



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

Tese

Variabilidade espacial de indicadores físicos e visuais da qualidade estrutural dos
solos da sub-bacia Santa Rita, Pelotas/RS

Ivana Kruger Tuchtenhagen

Pelotas, 13 de julho de 2018

Ivana Kruger Tuchtenhagen

Variabilidade espacial de indicadores físicos e visuais da qualidade estrutural dos solos da sub-bacia Santa Rita, Pelotas/RS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção de título de Doutor em Ciências, com ênfase em Manejo e Conservação do Solo e da Água.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Cláudia Liane Rodrigues de Lima

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a Maria Cândida Moitinho Nunes

Co-Orientador: Prof. Dr Luis Carlos Timm

Pelotas, 2018

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

T887v Tuchtenhagen, Ivana Kruger

Variabilidade espacial de indicadores físicos e visuais da qualidade estrutural dos solos da sub-bacia Santa Rita, Pelotas/RS / Ivana Kruger Tuchtenhagen ; Cláudia Liane Rodrigues de Lima, orientadora ; Maria Cândida Moitinho Nunes, Luis Carlos Timm, coorientadores. — Pelotas, 2018.

105 f.

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

1. Estrutura do solo. 2. Qualidade do solo. 3. Manejo do solo. I. Lima, Cláudia Liane Rodrigues de, orient. II. Nunes, Maria Cândida Moitinho, coorient. III. Timm, Luis Carlos, coorient. IV. Título.

CDD : 631.4

Data da defesa: 13 de julho de 2018.

Banca examinadora:

Professora Dr^a Cláudia Liane Rodrigues de Lima (Presidente)
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” - UFPel

Professor Dr Marcelo Peske Hartwig
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense - IFSUI

Professor Dr Leandro Sanzi Aquino
Centro de Engenharias, UFPel

Pós Doutoranda Dr^a Lizete Stumpf
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

Aos meus pais, Ildomar e Isolete, aos meus irmãos Igor e Izaque, aos meus sobrinhos Samuel e Poliana, dedico.

Agradecimentos

Fernando Pessoa afirmava que sempre é preciso saber quando uma etapa chega ao final. “Encerrando ciclos, fechando portas, terminando capítulos”. É então chegada a hora de vestir-me de nova cor, transformar novos sonhos em realidade.

Antes, porém, de trilhar novos caminhos, devo minha gratidão, pois agradecer é um gesto de reconhecimento e retribuição às graças, benefícios, dádivas, favor e gentilezas recebidas. Todos e a tudo sou grata pelo que tenho recebido em um nível maior do que meu merecimento.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado forças durante esta caminhada e permitir alcançar mais esta vitória.

Sou imensamente grata ao meu pai Ildomar Tuchtenhagen, e a minha mãe Isolete Kruger Tuchtenhagen, os quais são meus tesouros mais preciosos, pelo exemplo de vida e de conduta, pela dedicação, apoio e incentivo dados de forma incondicional ao longo da minha vida. Sem o amor e a companhia de vocês seria impossível trilhar este caminho e enfrentar todos os obstáculos que encontrei ao longo desta caminhada. Obrigada pelo voto de confiança e por sempre acreditarem na minha capacidade, eu amo vocês!

Sou grata também aos meus queridos irmãos Igor Kruger Tuchtenhagen e Izaque Kruger Tuchtenhagen pela amizade, incentivo, paciência, estímulo e por sempre acreditarem no meu potencial me dando força e não me deixando desistir.

Ao meu noivo, Mikael dos Santos Cardoso, pelo amor, amizade, cumplicidade, companheirismo, apoio incondicional e principalmente pela paciência, compreensão e ajuda. Agradeço-te imensamente por sempre acreditar em mim, me incentivar e me aconselhar em todas as etapas mais difíceis desta caminhada, compreendendo sempre meus momentos de ausência, medo e ansiedade.

À minha orientadora Cláudia Liane Rodrigues de Lima, pela orientação, dedicação, amizade construída, pela contribuição no meu processo de formação e construção do conhecimento, pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional, saiba que contigo aprendi muito, e esse aprendizado com certeza me tornou uma profissional melhor. Agradeço muito por todos os ensinamentos e conhecimentos transmitidos e por ter deixado em mim o espírito da organização e da seriedade.

Quero agradecer a professora Maria Cândida Moitinho Nunes e ao professor Luis Carlos Timm pela co-orientação, pelo compromisso à docência e orientação a mim prestada, pela contribuição no meu processo de formação e construção do conhecimento, pela ajuda imensurável, pela dedicação ao meu trabalho, pela amizade, carinho, enfim por tudo, o meu muito obrigado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, pelo conhecimento a mim passado, permitindo o enriquecimento da minha formação.

À Universidade Federal de Pelotas, ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas de pós-graduação, estagiários e funcionários do departamento de solos da UFPel pela ajuda constante e amizade construída.

Às minhas colegas e amigas: Aline Hernandez Kath, Thaís Antolini Vecozzi e Juliana Britto e aos meus colegas Gabriel Lemos e Anderson Silveira pelo companheirismo e amizade, vocês se tornaram mais que colegas, são amigas e amigos que quero ter sempre por perto e que fazem os meus dias de trabalho mais “leves e alegres”.

A Thaís Brod, a qual foi o meu braço direito em todas as análises realizadas, sem você seria muito mais difícil a realização do meu trabalho, jamais terei palavras para te agradecer!

Agradeço, a todos que, de uma forma ou de outra, me ajudaram. A vocês o meu sincero muito obrigado.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço e a dedicação, não existe meio termo. O você faz uma coisa bem feita ou não faz”.

Ayrton Senna

Resumo

TUCHTENHAGEN, Ivana Kruger. **Variabilidade espacial de indicadores físicos e visuais da qualidade estrutural dos solos da sub-bacia Santa Rita, Pelotas/RS.** 2018. 105f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Visando à sustentabilidade dos recursos naturais, são necessárias informações sobre a qualidade física do solo, fornecendo subsídios ao planejamento conservacionista agrícola e ambiental. Nessa perspectiva, e em escala de bacias hidrográficas, a conservação do ambiente natural apresenta-se como um tema de grande importância no contexto econômico, social e cultural. Este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade estrutural dos solos da sub-bacia Santa Rita, por meio de indicadores físicos e visuais, visando identificar e mapear a condição física e construir uma base inicial de dados associados à qualidade física do solo para futuros estudos de manejo e conservação do solo. O presente estudo foi desenvolvido na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na Bacia hidrográfica do Arroio Moreira Fragata (BHAM), Pelotas, no Sul do Estado Rio Grande do Sul, Brasil. A BHAM é uma das principais bacias da região, sendo responsável pelo abastecimento de água para a população de Pelotas. Inicialmente, foi realizada uma classificação de imagem de satélite para a localização das classes de solos presentes na sub-bacia Santa Rita. Foi realizado uma amostragem de solo pontos georeferenciados e irregularmente espaçados, de uma malha amostral na sub-bacia Santa Rita, em que foi analisado os seguintes atributos do solo: avaliação visual da estrutura do solo, avaliação visual do solo, diâmetro médio ponderado, macroagregados, microagregados, resistência tênsil de agregados, friabilidade, carbono orgânico total, resistência do solo à penetração, densidade do solo, porosidade do solo, macroporosidade, microporosidade, na camada de 0,00-0,10 m. Para a análise do comportamento desses, os resultados foram primeiramente submetidos à estatística descritiva e ao teste de Kolmogorov-Smirnov no intuito de verificar a tendência de normalidade da distribuição dos dados. A estrutura de variabilidade espacial foi avaliada por meio de semivariogramas experimentais e teóricos e respectivos parâmetros de ajustes (efeito pepita C_0 , patamar $C+C_0$ e alcance A). Quando identificada a estrutura de dependência espacial, a krigagem ordinária foi usada para a elaboração dos mapas das variáveis; se não identificada, o interpolador inverso da distância ponderada (idw) foi utilizado. Foi possível identificar, caracterizar a variabilidade espacial e elaborar mapas de distribuição espacial da estrutura do solo usando tais metodologias. A avaliação visual da estrutura do solo e da avaliação visual do solo apresentam praticidade para diferenciar sistemas de uso e manejo, podendo ser consideradas como indicadores da qualidade física do solo. A partir dos parâmetros físicos como diâmetro médio ponderado, macroagregados, microagregados, resistência tênsil de agregados, friabilidade, carbono orgânico total, resistência do solo à penetração, densidade, porosidade, macroporosidade, e microporosidade do solo, foram capazes de identificar alterações nas condições estruturais em decorrência de uso e de unidade pedológica, sendo importantes indicadores da qualidade do solo.

Palavras-chave: estrutura do solo; qualidade do solo; manejo do solo.

Abstract

TUCHTENHAGEN, Ivana Kruger. **Spatial variability of physical and visual indicators of the structural quality of soils in the sub-basin Santa Rita, Pelotas/RS.** 2018. 105f. Thesis (PhD Program) – Soil and Water Management Post-Graduation Program. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Aiming at the sustainability of natural resources, information about the soil physical quality is necessary to subsidize farming and environmental conservation plans. In such perspective, and regarding water basins, the conservation of the natural environment is a theme of great relevance in the current economic, social and cultural contexts. This study aimed at evaluating the structural quality of the soils in the sub-basin Santa Rita based on physical and visual indicators, with the purpose of identifying and mapping their physical conditions and building up an initial data base of the soil physical quality for further studies on soil management and conservation. This research was carried out in the sub-basin Santa Rita, which is part of the Water Basin Arroio Moreira Fragata (BHAM), Pelotas, in the South of Rio Grande do Sul State, Brazil. BHAM is one of the main basins in the region, and is responsible for the water supply for Pelotas population. Initially, satellite images were classified to identify the classes of soils present in the sub-basin Santa Rita. Soil sampling was carried out at georeferenced and irregularly spaced points of a sampling grid in the sub-basin Santa Rita. The following soil properties were analyzed: soil structure visual evaluation, soil visual evaluation, weighted mean diameter, macroaggregates, microaggregates, aggregate tensile strength, friability, total organic carbon, soil penetration resistance, soil density, soil porosity, macroporosity, and microporosity in the 0.00-0.10m layer. To analyze the behaviour of these properties, the results were firstly submitted to descriptive statistics and the Kolmogorov-Smirnov test aiming at verifying the data distribution normality tendency. The spatial variability structure was evaluated using experimental and theoretical semivariograms and the respective fitting parameters (C0 nugget effect, C+C0 sill and range A). When the spatial dependence was identified, ordinary kriging was used to elaborate the map of variables; when it was not identified, the inverse distance weighted interpolator (idw) was employed. The spatial variability was identified and characterized and maps of the soil structure spatial distribution were created using these methodologies. The visual evaluation of the soil structure and the soil visual evaluation were practical ways of differentiating systems of use and management, and can be considered indicators of the soil physical quality. The soil physical parameters such as weighted mean diameter, macroaggregates, microaggregates, aggregate tensile strength, friability, total organic carbon, soil resistance to penetration, density, porosity, macroporosity and microporosity enabled the identification of alterations in the structural conditions regarding use and pedological units and are considered important indicators of soil quality.

Keywords: soil structure, soil quality, soil management.

Lista de Figuras

- Figura 1 - Localização do Estado do Rio Grande do Sul no mapa do Brasil (A), da bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata no mapa do Estado do Rio Grande do Sul (B), da bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata no mapa do município de Pelotas-Rio Grande do Sul (C) e dos limites de delimitação da sub-bacia Santa Rita dentro da bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata (D).28
- Figura 2 - Mapa de distribuição das classes de solos na sub-bacia Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS (Cunha & Siveira, 1996).29
- Figura 3 - Mapa de ocupação e cobertura do solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.30
- Figura 4 – Mapa de distribuição das classes de declividades do relevo na sub-bacia Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.31
- Figura 5 - Esquema da amostragem sistemática do solo (pontos em cor preto) na sub- bacia hidrográfica Santa Rita, Pelotas-RS, inserida dentro do mapa de distribuição das classes de solo na sub-bacia.....32
- Figura 6 - Esquema de amostragem sistemática (pontos em cor preto) para coleta de solo para a avaliação visual da estrutura do solo na sub- bacia hidrográfica Santa Rita, Pelotas-RS, inserida dentro do mapa de distribuição das classes de solo na sub-bacia.....33
- Figura 7 - Extração de um bloco de solo com pá de corte em uma área (pastagem) para aplicação das metodologias de avaliação visual da estrutura do solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, Pelotas-RS.....34

- Figura 8 - Bloco de solo sendo quebrado com as mãos para avaliação da agregação do solo.....34
- Figura 9 - Descrição a campo da estrutura do solo em uma bandeja plástica e tabela de classificação (Guimarães et al., 2011) que define as características distintivas em cada uma das cinco categorias de qualidade.35
- Figura 10 - Gráfico “Box Plot” da Avaliação Visual da Estrutura do Solo (a) e da Avaliação Visual do Solo (b), nos 37 pontos georreferenciados da malha amostral, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.....44
- Figura 11 - Mapas de distribuição espacial das variáveis Avaliação Visual da Estrutura do Solo - VESS (a) e à Avaliação Visual do Solo - VSA (b), na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.47
- Figura 12 - Gráfico “Box Plot” do diâmetro médio ponderado (a); macroagregados (b); microagregados (c); resistência tênsil de agregados (d); friabilidade (e) e carbono orgânico total (COT) (f), nos 106 pontos georreferenciados da malha amostral, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.....50
- Figura 13 - Mapas de distribuição espacial das variáveis de diâmetro médio ponderado de agregados (a); macroagregados (b); microagregados (c); resistência tênsil de agregados (d); friabilidade (e) e carbono orgânico total (f) na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.60
- Figura 14 - Gráfico “Box Plot” de resistência do solo à penetração (a); densidade do solo (b); porosidade total (c); macroporosidade (d) e microporosidade (e) da malha amostral, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.....62
- Figura 15 - Mapas de distribuição espacial das variáveis de resistência do solo à penetração (a); densidade do solo (b); porosidade total (c); macroporosidade (d) e microporosidade (e), na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.69

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Estatística descritiva para as avaliações visuais do solo (VESS e VSA), na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.	44
Tabela 2 - Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para as avaliações visuais do solo (VESS e VSA), na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.	46
Tabela 3 - Estatística descritiva para agregação e resistência tênsil dos agregados do solo, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.	51
Tabela 4 - Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para as variáveis de agregação e resistência tênsil dos agregados do solo, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.	55
Tabela 5 - Parâmetros da estatística descritiva para resistência do solo à penetração, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.	63
Tabela 6 - Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.	67

Sumário

1 Introdução	15
1.1 Hipóteses	16
1.2 Objetivo geral	16
1.2.1 Objetivos específicos.....	17
2 Revisão de literatura	17
2.1 Avaliação visual do solo	17
2.2 Agregação do solo	20
2.3 Resistência tênsil dos agregados e friabilidade do solo	21
2.4 Resistência do solo à penetração	23
2.5 Geoestatística	24
3 Material e Métodos.....	27
3.1 Caracterização da área de estudo	27
3.2 Amostragem do solo e estabelecimento da malha experimental	31
3.3 Avaliação visual da estrutura do solo	32
3.4 Agregação, resistência tênsil dos agregados e friabilidade do solo	39
3.5 Resistência do solo à Penetração, Densidade do Solo, Porosidade do Solo, Macroporosidade e Microporosidade	41
3.6 Análises estatísticas.....	41
4 Resultados e discussão.....	43
4.1 Variabilidade espacial da avaliação visual da estrutura do solo (VESS e VSA).	43
4.2 Variabilidade espacial da agregação e resistência tênsil dos agregados do solo	49
4.3 Variabilidade espacial da resistência à penetração.....	61
5 Referências	73

1 Introdução

Para um adequado manejo, visando à sustentabilidade dos recursos naturais, são necessárias informações sobre a qualidade física do solo, identificando áreas com suscetibilidade a degradação, fornecendo subsídios ao planejamento conservacionista agrícola e ambiental. Nessa perspectiva, a conservação do ambiente natural apresenta-se como um tema de grande importância no contexto econômico, social e cultural.

Para avaliar a qualidade do solo é necessária a seleção de indicadores e modelos para verificar os impactos ambientais (LEGAZ et al., 2017). Os indicadores de qualidade do solo podem ser divididos em atributos físicos (CRITTENDEN et al., 2015), químicos (CHERUBIN et al., 2015), biológicos (GARBUSU et al., 2011) e complementarmente, os visuais (GUIMARÃES et al., 2013).

Dentre os parâmetros físicos mais frequentemente adotados na literatura para a avaliação estrutural do solo estão a densidade, a porosidade, a estabilidade de agregados, a resistência tênsil dos agregados, a friabilidade, o carbono orgânico, a resistência do solo à penetração, a pressão de preconsolidação, o índice de compressão e o grau de compactação. Já os indicadores visuais mais comumente adotados são baseados nos métodos Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) e Visual Soil Assessment (VSA).

A exploração e uso dos recursos naturais de uma forma desenfreada têm causado uma preocupação da sociedade sob todos os aspectos. A bacia hidrográfica (BH) tem sido adotada como unidade para o planejamento e gestão de recursos naturais. Em termos de planejamento experimental para estudos de manejo e conservação dos recursos naturais na BH, a caracterização e quantificação da estrutura de variabilidade espacial dos atributos do solo se constitui em uma ferramenta valiosa, haja vista que permite definir o intervalo adequado de amostragem delimitando zonas homogêneas, reduzindo significativamente os custos relacionados ao monitoramento de dados de campo.

Dentre as bacias hidrográficas localizadas no Sul do Estado do Rio Grande do Sul (RS), a do arroio Moreira/Fragata (BHAMF) representa uma unidade de planejamento e gestão ambiental fundamental para a região, sendo uma das responsáveis pelo abastecimento de água para a população de Pelotas. A BHAMF é subdividida em sub-bacias, cada uma com características e especificidades

diferentes no que tange ao uso e ocupação dos seus recursos naturais. Entre elas, a sub-bacia Santa Rita apresenta ao longo de sua extensão uma grande variedade de solos e tipos de usos da terra, sendo ocupada principalmente por propriedades rurais voltadas para produção leiteira, mata nativa, cultivos de milho e pêssego.

Desta forma, o presente estudo se justifica no fato de que a identificação das potencialidades e das vulnerabilidades de cada classe de solo face aos diferentes sistemas de uso e ocupação propiciará subsídios para planejamento e uso dos recursos naturais na sub-bacia Santa Rita.

1.1 Hipóteses

- i) O método de avaliação visual permite um diagnóstico da qualidade do solo com respostas rápidas, fáceis e com boa representatividade para a comunidade científica e agricultores.
- ii) Os atributos físicos agregação, resistência tênsil de agregados, friabilidade, resistência do solo à penetração, densidade, porosidade, macroporosidade, e microporosidade do solo, são importantes indicadores da qualidade do solo, portanto podem auxiliar na avaliação e monitoramento em grande escala, devido ao auxílio de dependência espacial, neste caso em uma sub-bacia com diferentes solos e tipos diferenciados de uso e manejo.
- iii) Mapas para avaliar a distribuição espacial dos atributos físicos do solo indicam os locais com maior suscetibilidade à degradação física, considerando diferentes tipos de solos, de usos e de sistemas de manejos.

1.2 Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade estrutural dos solos da sub-bacia Santa Rita, por meio de indicadores físicos e visuais, visando identificar e mapear a condição física e construir uma base inicial de dados associados à qualidade física do solo para futuros estudos de manejo e conservação do solo.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- i) Quantificar indicadores de Avaliação Visual da Estrutura do Solo e Avaliação Visual do Solo.
- ii) Mapear o padrão de comportamento espacial dos indicadores de Avaliação Visual da Estrutura do Solo e Avaliação Visual do Solo.
- iii) Mapear o padrão de comportamento espacial dos atributos físicos diâmetro médio ponderado, resistência tênsil de agregados e resistência mecânica do solo à penetração.

2 Revisão de literatura

2.1 Avaliação visual do solo

O uso de métodos de avaliações visuais da estrutura do solo está se tornando cada vez mais comum, já que distinguem com simplicidade e agilidade, a qualidade do solo, ao mesmo tempo em que proporcionam fácil entendimento e respostas rápidas para a comunidade científica e agricultores com recursos limitados (ASKARI et al., 2013; GUIMARÃES et al., 2017a), auxiliando na tomada de decisões.

A rápida avaliação da qualidade do solo é uma importante estratégia no planejamento agrícola, possibilitando a identificação e o aprimoramento de sistemas de manejo e de preservação ambiental. A necessidade de diagnóstico rápido e confiável da qualidade do solo conduz ao desenvolvimento de estudos baseados na avaliação visual de atributos que indiquem sua qualidade (STEFANOSKI et al., 2013; GUIMARÃES et al., 2017b). Existem na literatura vários métodos de avaliação visual, sendo os mais comumente utilizados os de Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) “Visual Evaluation Soil Structure” (BALL et al., 2007) e de Avaliação Visual do Solo (VSA) “Visual Soil Assessment” (SHEPHERD, 2009).

O método VESS foi originalmente desenvolvido entre as décadas de 1950 e 1960, por Peerlkamp e, posteriormente, adaptado por Ball et al. (2007), devido algumas dificuldades encontradas no método original, como o fato da escala da qualidade estrutural ser inicialmente de 10 classes, e as mesmas não estarem bem definidas assim como a necessidade de se incluir mais detalhes como cor, forma e orientação de agregados, poros e raízes. Esse método foi aprimorado por Guimarães

et al. (2011), onde foi acrescentada uma chave visual, que inclui fotografias de amostras de solo, em cada categoria de qualidade estrutural.

Cada categoria tem uma característica distintiva, sendo dividida em uma escala de pontuação que vai da menor qualidade estrutural, para o solo com melhores características até para solo com as piores características. Consiste em analisar visualmente um bloco de solo, verificando atributos como a estabilidade, tamanho e porosidade dos agregados, identificar camadas com diferenças estruturais, comportamento do sistema radicular, entre outros. Os blocos são classificados com escores variando de 1 a 5 representando, respectivamente, condições de boa a pobre qualidade estrutural. A atribuição de escores e o cálculo do escore final são realizados por meio de média ponderada, conforme Guimarães et al. (2011).

As avaliações podem ser feitas a qualquer momento do ano, mas, de preferência, quando o solo estiver úmido, de modo que um bloco de solo possa ser retirado, sem alterar a estrutura. O bloco pode ser quebrado e pode ser mais difícil sua retirada se o solo estiver seco, de modo que a avaliação pode se tornar imprecisa (BALL et al., 2007).

Nos últimos anos, diversos pesquisadores das mais variadas nacionalidades desenvolveram métodos baseados nas avaliações visuais da qualidade da estrutura do solo. O uso destes métodos tem sido incentivado pelas atividades do Grupo de Trabalho “Visual soil examination and evaluation” da ISTRO (International Soil Tillage Research Organisation). Este grupo de trabalho promoveu uma reunião em 2005, no norte da França, onde foram discutidos dez métodos de avaliação da estrutura do solo.

Em 2011, na Dinamarca, o grupo reuniu-se com o objetivo de continuar as discussões sobre a utilização e experiências de métodos de campo para análise e avaliação do solo, tendo entrado em pauta também os métodos que analisam o subsolo. Destacaram-se as aplicações dos métodos visuais para garantir a qualidade do solo, visando sanidade e quantidade na produção agrícola, evitando a compactação, perdas ambientais e melhoria no armazenamento de carbono.

O encontro do Grupo de Trabalho “Visual soil examination and evaluation” da ISTRO (International Soil Tillage Research Organisation) de 2014 ocorreu no Brasil, onde se pode analisar a qualidade estrutural de solos tropicais, com textura argilosa e arenosa, sob plantio direto, produção de culturas anuais (soja e milho) e cana

colhida mecanicamente. Foram discutidas estratégias de prevenção de compactação do solo explorando os métodos para a avaliação visual, buscando estratégias de prevenção da compactação na superfície e no subsolo de solos tropicais.

O VSA foi uma das metodologias desenvolvidas que uniu a participação dos agricultores com seu conhecimento popular e os avanços tecnológicos para a obtenção de resultados mais reais no campo. Essa metodologia foi desenvolvida por Shepherd (2009) com o objetivo de implementar uma gestão sustentável do solo em toda a Europa. Este manual baseia-se em indicadores-chave que pode ser aplicada de forma simples, rápida e econômica para avaliação visual da qualidade dos solos e apresenta um modelo de caderneta de campo elaborada a partir da técnica de avaliação visual. Essa caderneta de campo possui fotos que podem ser comparadas com as áreas avaliadas.

O VSA é baseado em atributos morfológicos visíveis ou passíveis de serem distinguidos e sugere um índice visual de qualidade do solo que consiste na atribuição de valores. Para cada indicador é atribuída uma pontuação visual de 0 (ruim), 1 (moderada) ou 2 (bom) com base na condição do solo observada. Esse método permite uma pontuação flexível, ou seja, se a amostra avaliada não for parecida com as fotos do guia de campo, mas situar-se entre duas paisagens, é possível pontuar o solo com uma nota 0,5 ou 1,5. Para se obter o resultado da qualidade do solo, as notas são multiplicadas por diferentes pesos e posteriormente somadas. A soma total dos valores de cada atributo fornece o índice visual da amostra que está sendo avaliada. O resultado da qualidade do solo é oriundo de notas (scores) e diferentes pesos somados (PENNING et al., 2015).

Exemplos de aplicações dessas metodologias de avaliação visual em vários trabalhos e em diferentes países são: NIERO et al. (2010); MUELLER et al. (2013); MONCADA et al. (2014a, b) FRANCO et al. (2016); KIRCH et al. (2016); BALL et al. (2017); CHERUBIN et al. (2017); JOHANNES et al. (2017); GUIMARÃES et al. (2017b); MONCADA et al. (2017). No Brasil, as pesquisas foram conduzidas principalmente em Latossolos sob plantio direto (GIAROLA et al., 2009; GIAROLA et al., 2013; SILVA et al., 2014;), contrastando diferentes manejos e tipos de solos (GUIMARÃES et al., 2013; GUIMARÃES et al., 2017a; CHERUBIN et al., 2017; FRANCO et al., 2016).

2.2 Agregação do solo

A estabilidade dos agregados é um dos atributos mais sensíveis a alterações em decorrência das diversas formas de uso e manejo, constituindo em um indicador da qualidade física do solo de áreas degradadas (STUMPF et al., 2016). De acordo com Tisdall & Oades (1982), a agregação do solo ocorre em duas etapas: a primeira compreende a formação do agregado e a segunda, a sua estabilização. O agregado se forma quando ocorre a aproximação das partículas de solo, principalmente através da floculação das partículas de argila, sendo esta a primeira etapa na formação de macroagregados estáveis. No entanto, a floculação é uma condição necessária, mas não suficiente para que ocorra a agregação de forma estável. Para isto, há a necessidade de ocorrer a cimentação das partículas. A matéria orgânica, juntamente com os minerais de argila, são os dois agentes cimentantes que mais contribuem para a agregação do solo.

Vale destacar que a aproximação das partículas de solo pode ocorrer por ação de forças de compressão, originadas na atuação de raízes, variação da umidade do solo e compactação por implementos agrícolas. O efeito dos ciclos de umedecimento e secagem sobre os agregados podem ser observados em solos com alto teor de argila, pois quando úmidas, expandem-se e quando secas, contraem-se, formando fendas (CARPENEDO & MIELNICZUK, 1990).

Os agregados de maior diâmetro tendem a apresentar uma melhor correlação com o conteúdo de carbono orgânico do solo (PALADINI & MIELNICZUK, 1991). A medida que o conteúdo de matéria orgânica diminui, decresce a estabilidade dos agregados, indicando que os compostos orgânicos podem ter atuação na formação e estabilização desses agregados. No entanto, Tisdall & Oades (1982) consideram que, apesar de existir correlação entre o conteúdo de carbono orgânico no solo e a estabilidade de agregados em água, este nem sempre tem efeito agregante, pois apenas frações específicas da matéria orgânica são responsáveis pela estabilidade de agregados.

Tisdall & Oades (1982) mencionam que há diferentes tipos de ligantes responsáveis pela estabilização de agregados. Alguns são considerados ligantes transitórios, os quais compreendem materiais orgânicos rapidamente decompostos por microorganismos (polissacarídeos microbianos associado às raízes e à biomassa microbiana na rizosfera). Os ligantes temporários compreendem raízes e hifas de fungos, que persistem no solo por meses ou anos, podendo ser afetados

pelo manejo do solo e geralmente agem estabilizando macroagregados (TISDALL & OADES, 1982). Os ligantes persistentes se referem aos húmus, a fração mais estável da matéria orgânica.

A agregação está relacionada com a porosidade, que representa o espaço em que ocorrem os processos dinâmicos dos gases e da solução do solo (EDEN et al., 2011). Ela está diretamente relacionada com a densidade, pois quanto maior o espaço ocupado pelas partículas, menor será o volume de poros. Nos macroporos ocorrem as trocas gasosas e os processos de drenagem, as quais interferem no desenvolvimento das culturas e na qualidade ambiental (ABREU et al., 2004) e nos microporos predominam os fenômenos ligados a retenção de água no solo (MICHELON et al., 2010).

Existe uma estreita relação entre as condições físicas do solo e o desenvolvimento das plantas. Solos desestruturados e compactados geralmente apresentam valores baixos de macroporosidade, dificultando a penetração das raízes e a difusão do oxigênio (PALMEIRA et al., 1999). De acordo com Tormena et al. (1998), a porosidade de aeração, que é o espaço poroso ocupado pela fase gasosa do solo, de 10% tem sido adotada como crítica para o crescimento da maioria das plantas cultivadas. No entanto, van Lier (2001) afirma que em termos físicos, para culturas com um sistema radicular pouco profundo (em torno de 0,10 m), os valores de porosidade de aeração seriam ao redor de 5%, enquanto que em condições de maior profundidade do sistema radicular e alto consumo de O₂, os valores seriam próximos a 20%.

A agregação do solo pode ser avaliada por meio da estabilidade dos agregados em água. Para Silva et al. (2000), quanto maior for o agregado, maiores serão o diâmetro médio ponderado (DMP) e os espaços porosos entre eles, aumentando a infiltração e diminuindo a erosão. No entanto, Bertol et al. (2004) mencionam que um agregado de elevado DMP nem sempre apresenta adequada distribuição de tamanho de poros no seu interior. Isto pode ocorrer se o agregado teve suas partículas aproximadas por compressão do solo.

2.3 Resistência tênsil dos agregados e friabilidade do solo

A resistência tênsil de agregados (RT) é considerada um importante indicador da qualidade do solo (DEXTER & KROESBERGEN, 1985) e se refere à energia

necessária para quebrar os agregados em partes menores, podendo refletir a capacidade das raízes das plantas em se desenvolver no solo (IBARRA et al., 2005).

De acordo com Dexter & Kroesbergen (1985), a RT é, provavelmente, a medida mais útil de resistência individual dos agregados do solo, sendo determinada por meio de testes indiretos e diretos, numa ampla variação de tamanhos de agregados, consistindo um indicador muito sensível da condição estrutural do solo. Os testes diretos são assim denominados porque duas forças de mesma direção e sentido oposto são aplicadas, diretamente, em dois extremos de um agregado, o qual é separado em duas partes pela ação dessas forças.

Nos testes indiretos, o estresse não é aplicado diretamente, e sim, uma força compressiva é aplicada a uma placa metálica que transmite a força através do diâmetro polar do agregado, produzindo um aumento do estresse dentro do agregado. O valor máximo de estresse tênsil ocorre no plano vertical através do centro da amostra, quando a força compressiva supera a resistência tênsil do agregado (força de mesma magnitude, mas em sentido oposto) formando-se uma fissura no centro do agregado, dividindo-o em unidades menores, porém, de maior resistência (DEXTER & WATTS, 2000). A RT é, portanto, igual ao valor do estresse tênsil no momento da quebra da amostra.

A partir das medidas de RT, pode-se quantificar a friabilidade (F), outro importante indicador da qualidade estrutural (TORMENA et al., 2008). Watts & Dexter (1998) definem friabilidade do solo como a tendência de uma massa de solo desfazer-se em tamanhos menores de agregados sob a aplicação de um estresse ou carga. Este atributo é sinônimo de qualidade física do solo (UTOMO & DEXTER, 1981). A friabilidade é considerada importante, uma vez que é desejável para o adequado estabelecimento das plantas (WATTS & DEXTER, 1998), e práticas de manejo, como a entrada de máquinas.

Para a determinação da F, três métodos são empregados: a) método do coeficiente de variação, em que o desvio padrão dos valores de resistência tênsil dos agregados é dividido pelo valor médio de RT; b) método que relaciona a força aplicada nos agregados com o logaritmo dos valores de RT; e c) método do volume dos agregados, que relaciona o logaritmo da RT com o logaritmo do tamanho do agregado. Utomo & Dexter (1981), com base em valores de F obtidos a partir do método do volume dos agregados, propuseram um sistema de classificação da friabilidade do solo. Esse método estima os valores de friabilidade como sendo a

inclinação da reta (coeficiente angular da reta) que relaciona o logaritmo da resistência tênsil com o logaritmo do tamanho do agregado. Quando comparado ao método do coeficiente de variação (WATTS & DEXTER, 1998), este resulta em menores valores de friabilidade. Com base nestas indicações, Imhoff et al. (2002) utilizaram a classificação da friabilidade proposta por Utomo & Dexter (1981) multiplicada por dois e propuseram a seguinte classificação para avaliar a qualidade estrutural de Latossolos brasileiros: não friável ($F < 0,10$), ligeiramente friável ($0,10 \leq F < 0,20$), solo friável ($0,20 \leq F < 0,50$), muito friável ($0,50 \leq F < 0,80$) e mecanicamente instável ($F \geq 0,80$).

Os valores de RT e de F são influenciados pela umidade do solo, tipo e teor de argila, mineralogia, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio e manganês, composição e concentração da solução do solo, ciclos de umedecimento e secagem do solo, exsudatos orgânicos de plantas e substâncias orgânicas provenientes da ação de micro-organismos (BASTOS et al., 2005).

Trabalhos pioneiros desenvolvidos por Imhoff et al. (2002) avaliaram a influência das características intrínsecas de três Latossolos em uma toposequência, cultivados com cana-de-açúcar, sobre os valores de RT e de F. Tormena et al. (2008a) estudaram o efeito da rotação e sucessão de culturas em um Latossolo Vermelho Distroférico, avaliando a RT e F, sob semeadura direta, com e sem escarificação. Reis et al. (2014) avaliaram a RT em um solo construído sob diferentes plantas de cobertura. Tuchtenhagen et al. (2017) avaliaram o comportamento da RT em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em que diferentes doses de cinza de casca de arroz foram aplicadas na camada de 0-0,10 m de profundidade.

2.4 Resistência do solo à penetração

O entendimento do processo de compactação do solo e a busca por alternativas para mitigar seus efeitos têm motivado a realização de estudos em escala global, uma vez que é considerada uma das principais causas à manutenção da qualidade do solo (KELLER et al., 2013). Segundo Oliveira et al. (2014), a compactação é provocada por ação mecânica sobre o solo, que não respeitam os limites dos atributos físicos do solo. No entanto, novas técnicas e novos métodos de campo e de laboratório têm sido desenvolvidos e auxiliado na avaliação da compactação do solo.

É importante conhecer as condições do solo e determinar sua compactação haja visto que a mesma poderá causar impedimento mecânico à penetração das raízes das plantas. Desta forma, existem equipamentos denominados “penetrômetros” que são utilizados para verificar, caso houver, uma camada compactada no solo.

Para avaliar o grau de compactação em uma determinada superfície, Stolf (1991) relata que a resistência mecânica do solo à penetração (RP) tem sido utilizada frequentemente por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação. Torna-se uma alternativa para o levantamento de informações com relação à qualidade física do solo a fim de determinar o manejo apropriado no âmbito de uma agricultura conservacionista sustentável.

2.5 Geoestatística

A geoestatística e a estatística clássica diferem entre si. Entretanto, a aplicação de uma complementa a outra (REICHARDT & TIMM, 2016). Para o emprego da estatística clássica, a pressuposição de independência entre as observações adjacentes de uma variável aleatória deve ser atendida. A utilização da geoestatística, por sua vez, permite identificar até que distância as observações adjacentes de uma dada variável são espacialmente correlacionadas.

A geoestatística surgiu por volta de 1950, após dificuldades encontradas por Daniel Krige nas estimativas dos teores de ouro em uma mina na África do Sul. Ele observou que era inviável estimar o conteúdo de ouro em blocos mineralizados sem levar em consideração o volume e a localização das amostras. Mais tarde, Matheron (1963), baseado nas observações de Krige (1951), desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, definida como uma função espacial numérica que varia de um local para outro, com uma continuidade espacial aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples, sendo essa continuidade estimada pelo semivariograma.

A geoestatística é fundamentada na teoria segundo a qual os valores medidos em um determinado local estão de alguma forma em concordância com a distribuição espacial, logo, as observações tomadas a curtas distâncias devem ser mais semelhantes do que aquelas a distâncias maiores (VIEIRA et al., 2002).

A variabilidade espacial do solo está associada a diferentes fatores, tais como: processos que envolvem a formação do solo, variações climáticas, práticas de manejo e outros. Para Nielsen & Wendroth (2003), a descrição do padrão espacial de um atributo do solo possibilita a caracterização de subáreas que poderão ser tratadas de uma forma individualizada. Essa descrição é possível desde que se considere a posição no espaço dos valores amostrais e a estrutura de dependência espacial do atributo. Quando um determinado atributo varia de um local para outro, com algum grau de organização ou continuidade, expresso através da dependência espacial, a estatística clássica e a geoestatística podem ser usadas conjuntamente no estudo da variabilidade espacial (VIEIRA, 2000; REICHARDT & TIMM, 2016).

Quando se utiliza a geoestatística para a análise dos dados, algumas hipóteses de trabalho são assumidas, principalmente a intrínseca. Por esta hipótese, a probabilidade de variação dos valores tomados entre pontos com a mesma distância de separação é igual, ou seja, a relação da dependência espacial é a mesma em qualquer posição de h (h é o vetor que separa dois pontos amostrais). Nessa hipótese, é assumida a estacionariedade dentro do alcance da continuidade espacial. A estacionariedade de primeira ordem é a esperança do valor de um ponto no espaço ser igual à média, ou seja, essa hipótese significa supor que a média das amostras seja representativa da área estudada (i.e., os valores são homogêneos) (SOARES, 2006). A estacionariedade de segunda ordem além de assumir que a esperança matemática existe e não depende de h , assume também que a correlação entre duas variáveis aleatórias depende somente da distância h que as separa e que ela é independente da sua localização (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978; ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989; WEBSTER & OLIVER, 2001).

Para avaliar se há dependência espacial entre as amostras utiliza-se o semivariograma, que mede e descreve a dependência espacial e expressa o grau de semelhança entre o ponto e os seus vizinhos (VIEIRA, 2000). O semivariograma é um gráfico que representa a estimativa das semivariâncias dos dados $[\gamma(h)]$ em relação ao número (h) de vetores (lag ou espaçamento) que os separa. A estimativa das semivariâncias pode ser obtida pela equação 1 (REICHARDT & TIMM, 2016):

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

Onde: $\gamma(h)$ é a semivariância dos dados distantes entre si de um número h de vetores de espaçamento, $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$ são os pares de valores medidos separados por um vetor h , $N(h)$ é o número de pares de valores $[z(x_i) - z(x_i+h)]$ separados pelo vetor h , e z são os valores medidos da variável Z em estudo. Cabe ressaltar que esta equação é conhecida como estimador clássico de semivariância ou estimador de Matheron.

Ao semivariograma experimental é ajustada a curva que proporcione a máxima correlação possível com os valores experimentais de semivariância (Equação 1). O modelo ajustado é chamado de modelo teórico do semivariograma. Na região onde se observa a continuidade espacial, ferramentas da geoestatística podem ser aplicadas.

A etapa de ajuste do modelo ao semivariograma experimental é de grande importância. O modelo ajustado deve se aproximar ao máximo da descrição do fenômeno no campo, sendo que a verificação do melhor ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental pode ser realizada pela validação cruzada.

Há duas metodologias básicas para a realização da validação cruzada (VIEIRA, 1995). Pela primeira pode-se ir ao campo com o mapa gerado pela interpolação e fazer uma reamostragem com a finalidade de comparar os valores amostrados com os valores indicados no mapa. É pouco prática, pois depende da reamostragem para validar o semivariograma ajustado anteriormente. A metodologia mais utilizada para a realização da validação cruzada do semivariograma é a análise comparativa do valor estimado com o valor medido da variável no ponto amostral. Esta metodologia baseia-se na retirada de um valor do conjunto de dados, sendo então realizada a interpolação por krigagem daquele ponto (utilizando o modelo do semivariograma ajustado, modelo teórico do semivariograma, para estimar o valor desta amostra). Após a realização desta etapa em cada ponto amostral são comparados os valores reais com os estimados usando diferentes medidas estatísticas (coeficiente de determinação r^2 , soma dos quadrados dos resíduos, coeficiente angular da reta, etc.) (VIEIRA, 1995).

O processo de interpolação, a partir de uma amostra, realiza inferências sobre a população, ou seja, para os pontos não amostrados a partir dos valores medidos da variável nos pontos amostrais vizinhos. Existem muitos métodos de interpolação, tais como: método poligonal, triangulação, médias locais e inverso do quadrado das distâncias, krigagem, etc.

A krigagem é considerada o melhor método de interpolação linear não tendencioso e com variância mínima, pois considera os parâmetros do semivariograma, ou seja, é considerada um interpolador geoestatístico. Nenhum outro método de interpolação é baseado na variância mínima entre os valores medidos das variáveis nos pontos amostrais (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Na realização da interpolação por krigagem são atribuídos pesos aos valores da variável medidos nos pontos amostrais vizinhos ao ponto que se deseja estimar o valor da variável. Estes pesos variam em função da distância que separa o ponto a ser estimado e o ponto de valor conhecido. Os pesos são calculados pela solução de um sistema de matrizes considerando-se o modelo do semivariograma teórico ajustado. A partir disso, o valor da variável no ponto desconhecido é calculado pela equação de krigagem (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978; NIELSEN & WENDROTH, 2003).

Ferramentas da geoestatística permitem identificar, em uma área geralmente tratada como homogênea, características e necessidades que requerem manejos diferenciados. Desta forma, é possível avaliar as respostas dos atributos do solo às práticas de manejo adotadas, bem como reduzir os efeitos da variabilidade espacial do solo na produtividade agrícola (RIBEIRO et al., 2016).

3 Material e Métodos

3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo possui 10,54 km² e compreende a sub-bacia hidrográfica Santa Rita, localizada no município de Pelotas, no Sul do Estado do Rio Grande do Sul. Essa sub-bacia está inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira, conhecida como bacia hidrográfica Moreira/Fragata (BHAM). Situa-se entre as coordenadas geográficas: 355168,619 O e 6495482,457 S no sistema de projeção UTM, Zona 22J, Datum SIRGAS 2000 (Figura 1), com uma altitude média de 108,80 m.

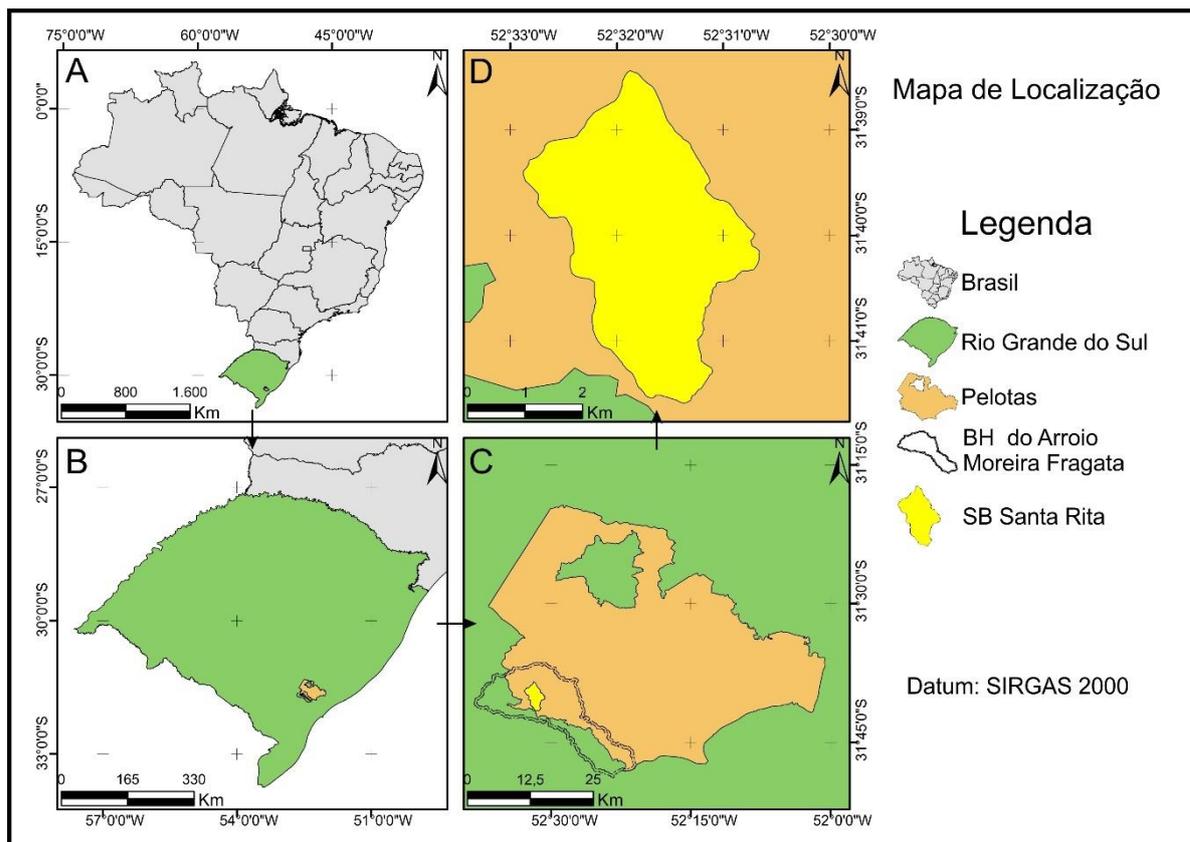


Figura 1 - Localização do Estado do Rio Grande do Sul no mapa do Brasil (A), da bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata no mapa do Estado do Rio Grande do Sul (B), da bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata no mapa do município de Pelotas-Rio Grande do Sul (C) e dos limites de delimitação da sub-bacia Santa Rita dentro da bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata (D).

Elaborada por: Ivana Kruger Tuchtenhagen

As unidades pedológicas com maior representatividade na sub-bacia Santa Rita foram elaboradas por Cunha & Silveira (1996) e de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013) sendo Associação de Neossolo Regolítico, Neossolo Litólico e Argissolo Bruno-Acinzentado (RLd1) (4,26%); Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) (63,87%); Associação de Planossolo Háptico Eutrófico e Gleissolo Háptico (SXe3) (7,77%) e Argissolo Bruno-Acinzentado (PBACal) (24,10%) (Figura 2).

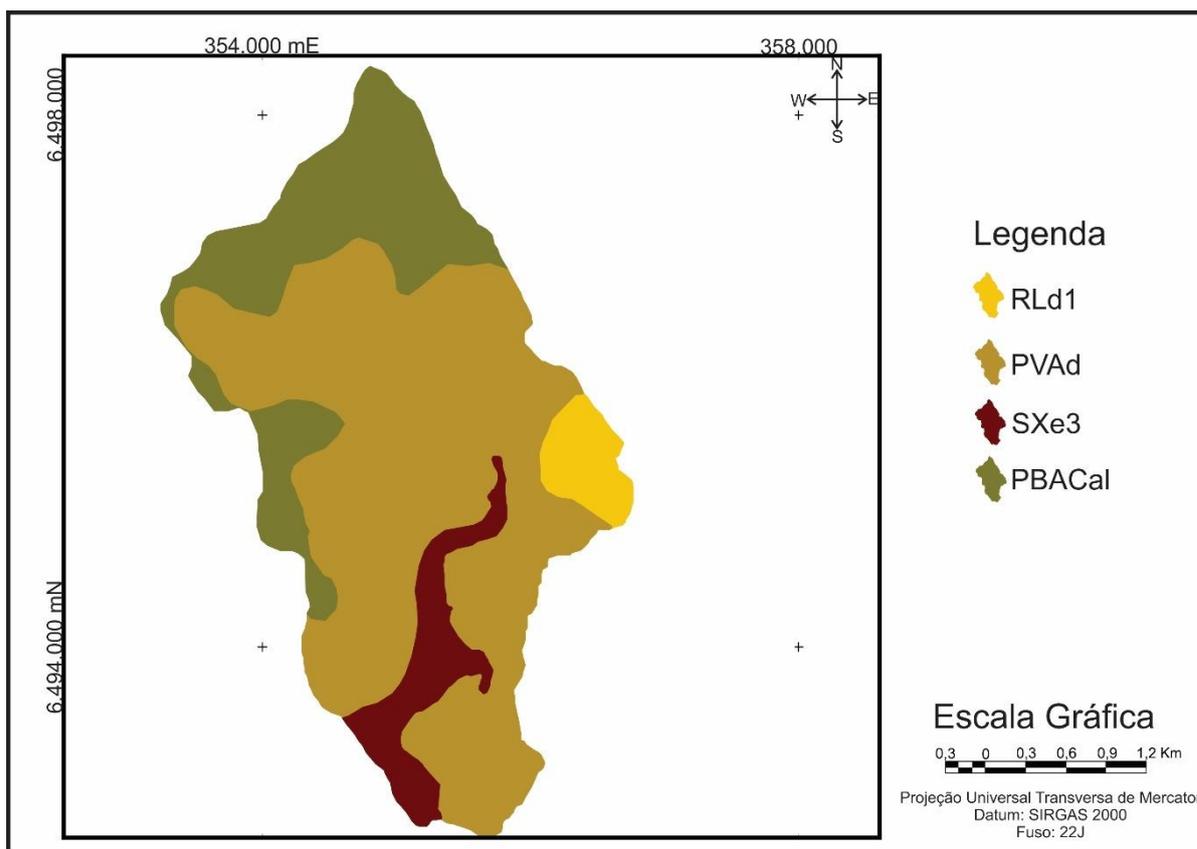


Figura 2 - Mapa de distribuição das classes de solos na sub-bacia Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS (Cunha & Siveira, 1996).

RLd1: Associação de Neossolo Regolítico, Neossolo Litólico e Argissolo Bruno-Acinzentado; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; SXe3: Associação de Planossolo Háplico Eutrófico e Gleissolo Háplico e PBACal: Argissolo Bruno-Acinzentado.

Elaborada por: Ivana Kruger Tuchtenhagen

A área da sub-bacia hidrográfica é ocupada principalmente por propriedades rurais voltadas para produção leiteira, razão pela qual se destaca o uso do solo com pastagem (campo e pastagem cultivada – 36,49%), seguido por mata nativa, (29,51%), agricultura com cultivo de milho (cultura anual) e pêssego (cultura permanente) com 22,73%. De forma menos expressiva, solo exposto (7,80%) e área de mineração (3,47%) (Figura 3).

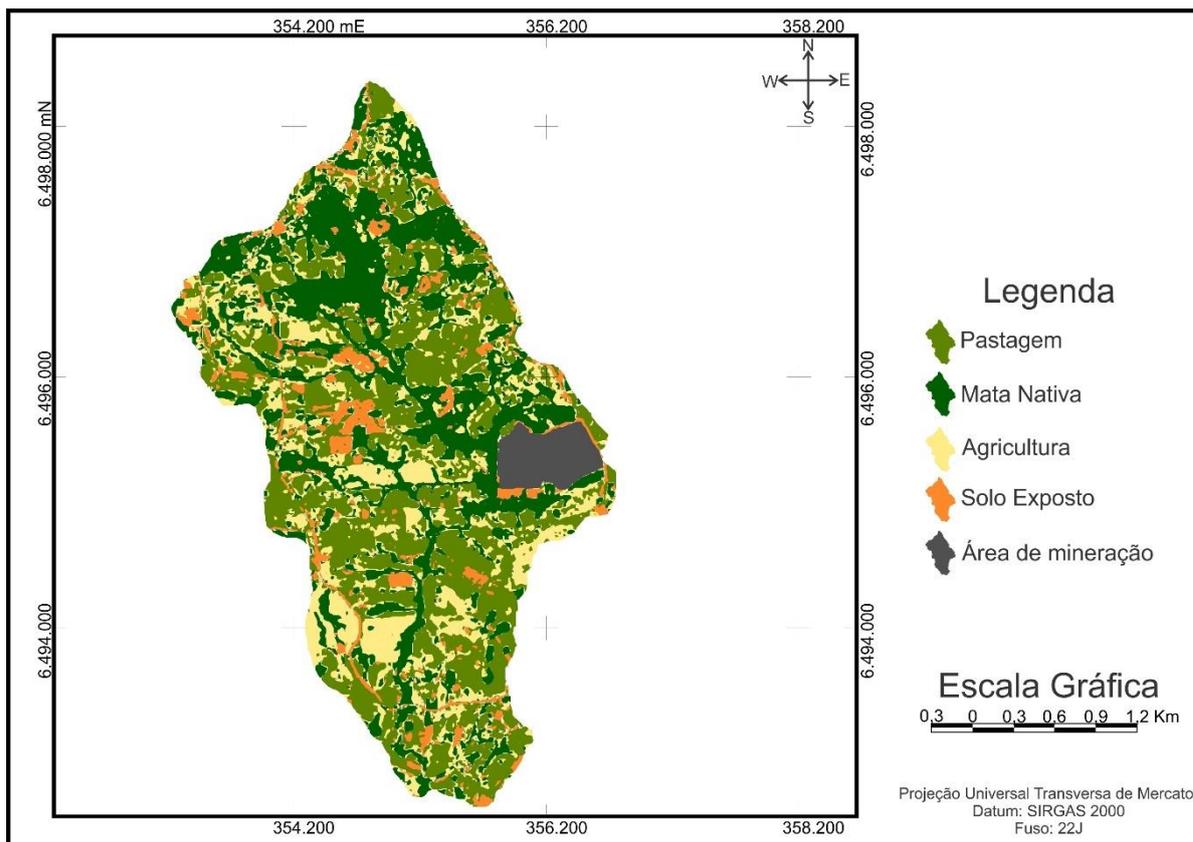


Figura 3 - Mapa de ocupação e cobertura do solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS.
Elaborada por: Ivana Kruger Tuchtenhagen

O relevo predominante é ondulado (declividade de 8-20%), ocupando 49,71%, seguido do relevo suave-ondulado (declividade de 3-8%), com 39,44% da área, plano (declividade 0-3%) representando 6,24% da área, e o relevo forte-ondulado (declividade de 20-45%), com 1,14% da área total, segundo classificação de Santos et al. (2013). Cabe salientar que 3,47% referente à área de mineração, não foi considerada na avaliação, por apresentar solo construído (Figura 4).

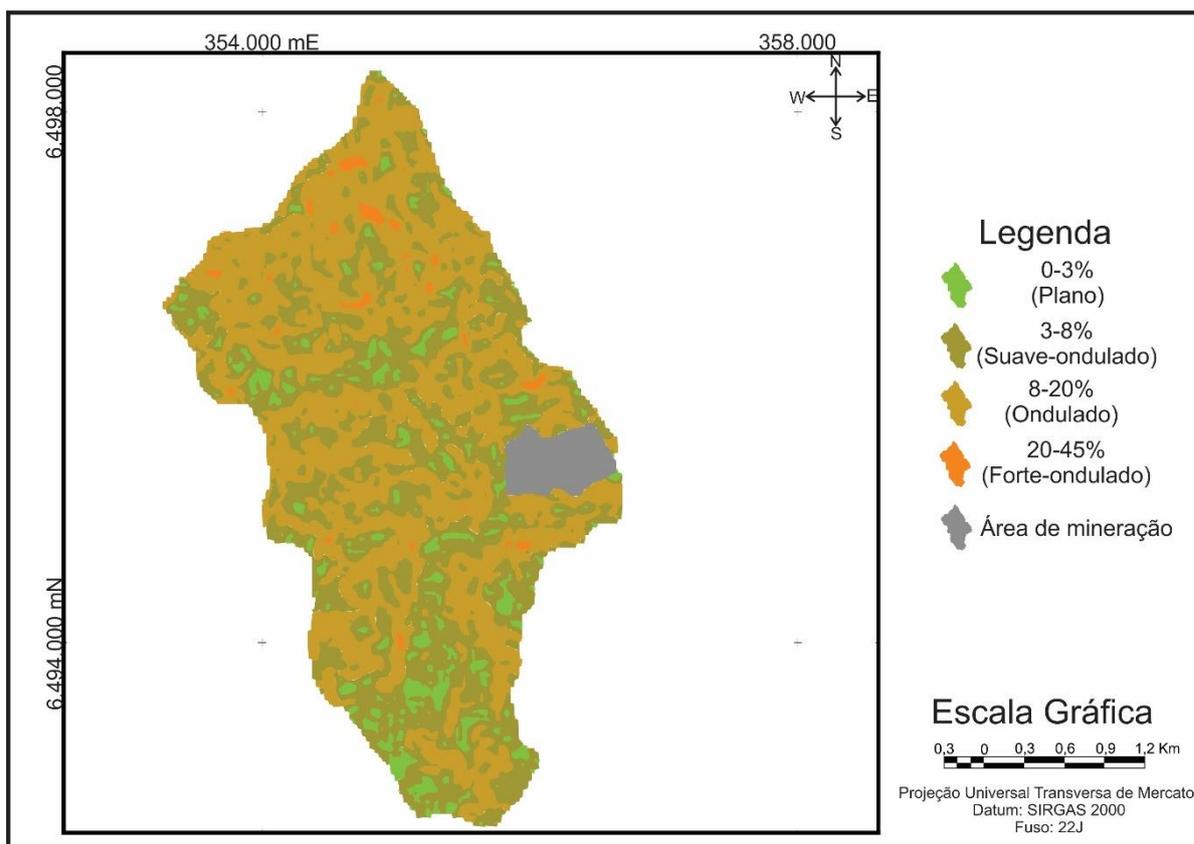


Figura 4 – Mapa de distribuição das classes de declividades do relevo na sub-bacia Santa Rita, inserida na bacia hidrográfica do arroio Moreira/Fragata, Pelotas-RS. Elaborada por: Ivana Kruger Tuchtenhagen

3.2 Amostragem do solo e estabelecimento da malha experimental

Para a coleta de solo na camada de 0,00 a 0,10 m foi estabelecida uma malha irregular de 106 pontos espaçados em até 300 m (Figura 5). Devido a problemas de locação de pontos inacessíveis, alguns pontos de amostragem não ficaram equidistantes entre si.

Para a localização dos pontos foi utilizado o sistema de posicionamento global (GPS). A marcação das coordenadas em cada ponto foi realizada pelo aparelho de GPSGARMIN etrex 30.

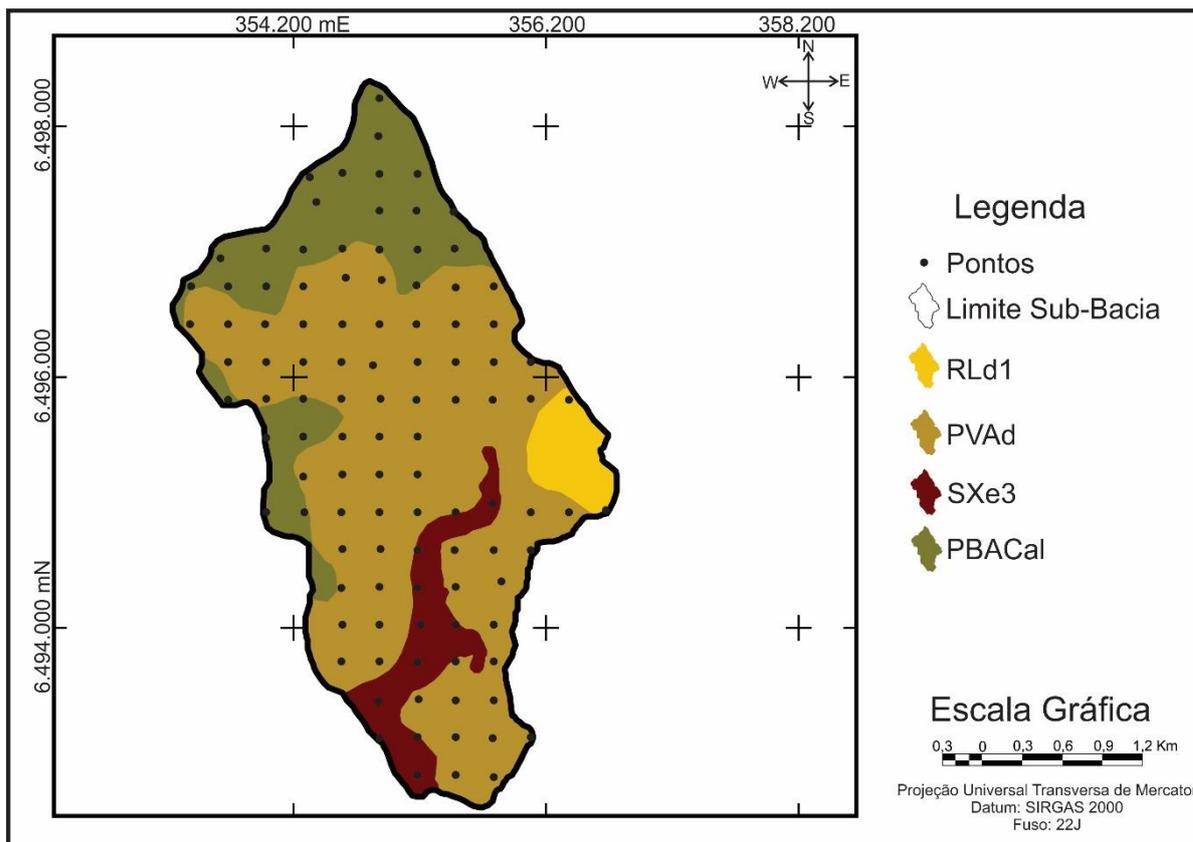


Figura 5 - Esquema da amostragem sistemática do solo (pontos em cor preto) na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, Pelotas-RS, inserida dentro do mapa de distribuição das classes de solo na sub-bacia.

RLd1: Associação de Neossolo Regolítico, Neossolo Litólico e Argissolo Bruno-Acinzentado; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; SXe3: Associação de Planossolo Háplico Eutrófico e Gleissolo Háplico e PBACal: Argissolo Bruno-Acinzentado.

Elaborada por: Ivana Kruger Tuchtenhagen

3.3 Avaliação visual da estrutura do solo

Para a avaliação visual da estrutura do solo foram utilizadas duas metodologias: Avaliação visual da estrutura do solo (Visual Evaluation of Soil Structure - VESS), desenvolvida por Ball et al. (2007) e na sua versão mais recente por Guimarães et al. (2011) e a Avaliação Visual do Solo (Visual Soil Assessment - VSA), conforme Shepherd (2009). Tais avaliações foram realizadas em 37 pontos georeferenciados da sub-bacia Santa Rita (Figura 6).

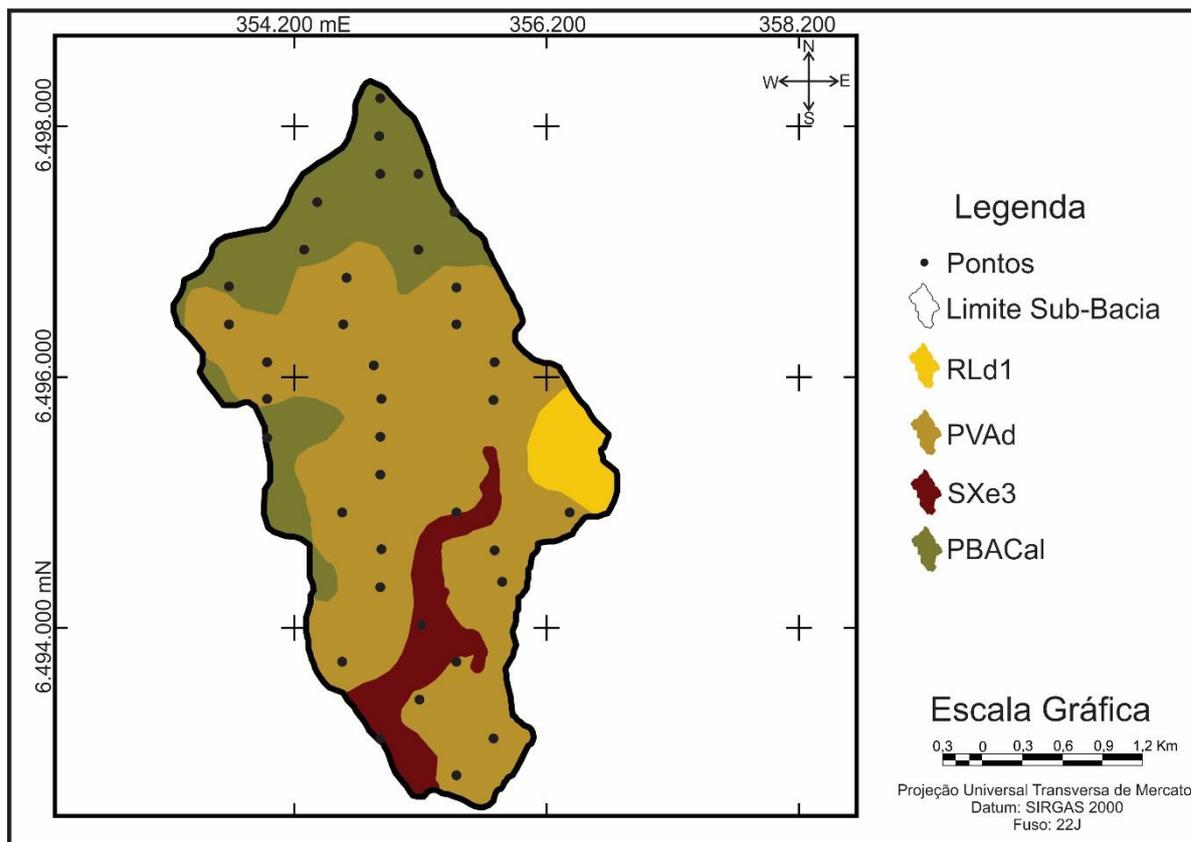


Figura 6 - Esquema de amostragem sistemática (pontos em cor preto) para coleta de solo para a avaliação visual da estrutura do solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, Pelotas-RS, inserida dentro do mapa de distribuição das classes de solo na sub-bacia.

RLd1: Associação de Neossolo Regolítico, Neossolo Litólico e Argissolo Bruno-Acinzentado; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico; SXe3: Associação de Planossolo Háplico Eutrófico e Gleissolo Háplico e PBACal: Argissolo Bruno-Acinzentado.

Elaborada por: Ivana Kruger Tuchtenhagen

A coleta de amostras em monolitos (blocos) para as avaliações das metodologias VESS e VSA foi realizada em minitrincheiras com dimensões de 0,15 m de largura x 0,20 m de profundidade x 0,10 m de espessura (Figura 7).



Figura 7 - Extração de um bloco de solo com pá de corte em uma área (pastagem) para aplicação das metodologias de avaliação visual da estrutura do solo na sub-bacia hidrográfica Santa Rita, Pelotas-RS.

Fonte: Penning et al. (2015)

Após a extração do bloco de solo, primeiramente foi realizado o procedimento da avaliação do VESS, segundo a metodologia de Ball et al. (2007) e Guimarães et al. (2011), descrita a seguir:

Quebrou-se o bloco de solo na sua posição intermediária e, posteriormente, os agregados nas suas linhas de fraqueza (Figura 8).



Figura 8 - Bloco de solo sendo quebrado com as mãos para avaliação da agregação do solo.

Fonte: Penning et al. (2015)

Comparou-se os agregados obtidos com a sequência de figuras disponíveis em Guimarães et al. (2011), atribuindo o seu escore ou pontuação. Definiu-se a

aparência dos agregados de 1 cm a 2 cm de diâmetro, a porosidade visível e as raízes (Figura 9).



Figura 9 - Descrição a campo da estrutura do solo em uma bandeja plástica e tabela de classificação (Guimarães et al., 2011) que define as características distintivas em cada uma das cinco categorias de qualidade.

Autora: Ivana Kruger Tuchtenhagen

Para atribuir um escore, a qualidade da estrutura foi dividida em cinco níveis: escore 1 (friável), definido por agregados que quebram facilmente com os dedos; escore 2 (intacto), agregados facilmente rompidos com a mão; escore 3 (firme), representa o rompimento da maioria dos agregados com a mão; escore 4 (compactado), agregados que exigem um esforço considerável para serem rompidos com a mão; e escore 5 (muito compactado), agregados muito difíceis de serem quebrados com a mão (GUIMARÃES et al., 2011).

Para confirmar e complementar o escore anteriormente definido, efetuou-se anotações sobre os aspectos visuais dos agregados (forma e tamanho), raízes presentes, porosidade e compactação para cada condição de uso do solo (BALL et al., 2007).

Após a aplicação da metodologia e o cálculo do escore pelo método de Ball et al. (2007), foi possível identificar, para cada condição de uso do solo, a necessidade de adoção de alguma interferência. Assim quando o escore estiver entre 1 e 2,9 não há necessidade de mudanças; entre 3 e 3,9 melhorias em longo prazo; e entre 4 e 5 melhorias em curto prazo.

De acordo com a metodologia Visual Soil Assessment (VSA), descrita em Shepherd (2009), alguns parâmetros diferem para solos cultivados e sob pastagem, para este são acrescidos os parâmetros “formação de poças na superfície” e “relevo do solo”, mas o método pode ser empregado para ambos.

Para cada atributo avaliado atribuiu-se um valor de escore visual quanto à qualidade do solo: 0 (zero): considerado pobre; 1: moderado; 2: bom, ou ainda, foi possível obter escore intermediário; 0,5: moderadamente pobre; e 1,5: moderadamente bom, baseando-se nas características observadas ao comparar a amostra de solo de acordo com as informações contidas no guia de campo de Shepherd (2009).

Foram atribuídos os escores para os seguintes indicadores: estrutura do solo, textura, porosidade, número e cor de mosqueados, cor, cheiro, presença de minhocas, profundidade efetivadas das raízes, suscetibilidade à erosão, ocorrência de acúmulo de água na superfície e tipo de relevo superficial da área amostrada. Deste modo, a aplicação da metodologia do VSA foi executada da seguinte forma:

A avaliação da estrutura foi realizada utilizando-se o bloco de solo coletado. Deixou-se cair a amostra três vezes de uma altura de 1 m, diretamente no solo. Se após a primeira queda os torrões grandes não se fragmentassem, deixava-se ir ao chão cada torrão outra vez, até um máximo de três quedas. Se o torrão se quebrasse (em unidades pequenas) após a primeira ou segunda queda, não era necessário realizar o procedimento outra vez. Movendo as frações mais grosseiras para uma extremidade, as mais finas para a outra extremidade, obteve-se uma medida da distribuição e de tamanho dos agregados. Comparou-se a distribuição resultante dos agregados com as três fotografias expostas no manual de campo. Atribuiu-se a contagem visual referenciada em escore=0 (solo com pouca ou nenhuma porosidade e com torrões grandes e de estrutura firme, agregados com formas angulares ou subangulares); escore=1 [solo menos poroso, contendo proporções significantes de torrões (50%) e agregados friáveis. Os torrões são firmes, subangulares ou angulares]; e escore=2 (solo friável, poroso, com agregados pequenos e arredondados e sem a formação de torrões).

A textura, proporção relativa das frações granulométricas que compõem a massa de solo, foi determinada a campo, com base na sensação tátil percebida quando uma porção de solo úmido é manuseado entre os dedos: a areia provoca

sensação de aspereza, o silte de sedosidade e a argila de pegajosidade, com a finalidade de classificação do solo quanto à granulometria.

A porosidade visual do solo foi avaliada utilizando um torrão de tamanho aproximado de 0,15 a 0,20 m. Com a exposição da face originada da separação natural das unidades estruturais, realizou-se a comparação visual com os padrões fotográficos sugeridos no manual de campo, comparando-se a quantidade de poros, a macroporosidade e a distribuição de macro e microporos. A exemplo do realizado para o atributo estrutura, foi atribuído $\text{escore}=0$ (são visíveis apenas os microporos, o solo apresenta estrutura maciça, a superfície do bloco é mais suave com algumas rupturas e pode ter agregados mais angulares); $\text{escore}=1$ (poucos macros e microporos intra-agregados); e $\text{escore}=2$ (proporção adequada de macro e microporos entre e internamente presente nos agregados).

Avaliou-se a cor e o número de mosqueados, comparando com as três fotografias expostas do manual de campo. Atribui-se $\text{escore}=0$ (mais de 50% de mosqueados, de tamanho médio a grande e de coloração alaranjada a acinzentada); $\text{escore}=1$ [muitos mosqueados (10-20%), de tamanho pequeno a médio, de coloração alaranjada a acinzentada]; e $\text{escore}=2$ (boa condição, sem a presença de mosqueados).

Foi realizada a avaliação da cor do solo, comparado com os três padrões fotográficos do manual de campo. Os escores atribuídos foram $\text{escore}=0$ (coloração significativamente mais clara); $\text{escore}=1$ (coloração um pouco mais clara); e $\text{escore}=2$ (coloração bem escura).

O número de minhocas foi estabelecido no mesmo bloco utilizando $\text{escore } 2$, quando se encontrou número superior a trinta e cinco minhocas; $\text{escore } 1,5$, entre vinte e nove a trinta e cinco minhocas; $\text{escore } 1$, entre vinte e duas a vinte oito minhocas; $\text{escore } 0,5$, entre quinze a vinte e uma minhocas, e $\text{escore } 0$, para menos do que quinze minhocas.

O odor químico quanto ao cheiro mineral ou de matéria fresca também foi avaliado. Atribuiu-se $\text{escore}=0$ (quando o solo apresentava um cheiro “pútrido, azedo” ou “cheiro de componentes químicos”); $\text{escore}=1$ (o solo proporcionava um cheiro “mineral”); e $\text{escore}=2$ (o solo promovia um cheiro distinto, cheiro de “solo fresco”).

A profundidade efetiva das raízes foi avaliada de acordo com informações expostas no manual de campo de Shepherd (2009), ou seja: $\text{escore}=0$ (profundidade

efetiva das raízes inferior a 200 mm); escore=0,5 (profundidade efetiva das raízes entre 200 a 400 mm); escore=1 (profundidade efetiva das raízes entre 400 a 600 mm); escore=1,5 (profundidade efetiva das raízes entre 600 a 800 mm); e escore=2 (profundidade efetiva das raízes superior a 800 mm).

Avaliou-se a formação de lagoas e a sua permanência sobre o solo (áreas agrícolas ou campos e pastagens), comparando-se com os três padrões fotográficos ilustrados no manual. Os escores atribuídos foram: escore=0 (após chuvas intensas, em solos que estavam saturados ou perto da saturação, com formação significativa de lagoas na superfície do solo mesmo após quatro dias após cessarem as chuvas); escore=1 (após chuvas intensas, em solos que estavam saturados ou perto da saturação, com formação moderada de lagoas na superfície do solo mesmo dois dias após cessarem as chuvas); e escore=2 (após chuvas intensas, em solos que estavam saturados ou perto da saturação, não há formação evidente de lagoas na superfície do solo no primeiro dia após cessarem as chuvas).

A cobertura e formação de crostas na superfície do solo foram comparadas visualmente pela presença de cobertura morta e restos de cultura na superfície do solo. O escore foi atribuído comparando a situação encontrada no campo com as fotografias contidas no manual: escore=0 (cobertura do solo é inferior ou igual à 30%, com crostas de espessura maior que 5 mm); escore=1 (a cobertura do solo está entre 30% e 70% e pode evidenciar crostas de 2 mm a 3 mm de espessura); e escore=2 (a cobertura do solo é superior ou igual à 70%, com pouca ou nenhuma formação de crosta na superfície).

Por meio de aspectos superficiais, a erosão do solo foi comparada com as três fotografias ilustradas no manual de campo (SHEPHERD, 2009) e quantificada como: escore=0 (tanto a erosão hídrica como a eólica são grandes problemas, ocorrendo grandes voçorocas na área); escore=1 (a erosão hídrica e eólica são problemas, onde é possível observar uma moderada erosão na superfície); e escore=2 (não há erosão hídrica na superfície do solo e a erosão eólica não é um problema).

O escore referente ao relevo da superfície foi estabelecido comparando a situação encontrada no campo com as fotografias do manual, sendo atribuído: escore=0 (superfície do terreno é muito quebrada devido a pisoteios mais profundos e há certa dificuldade de caminhar sobre a área); escore=1 (superfície do terreno é

um pouco quebrada devido ao pisoteio animal ocasional, mas não há dificuldade de caminhar sobre a área); e escore=2 (superfície do terreno é relativamente plana).

Após a aplicação da metodologia do VSA, em função da importância relativa de cada indicador na avaliação da qualidade do solo, as pontuações atribuídas são multiplicadas por um fator de ponderação (1, 2, ou 3) em função da sua importância na qualidade do solo segundo proposição de Shepherd (2009). A soma da classificação visual dos valores obtidos com a ponderação para cada atributo fornece o índice de qualidade do solo.

Solo sob cultivo e sob pastagem com uma pontuação menor que 20, caracteriza uma pobre qualidade do solo, entre 20 a 37 e 20 a 35, para solo sob cultivo e sob pastagem, respectivamente, representa uma qualidade moderada e um índice maior que 37 para solo sob cultivo e superior a 35 para solo sob pastagem, equivale a uma boa qualidade do solo (SHEPHERD, 2009).

3.4 Agregação, resistência tênsil dos agregados e friabilidade do solo

Foram coletadas 106 amostras (uma amostra em cada ponto da malha experimental ilustrada na Figura 5) na camada de solo de 0,00 a 0,10 m para a determinação da distribuição de agregados estáveis em água em diferentes classes de tamanho, do diâmetro médio ponderado de agregados estáveis em água (DMP), da resistência tênsil de agregados (RT), da friabilidade do solo (F) e do carbono orgânico total (COT).

Para a determinação da distribuição de agregados estáveis em água as amostras, em laboratório, foram destorroadas manualmente em seus pontos de fraqueza, secas ao ar e peneiradas em malha de 9,52 mm, com base no peneiramento úmido, seguindo o método descrito por Kemper & Rosenau (1986) e modificado por Palmeira et al. (1999), com a utilização do aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936). Os intervalos das classes dos agregados foram divididos em: C1: 9,52 a 4,76 mm; C2: 4,76 a 2,0 mm; C3: 2,00 a 1,00 mm; C4: 1,00 a 0,25 mm; C5: 0,25 a 0,105 mm e C6: <0,105 mm. A partir dessas classes, os agregados foram separados em macroagregados, ou seja, agregados maiores que 0,25 mm, e microagregados, agregados menores que 0,25 mm (TISDALL & OADES, 1982).

Para avaliação da RT, as amostras de solo foram mantidas à sombra e secas ao ar até o solo atingir o ponto de friabilidade quando foram destorroadas manualmente, observando-se os pontos de fraqueza dos agregados. Utilizaram-se

3.180 agregados (106 pontos coletados x uma camada de solo x 30 agregados por ponto amostrado), sendo utilizados agregados de 19,0 e 12,5 mm, com diâmetro médio de aproximadamente 15,75 mm (IMHOFF et al., 2002).

Cada agregado foi mensurado quanto à sua massa, com balança de precisão, e quanto seu diâmetro médio a partir da sua altura, largura e comprimento usando um paquímetro. Posteriormente foi acomodado na posição mais estável, para a aplicação de uma força de até 20 kgf, utilizando-se um atuador eletrônico linear a uma velocidade constante de 4 mm s⁻¹ (MA 933 fabricado pela empresa Marconi, Ltda).

O valor da força aplicada para a ruptura tênsil do agregado foi registrado em um sistema eletrônico de aquisição de dados, sendo a RT calculada conforme Dexter & Kroesbergen (1985):

$$RT = 0,576 \left(\frac{P}{D^2} \right) \quad (2)$$

sendo: 0,576, a constante de proporcionalidade, refletindo a relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado, P, a força aplicada (N), e D, o diâmetro efetivo (mm), calculado como:

$$D = D_m \left(\frac{M}{M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

sendo: D_m = diâmetro médio do agregado (mm), M = massa do agregado individual (g), e M₀ = massa média dos agregados obtidos na população (g).

A friabilidade do solo foi estimada pelo método do coeficiente de variação, proposto por Watts & Dexter (1998):

$$F = \frac{\sigma_Y}{Y} + \frac{\sigma_Y}{Y \sqrt{2n}} \quad (4)$$

onde: F é a friabilidade do solo (adimensional), σ_Y é o desvio-padrão dos valores médios da RT (kPa), Y é a média de todos os valores de RT, e n é o número de repetições, sendo o segundo termo o erro padrão do coeficiente de variância.

A friabilidade foi classificada com base nos valores de F propostos por Imhoff et al. (2002), como: não friável (<0,10), ligeiramente friável (0,10 a 0,20), solo friável (0,20 a 0,50), muito friável (0,50 a 0,80) e mecanicamente instável (> 0,80).

Para quantificação do COT, o conjunto de agregados de cada ponto foi moído em gral de ágata até obtenção de 100% de material < 0,105 mm e analisado em Analisador Elementar CHN-S (Perkin Elmer®) por combustão a seco.

3.5 Resistência do solo à Penetração, Densidade do Solo, Porosidade do Solo, Macroporosidade e Microporosidade

Para determinar a resistência do solo à penetração (RP), foram coletadas amostras na camada de 0,00 a 0,10 m em duplicata em cada ponto de amostragem (total de 212 amostras de solo), utilizando cilindros de inox de 0,050 m de altura por 0,050 m de diâmetro.

Primeiramente as amostras de solo foram saturadas em água por um período mínimo de 24 h e submetidas a diferentes potenciais matriciais (-0,006 MPa em mesa de tensão e -0,01 MPa em câmara de pressão de Richards) para quantificar o conteúdo de água no solo retido em cada potencial (KLUTE, 1986). Estabelecido o equilíbrio no potencial de água, cada amostra foi pesada e determinada para posteriormente em três pontos equidistantes ao centro da amostra, com velocidade de penetração de 10 mm min⁻¹ (BRADFORD, 1980), utilizando um penetrômetro eletrônico, MA 933 (Marconi Ltda), ser determinado a resistência do solo à penetração (RP).

Após determinação da RP, as amostras foram secas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante para determinar a densidade do solo (DS) em cada ponto amostral. A porosidade total (PT) correspondeu ao volume total de água na amostra de solo saturado, enquanto a microporosidade (Mi) ao conteúdo de água retido na amostra quando submetida a tensão de 6 kPa. A macroporosidade (Ma) foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade (EMBRAPA, 1997).

3.6 Análises estatísticas

Todos os conjuntos de dados foram submetidos à estatística descritiva (média, coeficiente de variação, desvio padrão, valores máximos e mínimos), bem como ao teste de Kolmogorov-Smirnov (MASSEY, 1951), ao nível de significância de 5%, para verificar a normalidade das variáveis utilizadas neste estudo.

O coeficiente de variação (CV) foi classificado de acordo com Wilding & Drees (1983) em: $CV \leq 15\%$, baixa variabilidade em torno da média; $15\% < CV \leq 35\%$ variabilidade moderada e $CV > 35\%$, alta variabilidade.

A estrutura de variabilidade espacial de cada variável foi avaliada por meio do cálculo do semivariograma experimental, utilizando um estimador de semivariância mais adequado (Mingoti & Rosa, 2008), o qual foi ajustado a um modelo teórico para obter os parâmetros C_0 (efeito pepita), C (contribuição) e A (alcance).

Os modelos teóricos de semivariogramas utilizados foram: i) esférico; ii) exponencial; e iii) gaussiano, cujas equações podem ser encontradas em Vieira (2000) e Reichardt & Timm (2016).

Dois estimadores de semivariância foram usados: o estimador clássico quando a distribuição da variável foi normal (Matheron, 1962) equação 5 e o estimador robusto de Cressie & Hawkins (1980) equação 6, quando não seguiu distribuição normal.

$$2 \gamma_M(h) = \frac{1}{N_h} \sum_{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_j))^2 \quad (5)$$

$$2 \gamma_{CH}(h) = \frac{1}{c_h} \left[\left(\frac{1}{N_h} \sum_{N(h)} |Z(x_i) - Z(x_j)|^{\frac{1}{2}} \right)^4 \right] \quad (6)$$

Onde $Ch = \left(0.457 + \frac{0.494}{N_h} + \frac{0.492}{N_h^2} \right)$ é o fator de correção para o viés quando a

variável Z é normal. A qualidade do ajuste de cada semivariograma teórico foi avaliada por meio da técnica de validação cruzada, utilizando como vizinhança, usadas para a predição por krigagem, todas as amostras pertencentes ao domínio espacial (WEBSTER & OLIVER, 2007)

O grau de dependência espacial (GDE) de cada variável foi calculado de acordo com Cambardella et al. (1994) $[GDE = (C_0/C_0 + C) \times 100]$ e classificado como: forte – $GDE \leq 25\%$, moderado - $25\% < GDE \leq 75\%$ ou fraco – $GDE > 75\%$.

Se a estrutura de dependência espacial da variável foi caracterizada por um modelo isotrópico de semivariograma, a interpolação por krigagem ordinária foi usada para a construção do seu mapa de contorno. Se não foi possível, identificar e caracterizar a estrutura de dependência espacial, o método de interpolação inverso

da distância ponderada (IDW) foi usado para construção do mapa de distribuição espacial da variável.

As análises estatísticas e geoestatísticas foram realizadas com o uso do software R (R CORE TEAM, 2018). Uma parte da estatística descritiva (valor mínimo, máximo e média) foi calculada pela função interna “summary” pertencente ao pacote “base” fornecido com o software R.

A parte restante (coeficiente de variação, desvio padrão, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e Kolmogorov-Smirnov) foi calculada com o uso de funções construídas pelo usuário no software R. O teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov foi realizado com a função interna “ks.test” pertencente ao pacote “stats” fornecido juntamente com o software R. As análises geoestatísticas, isto é, a construção de semivariogramas experimentais e teóricos, validação cruzada e mapas isotrópicos foram realizadas com os pacotes geoR (RIBEIRO JÚNIOR & DIGGLE, 2001) e gstat (PEBESMA, 2004).

4 Resultados e discussão

4.1 Variabilidade espacial da avaliação visual da estrutura do solo (VESS e VSA)

Considerando os gráficos tipo “Box Plot”, da Avaliação Visual da Estrutura do Solo (VESS) e da Avaliação Visual do Solo (VSA) (Figuras 10a e 10b) observa-se dados “outliers” ao longo da malha amostral. Todavia esses dados não foram considerados discrepantes, não sendo realizada qualquer transformação nos resultados, pois trata-se de um estudo sobre a variabilidade espacial, em que os dados discrepantes podem descrever o real comportamento daquele atributo e considera-se a escala utilizada (900 m de espaçamento), para a amostragem em cada ponto determinado.

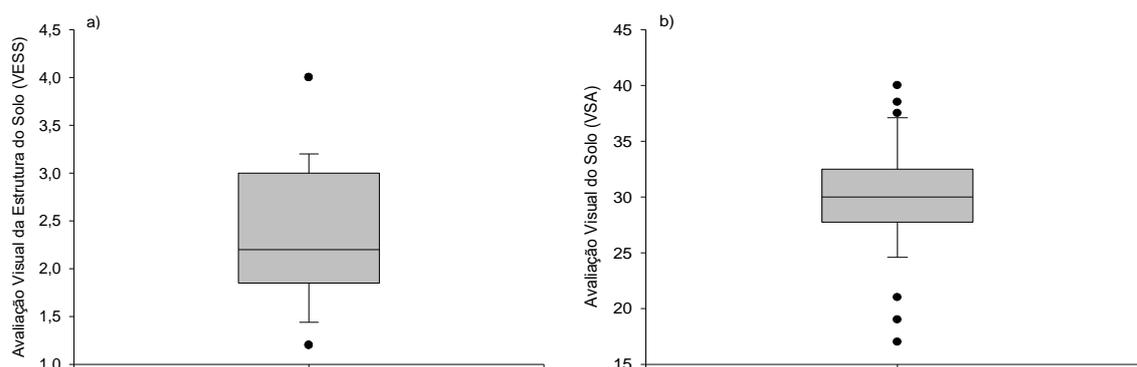


Figura 10 - Gráfico “Box Plot” da Avaliação Visual da Estrutura do Solo (a) e da Avaliação Visual do Solo (b), nos 37 pontos georreferenciados da malha amostral, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

Na tabela 1, encontram-se os resultados da estatística descritiva (análise exploratória) para os 37 pontos amostrais da sub-bacia de estudo referentes às metodologias de avaliação visual do solo.

Tabela 1 - Estatística descritiva para as avaliações visuais do solo (VESS e VSA), na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

(1)Variáveis	Média	(2)Me	(3)Mín	(4)Máx	(5)CV	(6)DP	(7)Cs	(8)C _k	(9)KS
VESS	2,37	2,20	1,20	4,00	31,81	0,75	0,50	-0,20	0,13 ^N
VSA	30,32	30,00	17,00	40,00	16,22	4,92	-0,56	1,09	0,12 ^N

(1)VESS = Avaliação visual da estrutura do solo, VSA = Avaliação Visual do Solo; (2)Me = Mediana; (3)Menor valor; (4)Maior valor; (5)CV = coeficiente de variação (%); (6)DP = Desvio padrão; (7)Cs = coeficiente de assimetria; (8)C_k= coeficiente de curtose; (9)ks = Kolmogorov-Smirnov, a 5%,N=segue a distribuição normal, NN=não segue a distribuição normal.

Observando os valores da média e a mediana (Tabela 1) verifica-se que estão próximos, no caso do VESS 2,37 e 2,20% e do VSA 30,32 e 30,00%. Os resultados apresentam valores de média e mediana em sua maioria próximos atendendo às condições de normalidade, ou seja, os valores não são dominados por valores atípicos de distribuição e são mais adequados para uso da geoestatística (CAMBARDELLA et al., 1994).

Considerando a metodologia de Ball et al. (2017), o valor médio obtido no estudo de avaliação visual da estrutura (2,37), foi classificado como uma boa qualidade estrutural, podendo ser principalmente pela presença de poucas áreas com declividades acentuadas, como pode ser visualizado na figura 4, e reduzida atividade antrópica, a qual possui em 66,15% de sua área coberta por pastagem e mata nativa.

Verifica-se que o VESS obteve quase em sua totalidade uma boa qualidade estrutural, porém, a metodologia VSA, a partir do índice de qualidade visual proposto por Shepherd (2009), apresentou 81,08% da sub-bacia Santa Rita foi classificada como uma qualidade moderada (30,32). Essa diferença pode estar relacionada devido ao fato do VSA avaliar um conjunto de indicadores superior ao VESS, fato este que pode ter corroborado com o resultado.

Em todos os pontos amostrados, o número de minhocas nos blocos foi inferior a 15, obtendo assim um escore pobre, neste indicador. Deste modo, com base nos dados deste trabalho acredita-se que o número de minhocas, conforme estipulado na metodologia, pode não ser condizente com as características dos solos presentes na sub-bacia Santa Rita.

Analisando o coeficiente de variação (CV) e tomando-se como base os critérios propostos por Wilding & Drees (1983) que consideram os valores entre 15 e 35% como moderada variabilidade e os valores abaixo e acima deste intervalo como de baixa e alta variabilidade, respectivamente, as metodologias VESS e VSA apresentaram moderada variabilidade.

Com relação aos coeficientes de assimetria dos dados, as distribuições das metodologias VESS e VSA apresentaram assimetria positiva e negativa (coeficiente de assimetria < 0), respectivamente. Os valores de assimetria negativa demonstram haver tendência de concentração dos valores acima da média observada sendo mais expressiva quanto maior for o valor obtido; para valores positivos deste coeficiente a situação é inversa (NEVES NETO et al., 2013).

Quanto ao grau de achatamento das distribuições, pode ser constatado que a metodologia VESS é classificada como platicúrtica (coeficiente de curtose < 0), ou seja, possui curva de frequência mais aberta que a normal, ou mais achatada na sua parte superior, enquanto a metodologia de VSA foi classificada como leptocúrtica (coeficiente de curtose > 0 , indicando menor grau de achatamento).

A partir do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade, observou-se que os dados de VESS e VSA apresentaram tendência à normalidade. A normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, ainda que seja conveniente que a distribuição de frequências não apresente caudas muito alongadas, o coeficiente de assimetria deve ser próximo a zero e que os semivariogramas apresentem patamares bem definidos, de forma a não comprometer as análises (CAMBARDELLA et al., 1994).

Na tabela 2 são apresentados os modelos matemáticos dos semivariogramas e respectivos parâmetros de ajustes para as metodologias de avaliação visual do solo. A metodologia VESS não apresentou estrutura de dependência espacial, neste caso, apresentam distribuição aleatória (efeito pepita puro) para distâncias maiores que a menor distância de amostragem, que foi de 900 m, distribuindo-se de forma independente no espaço, indicando que a distância de amostragem pode não ser capaz de exibir toda a variância dos dados. Enquanto o semivariograma para a metodologia de VSA se ajustou ao modelo gaussiano, obtendo um coeficiente de determinação (R^2) de 0,13.

Tabela 2 - Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para as avaliações visuais do solo (VESS e VSA), na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

⁽¹⁾ Variáveis	⁽²⁾ Modelo	⁽³⁾ r^2	⁽⁴⁾ C_0	⁽⁵⁾ $C + C_0$	⁽⁶⁾ A (m)	⁽⁷⁾ IDE (%)	Classificação
VESS	EPP	-	-	-	-	-	-
VSA	Gau	0,13	0,0	0,489	229,06	0	Forte

⁽¹⁾VESS = Avaliação visual da estrutura do solo, VSA = Avaliação Visual do Solo; ⁽²⁾EPP = efeito pepita puro, Gau = gaussiano; ⁽³⁾Coefficiente de determinação; ⁽⁴⁾Efeito pepita; ⁽⁵⁾Patamar; ⁽⁶⁾Alcance; ⁽⁷⁾Grau de dependência espacial (%).

O alcance representa a distância em que os pontos amostrais estão correlacionados espacialmente entre si. Isso indica que pontos localizados numa área de raio igual ao alcance são mais homogêneos entre si. Logo, pode-se observar que a faixa de dependência espacial (alcance A) encontrada para metodologia VSA foi de 229,06 m, inferior ao esquema amostral de 900 m entre pontos, não sendo suficiente para captar a dependência espacial para esta metodologia.

Em geral, a menor continuidade espacial, ou seja, menores valores de alcance podem ser atribuídos a fatores extrínsecos relacionados ao manejo do solo, maior continuidade espacial e a maior dependência espacial podem ser atribuídas a fatores intrínsecos relacionados aos fatores de formação do solo (CAMBARDELLA et al., 1994).

Empregando-se a escala de dependência espacial, descrita em Cambardella et al. (1994), verifica-se na tabela 2 que, para o semivariograma obtido para o resultado de VSA, o modelo apresentou forte dependência espacial, visto que o valor do efeito pepita (C_0) foi inferior a 25% do valor do patamar.

Os modelos ajustados aos semivariogramas pelas metodologias empregadas, para as avaliações visuais do solo avaliadas, na sub-bacia Santa Rita encontram-se no apêndice A.

Identificada a estrutura de dependência espacial por meio do semivariograma, foram construídos os mapas de distribuição espacial da avaliação visual da estrutura do solo (VESS) e da avaliação visual do solo (VSA) na sub-bacia Santa Rita, aplicando a interpolação geoestatística através do método do inverso da distância (IDW) e krigagem (Figuras 11a e 11b).

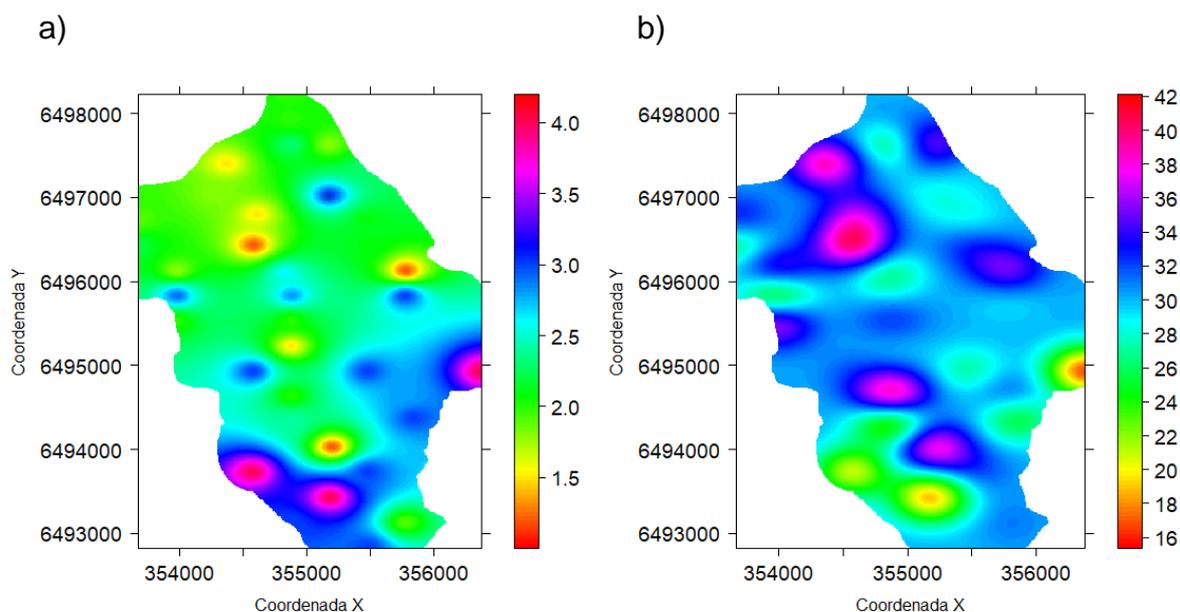


Figura 11 - Mapas de distribuição espacial das variáveis Avaliação Visual da Estrutura do Solo - VESS (a) e à Avaliação Visual do Solo - VSA (b), na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

Os mapas permitiram uma visualização da distribuição espacial na área da sub-bacia Santa Rita, fato que não ocorre quando se utiliza somente análise da estatística clássica, destacando assim a importância das ferramentas geoestatísticas nas predições das variações de variáveis no ambiente de estudo.

Por meio da gradação das cores, a pequena variabilidade para as avaliações visuais do solo ao longo da extensão geográfica da sub-bacia, pode estar relacionada à predominância de pastagem e mata nativa, como é evidenciado na figura 3 (Mapa de Cobertura). Deste modo, o conhecimento dos valores do alcance e as localizações das áreas em que estão concentrados os maiores e/ou menores escores das variáveis de avaliação visual do solo, são relevantes para o planejamento do manejo do solo, tanto na agricultura quanto na manutenção da conservação da área.

Através do mapa de avaliação visual da estrutura do solo (VESS), é possível observar que aproximadamente 43,24% da área, de acordo com a metodologia

proposta por Ball et al. (2017), receberam escores que variam entre 1 e 2,9, apresentando uma boa qualidade estrutural, sem necessitar de interferências para sua recuperação.

Adicionalmente, 48,65% da área apresentou estrutura moderada, escores entre 3 e 3,9, indicando condições ainda aceitáveis de qualidade, entretanto, carece de melhorias em longo prazo (BALL et al., 2017), fato este que deve estar relacionado a área de estudo ser caracterizada por pequenas propriedades rurais voltadas para produção leiteira, razão pela qual se destacam a pastagem e alto predomínio de mata nativa.

Apenas 8,11% da área apresentaram escores entre 4 a 5, com uma pobre qualidade estrutural, e deste modo necessitando de melhorias em curto prazo (BALL et al. 2017). Esses pontos por sua vez, concentram em sua totalidade no Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e em áreas agrícolas com cultivo de milho e de pêssego.

Em relação aos resultados da metodologia de avaliação visual do solo (VSA) aproximadamente 13,51% da área, obtiveram um índice de qualidade visual do solo considerado como bom (Figura 11b), conforme a metodologia de avaliação visual do solo proposta por Shepherd (2009), a qual define que o somatório dos indicadores visuais a qualidade do solo superior a 35, para solos sob pastagem e 37 para solos sob cultivos como uma boa qualidade de solo. Ressalta-se que 81,08% da área obtiveram um índice de qualidade visual considerada como moderada.

Apenas 5,41% do total da área de estudo, obteve um índice de avaliação visual do solo como uma qualidade pobre, onde define que o somatório dos indicadores visuais a qualidade do solo for inferior a 20 como uma qualidade de solo pobre.

Conclusões

As metodologias de avaliação visual da estrutura do solo apresentam praticidade para diferenciar sistemas de uso e manejo, podendo ser consideradas como indicadores da qualidade física do solo.

As metodologias de Avaliação Visual da Estrutura do Solo e da Avaliação Visual do Solo, classificaram respectivamente 91,89 e 94,59% da área de estudo entre uma estrutura boa a moderada e apenas 8,11 e 5,41% de pobre qualidade estrutural.

A faixa de dependência espacial (alcance A) encontrada pela metodologia da Avaliação Visual do Solo que foi de 229,06 m, foi inferior ao esquema amostral de 900 m entre pontos, não sendo suficiente para captar a dependência espacial para esta metodologia, sendo necessário um espaçamento inferior e um número maior de amostras para a avaliação visual da estrutura do solo.

4.2 Variabilidade espacial da agregação e resistência tênsil dos agregados do solo

Trabalhos realizados em bacias hidrográficas com diferentes unidades pedológicas, coberturas e manejos, podem apresentar variabilidade nos resultados. Considerando a sub-bacia em estudo, nota-se que todos os pontos avaliados apresentaram peculiaridades diferentes, independentemente de apresentarem a mesma unidade pedológica ou cobertura. Deste modo, observa-se que todas as variáveis analisadas obtiveram dados “outliers”, todavia esses dados não foram considerados discrepantes, como pode ser observado nas figuras 12a, 12b, 12c, 12d, 12e e 12f.

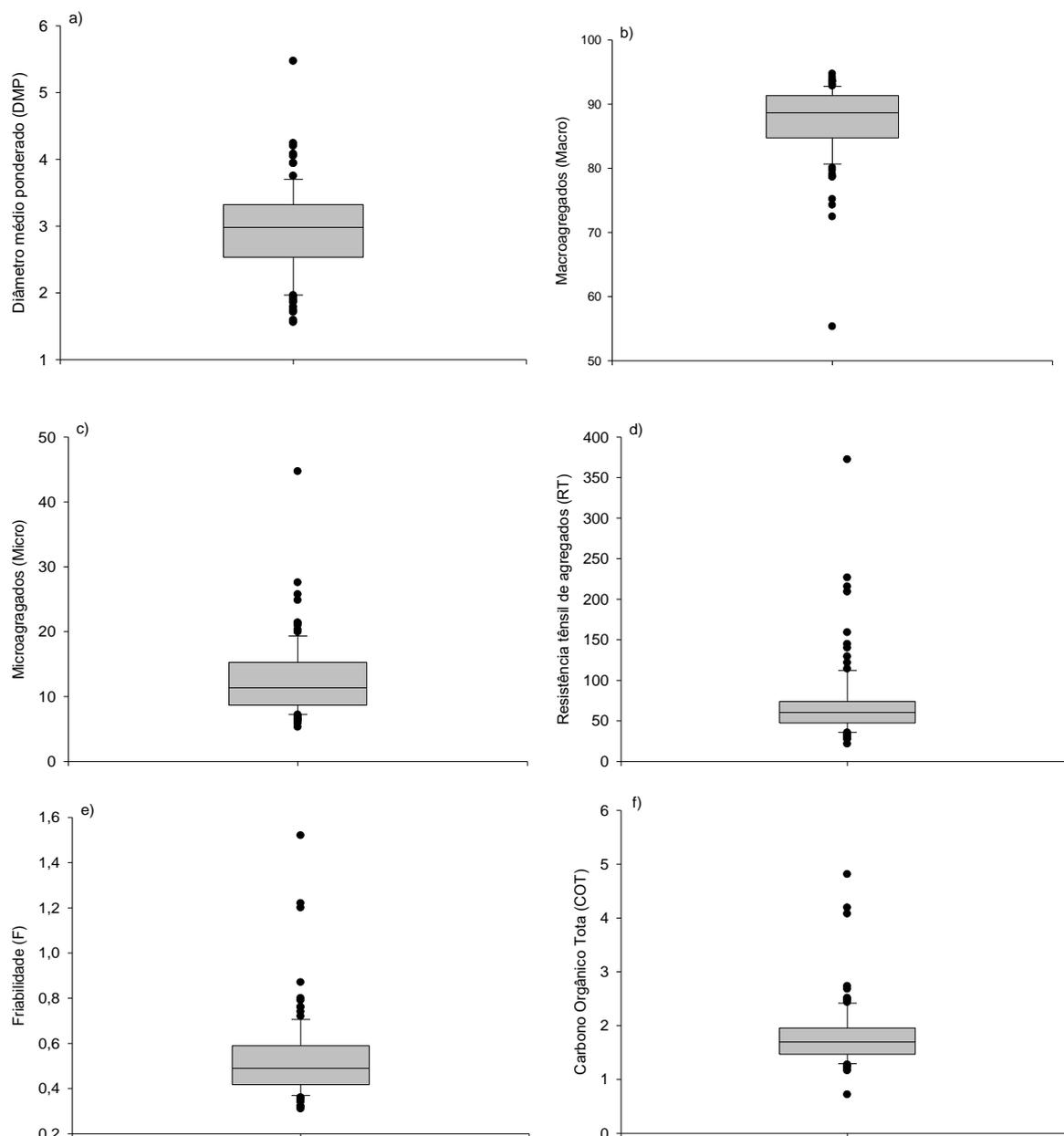


Figura 12 - Gráfico “Box Plot” do diâmetro médio ponderado (a); macroagregados (b); microagregados (c); resistência tênsil de agregados (d); friabilidade (e) e carbono orgânico total (COT) (f), nos 106 pontos georreferenciados da malha amostral, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas (análise exploratória) para os 106 pontos amostrais da sub-bacia de estudo referentes às variáveis do diâmetro médio ponderado (DMP), macroagregados (Mac), microagregados (Mic), resistência tênsil de agregados (RT), friabilidade (F) e carbono orgânico total (COT). Pode-se observar que, os valores da média e mediana das variáveis DMP, Mac, Mic e F são próximos. Entretanto, este comportamento não pode ser verificado para as variáveis

de RT e COT, sendo um primeiro indicativo que a distribuição dos dados destas variáveis não segue uma distribuição normal.

Tabela 3 - Estatística descritiva para agregação e resistência tênsil dos agregados do solo, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

⁽¹⁾ Variáveis	Média	⁽²⁾ Me	⁽³⁾ Mín	⁽⁴⁾ Máx	⁽⁵⁾ CV	⁽⁶⁾ DP	⁽⁷⁾ Cs	⁽⁸⁾ C _k	⁽⁹⁾ KS
DMP	2,95	2,98	1,56	5,47	22,01	0,65	0,29	1,30	0,06 ^(N)
Mac	87,30	88,64	55,31	94,71	6,34	5,54	-2,33	9,97	0,13 ^(NN)
Mic	12,60	11,35	5,29	44,69	43,96	5,54	2,33	9,97	0,13 ^(NN)
RT	70,69	60,30	21,53	372,17	65,41	46,24	3,70	18,61	0,25 ^(NN)
F	0,53	0,49	0,31	1,52	34,25	0,18	2,64	10,47	0,15 ^(NN)
COT	1,80	1,70	0,72	4,81	32,18	0,58	2,60	10,06	0,01 ^(NN)

⁽¹⁾DMP = Diâmetro médio ponderado (mm), Mac = Macroagregado (%), Mic = Microagregados (%), RT = Resistência tênsil de agregados (kPa), F = Friabilidade e COT = Carbono Orgânico Total (%); ⁽²⁾Me = Mediana; ⁽³⁾Menor valor; ⁽⁴⁾Maior valor; ⁽⁵⁾CV = coeficiente de variação (%); ⁽⁶⁾DP = Desvio padrão; ⁽⁷⁾Cs = coeficiente de assimetria; ⁽⁸⁾C_k= coeficiente de curtose; ⁽⁹⁾ks = Kolmogorov-Smirnov, a 5%, N=segue a distribuição normal, NN=não segue a distribuição normal.

Cabe salientar que a estabilidade dos agregados é um bom indicador da qualidade física do solo, sendo parte integrante de planejamento e tomada de decisão em questões agrícolas e ambientais. Deste modo, a agregação do solo é responsável diretamente por atributos físicos do solo como, porosidade e densidade do solo, auxiliando assim grande parte dos processos e reações que ocorrem em seu interior.

Os macroagregados são, conceitualmente, os mais afetados por mudanças nos sistemas de manejo (TISDALL & OADES, 1982). Um maior percentual de macroagregados é importante na diminuição da velocidade da decomposição da matéria orgânica (MO), aumentando o tempo de permanência do material particulado como núcleo de agregação e possibilitando a formação de microagregados enriquecidos em MO (SIX et al., 2000). Nota-se que a média de macroagregados na sub-bacia Santa Rita é de 87,30%, fato que pode estar relacionado ao predomínio de coberturas sob pastagem e mata nativa, resultando em um decorrente aporte de resíduos vegetais. Além disto, fatores com a ausência de revolvimento do solo, podem potencializar a presença e a diversidade de organismos promovendo eficiente ciclagem de nutrientes e agregação, formando microagregados estáveis em água.

Os resultados de RT demonstram uma alta amplitude de valores máximos e mínimos, os quais variaram de 21,53 a 372,17 kPa, alcançando uma média de 70,69 kPa (Tabela 3). Essa amplitude pode ser atribuída à variabilidade no formato dos

agregados, verificada na ocasião das medidas, devido a RT ser uma propriedade dinâmica sob condições de campo e num determinado solo reflete os efeitos de fatores naturais, de sua cobertura, das diferentes unidades pedológicas e do manejo na organização hierárquica dos agregados na estrutura do solo.

Salienta-se que a maior RT (372,17 kPa) foi encontrada em Associação de Planossolo Háplico Eutrófico e Gleissolo Háplico (SXE3), quando este apresentou como cobertura do solo a pastagem. Agregados com elevado RT podem estar associados à ação mecânica com umidades inadequadas, a ação do pisoteio animal, sem uma adequada lotação e pastejo com elevado teor de água, que provavelmente causa a compressão dos agregados do solo formando torrões que não apresentam a qualidade positiva de um agregado.

É importante ressaltar que inexistem valores de RT limitantes, e, portanto, sua interpretação deve ser cuidadosa, sendo necessária, a avaliação de outros parâmetros físicos do solo, que corroborem para uma interpretação adequada, pois para cada unidade pedológica e cobertura haverá um valor considerado ideal para o desenvolvimento radicular das plantas.

Alguns autores reportam que valores elevados para a RT indicam maior dificuldade na emergência das plântulas, redução e restrição no crescimento das raízes e dificuldade a penetração das semeadoras no solo (LEY et al., 1993; IMHOFF et al., 2002). E com base nos resultados obtidos, acredita-se que valores elevados de RT, sejam prejudiciais ao desenvolvimento radicular das plantas, sendo necessário estabelecer limites críticos para o seu desenvolvimento, considerando suas características pedológicas e os manejos adotados.

De acordo com Utomo & Dexter (1981), friabilidade é sinônimo de qualidade física do solo, uma vez que a condição de friável é desejável para adequado estabelecimento das plantas, sendo indicativo da sua condição estrutural. Todavia, em bacias hidrográficas, principalmente em clima subtropical, tanto a resistência tênsil quanto a friabilidade há carência de informações para avaliar os efeitos de sistemas de manejo na estrutura do solo e suas unidades pedológicas. Convém evidenciar, que apesar da relevância do tema, inexistente uma classificação de friabilidade para todos os tipos de solos presentes na sub-bacia Santa Rita, deste modo, a classificação adotada para este estudo, foi a proposta por Imhoff et al. (2002) implementada para Latossolos.

A RT apresentou valores de CV superiores aos descritos por Dexter & Kroesbergen (1985) e por Imhoff et al. (2002). De acordo com Imhoff et al. (2002), um dos fatores que influenciam a RT é a forma dos agregados. Segundo Kay & Dexter (1992), a RT é uma propriedade dinâmica sob condições de campo, e reflete os efeitos de fatores naturais, do uso e manejo na organização hierárquica dos agregados na estrutura do solo. Na sub-bacia Santa Rita ocorrem diversos usos e sistemas de manejo, logo a sua diversidade de ambientes condiciona diferenças nas propriedades do solo e variação no formato dos agregados. Ressalta-se que observações realizadas em campo durante as coletas de amostras na sub-bacia Santa Rita, classificaram formas mais esféricas até formas mais prismáticas a estrutura do solo, o que justifica a elevada variabilidade das medidas da RT.

Em relação ao teste de normalidade da RT, os resultados foram similares aos obtidos por Tormena et al. (2008a) e Imhoff et al. (2002), os quais não constataram distribuição normal em diferentes solos do Brasil. No entanto, os resultados de Dexter & Watts (2000) indicaram a distribuição normal para RT, diferindo dos resultados obtidos neste estudo. Cabe salientar que este trabalho foi realizado em uma sub-bacia, com espaçamento entre os pontos amostrais de aproximadamente 300 m, com diferentes unidades pedológicas e coberturas, deste modo, saliente-se que inexistem estudos nessa proporção, para fins de comparação considerando a variável de resistência tênsil de agregados.

De acordo com os resultados obtidos a amplitude da friabilidade foi de 0,31 a 1,52, pertencente às classes friável, muito friável e mecanicamente instável. Evidenciando a existência de condições físicas adequadas, e locais da sub-bacia Santa Rita que possuem um meio físico inadequado para a germinação e crescimento das raízes, ou seja, em determinados pontos, os quais possuem friabilidade superior a 0,80 são considerados como mecanicamente instável.

O carbono orgânico total (COT) influência direta e indiretamente a maioria das propriedades físicas, de modo que a sua redução está relacionada com a degradação dos solos (CARDOSO et al., 1992). A vulnerabilidade à compactação pode ser modificada pelos sistemas de uso e manejo (BLANCO-CANQUI et al., 2009), via modificações nos teores de COT.

Os resultados de COT mostram uma elevada amplitude de valores máximos e mínimos, os quais variaram de 0,72 a 4,81 %, alcançando uma média de 1,80 %

(Tabela 3). Essa amplitude pode ser atribuída à variabilidade das diferentes unidades pedológicas e do manejo.

O coeficiente de variação (CV) é um parâmetro adimensional que permite a comparação de valores entre diferentes unidades sendo considerado um dos primeiros indicadores da existência de heterogeneidade dos dados. Analisando o coeficiente de variação e tomando-se como base os critérios propostos por Wilding & Drees (1983) que consideram os valores deste coeficiente entre 15 e 35% como moderada variabilidade e os valores abaixo e acima deste intervalo como de baixa e alta variabilidade, respectivamente, nota-se que o atributo de Mac apresentou uma baixa variabilidade ($CV < 15\%$) e os parâmetros DMP, F e COT apresentaram uma moderada variabilidade. Já os valores de CV foram altos ($CV > 35\%$) para Mic e RT.

Os coeficientes de assimetria e curtose indicam se a distribuição dos dados de uma variável está próxima à distribuição normal (coeficientes iguais à zero). Com relação aos coeficientes de assimetria dos dados, a distribuição da variável macroagregados apresentou assimetria negativa (coeficiente de assimetria < 0) e as demais assimetria positiva. Em termos de amplitude dos coeficientes de assimetria, houve variação de -2,33 (macroagregados) a 3,70 (resistência tênsil de agregados). Quanto ao grau de achatamento das distribuições, pode ser constatado que todas as distribuições são classificadas como leptocúrtica (coeficiente de curtose > 0), indicando um menor grau de achatamento.

Além da análise dos coeficientes de assimetria foi realizado o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov, para verificar a aderência da distribuição das séries espaciais em relação à distribuição normal, verificando-se que apenas a variável DMP apresentou tendência a normalidade, o que pode ser justificado pelos baixos coeficientes de curtose e assimetria e a proximidade entre a média e a mediana desse atributo.

Na tabela 4 apresentam-se os modelos utilizados, os valores do coeficiente de determinação (r^2), efeito pepita (C_0), Patamar ($C + C_0$), alcance (A), grau de dependência espacial (IDE) e a classificação empregada.

Tabela 4 - Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para as variáveis de agregação e resistência tênsil dos agregados do solo, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

⁽¹⁾ Variáveis	⁽²⁾ Modelo	⁽³⁾ r ²	⁽⁴⁾ C ₀	⁽⁵⁾ C + C ₀	⁽⁶⁾ A (m)	⁽⁷⁾ IDE (%)	Classificação
DMP	Esf	0,01	0,15	0,44	2.000	34,1	Moderado
Mac	Gau	0,04	14,00	22,00	1.200	63,6	Moderado
Mic	Esf	0,03	14,00	22,00	1.500	63,6	Moderado
RT	Esf	0,01	590,00	800,00	1.400	73,8	Moderado
F	EPP	-	-	-	-	-	-
COT	Esf	0,08	0,00	0,20	440	0	Forte

⁽¹⁾DMP = Diâmetro médio ponderado, Mac = Macroagregados, Mic = Microagregados, RT = Resistência tênsil de agregados, F = Friabilidade e COT = Carbono Orgânico Total; ⁽²⁾Esf = Esférico, Gau = gaussiano, Lin = Linear, EPP = efeito pepita puro; ⁽³⁾Coefficiente de determinação; ⁽⁴⁾Efeito pepita; ⁽⁵⁾Patamar; ⁽⁶⁾Alcance; ⁽⁷⁾Grau de dependência espacial (%).

Na análise dos parâmetros estimados do semivariograma, o modelo esférico ajustou-se para 66,68% das variáveis (diâmetro médio ponderado, microagregados, resistência tênsil de agregados e carbono orgânico total), enquanto o modelo efeito pepita puro e o modelo gaussiano ajustaram-se para as variáveis de friabilidade e macroagregados respectivamente. O modelo gaussiano indica pequena variabilidade para curtas distâncias (VIEIRA, 2000). Para as variáveis que possuem a semivariância linear na sua origem, e que se ajustam aos modelos esférico ou linear, seus valores obtidos no campo são mais erráticos quanto à semivariância, diferentemente das que se ajustam com modelos parabólicos, como é o caso do gaussiano e exponencial.

Uma das maneiras de avaliar o desempenho dos semivariogramas é a análise a partir dos seus respectivos coeficientes de determinação espacial (r²), por demonstrar o quão os dados estão espacialmente correlacionados, logo as variáveis DMP, Mac, Mic, RT e COT obtiveram coeficiente de determinação de 0,01, 0,04, 0,03, 0,01 e 0,08 respectivamente.

Quanto menor o efeito pepita (C₀), melhor é a continuidade espacial dos atributos analisados. A amplitude de variação do C₀ para os atributos em estudo foi de 0,00 a 590. Pela análise de C₀, o COT, obteve a melhor continuidade de estrutura espacial, em relação às outras variáveis. Analisando conjuntamente os resultados, observa-se na tabela 3 que os atributos que apresentaram valores de variância e coeficiente de variação elevados, por consequência, também apresentam altos valores de efeito pepita (Tabela 4). Desta maneira é possível prever através da estatística descritiva parâmetros que apresentem valores de variabilidade não

detectada pelo esquema de amostragem, indicando maior descontinuidade entre amostras.

O alcance é um parâmetro importante para a interpretação dos semivariogramas, por indicar a distância até onde os pontos amostrais são dependentes entre si. A maioria dos atributos apresentaram valores de alcance superiores ao espaçamento utilizado na amostragem, variando de 440 a 2.000 m, o que comprova a eficácia da grade de amostragem adotada para detectar a variabilidade espacial dos atributos físicos analisados.

O C_0 reflete a variabilidade não explicada em função da distância de amostragem utilizada, como variações locais, erros de análises, erros de amostragem. Como é impossível quantificar a contribuição individual desses erros, o C_0 pode ser expresso como porcentagem do patamar, facilitando assim a comparação da dependência espacial dos atributos químicos do solo. Nesse estudo, utilizou-se a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), sendo que a variável COT apresentou forte grau de dependência espacial, e os demais atributos físicos analisados apresentaram grau de dependência espacial moderado, visto que os valores do efeito pepita foram superiores a 25% e inferiores a 75% do valor do patamar. Vale ressaltar que quanto maior o valor do IDE, mais o semivariograma explica a variância dos dados.

A utilização dos semivariogramas permite verificar a dependência espacial existente entre os atributos físicos analisados. Se o semivariograma, ao invés de ser crescente e dependente da distância, não apresentar patamar, tem-se ausência total de dependência espacial, impossibilitando o ajuste de um modelo ao semivariograma, ocorrendo então o que se denomina efeito pepita puro (VIEIRA, 2000). Apenas a F apresentou esse comportamento, indicando a necessidade de uma menor grade de amostragem a fim de que sua dependência espacial possa ser detectada (CAMBARDELLA et al., 1994). Os demais atributos apresentaram estrutura de dependência espacial bem definida como pode especificado na tabela 4 e no apêndice B, sendo possível, dessa maneira, realizar a interpolação de valores em qualquer posição no campo em estudo, elaborando-se os mapas por meio do processo da krigagem ordinária (VIEIRA, 2000).

A krigagem é uma técnica de estimação de locais não amostrados, usando propriedades estruturais do semivariograma confeccionados a partir de locais amostrados. Mapas de krigagem podem ser elaborados para aqueles atributos que

apresentam dependência espacial. Esta informação é usada para visualizar e melhor entender o padrão de distribuição espacial, além de definir diferentes zonas de manejo em uma determinada área.

No mapa de variabilidade espacial do DMP (Figura 13a), verifica-se que a distribuição espacial desse atributo variou entre 2,0 a 3,6 mm, com predominância entre 2,9 à 3,3 mm, sendo os maiores valores foram encontrados na parte Oeste, onde predomina as classes do Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd), Associação de Planossolo Háptico Eutrófico e Gleissolo Háptico (SXE3) e Argissolo Bruno-Acinzentado (PBACal), e os menores DMP foram encontrados no centro da parte Leste da sub-bacia Santa Rita, com a classe predominante de Associação de Neossolo Regolítico, Neossolo Litólico e Argissolo Bruno-Acinzentado (RLd1) e alguns pontos com Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd).

Nota-se que em alguns locais da sub-bacia Santa Rita que obtiveram DMP superior a 3,5 mm, são os locais os quais obtiveram o maior teor de COT, sob cultivo de pastagens (visualmente não compactadas), correspondendo a aproximadamente 15,09%, fato este que pode estar associado a uma atuação intensa de agentes importantes na gênese dos agregados, como as moléculas orgânicas, hifas de fungos, ausência de mobilização do solo e ação das raízes das gramíneas, que possuem um sistema radicular abundante que são muito eficientes na renovação da bioestrutura dos solos, conforme relatado por Primavesi (2002).

Tisdall & Oades (1979), também reconhecem a importância das raízes das plantas no papel de estabilizar os agregados por meio da liberação de compostos orgânicos, do envolvimento físico e como fonte de energia para os microrganismos da rizosfera que produzem substâncias estabilizantes. Bertol et al. (2004) explicaram o maior DMP de solos não cultivados (campo natural), devido a influência do teor de matéria orgânica e aos ciclos de umedecimento e secagem do solo, que potencializam e consolidam a agregação.

Observando os mapas gerados após a interpolação dos dados pelas técnicas de krigagem, pode-se fazer uma inferência a partir dos dados obtidos, e assim compreender melhor a relação entre atributos macroagregados e microagregados. Essas relações são verificadas, nas áreas que ocorrem as maiores concentrações de macroagregados e conseqüentemente as menores em microagregados, logo, quando ocorre uma diminuição de macroagregados acontece um aumento de

microagregados, esses resultados podem indicar que a sub-bacia Santa Rita, possui uma boa estrutura do solo (Figuras 13b e 13c).

A distribuição dos valores de RT na sub-bacia da Santa Rita (Figura 13d) ocorreu de maneira que predominaram índices variando de 50 a 90 kPa, havendo algumas áreas pontuais com elevados valores e algumas com índices superiores a 110 kPa (pastagem) observada na Associação de Planossolo Háplico Eutrófico e Gleissolo Háplico (SXe3). Já os menores valores dos de RT estão relacionados à mata nativa.

Nota-se que os maiores valores de RT foram observados em alguns pontos sob sistema de pastagens, em locais visualmente degradados, ou seja, áreas compactadas, com ocorrência de erosão, geralmente em áreas que apresentam relevo ondulado a forte ondulado. Um dos principais efeitos provocados pelos animais na pastagem é o da compactação do solo, comprometendo o movimento de água no solo, o crescimento das raízes, e conseqüentemente obtendo uma elevada resistência tênsil, que representa a compactação adicional.

Aproximadamente 29,25% da área total da sub-bacia Santa Rita, obteve uma resistência tênsil de agregados inferior a 50 kPa, esses resultados foram encontrados principalmente em mata nativa e pastagem (vegetação natural, sem pastejo animal), podendo ser justificados pela preservação das ligações entre agregados, devido à não mobilização do solo e, por sua vez, à manutenção da qualidade estrutural. Corroborando com estudo realizado por Tormena et al. (2008b), os quais indicaram que solos sob floresta nativa possuem agregados menos resistentes à ruptura do que agregados de solos cultivados, devido a melhor estruturação do solo. A maior frequência dos ciclos de secagem e umedecimento associados à transpiração das plantas e à menor produção de argila dispersa por ocasião do umedecimento do solo podem ter contribuído para os menores valores de resistência tênsil no solo sob mata, tendo em conta os resultados de Utomo & Dexter (1981).

Os menores valores de RT obtidos sob pastagem, podem ser relacionados aos seguintes fatores: (a) o consumo contínuo da forragem estimula o perfilhamento e a rebrota e, por sua vez, estabelece maior atividade e crescimento de raízes no solo; e (b) no período de recuperação da forrageira após o pastejo, o que propicia incremento na área foliar, resultando em aumento no consumo e extração de água no perfil de solo, especialmente nas camadas superficiais, e, por sua vez, em maior

intensidade de ciclos de secagem e umedecimento, responsáveis pela criação de microfissuras ou microfraturas nos agregados, determinando redução na RT (BAVOSO et al., 2010). Salienta-se ainda que esses processos sejam possíveis desde que a lotação animal e o tempo de pastejo sejam adequados.

Aproximadamente 22,64% da área de estudo apresentou valores de RT superior a 75 kPa, sendo verificadas em áreas com pastagens, agricultura e solo exposto. Valores esses que são superiores ao descrito por Tormena et al. (2008b), em um Latossolo Vermelho Distrófico, considerando diferentes sistemas de uso: floresta nativa, pousio e cultivado e por Tuchtenhagen et al. (2017), em um Argissolo Vermelho-Amarelo, o qual obtiveram um valor médio para RT de 62,83 kPa.

A distribuição dos valores de COT na sub-bacia da Santa Rita (Figura 13e) ocorreu de maneira que predominaram índices variando de 1 a 2%, havendo algumas áreas pontuais com maiores teores. Observa-se que o menor valor de COT ocorreu no sistema sob pastagem com 0,72% em uma Associação de Neossolo Regolítico, Neossolo Litólico e Argissolo Bruno-Acinzentado (RLd1), já o maior teor de COT ocorreu em mata nativa, sob Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd).

A partir da visualização dos mapas das variáveis físicas do solo estudadas na sub-bacia Santa Rita, compreende-se as diferenças entre as unidades pedológicas, usos e manejos do solo, e suas características. Os resultados evidenciam que em determinados locais como pastagem e agricultura se deve buscar alternativas para a melhoria da qualidade estrutural, assim, as atividades devem ser cuidadosamente planejadas e as práticas de conservação do solo devem ser aplicadas desde o início do uso, visando conservar o potencial produtivo do solo. Além disso, locais com solo exposto presentes na sub-bacia Santa Rita carecem de uma atenção para uma adequada recuperação física do solo, como exemplo, uma revegetação do local.

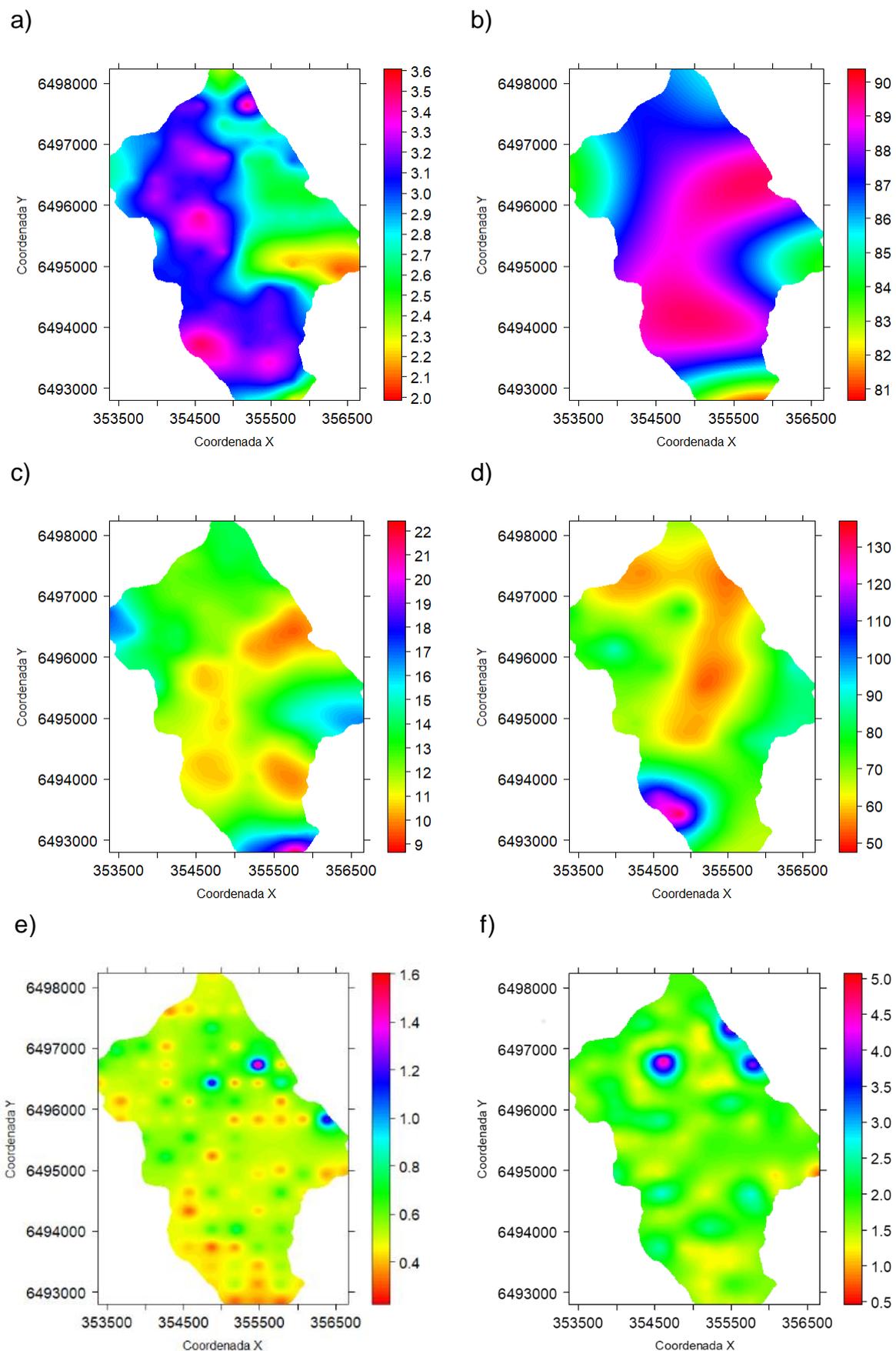


Figura 13 - Mapas de distribuição espacial das variáveis de diâmetro médio ponderado de agregados (a); macroagregados (b); microagregados (c); resistência tênsil de agregados (d); friabilidade (e) e carbono orgânico total (f) na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

Conclusões

Os resultados deste estudo confirmam a hipótese de que a agregação e a resistência tênsil dos agregados são importantes indicadores da qualidade do solo, auxiliando na avaliação e monitoramento interpretação em grande escala de diferentes solos com tipos diferenciados de uso e manejo.

Os atributos físicos agregação, resistência tênsil de agregados e friabilidade do solo, foram capazes de identificar alterações nas condições estruturais em decorrência de uso e de unidade pedológica.

A partir dos parâmetros físicos avaliados, foi possível verificar locais da sub-bacia Santa Rita com maior suscetibilidade a degradação física. Considerando diferentes tipos de solos, usos e manejos, nesses locais é recomendada a adoção de práticas conservacionistas agrícola e ambiental, além da preservação da mata nativa presente na área de estudo.

O modelo esférico ajustou-se para as variáveis de diâmetro médio ponderado, microagregados, resistência tênsil de agregados e carbono orgânico total, enquanto o modelo efeito pepita puro e o modelo gaussiano ajustaram-se para as variáveis de friabilidade e macroagregados respectivamente.

4.3 Variabilidade espacial da resistência à penetração

Nas figuras 14a, 14b, 14c, 14d e 14e podem ser observados os gráficos tipo “Box Plot”, para os 106 pontos amostrais da sub-bacia de estudo, que demonstram parte das análises exploratórias para os dados de resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (DS); porosidade total (PT); macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi).

Os gráficos apresentam “outliers”, entretanto não foram considerados como discrepantes. Segundo Reichardt & Timm (2016), do ponto de vista da variabilidade espacial, em que a ênfase é analisar as causas e efeitos da variabilidade de um determinado atributo ao longo do domínio espacial, a remoção de “outliers” torna-se questionável, uma vez que pode se tratar do comportamento real da variável no campo.

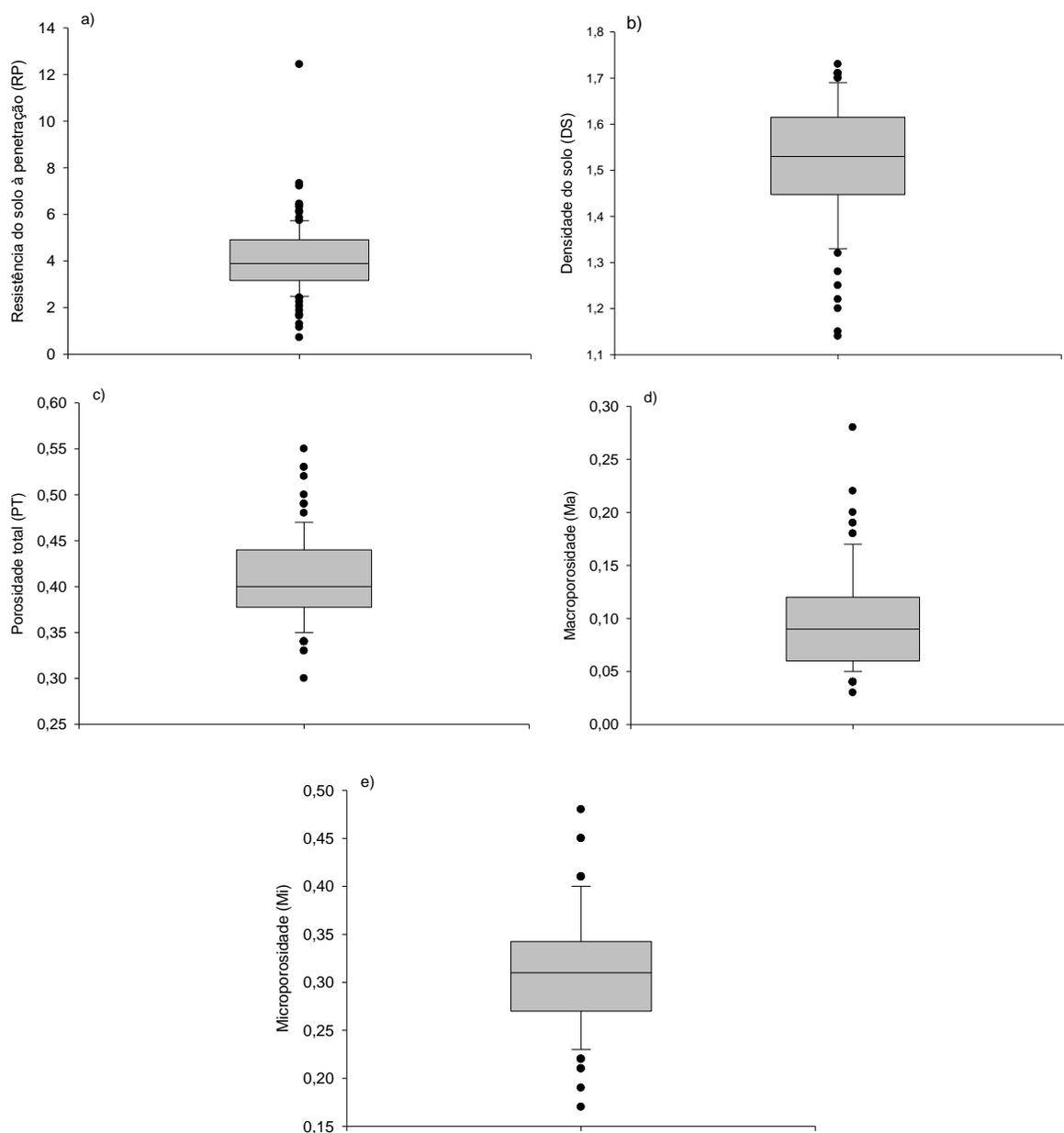


Figura 14 - Gráfico “Box Plot” de resistência do solo à penetração (a); densidade do solo (b); porosidade total (c); macroporosidade (d) e microporosidade (e) da malha amostral, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

Dentre os principais indicadores da degradação dos solos, tem-se a RP, a qual é utilizada na identificação de camadas compactadas do solo. O valor médio de resistência do solo à penetração (RP) foi de 4,05 MPa (Tabela 5), acima do limite de 2,0 MPa estabelecido em literatura, sendo prejudicial ao crescimento e desenvolvimento radicular (REICHERT et al., 2009). Porém, é sabido que a RP limitante varia com o tipo de solo. Deste modo, enfatiza-se que os resultados obtidos nesse estudo podem estar relacionados às unidades pedológicas e as coberturas presentes ao longo da sub-bacia Santa Rita. No trabalho realizado por Ralisch et al.

(2008), os autores verificaram valores de RP acima de 2 MPa em área de floresta e superior a 3 MPa nos sistemas de semeadura direta, preparo convencional e pastagem.

Salienta-se que durante a amostragem foi observado visualmente que alguns pontos da sub-bacia Santa Rita, sob sistemas de pastagem estavam compactados e até mesmos degradados, o que pode ter colaborado a elevação da média de RP, sendo caracterizada ao longo de sua extensão por 36,64% com essa cobertura.

Tabela 5 - Parâmetros da estatística descritiva para resistência do solo à penetração, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

⁽¹⁾ Variáveis	Média	⁽²⁾ Me	⁽³⁾ Mín	⁽⁴⁾ Máx	⁽⁵⁾ CV	⁽⁶⁾ DP	⁽⁷⁾ Cs	⁽⁸⁾ Ck	⁽⁹⁾ Ks
RP	4,05	3,89	0,72	12,43	37,45	1,51	1,61	7,93	0,08 ^(N)
DS	1,52	1,53	1,14	1,73	8,51	0,13	-0,72	0,35	0,07 ^(N)
PT	0,41	0,40	0,30	0,55	11,83	0,05	0,64	0,33	0,12 ^(NN)
Ma	0,09	0,09	0,03	0,28	47,64	0,04	1,22	1,81	0,19 ^(NN)
Mi	0,31	0,31	0,17	0,48	18,59	0,06	0,22	0,18	0,08 ^(N)

⁽¹⁾RP = Resistência do solo à penetração (MPa), DS = Densidade do solo (Mg m⁻³), PT = Porosidade do solo (m³ m⁻³), Ma = Macroporosidade (m³ m⁻³), Mi = Microporosidade (m³ m⁻³), ⁽²⁾Me = Mediana; ⁽³⁾Menor valor; ⁽⁴⁾Maior valor; ⁽⁵⁾CV = coeficiente de variação (%); ⁽⁶⁾DP = Desvio padrão; ⁽⁷⁾Cs = coeficiente de assimetria; ⁽⁸⁾Ck= coeficiente de curtose; ⁽⁹⁾ks = Kolmogorov-Smirnov, a 5%, N=segue a distribuição normal, NN=não segue a distribuição normal.

Ao comparar os valores de média e mediana da RP observa-se que a primeira é sempre maior. Isso ocorre porque a média é mais sensível a valores extremos, os quais estão do lado direito da distribuição, conforme indica o sinal positivo do coeficiente de assimetria (Tabela 5).

Os resultados demonstram uma alta amplitude de valores máximos e mínimos, os quais variaram de 0,72 a 12,43 MPa (Tabela 5), demonstrando que alguns pontos apresentam restrições ao desenvolvimento das plantas. A alta variação dos dados de RP pode ser atribuída às diferentes unidades pedológicas, do uso e manejo do solo na sub-bacia (Figura 3), como: pastagem, mata nativa, áreas com produção agrícola com cultivos milho e pêssego e de forma menos expressivas áreas degradadas, com solo exposto, além de outros fatores que podem ter interferido na determinação do atributo em condições de campo, como a elevada quantidade de material pedregoso presente na área de estudo.

Silva et al. (2015), avaliaram, por meio de análises multivariadas, os atributos do solo que melhor explicam a variabilidade espacial na produção da cultura do feijão, em razão de alguns atributos físicos, como por exemplo: densidade do solo,

porosidade do solo e resistência do solo a penetração, de um Latossolo Vermelho Distroférico, utilizando uma malha para a coleta de dados, com 117 pontos amostrais. Conforme Stefanoski et al. (2013), os atributos físicos intermediários, como a DS, são mais utilizados como indicadores da qualidade física do solo, por estarem sujeitos às maiores alterações em função dos sistemas de manejo. Cabe ressaltar que com base nas informações literárias, os valores de densidade do solo variam de 0,9 a 1,8 Mg m⁻³, dependendo da textura e do teor de matéria orgânica do solo (KLEIN, 2012).

A DS média encontrada na sub-bacia Santa Rita foi de 1,52 Mg m⁻³ e uma mediana de 1,53 Mg m⁻³. Segundo Little & Hills (1978), quando os valores da média e mediana mostram-se semelhantes, os dados apresentam ou aproximam-se da distribuição normal, corroborando com o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Já os valores de mínimo e máximo de DS foram respectivamente 1,14 e 1,73 Mg m⁻³, os quais não estão enquadrados na faixa de limites críticos ao crescimento do sistema radicular das plantas cultivadas.

Verifica-se, na tabela 5, que a PT na sub-bacia Santa Rita variou de 0,30 m³ m⁻³ a 0,55 m³ m⁻³, entre os diferentes usos e unidades pedológicas, com uma média de 0,41 m³ m⁻³, sendo possível afirmar que a malha amostral utilizada apresentou locais com valores de porosidade total abaixo e acima do valor considerado restritivo ao crescimento radicular.

A Ma é um importante indicador da qualidade física do solo, por exemplo, para diagnóstico da compactação do solo, em que a principal redução de volume de poros do solo ocorre nesta fração associada à porosidade total (SCHJONNING & LAMANDE, 2010). Um solo fisicamente adequado ao crescimento de plantas não deve apresentar valores de macroporos inferiores a 0,10 m³ m⁻³, a fim de que se mantenham os níveis adequados de aeração do solo (REICHERT et al., 2009).

A amplitude da macroporosidade foi de 0,03 a 0,28 m³ m⁻³, obtendo uma média 0,09 m³ m⁻³, sendo este inferior ao valor limite para adequada aeração do solo, esse resultado pode ser explicado pela transformação de Ma em Mi, virtude da compactação do solo, como pode ser observado pela alta resistência do solo à penetração.

Nota-se que a Mi média foi de 0,31 m³ m⁻³, conforme estabelecido em literatura, é caracterizada como prejudicial para que ocorra o crescimento e desenvolvimento radicular. Azevedo & Dalmolin (2004) preconizaram níveis de

microporosidade de $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para um solo agrícola ideal. Todavia, a amplitude variou de $0,17$ a $0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, nos 106 pontos avaliados, obtendo uma média de $0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Observa-se que o adensamento presente na sub-bacia Santa Rita, pode ter ocasionado uma redução na macroporosidade, e conseqüentemente gerando um maior volume de microporos.

Em síntese, solo compactado ou adensado apresenta redução da porosidade total e da macroporosidade, assim como aumento da microporosidade e densidade do solo (KLEIN & LIBARDI, 2002). Os resultados evidenciam que a porosidade do solo nas diferentes unidades pedológicas e usos presentes nesse estudo, são constituídos predominantemente por microporos, o que pode estar relacionado à elevada resistência do solo a penetração.

Os limites críticos ao desenvolvimento de plantas são de difícil mensuração, pois variam de acordo com o tipo de solo, manejo, planta e com as condições climáticas que ocorreram durante o seu desenvolvimento. Por conseguinte, persistem muitas dúvidas quanto a valores de RP, DS, PT, Ma e Mi que sejam limitantes ao desenvolvimento e a produtividade das culturas.

Analisando conjuntamente os resultados obtidos dos atributos físicos do solo, nota-se que a elevada RP na sub-bacia Santa Rita, pode ser o fator principal dos resultados obtidos na PT, ou seja, o efeito da compactação do solo é acompanhado por incrementos na sua DS e RP, bem como por reduções na PT em função da diminuição no volume de Ma.

O valor do coeficiente de variação (CV) da distribuição dos dados físicos do solo avaliados na malha amostral variou de 8,51% a 47,64%. Adotando-se como base os critérios propostos por Wilding & Drees (1983), apresentaram alta CV (> 35%) às variáveis RP e Ma, enquanto a Mi foi classificada com CV moderado (15 a 35%) e as variáveis DS e PT apresentaram um baixo CV (< 15%).

De acordo com Warrick & Nielsen (1980), o coeficiente de variação pode variar de valores menores que 10 a maiores que 1000% e, a densidade tende a apresentar CV de até 10% (baixa variação), corroborando com os resultados obtidos.

O coeficiente de assimetria é utilizado para caracterizar como e quanto a distribuição de frequências se afasta da simetria. Se o valor encontrado para este coeficiente for zero, a distribuição é simétrica; se for positivo, a distribuição é assimétrica à direita e, se for negativo, é assimétrica à esquerda. A maioria das variáveis apresentou coeficientes de assimetria positivos, sendo os maiores valores

para resistência do solo à penetração de 1,61, macroporosidade com 1,22, porosidade total de 0,64 e microporosidade de 0,22. Já o valor de assimetria negativa, foi verificado somente na variável de densidade do solo de -0,72, o que demonstra haver tendência de concentração dos valores acima da média (NEVES NETO et al., 2013).

Observa-se que os valores da curtose da RP não estão próximos de zero, revelando maior dispersão de dados, fato que pode ser observado pelos valores máximos e mínimos. Em pesquisas relacionadas à ciência do solo, é comum a frequência de curtoses mais distantes de zero. No estudo realizado por Guimarães et al. (2016), em um experimento que visava avaliar a variabilidade espacial de atributos físicos de três classes de solo ocupadas por pastagem, os autores observaram valores de curtose com variação de 2,54 a 14,15 Mpa.

Em relação ao grau de achatamento das distribuições, pode ser constatada que todas as distribuições são classificadas como leptocúrtica (coeficiente de curtose > 0), indicando um menor grau de achatamento.

A partir do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade, observou-se que as variáveis RP, DS e Mi apresentaram tendência à normalidade, entretanto a PT e Ma, não seguiram a tendência de normalidade (Tabela 5). Cabe salientar que a condição de normalidade não é um pré-requisito fundamental para o emprego da análise geoestatística, o importante é que a distribuição não apresente grandes fugas nas extremidades da curva, que poderiam comprometer a análise (CAMBARDELLA et al., 1994).

Na tabela 6 são apresentados os valores dos índices de geoestatística e seus varioagramas conforme as avaliações físicas propostas para os 106 pontos da sub-bacia Santa Rita. A análise geoestatística, efetuada por meio dos semivariogramas, mostrou que todas as variáveis apresentaram dependência espacial, exceto a microporosidade.

Tabela 6 - Estimativas dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas ajustados para a resistência do solo à penetração, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.

(1)Variáveis	(2)Modelo	(3)r ²	(4)C ₀	(5)C + C ₀	(6)A (m)	(7)IDE (%)	Classificação
RP	Esf	0,01	1,4	2,9	2.800	48,28	Moderado
DS	Esf	0,03	0,01	0,019	2.500	52,63	Moderado
PT	Esf	0,01	7x10 ⁻⁴	0,0024	1.200	29,16	Moderado
Ma	Esf	0,02	7x10 ⁻⁴	0,0018	1.500	38,88	Moderado
Mi	EPP	-	-	-	-	-	-

(1)RP = Resistência do solo à penetração, DS = Densidade do solo, PT = Porosidade do solo, Ma = Macroporosidade, Mi = Microporosidade; (2)Esf = Esférico, EPP = efeito pepita puro; (3)Coeficiente de determinação; (4)Efeito pepita; (5)Patamar; (6)Alcance; (7)Grau de dependência espacial (%).

Quando a variável estudada é independente espacialmente, neste caso mais especificamente a microporosidade, o semivariograma se ajusta ao modelo linear, em que C₀ é igual a C₁ + C₀, conhecido como efeito pepita puro (EPP). O EPP é importante e indica distribuição casual, e pode ser devido a erros de medidas, considerando ser o espaçamento de amostragem utilizado maior que o necessário para detectar dependência espacial, ou seja, o esquema amostral de 300 m entre pontos não foi suficiente para captar a dependência espacial para esta variável. Deste modo, recomenda-se uma malha mais adensada que a utilizada neste estudo para avaliar a variabilidade espacial da Mi. As demais variáveis foram ajustadas ao modelo esférico (Tabela 6) confirmando-o como o que melhor se ajusta em trabalhos de ciência do solo (CAMBARDELLA et al., 1994; OLIVEIRA et al., 2013).

Uma das maneiras de avaliar o desempenho dos semivariogramas é a sua análise a partir dos seus respectivos coeficientes de determinação espacial (r²), por demonstrar o quão os dados estão espacialmente correlacionados. As variáveis RT, RP, DS, PT e Ma obtiveram um coeficiente de determinação de 0,01, 0,03, 0,01 e 0,02 respectivamente.

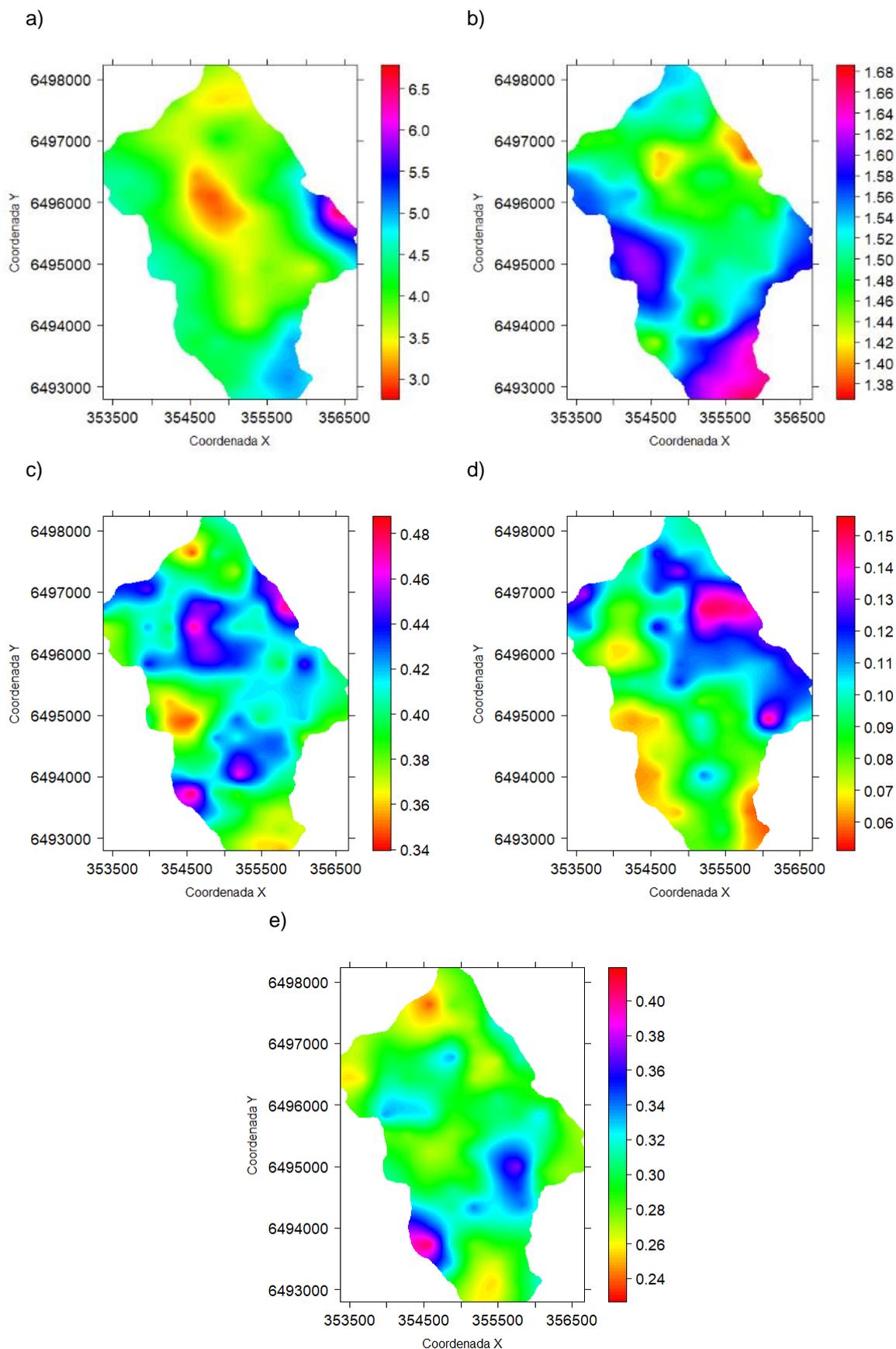
O alcance indica o limite da dependência espacial da variável, ou seja, determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance tem distribuição espacial aleatória, sendo independentes entre si, fazendo-se uso então da estatística clássica. Já as determinações realizadas em distâncias menores que os alcances estão correlacionadas umas com as outras, o que permite que se façam interpolações para espaçamentos menores que os amostrados (SILVA et al., 2003). No presente trabalho o maior alcance foi proporcionado através da RP (2.800 m), seguido pela DS (2.500 m), Ma (1.500 m) e PT (1.200 m). Em todos esses atributos

o valor do alcance foi maior do que a distância da malha amostral, indicando que o espaçamento utilizado foi suficiente para capturar a dependência espacial para a RP, DS, PT e Ma.

Para analisar o grau de dependência espacial, utilizou-se a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), verificando que todas as variáveis, apresentaram IDE classificado como moderado, devido a relação entre efeito pepita e patamar estar entre 25% e 75% (Tabela 6).

Os modelos ajustados aos semivariogramas pelas metodologias empregadas, para as variáveis de RP, na sub-bacia Santa Rita encontram-se no apêndice C.

Na krigagem identifica-se a localização e a abrangência dos valores extremos, o grau de homogeneidade da área e as direções de maior gradiente. Além disso, ainda que de forma qualitativa, essas superfícies podem revelar se há algum padrão que sugira que a variável interpolada tenha correlação com outras variáveis, tais como declividade, altimetria, manejo e uso da terra, por exemplo. Cabe salientar que uma das características da krigagem é que ela não preserva os valores dos dados originais, por isso os valores de máximo da tabela 5 não aparecem na legenda das figuras 15a, 15b, 15c e 15d. Em função da variável microporosidade não apresentar dependência espacial, esta foi interpolada pelo método IDW (interpolação ponderada pelo inverso da distância), figura 15e.



No mapa de RP, os valores mais elevados, foram verificados a sudeste e leste da sub-bacia Santa Rita (Figura 15a), com unidade pedológica classificada como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) e Associação de Neossolo Regolítico, Neossolo Litólico e Argissolo Bruno-Acinzentado (RLd1). No restante os valores estão homogêneos, mostrando que neste caso o valor médio (4,05 Mpa) representaria a RP na sub-bacia Santa Rita. Ressalta-se que esses resultados indicam que alguns locais das áreas de estudo estão acima de valores considerados críticos ao desenvolvimento radicular das plantas, todavia, este fato pode estar relacionado à elevada quantidade de raízes e material pedregoso, o que pode ter contribuído ao aumento da RP.

Apenas 5,66% da área amostrada está abaixo do limite de 2,0 MPa, em áreas cobertas predominantemente por mata nativa, sob Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) e Associação de Planossolo Háplico Eutrófico e Gleissolo Háplico (SXe3). Esse fato deve-se provavelmente pela ausência de qualquer tipo de pressão no solo causada pelos pneus das máquinas agrícolas e pisoteio de gado.

Logo, verifica-se que 94,34% da área de estudo apresentaram valores acima do considerado crítico na literatura indicando limitação física ao crescimento do sistema radicular em alguns pontos da sub-bacia Santa Rita, acarretando deformações morfológicas do sistema radicular das culturas agrícolas, o que dificulta o acesso à água e aos nutrientes nas camadas mais profundas do perfil (COLLARES et al., 2008).

Todavia, Tavares Filho et al. (2001) afirmam que, se houverem condições químicas e umidade favorável, e se a porosidade do solo permitir que ocorra difusão de oxigênio, as raízes podem sofrer deformações morfológicas e crescer através de pontos de menor resistência, mesmo em solo com valores elevados de resistência mecânica à penetração.

Observa-se que a região nordeste da bacia foi a que obteve os menores valores de DS, sendo composta por Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Argissolo Bruno-Acinzentado (PBACal) (Figura 15b). Cabe salientar que esses resultados foram adquiridos principalmente em área sob campo (sem pastejo animal) e mata nativa, fato que pode estar relacionado à vegetação natural apresentar melhores condições físicas, consequência por ser um local conservado e protegido de ações antrópicas.

As maiores DS foram detectadas na parte sul, com unidades pedológicas referentes a Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) e Associação de Planossolo Háplico Eutrófico e Gleissolo Háplico (SXe3), e parte da região Oeste onde há predominância de Argissolo Bruno-Acinzentado (PBACal). Ressalta-se que os valores de DS, para sub-bacia Santa Rita encontram-se dentro do considerado adequado para desenvolvimento radicular.

A partir da figura 15c, observa-se que 96,23% dos pontos coletados da sub-bacia Santa Rita, apresentaram porosidade inferior a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que é considerado ideal para um solo bem estruturado e com condições satisfatórias para o crescimento de plantas (BRADY & WEIL, 2007). Apenas 3,77% da área de estudo, apresentaram porosidade superior ao considerado restritivo ao desenvolvimento radicular, sendo esses resultados encontrados na mata nativa, em Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) e Associação de Planossolo Háplico Eutrófico e Gleissolo Háplico (SXe3).

Considerando que, de maneira geral, condições físicas do solo favoráveis ao crescimento das plantas têm sido associadas com uma porosidade de aeração mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, cujo valor inferior a este pode causar restrições ao desenvolvimento radicular devido à baixa aeração e aumento da resistência à penetração do solo (BAVER et al. 1972; DREWRY et al., 2008), foi constatado que apenas 35,85% dos pontos coletados da sub-bacia Santa Rita, apresentaram volume poroso aquém do ideal para o desenvolvimento radicular, sendo esses encontrados em Argissolo Bruno-Acinzentado (PBACal) e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) e parte da Sudeste, caracterizada por Associação de Neossolo Regolítico, Neossolo Litólico e Argissolo Bruno-Acinzentado (RLd1).

Um dos primeiros indicativos da ocorrência do processo de compactação é a redução do tamanho dos poros, haja vista que a macroporosidade se forma pela união de agregados grandes por forças eletrostáticas e pela atividade microbiana e crescimento de raízes. Nota-se que 64,15%, da sub-bacia Santa Rita obteve resultados de M_a abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, limite mínimo para a adequada difusão de oxigênio no solo. Esses dados indicam possíveis problemas de infiltração de água, circulação de oxigênio e, conseqüentemente, desenvolvimento das raízes o que ressalta o elevado estado de compactação percebido na área de estudo, onde 94,34% da área apresentaram valores de RP acima do considerado crítico na literatura.

Os mapas da variável porosidade total e da macroporosidade são semelhantes entre si, do ponto de vista de distribuição espacial dos dados e eles possuem distribuição espacial oposta aos valores de densidade do solo, ou seja, regiões que apresentam os maiores valores de DS possuem os menores valores de PT e Ma.

Os resultados que melhor se adéquam com os valores considerados limitantes ao desenvolvimento das raízes foram os decorrentes do solo sob mata nativa, os quais apresentaram a menor DS e proporcionaram a menor RP, por este ambiente possuir uma elevada quantidade de matéria orgânica protegendo e mantendo a estrutura do solo, além disso, não ocorre pisoteio do gado nem revolvimento do mesmo. Todavia, deve-se ressaltar que a sub-bacia Santa Rita possui atividades agropecuárias para a subsistência dos produtores, e as tais devem ser adequadas para evitar possível degradação do solo.

Conclusões

Os atributos físicos de resistência do solo à penetração, densidade, porosidade, macroporosidade, e microporosidade do solo, foram capazes de identificar alterações nas condições estruturais em decorrência de uso e de unidade pedológica, sendo importantes indicadores da qualidade do solo.

A malha de amostragem permitiu mapear a dependência espacial da resistência do solo à penetração, da densidade do solo, da porosidade do solo e da macroporosidade dos solos.

A variável de microporosidade do solo apresentou distribuição aleatória (efeito pepita puro), logo, o esquema amostral de 300 m entre pontos não foi suficiente para captar a dependência espacial. As demais variáveis foram ajustadas ao modelo esférico.

5 Referências

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; Escarificação mecânica e biológica para redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000300013>>.

ASKARI, M. S.; CUI, J.; HOLDEN, N. M. The visual evaluation of soil structure under arable management. **Soil and Tillage Research**, v. 134, p. 1-10, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2013.06.004>>.

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: uma introdução**. Santa Maria: Palotti, 2004. 100p.

BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality—a development of the Peerkamp test. **Soil use and Management**, v. 23, n. 4, p. 329-337, 2007. <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x>>.

BALL, B. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; CLOY, J. M.; HARGREAVES, P. R.; SHEPHERD, T. G.; MCKENZIE, B. M. Visual soil evaluation: A summary of some applications and potential developments for agriculture. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 114-124, 2017. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.07.006>>.

BASTOS, R. S.; SÁ MENDONÇA, E.; ALVAREZ V., V. H.; CORRÊA, M. M.; COSTA, L. M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p. 21-31, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000100003>>.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4.ed. New York, John Wiley & Sons, 1972. 498p.

BAVOSO, M. A.; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; PAULETTI, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênsil e friabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 227-34, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000100023>>.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira**

de Ciência do Solo, v. 28, n. 1, p. 155-163, 2004. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000100015>>.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L. R.; SCHLEGEL, A. J.; LYON, D. J.; VIGIL, M. F.; MIKHA, M. M.; STAHLMAN, P. W.; RICE, C. W. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 6, p. 1871-1879, 2009. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2008.035>>.

BRADFORD, M. The penetration resistance of a soil with well defined structural units. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 3, p. 601-606, 1980. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400030034x>>.

BRADY, N.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14.ed. New Jersey, Prentice Hall, 2007. 980p.

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 American Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>>.

CARDOSO, A.; POTTER, R.; DEDECEK, R. A. Estudo comparativo da degradação de solos pelo uso agrícola no Noroeste do estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 27, n. 2, p. 349 - 353, 1992.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14 n. 1, p. 99-105, 1990.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; OLIVEIRA, D. M. S.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils – effects of land use change on soil chemical attributes. **Agriculture, ecosystems and environment**, v. 211, p. 173-184, 2015. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.006>>.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; CERRIA, C. E.P.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 64-74, 2017. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.05.004>>.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300003>>.

CRESSIE, N.; HAWKINS, D. M. **Robust estimation of the variogram: I.** *Math. Geol.* v. 12, n. 2, p. 115-125, 1980. <<http://dx.doi.org/10.1007/BF01035243>>.

CRESSIE, N. **Statistics for Spatial Data.** John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993.

CRITTENDEN, S. F.; POOT, N.; HEINEN, M.; BALEN, D. J. M. V.; PULLEMAN, M. M. Soil physical quality in contrasting tillage systems in organic and conventional farming. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 136-144, 2015. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.06.018>>.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Estudo dos solos do município de Capão do Leão.** EMBRAPA-CPACT (Documentos, 12/96). Pelotas: Ed. UFPel, 1996. 50p.

DEXTER, A. R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 31, n. 2, p. 139-147, 1985. <[https://dx.doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90066-6](https://dx.doi.org/10.1016/0021-8634(85)90066-6)>.

DEXTER, A. R.; WATTS, C. Tensile Strength and Friability. In: SMITH, K. & MULLINS, C. (Ed.) **Soil and environmental analysis: Physical methods.** 2. ed. New York: Marcelo Dekker, p. 401-430, 2000.

DREWRY, J. J.; CAMERON, K. C.; BUCHAN, G. D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing - a review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, n. 3, p. 237-256, 2008. <<https://dx.doi.org/10.1071/SR07125>>.

EDEN, M.; SCHJØNNING, P.; MOLDRUP, P.; JONGE, L. W. Compaction and rotovation effects on soil pore characteristics of a loamy sand soil with contrasting organic matter content. **Soil Use and Management**, v. 27, p. 340-349, 2011. <<https://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00344.x>>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos.** 2ª ed. Rio de Janeiro; 1997.

FRANCO, A. L. C.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; GUIMARÃES, R. M. L.; CERRI, C. C. Relating the visual soil structure status and the abundance of soil engineering invertebrates across land use change. **Soil and Tillage Research**, v.173, p. 49-52, 2016. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.08.016>>.

GARBISU, C.; ALKORTA, I.; EPELDE, L. Assessment of soil quality using microbial properties and attributes of ecological relevance. **Applied Soil Ecology**, v. 49, p. 1-4, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.04.018>>.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C. On the visual evaluation of soil structure: The Brazilian experience in Oxisols under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 60-64, 2013. <<https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.004>>.

GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; BALL, B. Método de avaliação visual da qualidade da estrutura aplicado a Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, v. 39, n. 8, p. 2531-2354, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009000800041>>.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A.; GAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soil of contrasting texture and management. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 92-99, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.01.020>>.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 3, p. 395-403, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>>.

GUIMARÃES, R. M.; JUNIOR, A. F. N.; SILVA, W. G.; ROGERS, C. D.; BALL, B. C.; MONTES, C. R.; PEREIRA, B. F. The merits of the Visual Evaluation of Soil Structure method (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 75-82, 2017a. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.10.014>>.

GUIMARÃES, R. M.; LAMANDÉ, M.; MUNKHOLM, L. J.; BALL, B. C.; KELLER, T. Opportunities and future directions for visual soil evaluation methods in soil structure research. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 104-113, 2017b. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.01.016>>.

GUIMARÃES, W. D.; GRIPP JUNIOR, J.; MARQUES, E. A. G.; SANTOS, N. T.; FERNANDES, R. B. A. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados

por pastagens. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 2, p. 247-255, 2016. <<https://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20160029>>.

IBARRA, S. Y.; MCKYES, E.; BROUGHTON, R. S. Measurement of tensile strength of unsaturated sandy loam soil. **Soil and Tillage Research**, v. 81, n. 1, p. 15-23, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.04.002>>.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DEXTER, A. R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 5, p. 1656-1661, 2002. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2002.1656>>.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000. <<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000700025>>.

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

JOHANNES, A.; WEISSKOPF, P.; SCHULIN, R.; BOIVIN, P. To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 24-32, 2017. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.06.001>>.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. New York: Academic Press, 1978. 600 p.

KAY, B. D.; DEXTER, A. R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, v. 30, n. 3, p. 297-310, 1992. <<https://doi.org/10.1071/SR9920297>>.

KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; PETH, S.; BERLI, M.; DELENNE, J.-Y.; BAUMGARTEN, W.; RABEL, W.; RADJAÏ, F.; RAJCHENBACH, J.; SELVADURAI, A. P. S.; OR, D. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 128, p. 61-80, 2013. <<https://doi.org/10.1016/j.still.2012.10.004>>.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 425-441. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>>.

KIRCH, P.; HEINICKE, T.; SHEPHERD, G.; ZEITZ, J. Application and Verification of Techniques for Visually Assessing Pasture Conditions in Mountainous Terrain: A Test of Three Field Assessment Methods in the Kyrgyz Republic. **Mountain research and development**, v. 36, n. 3, p. 355-363. <<http://dx.doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15-00049.1>>.

KLEIN, V. A. **Física do Solo**. 2.ed. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2012. 240 p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n 4, p. 857-867, 2002. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832002000400003>>.

KLUTE A. Water retention: Laboratory methods. In: Black CA, editor. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy; 1986. p. 635-62.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 52, n. 6, p. 119-139, 1951.

LEGAZ, B. V.; SOUZA, D. M. D.; TEIXEIRA, R. F. M.; ANTON, A.; PUTMAN, B.; SALA, S. Soil quality, properties, and functions in life cycle assessment: an evaluation of models. **Journal of cleaner production**, v. 140, p. 502-515, 2017. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.077>>.

LEY, G. J.; MULLINS, C. E.; LAL, R. Effects of soil properties on the strength of weakly structures tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v.28, p.1-13, 1993. <[https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90051-P](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90051-P)>.

LITTLE, T. M.; HILLS, F. J. **Agricultural experimentation: design and analysis**. New York: J. Wiley, 1978. 350p.

MASSEY, F. J. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. **J. Am. Stat. Assoc.** v. 46, n. 253, p. 68-78, 1951. <<http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1951.10500769>>.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**. n. 58, n. 8, p. 1246-66, 1963. <<http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>>.

MATHERON, G. *Traité de géostatistique appliquée*, Tome I. **Mémoires du bureau de recherches géologiques et minières principes**. Paris: Editions Technip, 1962. n. 14. 333p.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, p. 848-853, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782010005000055>>.

MINGOTI, S. A.; ROSA, G. A note on robust and non-robust variogram estimators. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 1, p. 87-95, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672008000100014>.

MONCADA, M. P.; GABRIELS, D.; DEYANIRA, L.; REY, R. C.; CORNELIS, W. M. Visual field assessing of soil structural quality in tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 139, p. 8-18, 2014a. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.01.002>>.

MONCADA, M. P.; PENNING, H. L.; TIMM, L. C.; GABRIELS, D.; CORNELIS, W. M. Visual examination of changes in soil structural quality due to land use. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 83-91, 2017. <<https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.011>>.

MONCADA, M. P.; PENNING, L. P.; TIMM, L. C.; GABRIELS, D.; CORNELIS, W. M. Visual examinations and soil physical and hydraulic properties for assessing soil structural quality of soils with contrasting textures and land uses. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 20-28, 2014b. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.02.009>>.

MUELLER, L.; SHEPHERD, G.; SCHINDLER, V.; BALL, B. C.; MUNKHOLM, L. J.; HENNINGS, V.; SMOLENTSEVE, E.; RUKHOVIC, O.; LUKIN, S.; HU, C. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 74-84, 2013. <<https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.03.002>>.

NEVES NETO, D. N.; Santos, A. C. dos; Santos, P. M.; Melo, J. C.; Santos, J. S. Análise espacial de atributos do solo e cobertura vegetal em diferentes condições de pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 9, p. 995-1004, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000900013>>.

NIERO, L. A. C.; DECHEN, S. C. F.; COELHO, R. M.; DE MARIA, I. C. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um latossolo vermelho distroférrico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1271-1282, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000400025>>.

NIELSEN, D. R.; WENDROTH, O. Spatial and temporal statistics: Sampling field soil and their vegetation. **Reiskirchen: Catena Verlag**, 2003. 398 p.

OLIVEIRA, A. P. P. de.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C. dos.; ZONTA, E.; PEREIRA, M. G. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar: Conhecimento atual sobre modificações em atributos de solos de tabuleiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 9, p. 939-947, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n09p939-947>>.

OLIVEIRA, I. R. de; TEIXEIRA, D. De B.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Modelagem geoestatística das incertezas da distribuição espacial do fósforo disponível no solo, em área de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1481-1491, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000600005>>.

PALADINI, F. L. S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-escuro afetado por sistema de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.135-140. 1991.

PALMEIRA, P. R. T.; PAULETTO, E. A.; TEIXEIRA, C. F. A.; GOMES, A. S.; SILVA, J. B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 189-195, 1999. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831999000200001>>.

PEBESMA, E.J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 7, p. 683-691, 2004. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012>>.

PEERLKAMP, P. K. A visual method of soil structure evaluation. **Meded. vd Landbouwhogeschool en Opzoekingsstations van de Staat te Gent. XXIV**, n. 24, p. 216-221, 1959.

PENNING, L. H.; LIMA, C. L. R. DE.; TUCHTENHAGEN, I. K.; SILVA, M. DE. F. M. M. DA.; PILLON, C. N.; NUNES, M. C. M. **Avaliação visual para o monitoramento da qualidade estrutural do solo: VESS e VSA**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2015. 39 p. Embrapa Clima Temperado. Documentos / Embrapa Clima Temperado, 390.

Primavesi, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**, São Paulo: Nobel, 2002 - 541 p.

R CORE TEAM, 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.

RALISCH, R.; MIRANDA, T. M.; OKUMURA, R. S.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; SCOPEL, E.; BALBINO, L. C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 381-384, 2008. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000400008>>.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2016. 547p.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree of compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009. <<https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>>.

REIS, D. A.; LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E. A. Resistência tênsil de agregados e compressibilidade de um solo construído com plantas de cobertura em área de mineração de carvão em Candiota, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 669-678, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000200031>>.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. Geor: a package for geostatistical analysis. **R-News**, v. 1, p. 15-18, 2001.

RIBEIRO, L. S.; OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S.; SILVA, C. V.; SILVA, G. B.; AZEVEDO, J. R. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo coeso sob sistemas de manejo convencional e de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1699-1702, 2016. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900071>>.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, J. P. **Erosividade determinada por desagregação de chuva diária no lado brasileiro da Bacia da Lagoa Mirim**. Pelotas, 2013, 89p. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água.

SCHJONNING, P.; LAMANDE, M. A note on the vertical stresses near the soil-tyre interface. **Soil and Tillage Research**, v. 108, p. 77-82, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2010.03.006>

SHEPHERD, T. G. **Visual Soil Assessment**, Volume 1. Field Guide for Pastoral Grazing and Cropping on Flat to Rolling Country. 2nd ed. Palmerston North: Horizons Regional Council, 2009. 119 p.

SILVA, A. P.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B.; GUIMARÃES, R. M. L. Soil structure and greenhouse gas production differences between row and interrow positions under no-tillage. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 2, p. 157-162, 2014. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162014000200011>>.

SILVA, E. N. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO A. R.; CORREA, R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 598-607, 2015. <<http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcs20140429>>.

SILVA, R. V.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, v. 30 n 5, p. 795-801. Santa Maria. 2000. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782000000500009>>.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, 2003. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000600005>>.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 14, p. 2099-2103, 2000. <[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6)>.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2. ed. Lisboa: IST Press, 2006.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. C.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013001200008>>.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 2, p. 229-35, 1991.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. **Soil and Tillage Research**, v. 161, p. 71-78, 2016. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.03.005>>.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 725-730, 2001. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832001000300022>>.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982. <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>>.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of Ryegrass. **Australian Journal of Soil Research**, v. 17, n. 3, p. 429-442, 1979. <<https://doi.org/10.1071/SR9790429>>.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.; SILVA, A. P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 943-952, 2008a. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300004>>.

TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 33-42, 2008b. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100004>>.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831998000200016>>.

TUCHTENHAGEN, I. K.; LIMA, C.L.R.; PAULETTO, E. A.; VAHL, L. C.; STUMPF, L. Cinza de casca de arroz como alternativa para melhorar a qualidade estrutural de um Argissolo. **Interciencia**, v. 42, n. 3, p. 163-167, 2017. ISSN 0378-1844 <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33950011004>>.

UTOMO, W. H.; DEXTER, A. R. Soil friability. **European Journal Soil Science**, Oxford, v. 32, n. 2, p. 203-213, 1981. <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1981.tb01700.x>>.

VAN LIER, Q. J. Oxigenação do sistema radicular: Uma abordagem física. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 233-238. 2001. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832001000100025>>.

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

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

VIEIRA, S. R. **Uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. In: Curso de atualização em conservação do solo. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1995. 61 p.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D. Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WATTS, C. W.; DEXTER, A. R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v.49, n.1, p.73-84, 1998. <<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.00129.x>>.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 315 p.

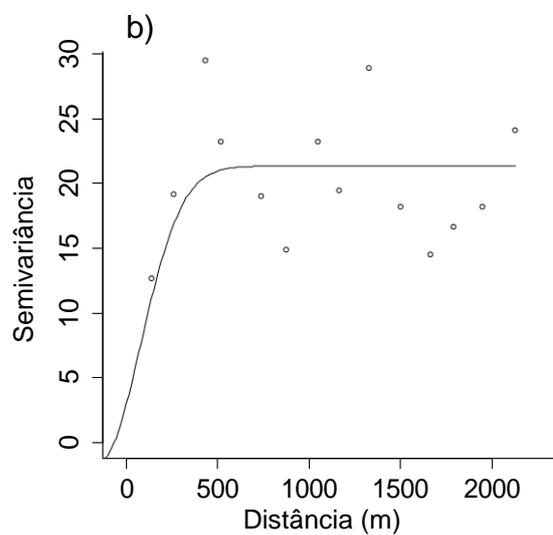
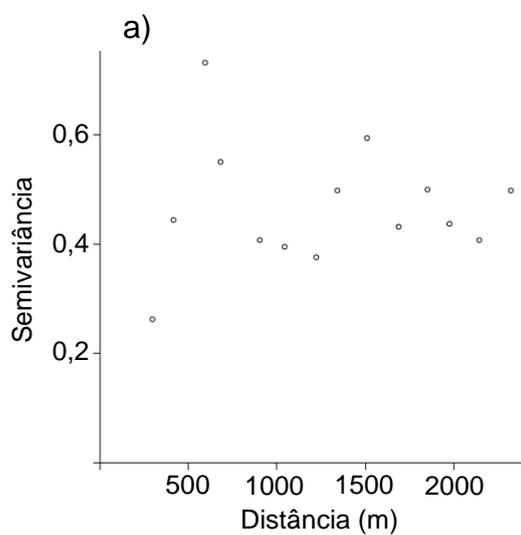
WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. Chichester (England): John Wiley & Sons, 2001. 271 p.

WILDING, L. P.; DREES, L. R. **Spatial variability and pedology**. In: WILDING, L. P.; SMECK, L. E.; HALL, G.F. (Ed.). Pedogenesis and soil taxonomy I. concepts and interactions. Amsterdam: Elsevier, 1983. p. 83-116. [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70599-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70599-3)

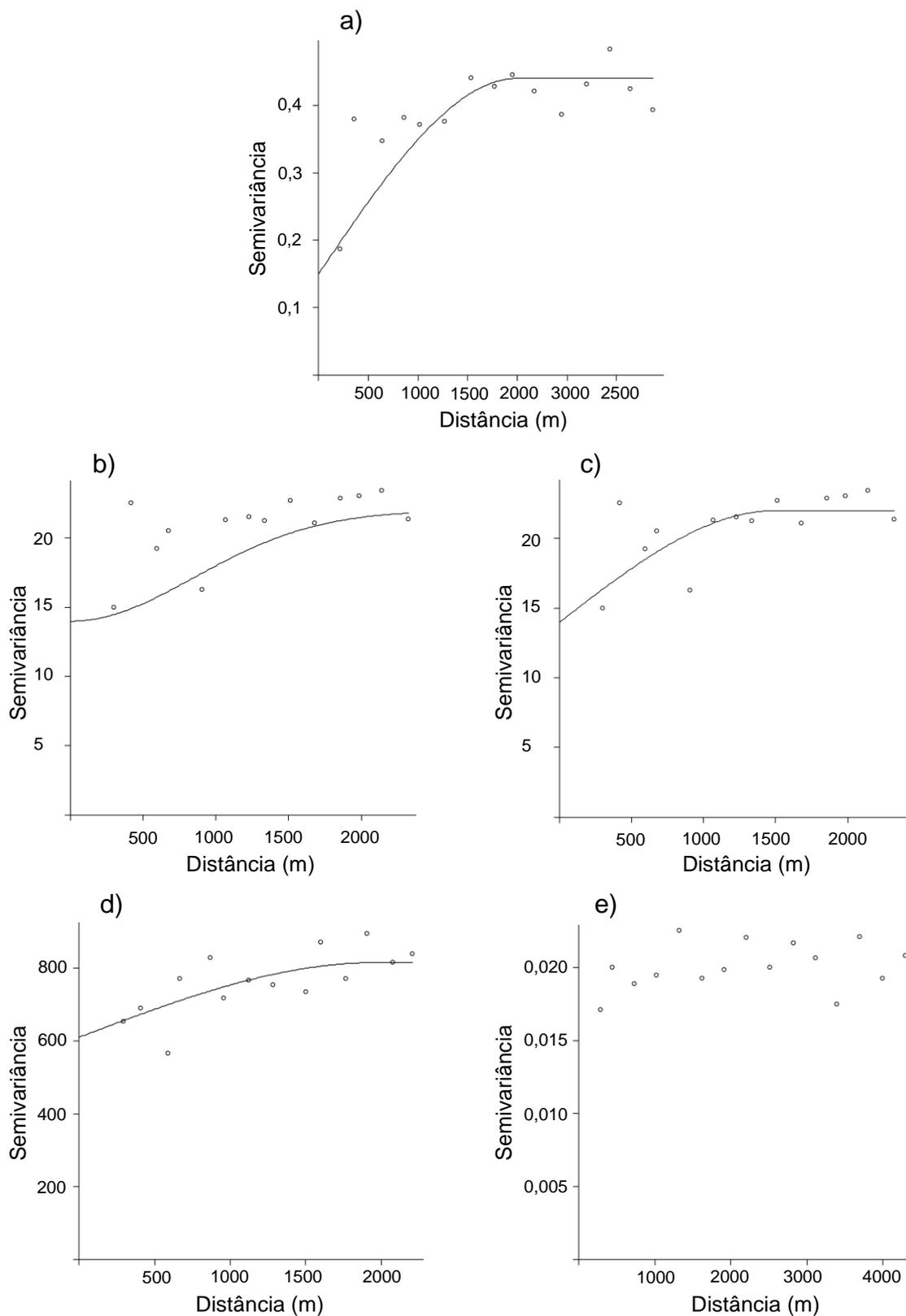
YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of America Society of Agronomy**, v.28, n.5, p.337-357, 1936.
<<http://dx.doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>>.

APÊNDICES

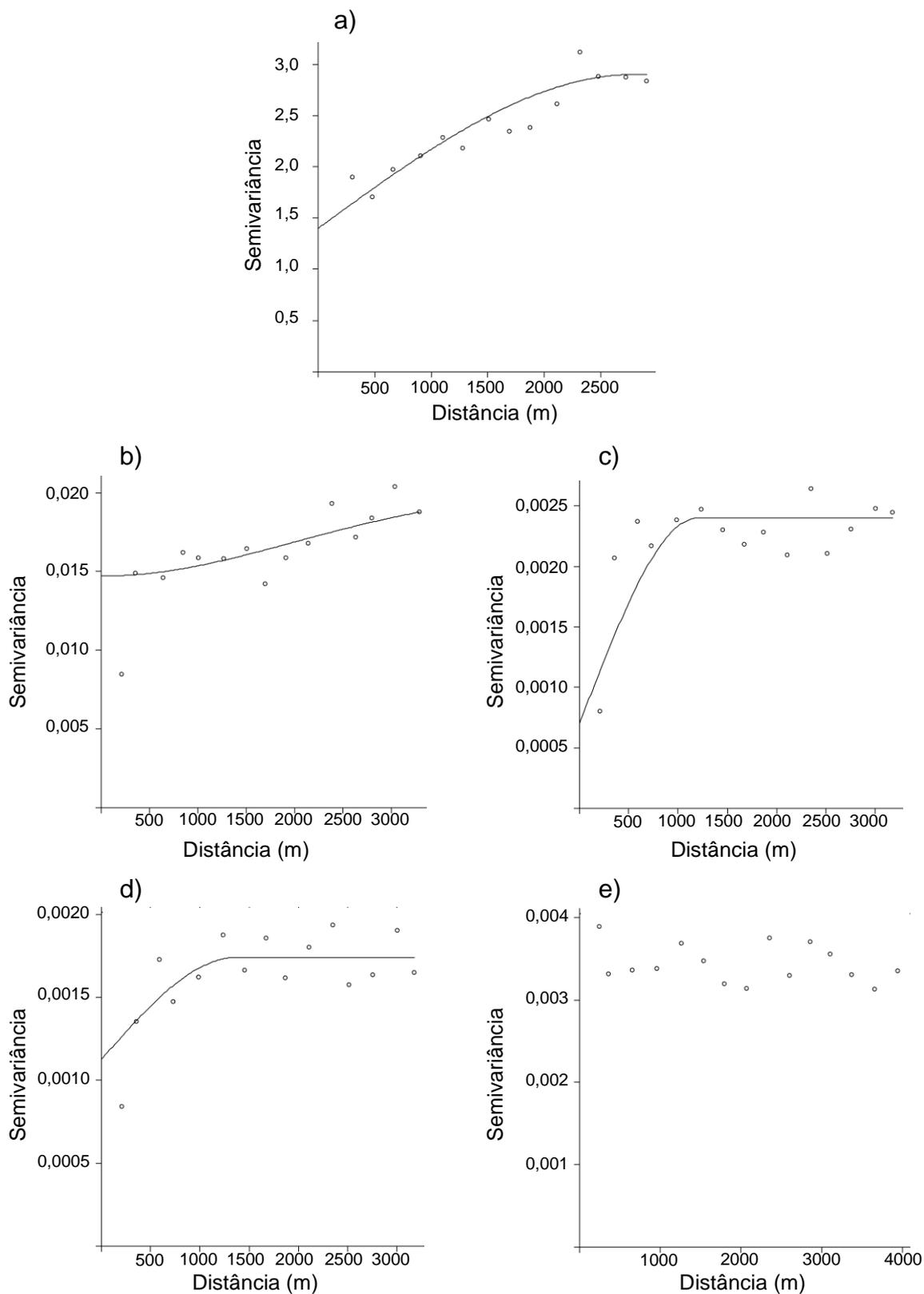
Apêndice A – Semivariogramas das metodologias de avaliação visual da estrutura do solo (a) e avaliação visual do Solo (b), na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.



Apêndice B – Semivariogramas dos atributos do diâmetro médio ponderado (a); macroagregados (b); microagregados (c); resistência tênsil de agregados (d) e friabilidade (e), na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.



Apêndice C – Semivariogramas dos atributos de resistência do solo à penetração (a); densidade do solo (b); porosidade do solo (c); macroporosidade (d) e microporosidade (e), na sub-bacia Santa Rita, Pelotas-RS.



Apêndice D – Avaliação visual da estrutura do solo (VESS) e Avaliação Visual do Solo (VSA) dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita.

Ponto	VESS	VSA
1	2,0	30,0
2	2,0	30,0
3	2,3	28,0
4	1,8	34,0
5	1,5	38,5
6	2,3	30,0
7	1,8	32,5
8	3,0	28,5
9	1,9	32,0
10	1,5	37,0
11	2,1	29,0
12	2,2	27,5
13	1,2	40,0
14	2,1	32,5
15	1,8	32,5
16	2,6	27,5
17	1,2	35,0
18	2,9	26,5
19	2,8	29,0
20	3,0	30,5
21	2,0	34,5
22	2,0	32,0
23	1,5	30,5
24	3,0	32,5
25	3,0	27,5
26	4,0	17,0
27	2,0	37,5
28	2,8	30,0
29	2,4	25,5
30	3,0	26,0
31	1,2	37,0
32	4,0	21,0
33	3,0	32,0
34	4,0	19,0
35	3,0	28,5
36	1,9	31,0
37	3,0	30,0

Apêndice E – Diâmetro médio ponderado, macroagregados e microagregados dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita.

Ponto	Diâmetro médio ponderado	Macroagregados	Microagregados
	(mm)		%
1	1,94	85,17	14,83
2	1,71	85,99	14,01
3	3,49	90,97	9,03
4	4,08	88,54	11,46
5	2,42	83,16	16,84
6	5,47	89,74	10,26
7	2,80	83,61	16,39
8	1,96	85,36	14,64
9	2,33	89,04	10,96
10	1,79	78,63	21,37
11	2,90	86,78	13,22
12	2,61	87,81	12,19
13	3,56	90,17	9,83
14	3,18	88,14	11,86
15	2,50	87,29	12,71
16	3,30	89,05	10,95
17	3,33	91,98	8,02
18	2,65	75,17	24,83
19	2,78	86,83	13,17
20	3,07	89,53	10,47
21	3,19	84,13	15,87
22	3,70	91,64	8,36
23	4,20	88,63	11,37
24	1,86	83,03	16,97
25	2,07	84,74	15,26
26	3,64	94,15	5,85
27	2,73	82,32	17,68
28	2,40	74,26	25,74
29	3,75	92,82	7,18
30	2,85	80,91	19,09
31	2,73	90,16	9,84
32	3,30	87,25	12,75
33	2,84	90,54	9,46
34	2,52	92,26	7,74
35	2,47	93,77	6,23
36	3,17	90,54	9,46
37	3,66	91,32	8,68
38	2,68	78,76	21,24

Apêndice E – Diâmetro médio ponderado, macroagregados e microagregados dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Ponto	Diâmetro médio ponderado	Macroagregados	Microagregados
	(mm)	%	
39	3,33	88,77	11,23
40	2,57	79,70	20,30
41	2,74	93,70	6,30
42	2,35	91,80	8,20
43	2,55	87,26	12,74
44	2,17	88,57	11,43
45	3,05	87,72	12,28
46	3,16	84,26	15,74
47	3,32	92,65	7,35
48	4,05	94,71	5,29
49	3,50	91,35	8,65
50	2,87	85,79	14,21
51	2,94	91,66	8,34
52	3,04	87,92	12,08
53	3,01	88,38	11,62
54	2,95	91,64	8,36
55	1,87	72,45	27,55
56	3,70	92,64	7,36
57	3,22	92,45	7,55
58	3,30	89,36	10,64
59	2,42	90,16	9,84
60	3,20	88,28	11,72
61	2,57	86,07	13,93
62	4,24	92,31	7,69
63	2,26	83,43	16,57
64	3,30	92,74	7,26
65	2,90	87,35	12,65
66	3,23	88,72	11,28
67	3,18	93,45	6,55
68	2,31	87,53	12,47
69	1,97	85,55	14,45
70	1,59	78,68	21,32
71	2,38	84,71	15,29
72	1,74	81,66	18,34
73	1,90	79,04	20,96
74	3,30	86,24	13,76
75	2,87	89,63	10,37
76	2,32	83,98	16,02

Apêndice E – Diâmetro médio ponderado, macroagregados e microagregados dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Ponto	Diâmetro médio ponderado	Macroagregados	Microagregados
	(mm)	%	
77	3,94	93,50	6,50
78	3,42	93,47	6,53
79	2,54	83,78	16,22
80	2,80	92,13	7,87
81	3,47	90,52	9,48
82	2,98	88,70	11,30
83	3,27	93,02	6,98
84	2,96	88,86	11,14
85	3,25	90,80	9,20
86	3,01	93,02	6,98
87	2,98	81,44	18,56
88	3,42	90,78	9,22
89	3,00	91,48	8,52
90	3,94	90,52	9,48
91	3,43	89,48	10,52
92	2,74	84,47	15,53
93	2,93	88,32	11,68
94	3,34	91,56	8,44
95	3,47	88,77	11,23
96	3,16	85,98	14,02
97	3,70	89,41	10,59
98	3,29	90,50	9,50
99	3,09	88,81	11,19
100	3,09	83,25	16,75
101	3,48	88,66	11,34
102	3,59	92,25	7,75
103	2,02	84,85	15,15
104	2,72	80,06	19,94
105	2,81	83,59	16,41
106	1,56	55,31	44,69

Apêndice F – Resistência tênsil de agregados e friabilidade dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita.

Ponto	Resistência tênsil de agregados	Friabilidade
	kPa	
1	66,55	0,44
2	67,58	0,48
3	46,45	0,36
4	62,28	0,41
5	73,62	0,47
6	47,68	0,47
7	33,31	0,53
8	35,32	0,80
9	59,61	0,57
10	21,53	0,59
11	39,91	0,76
12	42,73	0,69
13	52,76	0,39
14	46,85	0,57
15	67,70	0,66
16	43,31	0,43
17	31,33	0,74
18	144,60	0,68
19	64,58	0,55
20	78,51	0,48
21	41,01	0,43
22	78,25	0,56
23	226,51	0,52
24	27,61	0,66
25	36,29	1,52
26	73,70	0,42
27	50,59	0,42
28	28,17	0,50
29	63,81	0,53
30	46,77	0,42
31	39,07	0,63
32	51,14	1,22
33	42,54	0,37
34	51,19	0,40
35	75,29	0,87
36	102,60	0,37
37	215,42	0,47
38	68,74	0,67

Apêndice F – Resistência tênsil de agregados e friabilidade dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Ponto	Resistência tênsil de agregados	Friabilidade
	kPa	
39	42,45	0,41
40	46,71	0,65
41	56,11	0,70
42	51,27	0,52
43	73,47	0,36
44	82,07	0,59
45	32,93	0,41
46	73,90	0,48
47	57,89	0,49
48	139,78	0,48
49	59,97	0,54
50	54,93	0,37
51	48,11	0,38
52	57,34	0,39
53	34,18	0,39
54	158,96	1,20
55	58,34	0,64
56	71,96	0,56
57	56,92	0,72
58	70,35	0,49
59	27,61	0,58
60	47,82	0,76
61	63,63	0,57
62	54,79	0,34
63	56,32	0,57
64	46,12	0,54
65	113,98	0,54
66	54,49	0,46
67	60,68	0,49
68	29,09	0,52
69	65,00	0,43
70	48,54	0,40
71	62,43	0,61
72	96,65	0,38
73	95,37	0,39
74	63,05	0,39
75	45,57	0,61
76	46,99	0,45

Apêndice F – Resistência tênsil de agregados e friabilidade dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Ponto	Resistência tênsil de agregados	Friabilidade
	kPa	
77	111,61	0,50
78	129,18	0,67
79	121,59	0,45
80	69,43	0,32
81	66,53	0,45
82	75,17	0,50
83	58,09	0,42
84	58,75	0,49
85	74,08	0,49
86	74,87	0,63
87	71,34	0,79
88	54,69	0,52
89	85,52	0,62
90	209,08	0,42
91	42,70	0,32
92	98,57	0,37
93	72,03	0,59
94	70,16	0,56
95	372,17	0,42
96	92,52	0,50
97	52,30	0,39
98	86,64	0,55
99	55,60	0,43
100	47,84	0,53
101	79,24	0,37
102	63,95	0,54
103	60,63	0,43
104	61,11	0,32
105	59,21	0,35
106	68,09	0,31

Apêndice G – Teores de carbono orgânico total (COT, %) dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita.

Pontos	COT %
1	1,81
2	1,82
3	1,98
4	1,49
5	1,78
6	2,39
7	2,33
8	1,73
9	1,43
10	4,19
11	1,95
12	2,09
13	1,36
14	1,67
15	1,74
16	1,27
17	2,48
18	1,90
19	1,51
20	1,68
21	1,64
22	4,81
23	1,97
24	1,72
25	1,70
26	4,08
27	1,33
28	1,95
29	2,16
30	1,25
31	2,35
32	1,69
33	1,18
34	1,30
35	1,94
36	1,53
37	2,23

Apêndice G – Teores de carbono orgânico total (COT, %) dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Pontos	COT %
38	1,46
39	1,58
40	1,72
41	1,92
42	2,47
43	1,97
44	1,98
45	1,78
46	2,17
47	2,25
48	2,49
49	1,69
50	1,50
51	1,81
52	1,39
53	2,14
54	1,48
55	1,30
56	1,47
57	1,64
58	1,39
59	1,79
60	1,61
61	1,49
62	1,59
63	1,79
64	2,43
65	1,51
66	1,37
67	1,89
68	1,58
69	1,54
70	1,64
71	1,16
72	1,47
73	0,72
74	2,73

Apêndice G – Teores de carbono orgânico total (COT, %) dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Pontos	COT %
75	1,88
76	1,26
77	1,90
78	2,68
79	1,36
80	1,52
81	1,52
82	1,86
83	1,79
84	2,35
85	1,80
86	1,84
87	2,41
88	2,07
89	1,77
90	2,51
91	1,34
92	1,31
93	1,34
94	1,47
95	1,63
96	1,24
97	1,27
98	1,49
99	1,54
100	1,24
101	1,87
102	1,71
103	1,59
104	1,34
105	1,39
106	1,39

Apêndice H – Resistência do solo à penetração (RP, MPa), Densidade do solo (DS, Mg m⁻³), Porosidade do solo (PT, m³ m⁻³), Macroporosidade (Ma, m³ m⁻³), Microporosidade (Mi, m³ m⁻³), dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita.

Ponto	Repetição	RP	DS	Ma	Mi	PT
		Mpa	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³	
1	1	3,44	1,47	0,11	0,31	0,42
	2	3,96	1,52	0,09	0,30	0,39
2	1	3,39	1,52	0,08	0,29	0,37
	2	3,63	1,61	0,10	0,30	0,40
3	1	5,31	1,69	0,04	0,34	0,38
	2	5,29	1,59	0,05	0,30	0,35
4	1	2,69	1,49	0,19	0,19	0,38
	2	2,34	1,50	0,20	0,19	0,39
5	1	2,19	1,29	0,10	0,40	0,50
	2	3,06	1,52	0,04	0,37	0,41
6	1	2,54	1,53	0,11	0,27	0,38
	2	2,61	1,53	0,13	0,25	0,38
7	1	2,72	1,56	0,09	0,34	0,43
	2	3,14	1,46	0,10	0,30	0,40
8	1	4,60	1,59	0,17	0,20	0,37
	2	3,45	1,49	0,21	0,21	0,42
9	1	5,60	1,70	0,09	0,24	0,33
	2	4,21	1,69	0,09	0,25	0,34
10	1	2,96	1,30	0,06	0,42	0,48
	2	2,82	1,33	0,09	0,38	0,47
11	1	3,86	1,43	0,16	0,27	0,43
	2	2,78	1,38	0,20	0,23	0,43
12	1	3,54	1,43	0,10	0,40	0,50
	2	2,98	1,31	0,08	0,40	0,48
13	1	3,44	1,54	0,06	0,31	0,37
	2	3,12	1,52	0,10	0,29	0,39
14	1	4,59	1,57	0,11	0,27	0,38
	2	1,89	1,42	0,24	0,22	0,46
15	1	7,97	1,59	0,04	0,33	0,37
	2	6,69	1,49	0,05	0,34	0,39
16	1	2,49	1,48	0,18	0,21	0,39
	2	4,78	1,54	0,11	0,26	0,37
17	1	3,91	1,37	0,13	0,32	0,44
	2	2,74	1,30	0,16	0,32	0,48
18	1	4,74	1,44	0,14	0,31	0,44
	2	3,72	1,38	0,12	0,33	0,45

Apêndice H – Resistência do solo à penetração (RP, MPa), Densidade do solo (DS, Mg m⁻³), Porosidade do solo (PT, m³ m⁻³), Macroporosidade (Ma, m³ m⁻³), Microporosidade (Mi, m³ m⁻³), dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Ponto	Repetição	RP	DS	Ma	Mi	PT
		Mpa	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³	
19	1	4,69	1,51	0,11	0,28	0,39
	2	4,23	1,56	0,06	0,34	0,40
20	1	3,95	1,54	0,06	0,33	0,40
	2	4,66	1,52	0,05	0,35	0,41
21	1	3,75	1,52	0,06	0,33	0,39
	2	4,44	1,54	0,05	0,33	0,38
22	1	2,32	1,25	0,08	0,41	0,48
	2	2,52	1,25	0,08	0,41	0,48
23	1	2,82	1,30	0,03	0,47	0,50
	2	4,44	1,36	0,05	0,44	0,48
24	1	3,39	1,49	0,17	0,24	0,41
	2	2,15	1,35	0,22	0,22	0,45
25	1	6,26	1,61	0,14	0,23	0,37
	2	2,90	1,49	0,18	0,21	0,39
26	1	3,28	1,30	0,17	0,32	0,50
	2	2,20	1,15	0,18	0,36	0,53
27	1	4,99	1,67	0,09	0,23	0,33
	2	3,85	1,64	0,09	0,26	0,35
28	1	6,69	1,58	0,17	0,22	0,39
	2	4,09	1,58	0,15	0,22	0,37
29	1	4,63	1,38	0,11	0,37	0,47
	2	4,57	1,41	0,08	0,36	0,44
30	1	5,06	1,66	0,07	0,27	0,34
	2	4,85	1,63	0,08	0,28	0,36
31	1	1,43	1,28	0,21	0,31	0,52
	2	0,75	1,13	0,23	0,31	0,54
32	1	4,81	1,57	0,05	0,36	0,41
	2	4,20	1,53	0,05	0,34	0,39
33	1	3,16	1,56	0,18	0,20	0,38
	2	5,25	1,61	0,16	0,21	0,37
34	1	2,65	1,57	0,09	0,30	0,39
	2	3,36	1,56	0,10	0,29	0,38
35	1	3,34	1,41	0,18	0,27	0,45
	2	8,95	1,51	0,07	0,34	0,40
36	1	3,67	1,60	0,07	0,33	0,39
	2	2,84	1,61	0,06	0,32	0,38

Apêndice H – Resistência do solo à penetração (RP, MPa), Densidade do solo (DS, Mg m⁻³), Porosidade do solo (PT, m³ m⁻³), Macroporosidade (Ma, m³ m⁻³), Microporosidade (Mi, m³ m⁻³), dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Ponto	Repetição	RP	DS	Ma	Mi	PT
		Mpa	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³	
37	1	4,51	1,49	0,05	0,37	0,43
	2	6,85	1,53	0,05	0,36	0,42
38	1	4,72	1,66	0,05	0,32	0,36
	2	5,10	1,73	0,05	0,34	0,38
39	1	1,75	1,54	0,10	0,36	0,46
	2	1,65	1,46	0,08	0,35	0,43
40	1	1,42	1,40	0,13	0,31	0,44
	2	1,86	1,35	0,09	0,39	0,47
41	1	4,85	1,50	0,11	0,33	0,44
	2	5,86	1,49	0,12	0,32	0,43
42	1	6,63	1,47	0,11	0,32	0,43
	2	6,01	1,41	0,12	0,33	0,45
43	1	2,48	1,41	0,13	0,29	0,42
	2	4,32	1,51	0,09	0,31	0,40
44	1	5,36	1,37	0,15	0,26	0,41
	2	4,20	1,51	0,12	0,27	0,40
45	1	5,24	1,58	0,09	0,28	0,36
	2	4,20	1,53	0,10	0,26	0,36
46	1	3,17	1,56	0,04	0,44	0,48
	2	3,22	1,34	0,05	0,46	0,50
47	1	4,08	1,46	0,06	0,38	0,44
	2	4,28	1,45	0,07	0,36	0,43
48	1	2,24	1,43	0,04	0,39	0,43
	2	4,84	1,37	0,05	0,41	0,46
49	1	1,90	1,42	0,19	0,30	0,49
	2	2,59	1,53	0,10	0,31	0,41
50	1	1,81	1,40	0,11	0,33	0,44
	2	1,95	1,39	0,11	0,34	0,45
51	1	2,19	1,38	0,14	0,31	0,45
	2	3,51	1,48	0,10	0,31	0,41
52	1	3,01	1,64	0,10	0,25	0,35
	2	4,24	1,65	0,10	0,24	0,34
53	1	3,18	1,28	0,08	0,42	0,50
	2	2,61	1,29	0,09	0,41	0,50
54	1	13,81	1,65	0,14	0,24	0,39
	2	11,04	1,74	0,15	0,22	0,37

Apêndice H – Resistência do solo à penetração (RP, MPa), Densidade do solo (DS, Mg m⁻³), Porosidade do solo (PT, m³ m⁻³), Macroporosidade (Ma, m³ m⁻³), Microporosidade (Mi, m³ m⁻³), dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Ponto	Repetição	RP	DS	Ma	Mi	PT
		Mpa	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³	
55	1	4,14	1,68	0,10	0,24	0,34
	2	4,38	1,61	0,16	0,22	0,38
56	1	4,76	1,59	0,12	0,27	0,38
	2	3,05	1,59	0,14	0,26	0,40
57	1	2,82	1,52	0,07	0,33	0,41
	2	3,92	1,55	0,09	0,31	0,40
58	1	3,15	1,55	0,17	0,21	0,38
	2	2,30	1,53	0,17	0,23	0,40
59	1	3,12	1,50	0,11	0,28	0,38
	2	6,48	1,54	0,08	0,28	0,37
60	1	5,47	1,70	0,04	0,30	0,34
	2	5,55	1,68	0,06	0,28	0,34
61	1	3,23	1,54	0,14	0,27	0,40
	2	4,09	1,64	0,09	0,28	0,38
62	1	3,79	1,61	0,10	0,27	0,37
	2	2,39	1,60	0,10	0,27	0,37
63	1	3,13	1,50	0,04	0,39	0,43
	2	2,79	1,43	0,03	0,40	0,44
64	1	4,59	1,42	0,06	0,38	0,43
	2	5,29	1,45	0,06	0,37	0,42
65	1	4,17	1,66	0,05	0,29	0,34
	2	3,73	1,69	0,04	0,31	0,34
66	1	5,47	1,64	0,05	0,28	0,33
	2	6,01	1,67	0,04	0,30	0,33
67	1	4,46	1,53	0,06	0,33	0,39
	2	4,16	1,52	0,10	0,30	0,40
68	1	1,83	1,31	0,19	0,29	0,47
	2	2,32	1,42	0,12	0,33	0,45
69	1	5,34	1,60	0,05	0,32	0,37
	2	5,37	1,62	0,06	0,32	0,38
70	1	3,05	1,46	0,03	0,39	0,42
	2	4,07	1,51	0,05	0,37	0,41
71	1	0,72	1,33	0,28	0,17	0,45
	2	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00
72	1	4,02	1,70	0,07	0,30	0,36
	2	3,58	1,62	0,08	0,30	0,37

Apêndice H – Resistência do solo à penetração (RP, MPa), Densidade do solo (DS, Mg m⁻³), Porosidade do solo (PT, m³ m⁻³), Macroporosidade (Ma, m³ m⁻³), Microporosidade (Mi, m³ m⁻³), dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Ponto	Repetição	RP	DS	Ma	Mi	PT
		Mpa	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³	
73	1	4,99	1,54	0,10	0,29	0,40
	2	4,88	1,62	0,07	0,29	0,36
74	1	4,89	1,68	0,08	0,27	0,35
	2	4,72	1,71	0,06	0,28	0,34
75	1	4,49	1,38	0,05	0,39	0,44
	2	3,19	1,29	0,07	0,42	0,49
76	1	3,77	1,66	0,11	0,23	0,34
	2	2,91	1,54	0,15	0,26	0,41
77	1	4,38	1,55	0,07	0,34	0,41
	2	3,90	1,48	0,08	0,35	0,43
78	1	4,48	1,49	0,08	0,36	0,44
	2	4,10	1,49	0,07	0,37	0,44
79	1	4,14	1,70	0,07	0,28	0,35
	2	3,88	1,71	0,08	0,25	0,33
80	1	3,95	1,72	0,09	0,32	0,40
	2	3,77	1,58	0,09	0,30	0,39
81	1	4,69	1,64	0,07	0,29	0,37
	2	4,70	1,62	0,08	0,30	0,38
82	1	2,61	1,43	0,05	0,40	0,45
	2	2,22	1,39	0,06	0,41	0,47
83	1	4,02	1,57	0,08	0,34	0,42
	2	4,03	1,59	0,05	0,35	0,40
84	1	2,82	1,48	0,07	0,38	0,45
	2	2,80	1,47	0,07	0,37	0,44
85	1	5,31	1,60	0,05	0,33	0,38
	2	5,97	1,59	0,04	0,34	0,38
86	1	3,72	1,54	0,07	0,33	0,40
	2	4,41	1,60	0,07	0,35	0,42
87	1	1,35	1,14	0,16	0,36	0,52
	2	1,25	1,14	0,18	0,37	0,55
88	1	3,19	1,47	0,10	0,34	0,44
	2	2,15	1,42	0,12	0,32	0,44
89	1	7,51	1,69	0,07	0,34	0,41
	2	6,93	1,57	0,07	0,32	0,39
90	1	3,85	1,17	0,05	0,48	0,53
	2	1,47	1,12	0,07	0,49	0,56

Apêndice H – Resistência do solo à penetração (RP, MPa), Densidade do solo (DS, Mg m⁻³), Porosidade do solo (PT, m³ m⁻³), Macroporosidade (Ma, m³ m⁻³), Microporosidade (Mi, m³ m⁻³), dos pontos da malha amostral na sub-bacia Santa Rita (Continuação).

Ponto	Repetição	RP	DS	Ma	Mi	PT
		Mpa	Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³	
90	1	3,85	1,17	0,05	0,48	0,53
	2	1,47	1,12	0,07	0,49	0,56
91	1	4,89	1,72	0,09	0,28	0,37
	2	7,89	1,66	0,08	0,26	0,34
92	1	4,60	1,66	0,10	0,24	0,35
	2	5,62	1,76	0,08	0,26	0,34
93	1	4,51	1,64	0,09	0,31	0,40
	2	2,88	1,61	0,08	0,31	0,39
94	1	6,31	1,66	0,06	0,32	0,37
	2	6,59	1,76	0,05	0,34	0,38
95	1	4,64	1,52	0,03	0,38	0,41
	2	3,44	1,46	0,02	0,41	0,44
96	1	4,47	1,55	0,08	0,30	0,39
	2	3,30	1,43	0,07	0,38	0,45
97	1	5,24	1,59	0,10	0,27	0,37
	2	5,14	1,61	0,10	0,27	0,37
98	1	5,51	1,67	0,03	0,32	0,35
	2	4,60	1,68	0,05	0,33	0,37
99	1	2,82	1,57	0,09	0,31	0,40
	2	4,26	1,60	0,09	0,28	0,37
100	1	3,56	1,76	0,05	0,32	0,37
	2	2,58	1,66	0,10	0,31	0,41
101	1	6,06	1,63	0,11	0,25	0,36
	2	5,64	1,59	0,15	0,24	0,39
102	1	5,66	1,55	0,06	0,33	0,39
	2	6,51	1,60	0,05	0,34	0,38
103	1	3,28	1,67	0,06	0,31	0,37
	2	4,42	1,67	0,05	0,30	0,35
104	1	4,41	1,57	0,05	0,33	0,38
	2	7,03	1,64	0,08	0,27	0,35
105	1	3,42	1,63	0,11	0,26	0,36
	2	4,03	1,67	0,07	0,27	0,34
106	1	5,11	1,75	0,04	0,29	0,33
	2	5,25	1,71	0,06	0,30	0,36