depois da sistematização, ou seja, as operações de corte, aterro e suavização causaram uma maior homogeneização dos valores destas variáveis. O contrário foi observado para as variáveis θ_s e Ds.

O Grau de Dependência especial (GDE) é uma medida não dimensional da dependência espacial, proposta por Cambardella et al. (1994), para expressar a proporção da variância total ($C+c_0$) que é explicada pelo acaso e a proporção que é explicada, em porcentagem, pela variância estrutural (C). Um forte GDE ($GDE \leq 25\%$) significa que a maior parte da variância é explicada pela variância estrutural e uma pequena parte é explicada pelo efeito pepita (c_0).

Quanto maior GDE melhor a qualidade do procedimento de validação cruzada, quando o modelo de semivariograma foi bem ajustado. Desta forma, estimativas das semivariâncias durante a krigagem serão melhores e mapas mais precisos serão elaborados. A classificação do Grau de Dependência Espacial (GDE), segundo Cambardella et al. (1994), foi alterado para todas as distribuições das variáveis, exceto para os dados de α e Argila.

O GDE das distribuições de θ_s , θ_r , n e Areia passou de forte ($GDE \leq 25\%$), antes da sistematização, para moderado ($25\% < GDE \leq 75\%$) após a sistematização. O GDE das distribuições de Ds e Micro passou de moderado antes da sistematização para forte após a sistematização, enquanto que o da distribuição de Macro passou de fraco ($GDE > 75\%$) para moderado após a sistematização. O GDE das distribuições de α e Argila permaneceram na mesma faixa (GDE moderado) de classificação após a sistematização.

Segundo Cambardella et al. (1994), as variáveis que apresentam forte dependência espacial ($GDE \leq 25\%$) são relacionadas as propriedades intrínsecas e aos fatores de formação do solo, enquanto que as demais são aquelas relacionadas as práticas de uso e manejo do solo, i.e., aos fatores extrínsecos.

Nas Figuras 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21 são apresentados os efeitos da sistematização sobre os gráficos dos semivariogramas experimentais e teóricos para

todas as propriedades físico-hídricas avaliadas na camada de 0-0,20 m do solo. Analisando todas as figuras fica evidente o efeito da sistematização sobre o comportamento das estimativas das semivariâncias em função da distância de separação entre os pares de observações de cada variável.

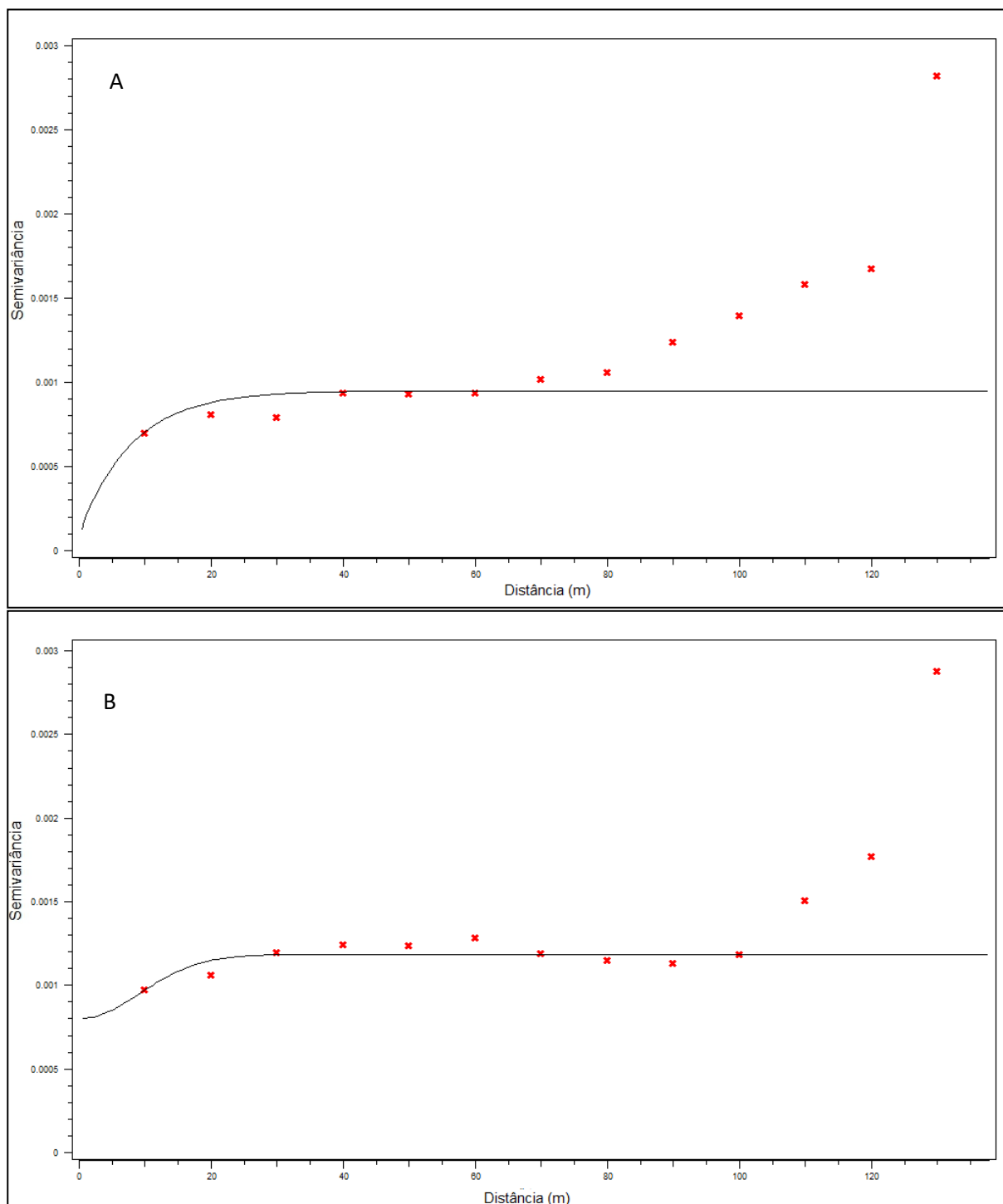


Figura 13 – Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de θ_s (conteúdo de água no solo na condição de saturação ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)), antes (A) e depois (B) da sistematização.

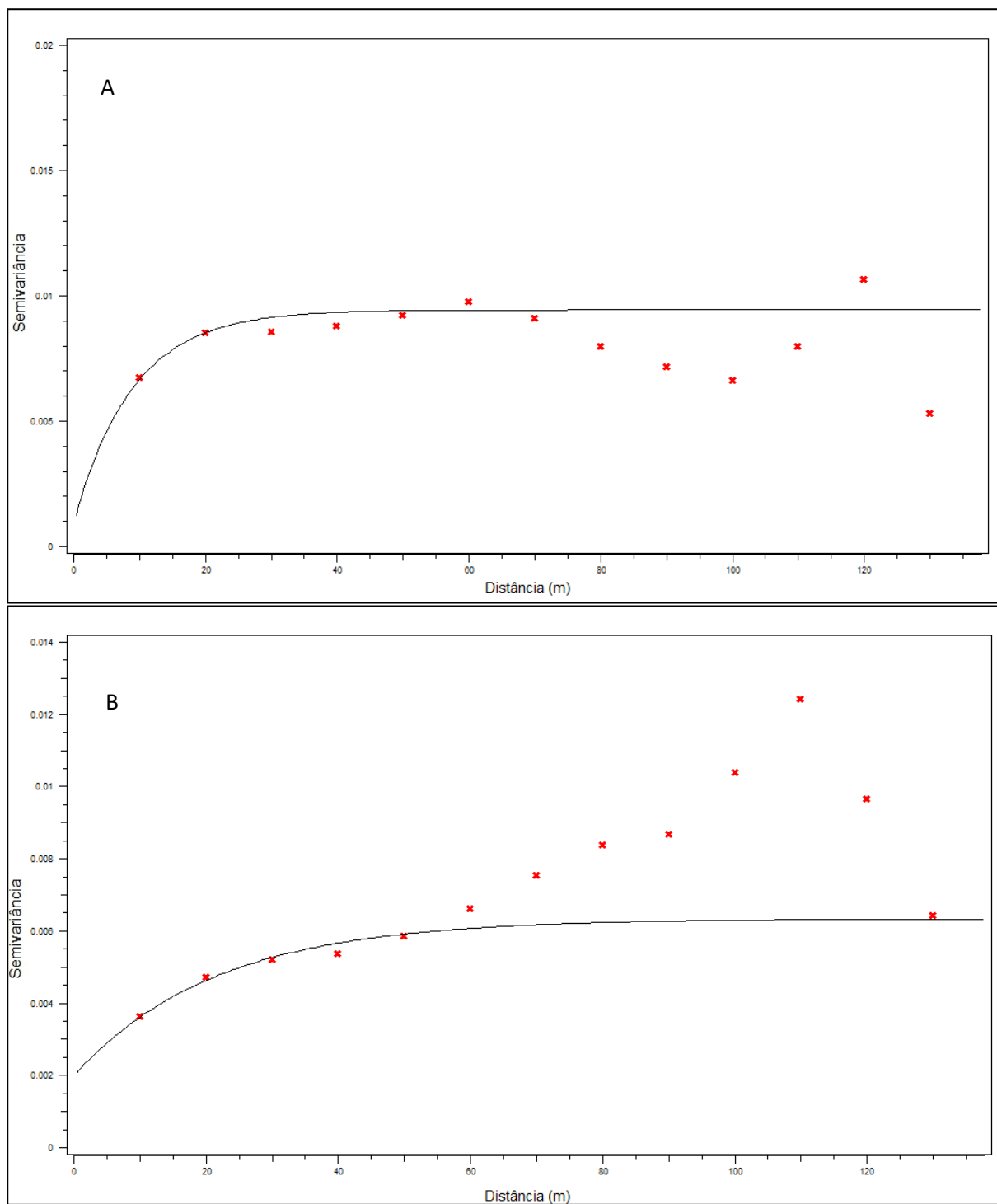


Figura 14 - Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de θ_r (conteúdo de água residual ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)), antes (A) e depois (B) da sistematização.

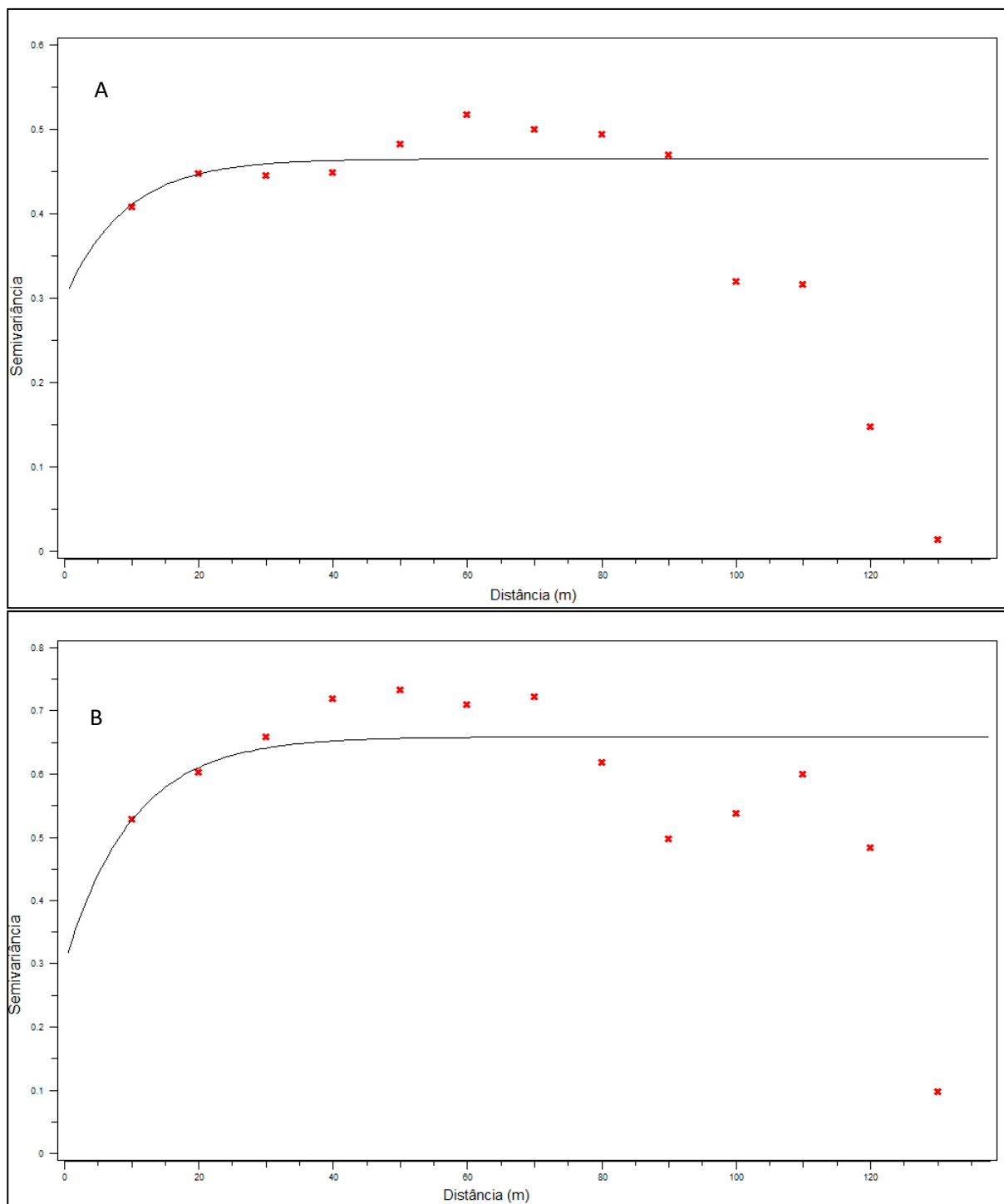


Figura 15 - Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de α , antes (A) e depois (B) da sistematização.

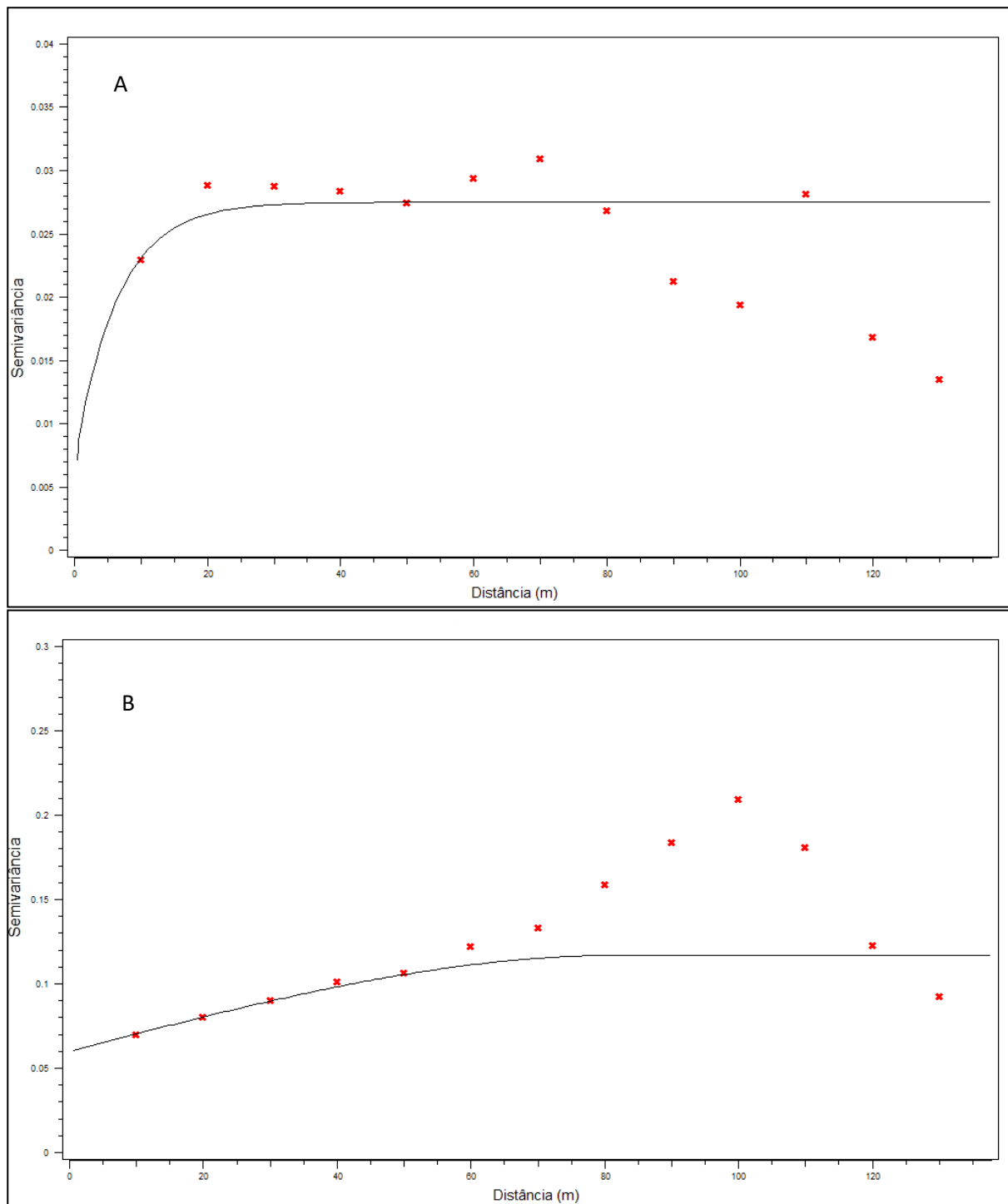


Figura 16 - Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de n , antes (A) e depois (B) da sistematização.

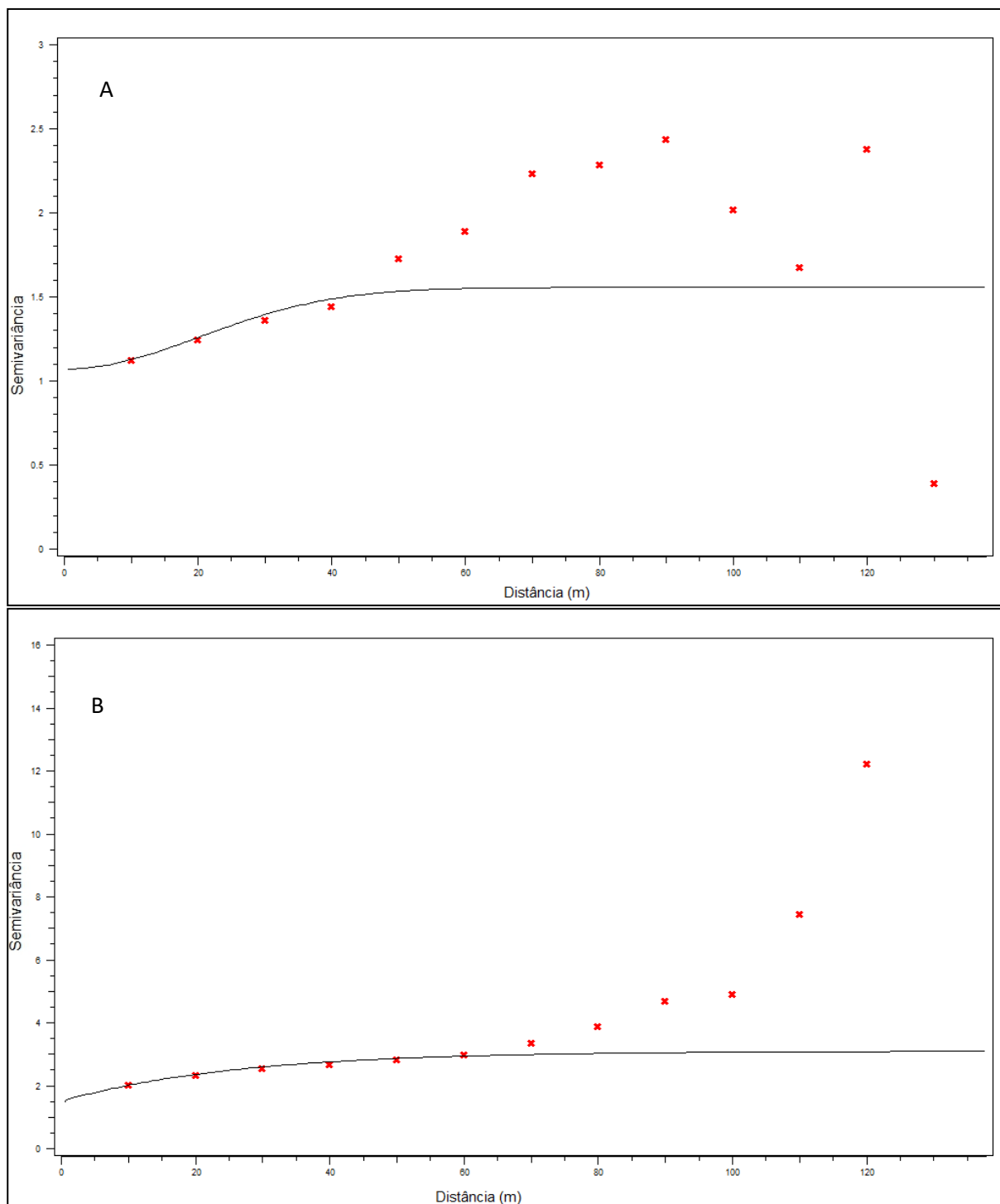


Figura 17 - Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de Argila (%), antes (A) e depois (B) da sistematização.

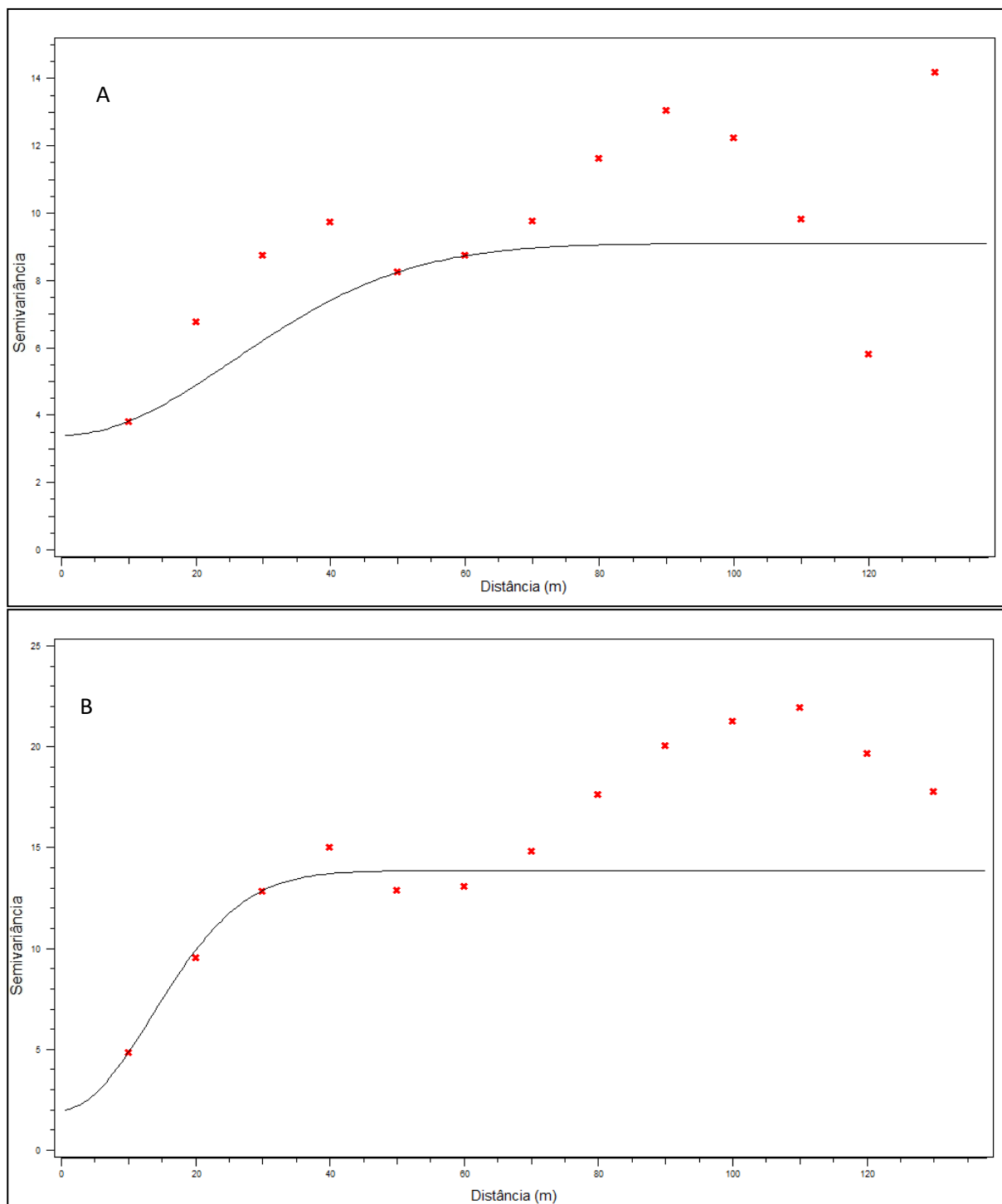


Figura 18 - Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de Areia (%), antes (A) e depois (B) da sistematização.

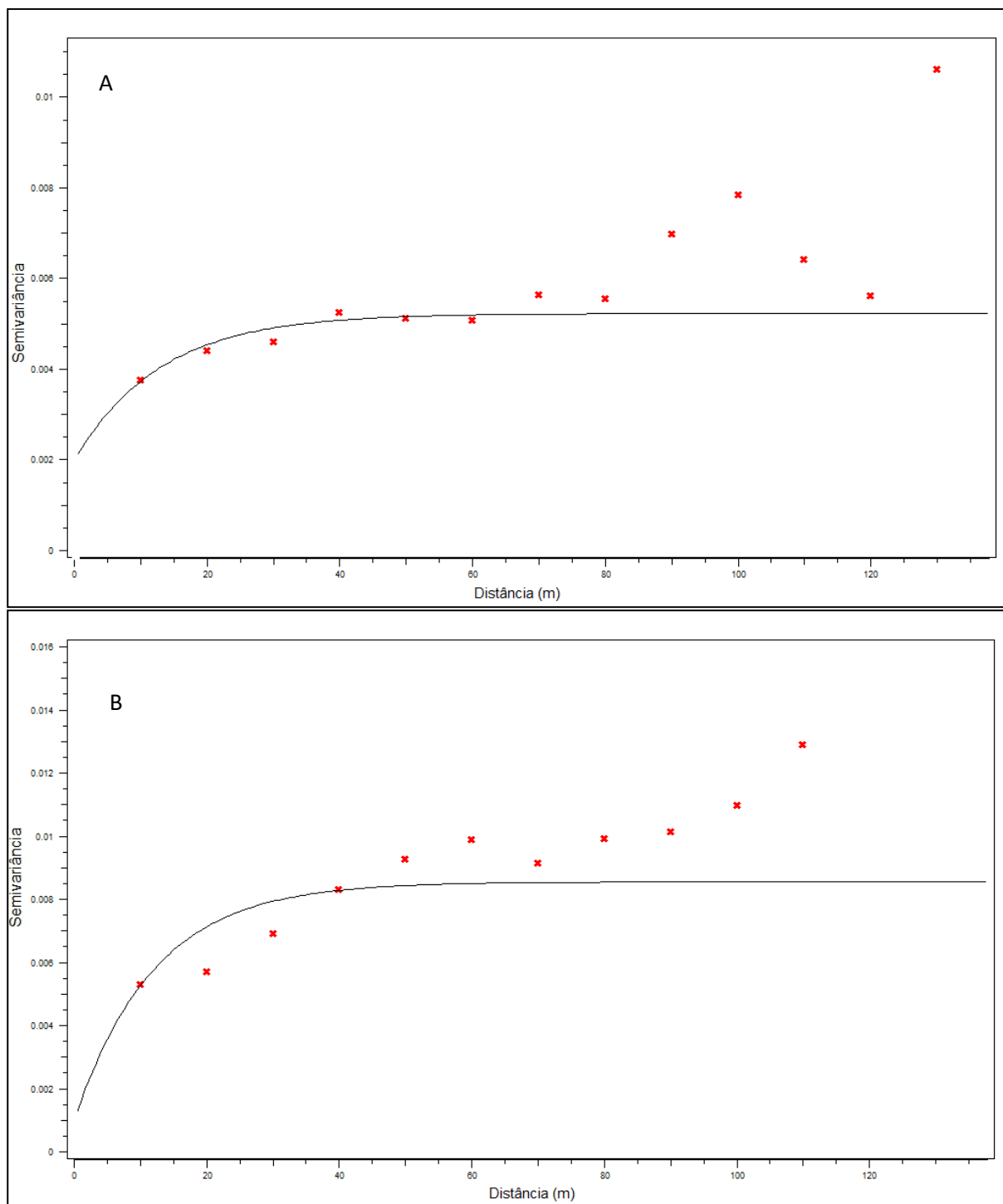


Figura 19- Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de Densidade do solo (g.cm^{-3}), antes (A) e depois (B) da sistematização.

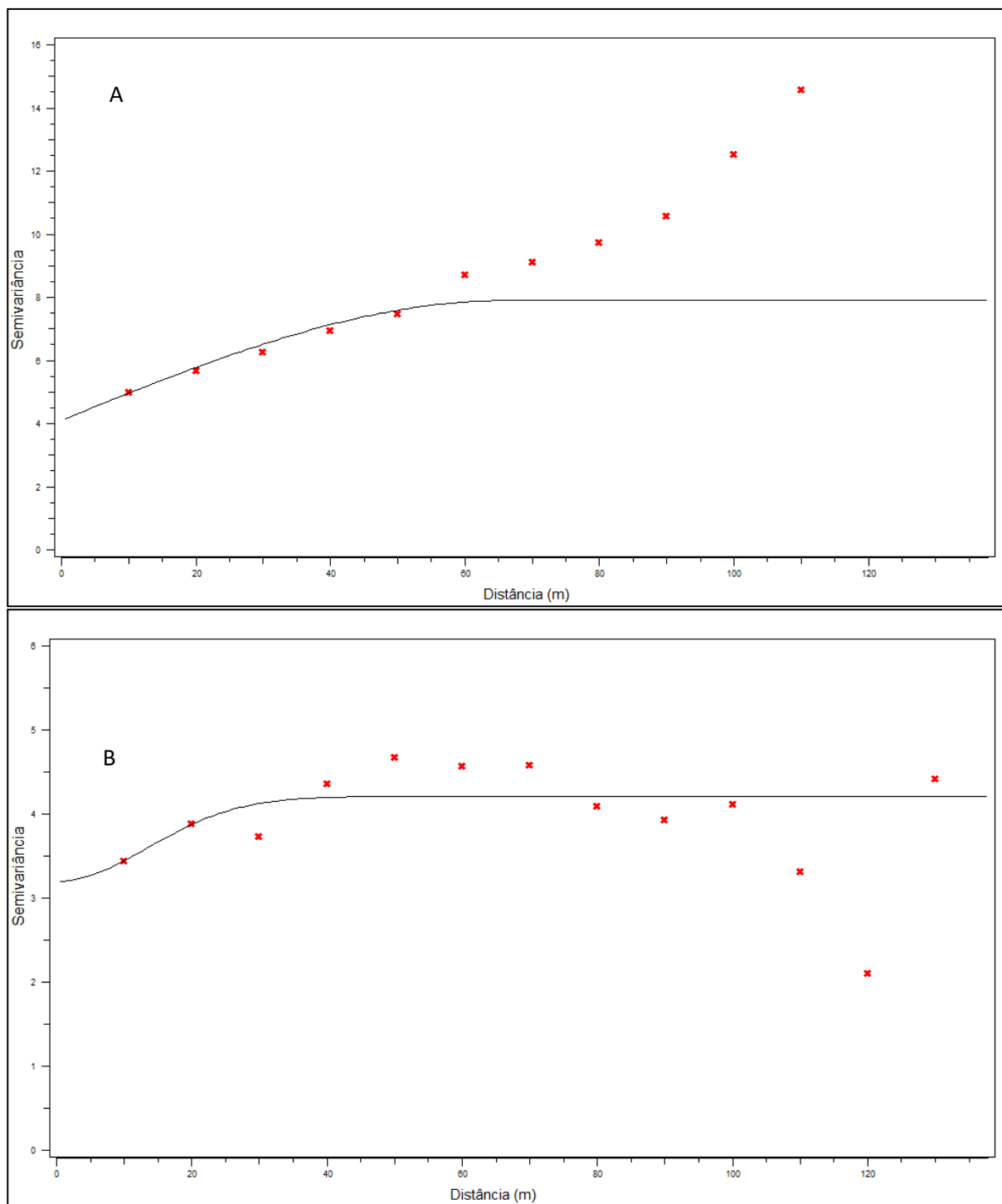


Figura 20- Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de Macroporosidade (%), antes (A) e depois (B) da sistematização.

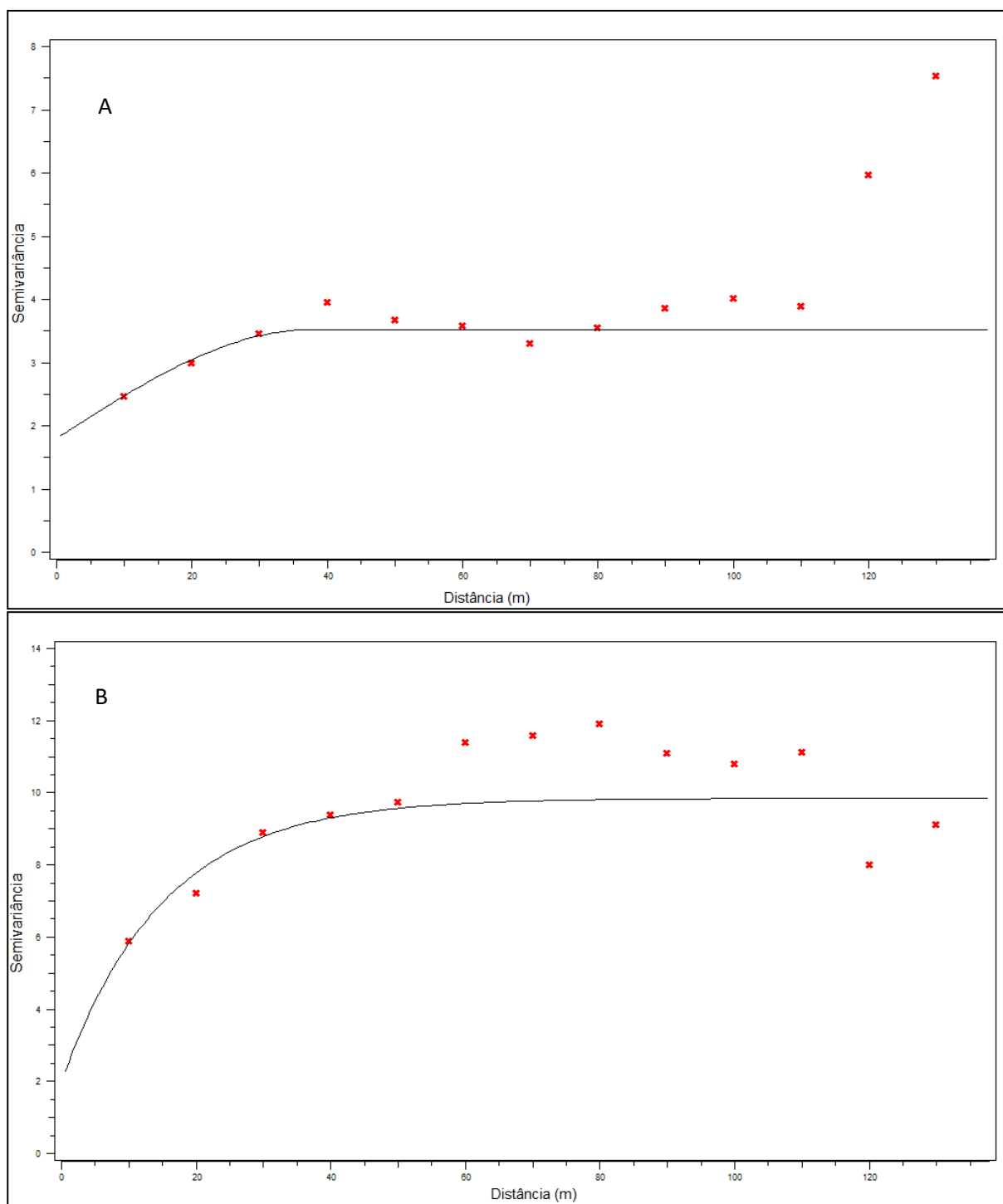


Figura 21- Semivariograma experimental e teórico do parâmetro de Microporosidade (%), antes (A) e depois (B) da sistematização.

Os mapas temáticos de todas as propriedades físico-hídricas solo avaliadas, antes e depois da sistematização, são apresentados nas Figuras 22 a 30, foram elaborados por meio da krigagem ordinária (Equação 9), baseado nos parâmetros ajustados nos modelos teóricos de semivariogramas (c_0 , C e alcance) (Tabela 3). Segundo Parfitt (2009), o mapa de distribuição espacial dos tipos de solos na área

experimental, Figura 1A, descreve o comportamento da área antes da sistematização, com predominância de Planossolo e Gleissolo, classes de solo característico de terras baixas. Neste sentido, observa-se nitidamente o efeito da sistematização sobre a distribuição espacial de todas as propriedades do solo avaliadas, havendo alteração, exceto para o atributo areia, no qual foi observado distribuição similar antes e depois da sistematização.

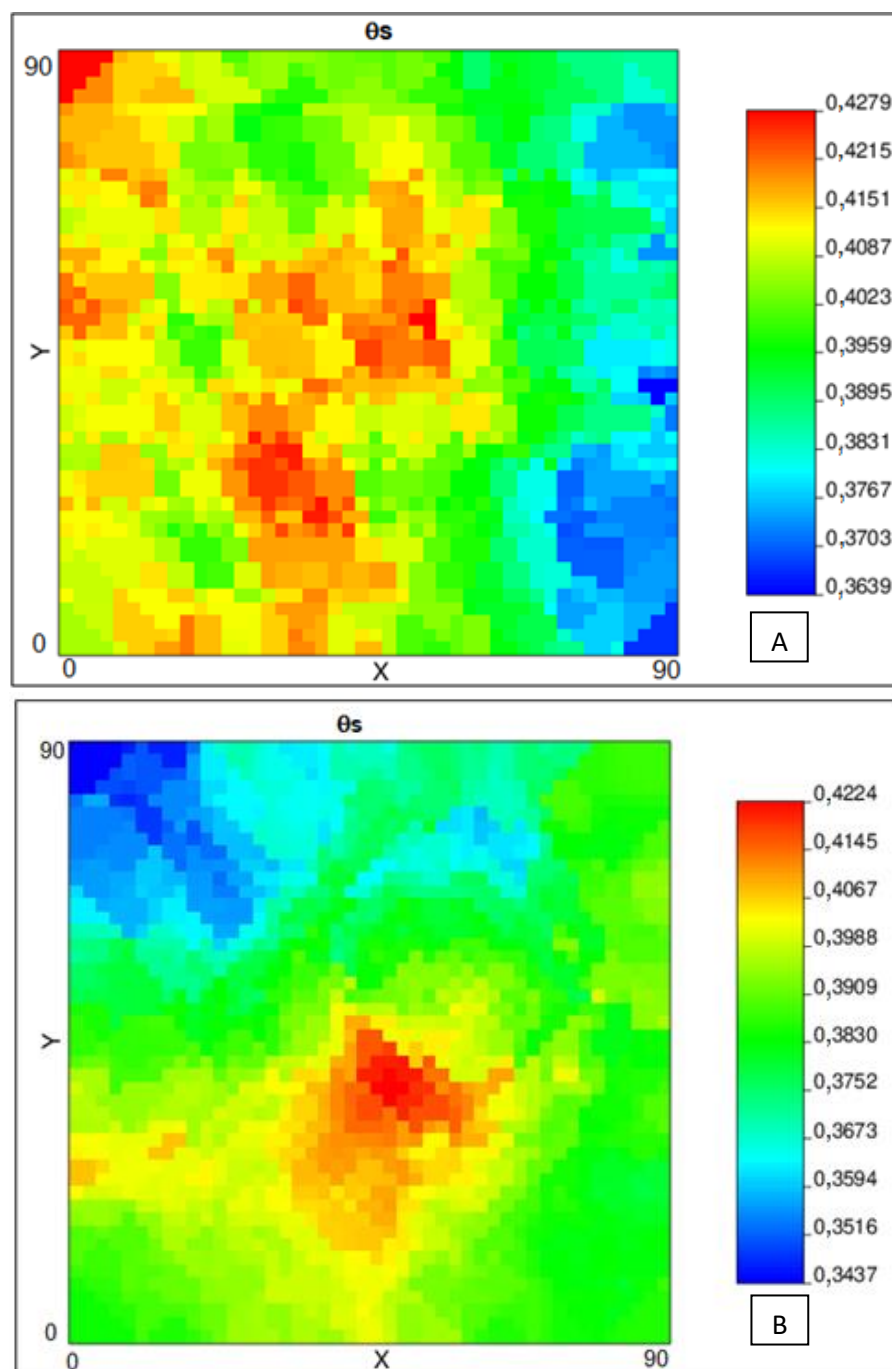


Figura 22 – Distribuição espacial dos valores de θ_s (conteúdo de água no solo na condição de saturação ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

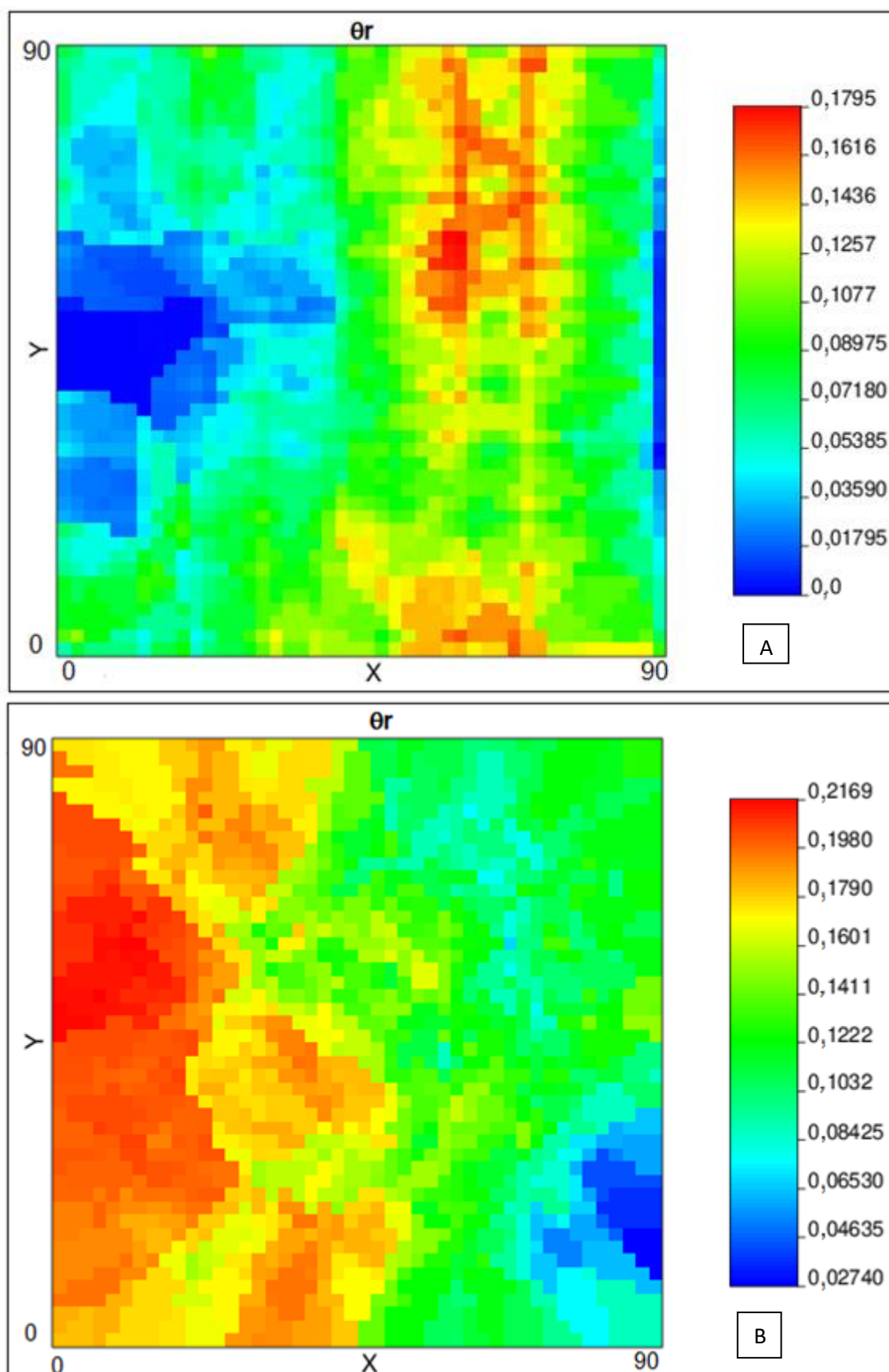


Figura 23 - Distribuição espacial dos dados de θ_r (conteúdo de água residual ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

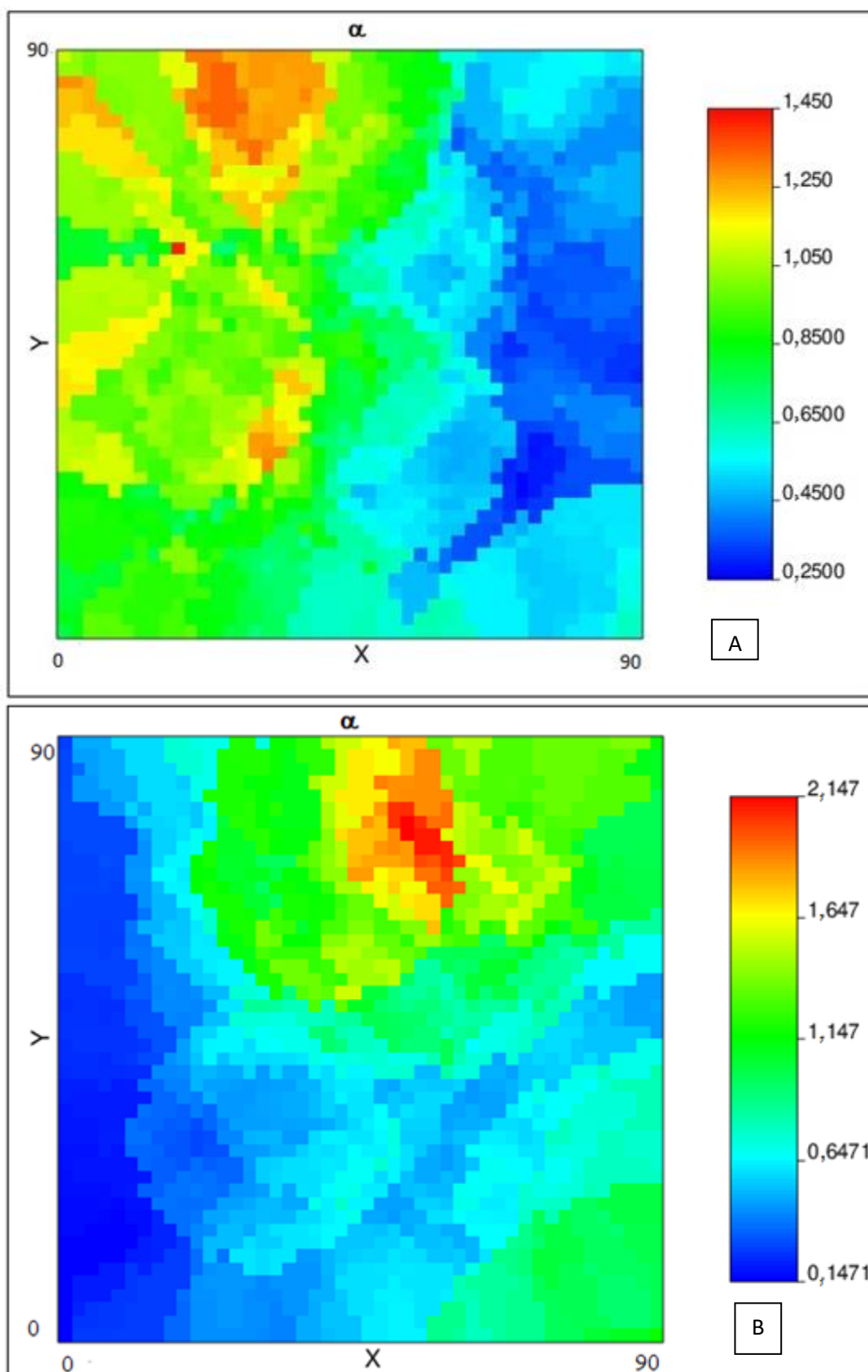


Figura 24 - Distribuição espacial dos dados de α (kPa^{-1}) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

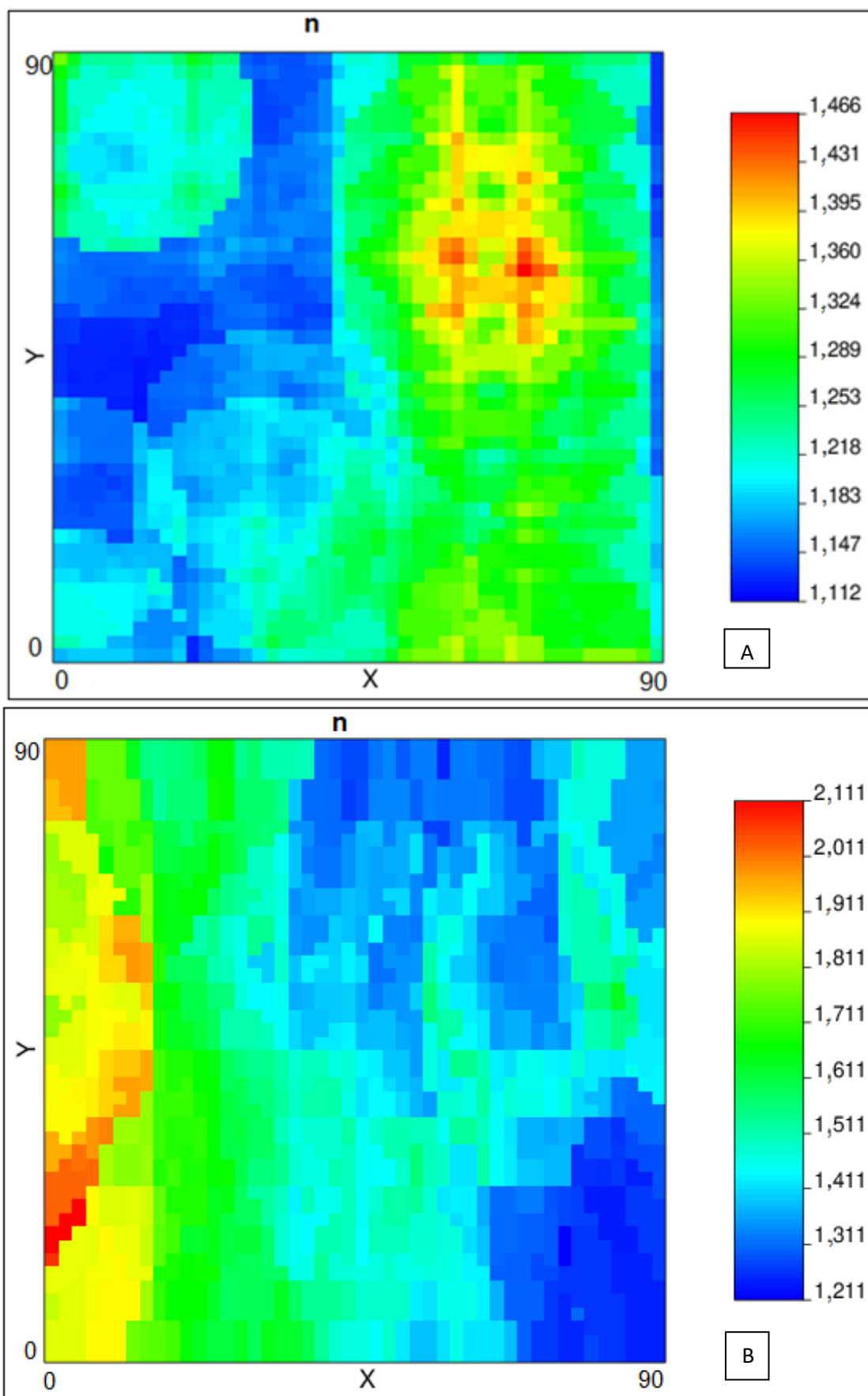


Figura 25 - Distribuição espacial dos dados de n na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

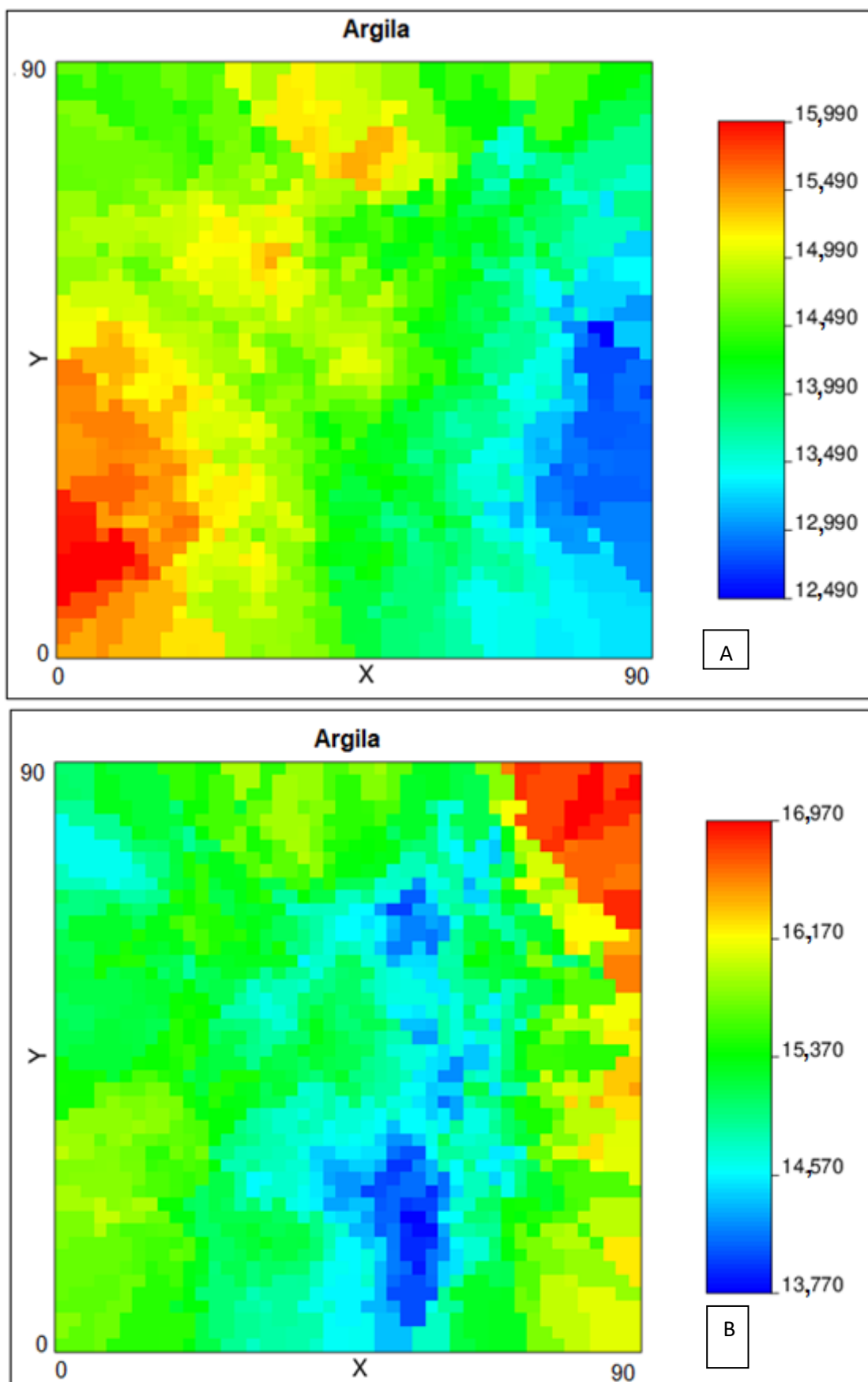


Figura 26 – Distribuição espacial dos dados de Argila (%) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

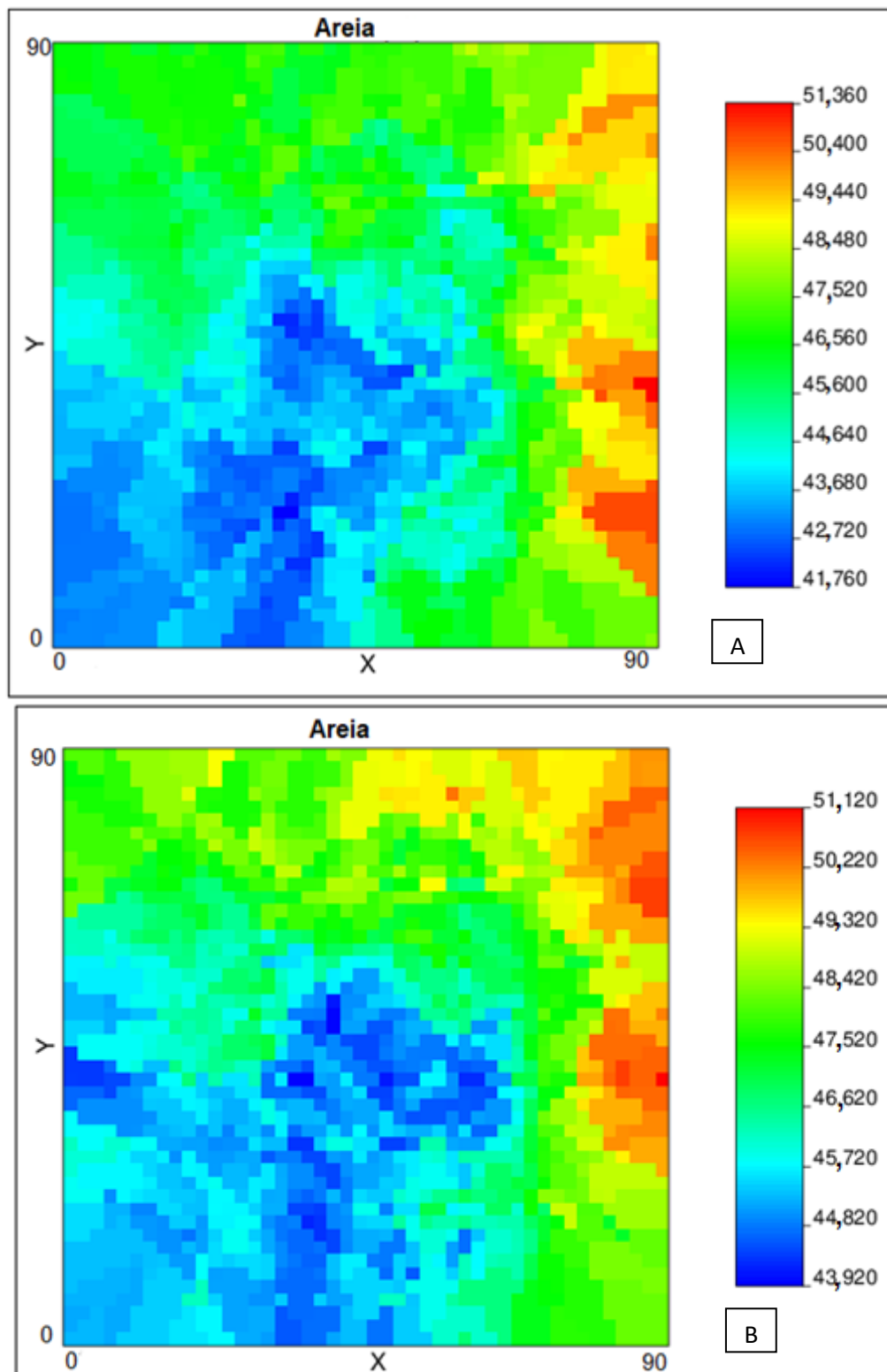


Figura 27 - Distribuição espacial dos dados de Areia (%) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

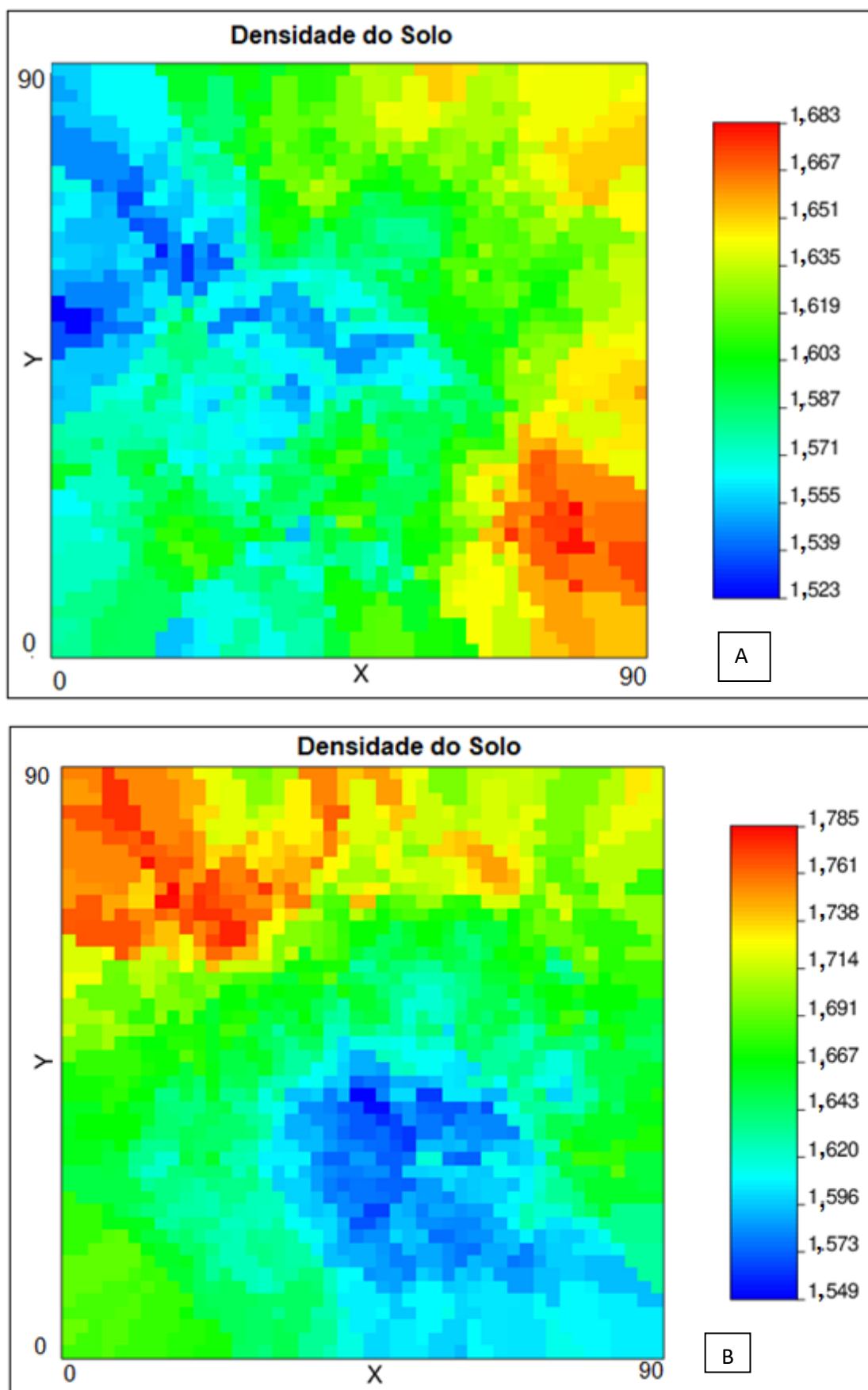


Figura 28 – Distribuição espacial dos dados de Densidade do Solo (D_s (g.cm⁻³)) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

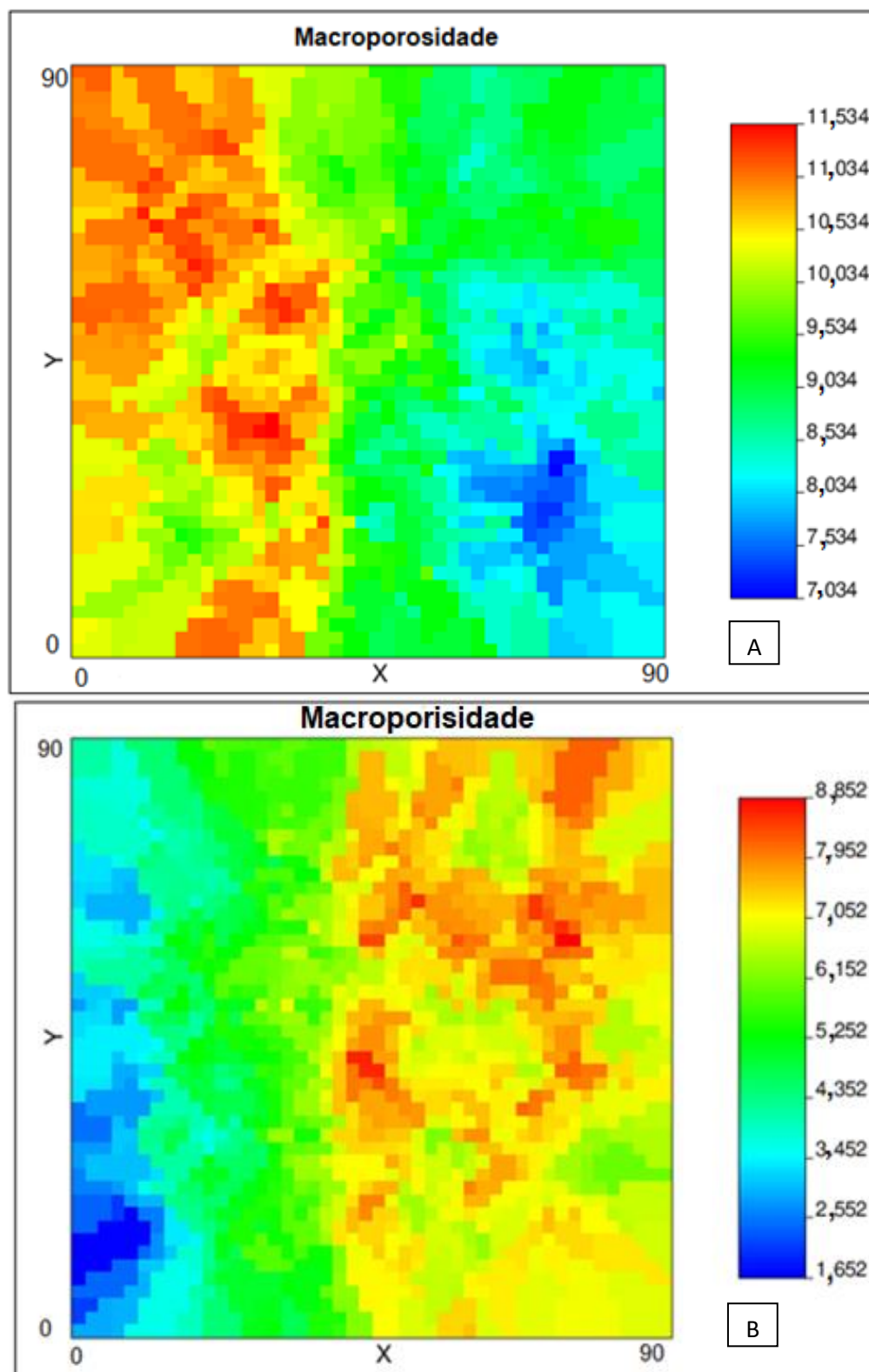


Figura 29 - Distribuição dos dados de macroporosidade do solo (Macro, %) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

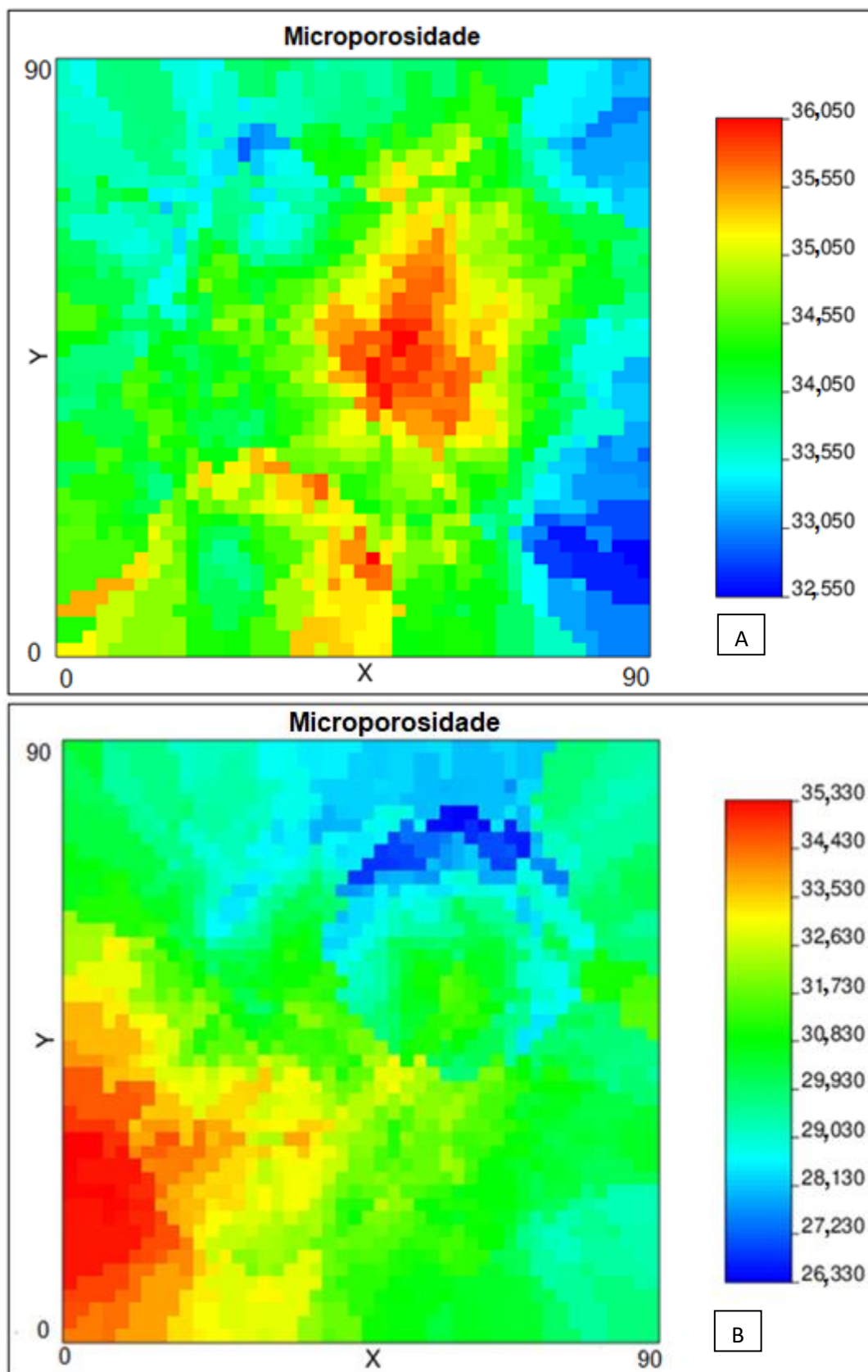


Figura 30 - Distribuição dos dados de microporosidade do solo (Micro, %) na área experimental antes (A) e depois de três meses da sistematização (B).

5.4 Correlação entre os parâmetros físico-hídricos

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos coeficientes de correlação de *Spearman* calculados entre os conjuntos de dados determinados antes da sistematização. Também são apresentados todos os valores calculados da estatística *p* e, em destaque na cor vermelha, os valores de *p* que foram significativos ao nível de probabilidade de 5%. A variável θ_s apresentou correlação significativa com todos os atributos físicos do solo avaliados, sendo que com as variáveis Areia e Ds apresentou uma correlação negativa. Dentre os atributos que apresentaram os maiores valores de correlação com θ_s , destacam-se a Ds (-0,78), Macro (0,65) e Micro (0,61).

A correlação negativa de θ_s com Ds pode estar associada as práticas de cultivo adotadas na área experimental antes da sistematização. O parâmetro θ_r apresentou correlação significativa ($r = -0,27$; $p\text{-valor} = 0,01$) somente com a variável Macro antes da sistematização. Já o parâmetro α apresentou correlação significativa com as variáveis físicas Argila (correlação positiva), Ds (correlação negativa) e Macro (correlação positiva).

Em relação ao parâmetro n (Tabela 3), observa-se que este apresentou correlação significativa somente com a variável Macro. A variável Ds apresentou correlação negativa ($r = -0,65$) e significativa ($p\text{-valor} = 4,4 \times 10^{-13}$) com a macroporosidade, fato este já esperado. Ruehlmann e Korschens (2009) mencionam que a variabilidade espacial de Ds ocorre em função da estrutura do solo, estabelecendo estreita relação com sua porosidade e retenção de água no solo.

Os valores de microporosidade do solo na camada de 0-0,20 m antes da sistematização se correlacionaram significativamente com os de Argila, Areia e Ds, sendo que a maior magnitude do coeficiente de *Spearman*, em termos absolutos, foi encontrado para a correlação com os dados de Areia. Segundo Reichert; Suzuki; Reinert (2007), a microporosidade de um solo é responsável pela retenção e armazenamento de água, enquanto que a macro tem influência na infiltração e drenagem da água no solo.

Tabela 3– Valores dos coeficientes de correlação de *Spearman* calculados entre os conjuntos de dados físico-hídricos do solo avaliados antes da sistematização da área experimental, camada de 0-0,20 m

Parâmetros		θ_s	θ_r	α	n	Argila (%)	Areia (%)	Ds (g/cm ³)	Macro (%)	Micro (%)
θ_s	r	1,0								
	p	-								
θ_r	r	-0,07	1,0							
	p	0,50	-							
α	r	0,49	-0,35	1,0						
	p	$2,5 \times 10^{-7}$	$4,0 \times 10^{-4}$	-						
n	r	-0,08	0,83	-0,51	1,0					
	p	0,41	$2,2 \times 10^{-16}$	$6,3 \times 10^{-8}$	-					
Argila (%)	r	0,308	0,06	0,28	-0,04	1,0				
	p	0,002	0,53	$4,9 \times 10^{-3}$	0,66	-				
Areia (%)	r	-0,522	0,03	-0,17	0,12	-0,45	1,0			
	p	$2,5 \times 10^{-8}$	0,77	0,10	0,24	$3,4 \times 10^{-6}$	-			
Ds (g/cm ⁻³)	r	-0,78	0,18	-0,36	0,14	-0,27	0,51	1,0		
	p	$2,2 \times 10^{-16}$	0,1	0,00025	0,15	0,006	$5,2 \times 10^{-08}$	-		
Macro (%)	r	0,65	-0,27	0,67	-0,29	0,21	-0,15	-0,65	1,0	
	p	$3,1 \times 10^{-13}$	0,01	$1,6 \times 10^{-14}$	0,004	0,04	0,13	$4,4 \times 10^{-13}$	-	
Micro (%)	r	0,61	0,18	-0,123	0,12	0,20	-0,62	-0,50	-0,06	1,0
	p	$1,9 \times 10^{-11}$	0,07	0,22	0,25	0,05	$4,0 \times 10^{-12}$	$8,79 \times 10^{-8}$	0,57	-

θ_s = conteúdo de água no solo na condição de saturação (m³.m⁻³); θ_r = conteúdo de água residual (m³.m⁻³); α e n= são os parâmetros de ajustes do modelo de van Genuchten (1980); Ds = Densidade do Solo; Macro e Micro = macroporosidade e microporosidade do solo, respectivamente.

O efeito da sistematização sobre os valores dos coeficientes de correlação de *Spearman* calculados entre os conjuntos de todas as propriedades físico-hídricas é apresentado na Tabela 4. Da tabela verifica-se que o parâmetro θ_s apresentou correlação significativa com os atributos físicos Areia, Ds, Macro e Micro após a sistematização do solo, ou seja, a correlação dos valores de θ_s com os de Argila foi afetada pela sistematização deixando de ser significativa usando o p-valor ao nível de 5% de probabilidade.

Em termos absolutos, os valores dos coeficientes de correlação de *Spearman* entre os dados de θ_s e Areia, e Ds, e Macro e Micro foram menores após a sistematização do solo (Tabela 4). Desta forma, a sistematização fez com que a relação entre as distribuições dessas variáveis se tornasse mais aleatória. Observa-se na Tabela 4 que a correlação de θ_r também foi afetada pela sistematização, ou seja: antes da sistematização os dados de θ_r eram correlacionados significativamente somente com os de Macro (Tabela 4); entretanto, a sistematização fez com que eles se tornassem também significativamente correlacionados com os de Areia (-0,34) e Micro (+0,45) além de continuarem correlacionados com os de Macro (-0,31) (Tabela 4).

Os valores do parâmetro α que eram correlacionados significativamente com os dados de Argila (+0,28), Ds (-0,36) e Macro (+0,67) passaram a se correlacionar com os dados de Areia (+0,37), Macro (+0,67, i.e., permaneceu o mesmo valor do coeficiente de *Spearman* antes da sistematização – Tabela 3) e Micro (-0,70) após a sistematização (Tabela 4). Também pode ser observado na Tabela 4 que a sistematização aumentou o número de variáveis correlacionadas significativamente com os valores de n.

Antes da sistematização somente os dados de Macro ($r = -0,29$) eram correlacionados com os dados de n (Tabela 3); depois da sistematização os conjuntos de dados de Areia ($r = -0,32$) e de Micro (+0,57) passaram a se correlacionar significativamente com os dados de n, além da significância da correlação entre n e Macro ter sido afetada em termos qualitativos. Do ponto de vista quantitativo ela foi afetada, alterando de -0,29 antes da sistematização (Tabela 3) para -0,39 depois da sistematização (Tabela 4).

Tabela 4- Valores dos coeficientes de correlação de *Spearman* calculados entre os conjuntos de dados físico-hídricos do solo avaliados, nos mesmos pontos amostrais, depois da sistematização da área experimental, camada de 0-0,20 m

Parâmetros		θ_s	θ_r	α	n	Argila (%)	Areia (%)	Ds (g/cm ³)	Macro (%)	Micro (%)
θ_s	r	1,0								
	p	-								
θ_r	r	0,14	1,0							
	p	0,15	-							
α	r	-0,05	-0,65	1,0						
	p	0,64	$2,5 \times 10^{-13}$	-						
n	r	0,15	0,87	-0,86	1,0					
	p	0,14	$2,2 \times 10^{-16}$	$2,2 \times 10^{-16}$	-					
Argila (%)	r	0,03	0,003	0,04	-0,02	1,0				
	p	$8,0 \times 10^{-01}$	0,98	0,69	0,81	-				
Areia (%)	r	-0,26	-0,34	0,37	-0,32	0,17	1,0			
	p	0,0096	0,001	0,00015	0,0013	0,09	-			
Ds (g/cm ³)	r	-0,71	0,04	-0,03	-0,04	0,15	0,31	1,0		
	p	$2,2 \times 10^{-16}$	0,72	0,79	0,73	0,13	0,0015	-		
Macro (%)	r	0,47	-0,31	0,67	-0,39	-0,03	0,27	-0,48	1,0	
	p	$7,9 \times 10^{-7}$	0,0018	$2,6 \times 10^{-15}$	$6,0 \times 10^{-5}$	0,75	0,01	$5,3 \times 10^{-7}$	-	
Micro (%)	r	0,57	0,45	-0,70	0,57	0,02	-0,54	-0,37	-0,36	1,0
	p	$4,9 \times 10^{-10}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-16}$	$4,9 \times 10^{-10}$	0,82	$5,5 \times 10^{-9}$	0,00017	0,00026	-

θ_s = conteúdo de água no solo na condição de saturação (m³.m⁻³); θ_r = conteúdo de água residual (m³.m⁻³); α e n= são os parâmetros de ajustes do modelo de van Genuchten (1980); Ds = Densidade do Solo; Macro e Micro = macroporosidade e microporosidade do solo, respectivamente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sistematização afetou as medidas de posição, de dispersão e de formato das distribuições de todas as propriedades físico-hídricas do solo avaliadas na camada de 0-0,20 m.

O ajuste do modelo teórico de semivariograma que melhor descreve a estrutura de variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas do solo avaliadas foi afetado pela sistematização da área experimental.

A sistematização afeta a correlação, tanto qualitativa como quantitativamente, entre os parâmetros de ajustes do modelo de curva de retenção de van Genuchten e as propriedades físicas do solo avaliadas na camada de 0-0,20.

Sugere-se futuros estudos no intuito de avaliar a relação entre as propriedades físico-hídricas do solo por meio da técnica de co-krigagem, que possibilita além de levar em conta a estrutura de correlação espacial entre as variáveis a estimativa dos parâmetros de ajustes da equação de van Genuchten a partir de propriedades físicas do solo com menor custo de obtenção e que fazem parte de bancos de dados rotineiramente disponíveis na literatura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARF, O; RODRIGUES, R. A. F; SÁ, M. E; CRUSCIOL, C. A. C. Influência da época de semeadura no comportamento de cultivares de arroz irrigado por aspersão em Selvíria, MS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 10, p. 1967–76, 2000.

ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.88, p.153-160,2002

BARRIGOSI, J. A.; YOUNG, L. J.; CRAWFORD, C. A. G.; HEIN, G. L.; HIGLEY, L. G. Spatial and probability distribution of Mexican bean beetle (Coleoptera: Coccinellidae) egg mass populations in dry beans. **Environmental Entomology**, v.30, n.2, p.244-253, 2002.

BERNARDI, C. C. Reuso de Água para Irrigação. Brasília: Isaefgv/Ecobusiness School, 2003. 52p. **Monografia de MBA em Gestão Sustentável da Agricultura Irrigada**.

BETIOLI JUNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; BERNABE FERREIRA, C. J.; SILVA, A. P. D.; BALAREZO GIAROLA, N. F. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 971-982, 2012.

BORSELLI, L.; TORRI, D.; ØYGARDEN, L.; DE ALBA, S.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A.; BAZZOFFI, P.; JAKAB, G. Land levelling. **Soil erosion in Europe**, p. 643-658, 2006.

BRYE, K. R.; SLATON, N. A.; NORMAN, R. J. Penetration resistance as affected by shallow-cut land leveling and cropping. **Soil & Tillage Research**, 81, 1-13, (2005).

BRYE, K. R.; SLATON, N. A.; NORMAN, R. J. Soil physical and biological properties as affected by land leveling in a clayey Aquert. **Soil Science Society of America Journal**, 70:631-642, 2006.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. Bioestatística: Princípios e Aplicações. Porto Alegre: Artmed, 2003.

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

CAMPINAS, D. D. S. N.; DA SILVA FARIAS, P. R.; DE LIMA, H. V. Atributos físicos e matéria orgânica em sistemas de uso do solo. **Revista EDUCamazônia - Educação Sociedade e Meio Ambiente**. 2013, vol. X, n. 1, pp. 109-125.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, p. 211-218, 2009.

COELHO, E.F.; OLIVEIRA, A.M.G.; SILVA, J.G.F.; COELHO FILHO, M.A.; CRUZ, JAISON, L.C. Irrigação e fertirrigação na cultura do mamão. In: SOUSA, V.F.; MARQUELLI, W.A.; COELHO, E.F.; PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A (Ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011.p.441-472.

COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. S.; KATO, E. Modelos de Ajuste e Métodos para a Determinação da Curva de Retenção de Água de um Latossolo-Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 32, p.515-523, 2008.

DENARDIN, L. G. D. O. Variabilidade espaço-temporal de atributos do solo e resposta do arroz irrigado à adubação em sistemas integrados de produção agropecuária. 2017, 86f: il. **Dissertação** (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

DAVALO, M. J. **Curva de retenção de água no solo estimado pelo método da câmara de Richards e psicrômetro**. 2013,48f: il. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Jaboticabal, 2013.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**, v. 57, n. 4, p. 203-212, 2001.

DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A. G. GSLIB: **Geostatistical Software Library and user's guide**. 2ª Edição. Oxford University Press, 1998, 369p.

DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A. G. GSLIB: **Geostatistical Software Library and user's guide**. Oxford University Press, New York, 339p.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Soil water retention curve**, SWRC software (version 3.0 beta) Piracicaba, SP, Brasil, 2001. CD-ROM.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise do solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ. Embrapa Solos. 1997, 212p.

FERREIRA, D. F. Estatística Básica. Lavras, Editora UFLA, 2005. 664p.

GARCÍA-GARIZÁBAL, I.; CAUSAPÉ, J. Influence of irrigation water management on the quantity and quality of irrigation return flows. **Journal of hydrology**, v. 385, n. 1, p. 36-43, 2010.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. **Particles size analysis** In: KLUTE, A. (ed). Methods of Soil Analysis. 2ª ed. Madison, Wisconsin USA. Am. Soc. Agron. 1986. p. 383:411.

GOMES, N. M.; FARIA, M. A. DE; SILVA, A. M.; MELLO, C. R. DE; VIOLA, M. R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 427-435, 2007.

GONÇALVES, F. C.; MARASCA, I.; SOUZA, S. F. G.; TAVARES, L. A. F.; SILVA, P. R. Métodos de determinação da densidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 28, n. 3, p. 165-169, 2013.

HU, W.; SHAO, M. A.; WANG, Q. J.; REICHARDT, K. Soil water content temporal spatial variability of the surface layer of a Loess Plateau hillside in China. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 65, n. 3, p. 277-289, 2008.

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

JAT, M. L.; GATHALA, M. K.; LADHA, J. K.; SAHARAWAT, Y. S.; JAT, A. S.; KUMAR, V.; SHARMA, S., K.; KUMAR, V.; GUPTA, R. Evaluation of precision land leveling and double zero-till systems in the rice-wheat rotation: Water use, productivity, profitability and soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, 105, 112-121, 2009.

JI, X.; KANG, E.; CHEN, R.; ZHAO, W.; ZHANG, Z.; JIN, B. The impact of the development of water resources on environment in arid inland river basins of Hexi region, Northwestern China. **Environmental Geology**, v. 50, n. 6, p. 793-801, 2006.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. H. J. Mining geoestistics. New York, Academic Press Inc., p. 600, 1978

KATO, Y.; KATSURA, K. Rice Adaptation to aerobic soils: physiological considerations and implications for agronomy. **Plant Production Science**, v.17, p.1-12, 2014.

KERRY, R.; OLIVER, M.A. **Determining nugget: sill ratios of standardized variograms from aerial photographs to kriging sparse soil data**. Precision Agriculture, v.9, p.33-56, 2008.

KOSMAS, C.; GERONTIDIS, S.T.; MARATHIANOU, M. The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesbos (Greece). **Catena** 40: 51–68, 2000.

KUOTSU, K.; DAS, A.; LAL, R.; MUNDA, G. C.; GHOSH, P. K.; NGACHAN, S. V. Land forming and tillage effects on soil properties and productivity of rainfed groundnut (*Arachis hypogaea* L.) – rapeseed (*Brassica campestris* L.) cropping system in northeastern India. **Soil & Tillage Research**, v.142, p.15-24, 2014.

LANDIM, P. M. B. **Sobre geoestatística e mapas**. Campinas SP: Editora Terræ Didática, 2006. p.19-33.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2ed. Edusp, São Paulo, 2012. 335p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação - Princípios e Métodos**. 2a.Ed. Viçosa: Editora UFV, 2007, 358p.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; RAMOS, M.C. Soil alteration due to erosion, ploughing and levelling of vineyards in north east Spain. **Soil Use Manage.** 25, 183–192, 2009.

MATHERON, G. **Traite de geostatistique applique, Tome II: Le krigeage. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières.** n. 24, Paris: Editions Bureau de Recherche Géologiques et Minières, 1963.

MION, R. L.; NASCIMENTO, E. M. S.; SALES, F. A. L. de.; SILVA, S. F. da.; DUARTE, J. M. L.; SOUSA, B. M. de. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo amarelo. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 6, p.2057-2066, 2012.

MONTANARI, R.; ZAMBIANCO, E. C.; CORRÊA, A. R.; PELLIN, D. M. P.; CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milho. **Revista Ceres**, Lavras, v.59, n.1, p.407- 410,2012.

MORENO, J. A. Clima do Rio Grande do Sul. Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 42p, 1961.

MOURÃO, A. C. **Variabilidade espacial da salinidade em solo cultivado com videira irrigada no vale do São Francisco em Petrolina-PE.** 2014, 52f.: il. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem). Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2014.

OLIVEIRA, C. F. de. Censo da lavoura de arroz irrigado do Rio Grande do Sul - safra 2004-05. Porto Alegre: **IRGA**, 2006. 122p.

OLIVEIRA, I. A. **Caracterização de solos sob diferentes ambientes na região Sul do Amazonas.** 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2013.

PARFITT, J. M. B.; TIMM, L. C.; REICHARDT, K.; PAULETTO, E. A. Land levelling impacts on lowland soil physical attributes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 315-326, 2014.

PARFITT, J. M. B. **Impacto da sistematização sobre atributos físicos, químicos e biológico em solos de várzea.** 2009. 92 f. Tese (Doutorado em Solos).

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, 2009. 92f.: Il.

PETER, K. D.; D'OLEIRE-OLTMANN, S.; RIES, J. B.; MARZOLFF, I.; HSSAINE, A. A. Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data. **Catena**, 113, 24-40, 2014.

PINTO, L. F. S.; MIGUEL, P.; PAULETTO, E. A. Solos de várzea e terras baixas. In: Emydio, M.B; Rosa, A.P.S.A da; Oliveira, A.C.B de. (Ed.) **Cultivo de Soja e Milho em Terras Baixas do Rio Grande do Sul**. Brasília: Embrapa, 2017. p. 23-43.

PINTO, M. A. B.; PARFITT, J. M. B.; TIMM, L. C.; FARIA, L. C.; SCIVITTARO, W. B. Produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas em função da disponibilidade de água e de atributos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 51(9), 1584-1593, 2016.

PORTUGAL, A.F.; COSTA, O.D'A.V.; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da zona da mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n.2, p. 575-585, 2010.

POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:19-27, 2003.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. 2. ed. Barueri. Manole, 2012. 500p.

REICHERT, J. M., REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**. V. 27, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agrários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos, Ciência do Solo**, 5:49-134, 2007.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

REMY, N.; BOUCHER, A.; WU, J. Applied Geostatistics with SGeMS: **A User's Guide**, Cambridge University Press, 2009, 284p.

RODRIGUES, V. A.; FENNER, P. T.; SANSÍGOLO, C. A.; MORAES, M. H. Estimativa da água no solo em floresta de Eucalyptus grandis. **Irriga**, 17(4), 523,2012.

RUEHLMANN, J.; KÖRSCHENS, M. Calculating the Effect of Soil Organic Matter Concentration on Soil Bulk Density. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 3, p. 876, 2009.

SARAIVA, K. R.; SOUZA, F. Estatísticas sobre irrigação nas regiões sul e sudeste do Brasil segundo o censo agropecuário 2005-2006. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 2, p. 168-176, 2012.

SCHÄFFER, B.; ATTINGER, W.; SCHULIN, R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery - Soil physical and mechanical aspects. **Soil and Tillage Research**, v. 93, n. 1, p. 28-43, 2007.

SHARIFI, A.; GORJI, M.; ASADI, H.; POURBABAE, A. A. Land leveling and changes in soil properties in paddy fields of Guilan province, Iran. **Paddy and water environment**, v. 12, n. 1, p. 139-145, 2014.

SIEGEL S. **Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento**. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil; 1975.

SOARES DE SOUZA, G.; SOARES DE SOUZA LIMA, J.; XAVIER, A. C.; DUARTE DA ROCHA, W. S. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia agraria**, v.11, p.73-81, 2010.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geoestatísticas to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 2, p. 45-94, 1985.

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

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.). **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2000, v.1, p.1-54.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. Spatial variability and pedology. In: WILDING, L. P.; SMECK, N. E.; HALL, G. F. (Eds.) **Pedogenesis and soil taxonomy: concepts and interactions**. New York: Elsevier, 1983. p.83-116.

XAVIER, C. M. **Avaliação de uma classe de coeficientes de correlação sob normalidade bivariada**. 2014. 98 f. Tese (Doutorado) - Curso de Estatística Aplicada, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

ZHANG, Q.; YANG, Z.; LI, Y.; CHEN, D.; ZHANG, J.; CHEN, M. Spatial variability of soil nutrients and GIS-based nutrient management in Yongji County, China. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 24, n. 7, p. 965-981, 2010.