

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOMÁTICA**

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-  
QUÍMICAS DO SOLO EM PLANTIO DE ERVA-MATE  
(*Ilex paraguariensis* St. Hil.) ATRAVÉS DA  
GEOESTATÍSTICA E DO GEOPROCESSAMENTO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Carlos Roberto Santos da Silva**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2007**

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO EM  
PLANTIO DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* St. Hil) ATRAVÉS DA  
GEOESTATÍSTICA E DO GEOPROCESSAMENTO.**

por

**Carlos Roberto Santos da Silva**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geomática, Área de Concentração em Tecnologia da Geoinformação, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Geomática.**

**Orientador: Prof. Pedro Roberto de Azambuja Madruga**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2007**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Geomática**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO EM  
PLANTIO DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* St. Hil) ATRAVÉS DA  
GEOESTATÍSTICA E DO GEOPROCESSAMENTO.**

elaborada por  
**Carlos Roberto Santos da Silva**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Geomática**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Pedro Roberto de Azambuja Madruga, Dr.**  
(Presidente/Orientador)

**Doádi Antônio Brena, Dr. (UFSM)**

**Carlos Alberto da Fonseca Pires, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 13 de abril de 2007.

A meus pais,  
meu espelho, meu estímulo.

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS ESPECIAIS**

A Deus, nosso criador e a N<sup>a</sup> S<sup>a</sup> de Fátima, pela proteção;

A Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Geomática, por mais essa oportunidade de concluir curso nesta instituição pública de qualidade reconhecida;

Aos Professores, Dr. Pedro Roberto de Azambuja Madruga, Dr. Doádi Antônio Brena e Dr. Carlos Alberto da Fonseca Pires, pela orientação, ajuda, paciência, apoio e confiança no meu trabalho;

Ao colega e amigo Eng<sup>o</sup> Florestal M.Sc. Julio César Wojciechowski, hoje professor da Universidade do Estado do Mato Grosso – UNEMAT, pela ajuda nos momentos de maiores dúvidas, independente de horários e dias da semana;

Ao mestrando, amigo, Eng<sup>o</sup> Florestal Luciano Volenhaupt Pereira, pela importante participação e ajuda não só neste trabalho, mas também em outros paralelos, Rio Grande afóra;

Ao colega e amigo, Eng<sup>o</sup> Florestal M.Sc. Gabriel Dalla Costa Berger, pelo apoio e companheirismo durante a realização dos trabalhos;

Aos colegas Lamaisson Matheus dos Santos, Tarso Mastela, Mário Terra Leite, Diogo Fernando Heck, Lisandro Bonatto, Marcelo Krug, Jankiel Moreira da Rosa, Fabiano Timóteo Scariot e Raul Bortolotto Agostini, pela colaboração e ajuda na instalação dos experimentos com erva-mate, na Fazenda Tupi;

Aos colegas e principalmente aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Geomática, em especial ao amigo Rudineli de Bairros Pires, pelo convívio e contribuições diversas durante esta passagem;

A mestranda, amiga, Eng<sup>a</sup> Florestal, Damáris Gonçalves Padilha, pelo convívio, pela alegria, pelo otimismo, pela disposição em ajudar os amigos nas tarefas;

Ao amigo, parceiro nas atividades profissionais e de alegria, Técnico em Geomática, Gustavo Baumart Vieira;

A empresa EMPROFLORA, em especial aos amigos Cláudio Fontoura da Costa, Tales Eduardo Sangói Rodrigues, Cezar Prinz Teixeira, Airton Ernesto Faé e André Burmeister Martins, pela experiência e oportunidade oferecida, durante este difícil período;

A Fazenda Tupi, em nome do Sr. Vicencio Paludo e, em especial aos funcionários de campo Valdir Boito e Ivair Porcebao, aos funcionários administrativos Luci Teresinha Ampese, ao Gerente Mauro Antônio Machado e a Eng<sup>a</sup> Química Franciele A. Balvedi, pelo apoio e atenção despendida;

A minha namorada Cátia Antoniollo, pelo carinho, compreensão e incentivo, durante a realização deste trabalho;

A minha família, pelo total apoio e estímulo;

A Prof<sup>a</sup> Isaphi Marlene Jardim Alvarez, pela revisão textual;

A todos que de alguma forma, colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho, meu muito obrigado.

E quando o gaúcho viaja  
Entre os trastes de conjunto  
Antes de qualquer assunto,  
Até do fiambre de viagem  
Se o mate vai na bagagem  
É o Rio Grande que vai junto!

(A. A. Fagundes)

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Geomática  
Universidade Federal de Santa Maria

### **ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO EM PLANTIO DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) ATRAVÉS DA GEOESTATÍSTICA E DO GEOPROCESSAMENTO**

AUTOR: CARLOS ROBERTO SANTOS DA SILVA

ORIENTADOR: PEDRO ROBERTO DE AZAMBUJA MADRUGA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 13 de abril de 2007.

Este trabalho utilizou-se de métodos de estatística descritiva clássica, métodos de geoestatística e de geoprocessamento, na identificação do tamanho e da estrutura da variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo em área de florestamento de erva-mate. A área de estudo, localizada na Fazenda Tupi, no município de Nova Prata, RS, foi levantada amostras nos meses de janeiro a março de 2005, compreendendo a classe de solo Latossolo Húmico Distrófico Álico. Realizou-se amostragem sistemática com *grid* de espaçamento regular entre os pontos de 100 metros, totalizando 36 pontos amostrais e 630 pares de dados, em uma área de 36 hectares. Foram coletadas amostras de solo *in situ* para análise em laboratório dos atributos físicos areia grossa (AG), areia fina (AF), silte (SIL), argila (ARG), densidade de solo (DS), densidade de partícula (DP) e porosidade total (PoT) e atributos químicos argila, textura, pH (H<sub>2</sub>O), fósforo (P), potássio (K), matéria orgânica (M.O.), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio trocável (H+Al), capacidade de troca de cátions efetiva (CTCe), capacidade de troca de cátions à pH<sup>7</sup> (CTCpH<sup>7</sup>) e saturação de bases (V%). As magnitudes das variabilidades espaciais foram obtidas pelo coeficiente de variação (CV%), com nível de confiança de 95,0%, através do programa Microsoft Office Excel 2003, enquanto que a estrutura foi identificada por meio de semivariogramas, em aplicativos geoestatísticos, definindo-se os parâmetros necessários para a krigagem. Todos os modelos de semivariogramas apresentaram zonas de influência anisotrópicas, tendo sua variabilidade espacial maior no sentido perpendicular a declividade destas áreas. O atributo químico que apresentou maior variabilidade foi o fósforo (P), com CV%=127,73, seguido do atributo alumínio (Al), com CV%=99,23 e o atributo de menor variabilidade, foi o pH(H<sub>2</sub>O), com CV%=13,79. Para os atributos físicos, na distribuição do tamanho de partículas (%), o atributo de maior variabilidade foi areia grossa, com CV%=36,39, enquanto a estatística realizada para os atributos densidade do solo, o que apresentou maior variabilidade foi o atributo porosidade total, com CV%=95,49 e a menor variabilidade foi constatada a argila, com CV%=12,32. Na análise de estrutura da variabilidade espacial através da geoestatística, o atributo químico Ca apresentou IDE(%)=64,42 e o atributo físico ARG com IDE(%)=62,50, obtendo os maiores índices. Para realização do ajuste no programa VARIOWIN® 2.21 – “Software for Spatial Data Analysis”, o método utilizado foi o visual, denominado “a sentimento”, onde o modelo Esférico foi o que melhor se ajustou aos atributos estudados, indicado em 55% dos semivariogramas.

O modelo Gaussiano para o atributo textura obteve o maior alcance com  $a(m)=421$ . A validação cruzada, com o uso do programa GSLIB 90 – “Geostatistical Software Library” mostrou acuracidade no ajuste dos modelos variográficos, tendo os atributos Ca, Al e ARG com  $R^2(\%)$  de 0,841; 0,705 e 0,760, respectivamente. A krigagem ordinária dos atributos estudados permitiu o detalhamento da distribuição destas a partir dos mapas de isolinhas.

Palavras-chave: geoprocessamento, geoestatística, variabilidade espacial, atributos físicos do solo, atributos químicos do solo, erva-mate.

## ABSTRACT

Master's Dissertation  
Post-Graduate Program in Geomatics  
Federal University of Santa Maria

### STUDY OF THE PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE SOIL IN PARAGUAY TEA (*Ilex paraguariensis* St. Hil) THROUGH THE GEOSTATISTICS AND THE GEOPROCESSING

Author: Carlos Roberto Santos da Silva  
Advisor: Pedro Roberto de Azambuja Madruga  
Date and Place of Defense: Santa Maria, April 13<sup>th</sup>, 2007.

This work was based in methods of classic descriptive statistics, methods of geostatistics and geoprocessing, in the identification of the size and the structure of the spatial variability of the physical and chemical attributes of the soil in area of Paraguay Tea forestry. The area of study, localized in the Tupian Farm, in the municipality of New Silver, RS, where were raised samples from January to March, 2005, embracing the Latosol humic dystrophic soil. It was accomplished systematic sample with "grid" of regular spacing among the one hundred meter points, totalizing thirty-six sample points and the six hundred and thirty pairs of data, in an area of thirty-six hectares. Were collected samples of soil "in situ" for analysis in laboratory of the physic attributes of the bulky sand (BS), thin sand (TS), silt (SIL), argil (ARG), soil density (SD), particle density (PD) and whole porosity (WP) and chemical attributes of argil, texture, pH (H<sub>2</sub>O), phosphorus (P), potassium (K), organic material (OM), aluminum (AL), calcium (Ca), magnesium (Mg), exchangeable aluminum (H + Al), "cations" real exchange capacity (CTCe), "cations" exchange capacity to pH7 (CTCpH7) and saturation of basis (V%). The magnitudes of spatial variabilities were obtained by the variation of coefficient (CV%), with confidence level of 95%, through Microsoft Office Excel 2003 program, while the structure was identified by semivariograms, in applications geostatistics establishing the necessary parameters to the "krigagem". All models of semivariograms presented zones of anisotropic influence, having its spatial variability the greatest in the perpendicular sense to these areas the declivity. The chemical attribute that presented greatest variability was phosphorus (P), with CV%=127,73, followed by the aluminum attribute (Al), com CV%= 99,23 and the attribute of least variability was the pH (H<sub>2</sub>O), com CV%=0,0013. To the physical attributes in the distribution of particles size (%), the attribute of greatest variability was bulky sand, with CV%=36,39, while the statistics made to the density attributes of soil, what present the greatest variability was the attribute of whole porosity, with CV%=95,49 and they least variability was verified was the argil, with CV%=12,32. IN the analysis of the structure of the spatial variability through geostatistics, the chemical attribute Ca presented IDE (%)=64,42 and the physical attribute ARG with IDE (%)=62,50, getting the greatest rates. To the accomplishment of agreement in the program VARIOWIN® 2.21- "Software for Spatial Data Analysis", the method used was the visual, named "the feeling", where the Spherical model was what better was adapted to the studied attributes, indicated in 55% of the variograms. The Gaussian's model to the attribute of texture got the

most overtaking with a  $(m)=421$ . A crusade validation with the usage of the program GSLIB90 –“Geostatistical Software Library” pointed out accuracy in the agreement of the variographic models, having the attributes Ca, Al and ARG with  $R^2$  (%) of 0,841; 0,705 and 0,760, respectively. The usual “krigagem” of the studied attributes permitted the detailed of the distribution of these through the maps of isolineas.

KEY WORDS: Geoprocessing. Geostatistics. Spatial variability. Physical attributes of the soil. Chemical attributes of the soil. Paraguay tea.

Author's version: Valcir dos Santos Quevedo  
Mestre em Letras, Área específica: Teoria da Literatura – PUC-RS.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 – Amostragem em duas dimensões .....	36
FIGURA 02 – Semivariograma experimental, modelo teórico e componentes .	37
FIGURA 03 – Representação gráfica dos semivariogramas experimentais .....	42
FIGURA 04 – Representação gráfica de semivariogramas experimentais e modelos teóricos .....	43
FIGURA 05 – Convenções direcionais usadas na geoestatística. ....	45
FIGURA 06 – Representação gráfica de semivariogramas isotrópicos .....	46
FIGURA 07 – Representação gráfica de anisotropia geométrica .....	46
FIGURA 08 – Representação gráfica da anisotropia geométrica .....	47
FIGURA 09 – Representação gráfica de anisotropia combinada .....	48
FIGURA 10 – Detalhe do relevo na área (gleba) de instalação do experimento	60
FIGURA 11 – Distribuição dos pontos amostrais na área de estudo .....	61
FIGURA 12 – Semivariograma experimental da variável argila no solo (%) .....	72
FIGURA 13 – Semivariograma experimental da variável textura do solo (%) ...	72
FIGURA 14 – Semivariograma experimental da variável pH (H <sub>2</sub> O) .....	73
FIGURA 15 – Semivariograma experimental da variável fósforo .....	73
FIGURA 16 – Semivariograma experimental da variável potássio .....	74
FIGURA 17 – Semivariograma experimental da variável matéria orgânica .....	74
FIGURA 18 – Semivariograma experimental da variável alumínio .....	77
FIGURA 19 – Semivariograma experimental da variável cálcio .....	77
FIGURA 20 – Semivariograma experimental da variável magnésio .....	78
FIGURA 21 – Semivariograma experimental da variável alumínio trocável .....	78
FIGURA 22 – Semivariograma experimental da variável CTC Efetiva .....	79
FIGURA 23 – Semivariograma experimental da variável CTC Ph7 .....	79
FIGURA 24 – Semivariograma experimental da variável saturação de bases ..	80
FIGURA 25 – Semivariograma experimental da variável areia grossa (%) .....	82
FIGURA 26 – Semivariograma experimental da variável areia fina (%) .....	83
FIGURA 27 – Semivariograma experimental da variável silte (%) .....	83
FIGURA 28 – Semivariograma experimental da variável argila (%) .....	84
FIGURA 29 – Semivariograma experimental da variável densidade do solo ....	85
FIGURA 30 – Semivariograma experimental da variável densidade partícula ..	86

FIGURA 31 – Semivariograma experimental da variável porosidade total .....	86
FIGURA 32 – Mapa de isolinhas da variável argila (%) .....	88
FIGURA 33 – Mapa de isolinhas da variável textura (%) .....	89
FIGURA 34 – Mapa de isolinhas da variável pH (H <sub>2</sub> O) .....	89
FIGURA 35 – Mapa de isolinhas da variável fósforo (mg/dm <sup>3</sup> ) .....	90
FIGURA 36 – Mapa de isolinhas da variável potássio (mg/dm <sup>3</sup> ) .....	90
FIGURA 37 – Mapa de isolinhas da variável matéria orgânica (%) .....	91
FIGURA 38 – Mapa de isolinhas da variável alumínio (mg/dm <sup>3</sup> ) .....	91
FIGURA 39 – Mapa de isolinhas da variável cálcio (mg/dm <sup>3</sup> ) .....	92
FIGURA 40 – Mapa de isolinhas da variável magnésio (mg/dm <sup>3</sup> ) .....	92
FIGURA 41 – Mapa de isolinhas da variável alumínio trocável (mg/dm <sup>3</sup> ) .....	93
FIGURA 42 – Mapa de isolinhas da variável CTC efetiva (cmol/dm <sup>3</sup> ) .....	93
FIGURA 43 – Mapa de isolinhas da variável CTC pH 7 (cmol/dm <sup>3</sup> ) .....	94
FIGURA 44 – Mapa de isolinhas da variável saturação de bases (V%) .....	94
FIGURA 45 – Mapa de isolinhas da variável areia grossa (%) .....	95
FIGURA 46 – Mapa de isolinhas da variável areia fina (%) .....	95
FIGURA 47 – Mapa de isolinhas da variável silte (%) .....	96
FIGURA 48 – Mapa de isolinhas da variável argila (%) .....	96
FIGURA 49 – Mapa de isolinhas da variável densidade do solo (g/cm <sup>3</sup> ) .....	97
FIGURA 50 – Mapa de isolinhas da variável densidade de partícula (g/cm <sup>3</sup> ) ...	97
FIGURA 51 – Mapa de isolinhas da variável porosidade total (%) .....	98

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Estatística descritiva realizada para as variáveis químicas: argila, textura, pH, fósforo, potássio e matéria orgânica .....	67
TABELA 02 – Estatística descritiva realizada para as variáveis químicas: alumínio, cálcio, magnésio, H+Al, CTCefetiva, CTCpH7, saturação de bases	67
TABELA 03 – Estatística descritiva realizada para distribuição do tamanho de partículas (%) .....	68
TABELA 04 – Estatística descritiva realizada para as variáveis físicas densidade e porosidade total .....	69
TABELA 05 – Modelos se semivariograma ajustados aos dados experimentais para os atributos argila, textura, pH, fósforo, potássio e matéria orgânica. ....	71
TABELA 06 – Modelos se semivariograma ajustados aos dados experimentais para os atributos alumínio, cálcio, magnésio, H+Al, CTC efetiva e CTC pH 7 e saturação de bases .....	76
TABELA 07 – Modelos se semivariograma ajustados aos dados experimentais distribuição do tamanho de partículas (%), para os atributos físicos areia grossa, areia fina, silte e argila .....	81
TABELA 08 – Modelos se semivariograma ajustados aos dados experimentais para os atributos físicos densidade de solo (DS), densidade de partícula (DP) e porosidade total (PoT) .....	85

**LISTA DE APÊNDICES**

**APÊNDICE - Pontos amostrais e respectivas coordenadas da malha  
de amostragem ..... 111**

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A – Laudo de análise química do solo .....</b>	<b>113</b>
---	------------

# SUMÁRIO

**RESUMO**

**ABSTRACT**

**LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

**LISTA DE TABELAS**

**SUMÁRIO**

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>2 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Objetivos específicos .....</b>	<b>22</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 A história e o mercado atual da Erva-mate .....</b>	<b>23</b>
3.1.2 Descrição taxonômica da Erva-mate ( <i>Ilex paraguariensis</i> St. Hil.) .....	26
3.1.3 Descrição botânica da Erva-mate ( <i>Ilex paraguariensis</i> St. Hil.) .....	27
3.1.4 Aspectos ecológicos da Erva-mate ( <i>Ilex paraguariensis</i> St. Hil.) .....	27
3.1.5 Ocorrência natural da Erva-mate ( <i>Ilex paraguariensis</i> St. Hil.) .....	28
3.1.6 Solos para Erva-mate ( <i>Ilex paraguariensis</i> St. Hil.) .....	28
3.1.7 Clima para Erva-mate ( <i>Ilex paraguariensis</i> St. Hil.) .....	28
3.1.8 Principais pragas da Erva-mate ( <i>Ilex paraguariensis</i> St. Hil.) .....	29
3.1.9 Crescimento e produção da Erva-mate .....	29
<b>3.2 A estatística clássica ou de Fisher .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3 Variabilidade espacial de atributos de solo .....</b>	<b>32</b>
<b>3.4 A geoestatística ou teoria das variáveis regionalizadas .....</b>	<b>34</b>
3.4.1 O variograma .....	35
3.4.2 Parâmetros do semivariograma .....	37
3.4.3 Modelos teóricos do semivariograma .....	38
3.4.3.1 Modelo efeito pepita de semivariograma .....	39
3.4.3.2 Modelo esférico de semivariograma .....	40
3.4.3.3 Modelo exponencial de semivariograma .....	40
3.4.3.4 Modelo gaussiano de semivariograma .....	40
3.4.3.5 Modelo linear de semivariograma .....	41
3.4.3.6 Modelo potência de semivariograma .....	41
3.4.4 Seleção do modelo teórico de semivariograma .....	44

3.4.5 Semivariogramas anisotrópicos e isotrópicos .....	45
3.4.6 Krigagem .....	49
3.4.7 Validação cruzada “ <i>Cross-Validation</i> ” .....	50
<b>3.5 Geoprocessamento e silvicultura de precisão .....</b>	<b>51</b>
<b>3.6 Localização e caracterização da região de estudo .....</b>	<b>53</b>
3.6.1 Meio físico da região .....	54
3.6.1.1 Características geomorfológicas e relevo .....	54
3.6.1.2 Características geológicas .....	54
3.6.1.3 Características dos solos .....	55
3.6.1.4 Características regionais do clima .....	56
3.6.1.5 Características hidrográficas .....	56
3.6.2 Meio biológico da região .....	57
3.6.2.1 Características da vegetação .....	57
<b>4 MATERIAIS E METODOLOGIA APLICADA .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1 Materiais e equipamentos utilizados .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2 Metodologia aplicada .....</b>	<b>59</b>
4.2.1 Plano de amostragem utilizado .....	60
4.2.2 Coleta e obtenção dos dados .....	61
4.2.3 Análise descritiva e exploratória dos dados .....	63
4.2.4 Análise geoestatística e exploratória dos dados .....	63
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>67</b>
<b>5.1 Análise estatística descritiva dos dados .....</b>	<b>67</b>
<b>5.2 Análise espacial dos dados .....</b>	<b>69</b>
5.2.1 Análise geoestatística .....	70
5.2.2 Análise variográfica dos atributos químicos argila, textura, pH(H <sub>2</sub> O), fósforo, potássio e matéria orgânica .....	71
5.2.2.1 Variável argila .....	72
5.2.2.2 Variável textura .....	72
5.2.2.3 Variável pH (H <sub>2</sub> O) .....	73
5.2.2.4 Variável fósforo P .....	73
5.2.2.5 Variável potássio K .....	74
5.2.2.6 Variável matéria orgânica .....	74
5.2.3 Análise variográfica dos atributos químicos alumínio, cálcio, magnésio,	

H+Al, CTC efetiva e CTC pH <sup>7</sup> e saturação de bases .....	76
5.2.4 Análise variográfica dos atributos físicos areia grossa, areia fina, silte e argila .....	82
5.2.5 Análise variográfica dos atributos físicos densidade de solo, densidade de partícula e porosidade total .....	85
<b>5.3 Krigagem e mapeamento dos atributos do solo estudados .....</b>	<b>88</b>
5.3.1 Mapas do solo na gleba denominada Campo Novo .....	88
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>100</b>
<b>7 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>113</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O estudo da relação entre as características físicas e químicas do solo, ou seja, de seus atributos visando o enfrentamento das principais limitações à produção de uma determinada área ou região, parece-nos cada vez mais essencial quando se tem como objetivo o manejo racional do cultivo e do solo, evitando-se assim a possível exaustão química e a degradação de seus atributos físicos, objetivando à máxima produtividade sustentável, assim como o conhecimento das condições de suas características referente à qualidade do solo.

O número de trabalhos desenvolvidos no Brasil que abordam o comportamento dos atributos físico-químicos é reduzido, sobre o ponto de vista espacial, ainda mais se considerarmos os estudos referentes a espécies florestais nativas, sobretudo, a erva-mate.

O sistema extrativista empregado no sul do País resultou na instabilidade econômica para a cultura, gerando assim a diminuição da realização de pesquisas e conhecimentos necessários para a sua produção. A exploração deste importante recurso natural, econômico e cultural, na forma indiscriminada, acabou levando à erradicação da maior parte dos ervais nativos, junto à floresta, dando lugar aos cultivos agrícolas.

Atualmente, com a redução da oferta de matéria prima para a indústria ervateira, com a expansão do uso da cultura para outros fins além do tradicional *chimarrão* e a provocada elevação dos preços do produto no mercado, produtores motivados por esta demanda começam a reflorestar com erva-mate, surgindo assim os plantios homogêneos.

Conforme estudos realizados, nos últimos anos ocorreram melhorias no sistema de produção de mudas, com melhoramento genético e nos tratos e manejo silviculturais, porém ainda apresenta limitações quanto ao aumento de produtividade relacionada aos atributos do solo.

Nesse sentido, os empregos da estatística clássica, da geoestatística e do geoprocessamento vêm a contribuir para uma *Silvicultura de Precisão* econômica e ecologicamente sustentável, devido à maioria das propriedades do solo apresentar variabilidades não observadas em amostragens simples.

O estudo da variabilidade espacial das características físico-químicas do solo, através da geoestatística, permite definir o grau de correlação espacial destas variáveis levantadas, bem como sua forma e distribuição na referida área.

Devido às poucas pesquisas disponíveis com esta espécie florestal referente a este tema proposto, o presente trabalho buscou contribuir com o estudo da estrutura de dependência e variabilidade espacial de atributos do solo em plantio de erva-mate na Fazenda Tupi, em Nova Prata, RS, viabilizando a confecção de mapas em escala e precisão adequadas, para um correto manejo do erval, utilizando-se de técnicas de geoestatística e geoprocessamento em uma metodologia análoga à empregada em estudos de *Agricultura de Precisão*.

## **2 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho foi à aplicação, dentro do conceito de silvicultura de precisão, de uma metodologia que utiliza técnicas de estatística, geoestatística e geoprocessamento, no mapeamento da variabilidade espacial das variáveis físico-químicas do solo, em plantio de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), numa área de 36 hectares, localizada na Fazenda Tupi, em Nova Prata, RS.

### **2.1 Objetivos específicos**

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Predizer a dependência espacial de cada variável estudada dos atributos físico-químicos do solo na área em estudo e analisar a possibilidade da descrição desta por semivariogramas;
- Predizer a média aritmética de cada variável estudada e a possibilidade da mesma poder ser utilizada na representação do conjunto amostral;
- Predizer o ajustamento de modelos matemáticos que representem através de equações a presente variabilidade espacial dos atributos físico-químicos do solo na área de reflorestamento de erva-mate;
- Mapear a espacialização dos atributos físico-químicos do solo através da técnica de krigagem, através da realização de estimativas em locais não amostrados.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão literária do presente trabalho se deteve à *priori* sobre o referencial erva-mate, estatística clássica, geoestatística e geoprocessamento.

#### 3.1 A história e o mercado atual da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)

A opinião mais aceita é que o vocábulo “*mate*” ou “*mati*”, originário da língua indígena “*quíchua*” ou “*quéchua*” era dado ao que se chama cuia cabaça ou porongo, recipiente feito do fruto maduro da Cucurbitaceae *Legenaria vulgaris*. Conforme esta teoria a bebida tomou então o nome do recipiente que a continha (MAZUCHOWSKI, 1991).

Dentre os aborígenes da América do Sul destacaram-se os Tupi-guaranis como maiores consumidores da bebida os quais a conheciam com o nome de “*caá*”, ou seja, na linguagem deles erva ou erva-verdadeira. A partir da palavra guarani “*caiguá*” verifica-se a correlação com a bebida mediante seu desdobramento em “*caá*” (erva), “*í*” (água), “*guá*” (recipiente) designando, portanto, o utensílio com a mais restrita determinação: recipiente para água da erva. O uso desta planta como bebida tônica e estimulante já era conhecido pelos aborígenes da América do Sul. Em túmulos pré-colombianos de Ancon, perto de Lima no Peru, foram encontradas folhas de erva-mate ao lado de alimentos e objetos demonstrando o seu uso pelos Incas (BACKES & IRGANG, 2002).

Desde os primórdios da ocupação castelhana no Paraguai a começar por Don Hernando Arios de Saavedra (governante no período de 1592 a 1594), observou-se a utilização da erva-mate pelos indígenas. Posteriormente foi observado que os indígenas brasileiros que habitavam as margens do Rio Paraná utilizavam-se igualmente desta Aquifoliaceae.

Desde o início das colonizações espanhola e portuguesa na América do Sul são referidos os usos da erva-mate pelos indígenas. Também foram encontrados relatos sobre tribos do Peru, Chile e Bolívia que obtinham a erva-mate através de

permuta transportando as folhas por milhares de quilômetros. Para os indígenas havia ganho de resistência às jornadas de trabalho devido ao consumo da bebida.

Os jesuítas da Companhia de Jesus do Paraguai no século XVII foram os primeiros a orientar os índios a realizar plantios de erva-mate sendo então os precursores do cultivo sistemático, da coleta de sementes, produção de mudas e condução de erveiras. Foram também os que deram maior contribuição à expansão da bebida melhorando seu preparo e difusão entre os europeus.

No Estado do Paraná, entre os anos de 1628 a 1632, as bandeiras paulistas percorreram as regiões de Guaíra e regressaram trazendo índios guaranis prisioneiros e com eles o hábito da bebida que era conhecido dos índios Caingangues do planalto curitibano. Dessa maneira foi introduzido o hábito do mate entre os portugueses. Na época o Paraná era a 5ª Comarca de São Paulo e teve no mate o seu argumento econômico para conseguir a sua emancipação política em 19 de dezembro de 1853, pois o ciclo da erva-mate fugia ao conhecimento e controle dos paulistas. A indústria do mate foi o principal produto de exportação da Província do Estado entre os anos de 1873 a 1890 absorvendo todas as atividades paranaenses, monopolizando capital e trabalho, sendo considerado o esteio econômico do Paraná até o início da 1ª Guerra Mundial, passando após a madeira a ser o principal produto a conquistar esta condição.

No Estado de Santa Catarina a exploração da erva-mate começou sob a influência do Rio Grande do Sul “nos campos e sertões de Lages”. A história do mate no Estado Catarinense era sincronizada com a do Paraná, apesar de haver iniciado um pouco mais tarde. Para isso o transporte da erva-mate necessitava de boas estradas, o que ainda não havia no Estado, causando problemas em seu escoamento, mas tal fato veio a melhorar em 1858, com a construção da estrada Dona Francisca, oferecendo a solução necessária para a indústria ervateira da região, facilitando o contato com a verdadeira zona produtora de erva, os municípios de Campo Alegre e Mafra, ainda contribuindo para a aproximação com o Paraná e ao intenso intercâmbio comercial favorável a ambos os Estados.

Já em nosso Estado, no Rio Grande de São Pedro, até meados do século XVIII ainda não era conhecido dos portugueses, a não ser através das incursões feitas pelos bandeirantes, sendo conquistado ou reconquistado em 1737. Em linhas gerais a trajetória do mate no Rio Grande do Sul se restringia às concentrações que se encontravam as margens dos rios Ijuí, Nhucorá e no Alto Uruguai, região antes

habitada por índios Tupi. Depois da ocupação jesuítica esses indígenas se retiraram para o Alto Uruguai. Em 1755 o mate do Rio Grande foi enviado à Europa junto com apetrechos que os índios e os “gaúchos do campo” utilizavam para tomá-lo. O mate foi o esteio econômico da Revolução Farroupilha, por isso é inegável dizer que o Rio Grande do Sul foi desbravado e povoado à sombra do mate.

Entre os anos de 1857 a 1858, exportava-se grande parte da produção do mate via fluvial, com destino à Argentina. Mais tarde a exportação do mate decaiu, mas não a sua produção em razão do aumento da população gaúcha, a qual passou a absorver toda a produção, como nos dias atuais, onde as faltas são supridas com matéria em folha e beneficiada através da importação dos estados do Paraná e Santa Catarina.

O mate é hoje provavelmente a bebida estimulante mais usada no sul da América do Sul, sobretudo no Estado do Rio Grande do Sul, onde seu consumo diário, no feitiço do chimarrão é costume ritualístico e cultural de suma importância, sendo a espécie *Ilex paraguariensis*, árvore símbolo do Estado Riograndense.

A palavra chimarrão tem origem nos vocabulários espanhóis e portugueses.

Do espanhol *cimarrón*, que significa xucro, bruto, bárbaro, vocábulo empregado em quase toda a América Latina, do México à região do Prata, designando os animais domesticados que se tornaram selvagens. A palavra chimarrão, foi também empregada pelos colonizadores do Prata, para designar aquela rude e amarga bebida dos nativos, tomada sem nenhum outro ingrediente que lhe suavizasse o gosto. “Marron” em português, além de outros significados, quer dizer clandestino, e *cimarrón*, em castelhano, têm idêntico significado. No entanto, sabe-se que o comércio de mate e o preparo da erva foram em tempos passados proibidos no Paraguai, o que não impedia, entretanto, que clandestinamente continuasse em largo uso naquela então colônia espanhola.

No que se refere à produção atual, a Argentina continua ao longo dos anos sendo o país de maior produção e exportação de erva-mate, seguido pelo Brasil. Os argentinos com uma produção média de 760 mil toneladas/ano e o Brasil, principalmente nos estados sulinos, com média anual de 530 mil toneladas/ano, ambos, exportando aproximadamente 5%, de sua produção total.

Quanto às áreas de exploração da erva-mate, o Estado do Paraná é o principal produtor nacional, tendo produzido 48% das 229.701 toneladas coletadas no país. Entre os municípios maiores produtores da erva-mate no país, destacaram-

se, nas três primeiras colocações: Canoinhas SC, com 5,47%, Pitanga PR, com 5,25%, e Fontoura Xavier RS, com 4,26% (IBGE, 2004).

Recentemente propôs-se a certificação da cadeia da erva-mate, trabalho a ser desenvolvido com o objetivo de padronizar o processo de produção e atestar a qualidade no produto final, o que resultará em um Selo de Qualidade, que terá por objetivo o mercado externo, um dos principais focos dessa iniciativa, levando em conta países como o Uruguai, que absorve cerca de 80% das exportações brasileiras, Síria, Alemanha e Estados Unidos estão na mira da indústria do mate. E o chimarrão não é o único destino da erva-mate produzida nos estados de Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O chá mate está aparecendo como uma bebida bastante consumida, principalmente no Rio de Janeiro e estados do Nordeste. Para diversificar ainda mais os usos da erva-mate como matéria-prima, estão sendo desenvolvidas pesquisas para viabilizar a produção de tinturas de cabelo, tintas, medicamentos e cosméticos, entre outros produtos (SINDIMATE, 2005).

### 3.1.2 Descrição taxonômica da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)

De acordo com o Sistema de Classificação de Cronquist, a taxonomia da *Ilex paraguariensis* obedece a seguinte hierarquia:

- Divisão: Magnoliophyta (Angiospermae)
- Classe: Magnoliopsida (Dicotyledonae)
- Ordem: Celastrales
- Família: Aquifoliaceae
- Espécie: *Ilex paraguariensis* Saint Hilaire; Memória do Museu de História Natural de Paris (Mém. Must. d' Hist. Nat. Paris 9: 351), em 1822.
- Sinonímia botânica: *Ilex domestica* Reissek; *Ilex mate* Saint-Hilaire
- Etimologia: *Ilex* é o nome antigo da azinheira usada pelos escritores Horácio, Plínio, etc. Trata-se da carrasqueira-mansa, que é uma espécie de carvalho (*Quercus ilex*); *paraguariensis*: o botânico francês Augusto de Saint-Hilaire coletou um exemplar em Curitiba, que naquela época pertencia a São Paulo e publicou o nome científico em 1825. Nesta época a planta era conhecida por

“erva-do-paraguai”, razão do nome específico, homenagem do coletor e descritor botânico.

### 3.1.3 Descrição botânica da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)

A erva-mate varia de arvoreta a árvore perenifólia. A altura dessa espécie é variável; quando cultivada, oscila de 3 a 5 metros, mas na floresta, pode atingir até 30 metros e 100 cm de DAP, na idade adulta. Apresenta tronco reto ou pouco tortuoso. Fuste geralmente curto, mas na mata pode atingir até 11 metros de comprimento. Apresenta ramificação racemosa, quase horizontal. Copa baixa, com folhagem verde-escura; casca com espessura de até 20 mm, sendo a casca externa cinza-clara a acastanhada, áspera a rugosa, com lenticelas formando linhas longitudinais com cicatrizes transversais (CARVALHO, 2003); casca interna com textura arenosa e cor branco-amarelada, que após incisão e com contato com o ar escurece (IVANCHECHEN, 1988; apud Carvalho, 2003).

Apresentam folhas simples, alternadas, geralmente estipuladas, subcoriáceas, glabras, verde-escuras em cima e claras abaixo; limbo foliar obovado com 5 a 10 cm de comprimento, por 3 a 4 cm de largura; margem irregular serrilhada ou dentada; pecíolo relativamente curto com 7 a 15 mm de comprimento; flores brancas, pequenas; fruto do tipo globoso (CARVALHO, 2003); apresenta floração de outubro a dezembro, e frutificação de janeiro a março (BACKES & IRGANG, 2002).

### 3.1.4 Aspectos ecológicos da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)

A erva-mate é uma espécie clímax, tolerante à sombra. Seu crescimento se dá nas associações mais evoluídas dos pinhais. É uma espécie característica da Floresta Ombrófila Mista (Floresta com Araucária), sempre em associações nitidamente evoluídas com o pinheiro do Paraná (*Araucaria angustifolia*) (Carvalho, 2004).

### 3.1.5 Ocorrência natural da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)

A *Ilex paraguariensis* ocorre numa ampla região compreendida entre os paralelos 12° e 35° S e os meridianos 40° e 65° Oeste, dentro do qual se pode definir uma zona menor, delimitada pelos paralelos 18° e 30° e os meridianos de 47° e 58°, onde a presença da erva-mate é mais freqüente. Segundo Oliveira e Rotta (1985), *apud* Carvalho (2003) no Brasil a ocorrência natural da erva mate compreende a 450.000 km<sup>2</sup>, ou seja, 5% do território brasileiro.

Ocorrem associações com a araucária desde Campos do Jordão, a leste de São Paulo, região sudeste de Minas Gerais e ao sul do Rio Grande do Sul. A erva-mate é ausente em campos naturais, com exceção dos pontos de contato com as matas nativas anteriormente existentes (Oliveira e Rotta, 1985).

### 3.1.6 Solos para erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)

A espécie ocorre em solos de baixa fertilidade, apresentando normalmente baixos teores de cátion trocáveis, altos teores de alumínio e pH baixo. Também não ocorre em solos hidromórficos. Seu plantio de ser evitado em solos úmidos não permeáveis; preferência por solos profundos e textura argilosa (Carvalho, 2003).

### 3.1.7 Clima para erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)

Segundo a classificação de Köppen, o clima predominante para o desenvolvimento desta espécie é o temperado úmido (Cfb), seguido pelo subtropical úmido (Cfa), ocorrendo ainda em menor grau em clima subtropical de altitude (Cwa) e (Cwb) e em clima tropical (Aw). As chuvas são distribuídas uniformemente na maior parte da sua área de ocorrência, apresentando uma temperatura média de 13,2°C a 21.9°C (MORENO, 1961).

### 3.1.8 Principais pragas da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)

Conforme lede e Machado (1989) e Mazuchowski (1991), são cinco as pragas consideradas principais:

- *Ceroplastes grandis*, cochonilha da cera. Suga a seiva dos ramos, propiciando aparecimento de fumagina;
- *Gyropsyla spegazziniana*, ampola da erva-mate. Inseto que causa a deformação nos brotos e folhas;
- *Thelosia camina*, lagarta da erva-mate. Lagarta que destrói a brotação nova e folhas mais velhas, acarretando uma diminuição da produção;
- *Hylesia sp*, larvas que se alimentam de brotações e de folhas velhas;
- *Hedypathes betulinus*, broca do tronco da erva-mate, conhecido popularmente de “corintiano” e é considerada a praga mais danosa à erva-mate. Esta larva constrói galerias longitudinais no tronco e colo impedindo assim a circulação da seiva, resultando no enfraquecimento dos ervais. Como medida de prevenção pode-se utilizar a catação manual dos adultos e a coleta e queima dos galhos quebrados, que geralmente contêm larvas no seu interior.

### 3.1.9 Crescimento e produção da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)

A capacidade produtiva de uma área florestal é determinada em virtude da ação e interação de fatores bióticos, climáticos, edáficos e topográficos, influenciados pelas práticas silviculturais e de manejo florestal. Esta capacidade produtiva recebe denominação de qualidade do sitio, também denominada de qualidade do local, (BARROS, 1990).

O plantio da erva mate baseia-se no sistema de produção a ser utilizado, podendo utilizar-se espaçamentos reduzidos em monocultivo; e espaçamentos maiores como 6 x 4m ou 8 x 3m na linha em sistemas agrossilviculturais.

A erva-mate forma um dos sistemas mais característicos brasileiros, sendo explorada de forma nativa (na mata, em pastagens, com culturas anuais e adensadas) e cultivada solteira ou em sistema agroflorestal com culturas anuais (feijão, milho, soja, mandioca, arroz), em consórcio com outras espécies florestais, com pastagem, fruticultura, entre outros.

Para Anselmo (1992), vários fatores devem ser considerados para a densidade de plantio da erva-mate: manejo a ser utilizado no plantio, qualidade do solo, tipo de máquina, equipamentos e mão-de-obra disponível.

Segundo Zöttl e Tschinkel (1971); *apud* Saidelles (2000), o conjunto de fatores do meio ambiente, que influi no crescimento de um povoamento, denomina-se sitio e um bom sitio é o local na qual o complexo destes fatores são favoráveis para um bom desenvolvimento da espécie em questão. Para isto, é necessário medir o crescimento do povoamento, com a finalidade de identificar os lugares de bom ou mau desenvolvimento, ou seja, bons ou maus sítios, para em seguida investigar os fatores ambientais que os determinam. Dessa maneira, podem-se identificar os fatores mais limitantes e saber se há correlação com aspectos de nutrição mineral.

A classificação de solos pode ser usada na estratificação de sítios, algumas vezes associada com outros fatores ambientais. Entretanto, as relações entre as classes de solo e a produtividade florestal podem ser fracas, porque os critérios de avaliação química e de classificação dos solos foram desenvolvidos sobre bases pedológicas e, ou, agrícolas. Assim, é fácil observar a variação da produtividade florestal dentro de uma mesma categoria de solo ou mesmo produtividades similares entre diferentes unidades taxonômicas, Gonçalves (1988).

Segundo Anselmo (1992), a qualidade de sitio varia com a espécie florestal, genótipo, preparo e fertilização florestal. A suposta capacidade ótima de produção pode também ser influenciada pela variação na precipitação, compactação e erosão do solo, incidência de doenças e danos causados por insetos.

Couto (1993) relata que os levantamentos florestais são fonte de dados para qualquer planejamento florestal e para SIG, o que não é apenas uma tecnologia, mas sim uma nova filosofia de trabalho para as empresas florestais. Isto porque estas empresas projetam a distribuição de suas áreas por meio de mapas onde é representado o relevo, a categoria de solos, a distribuição dos talhões, malha viária, entre outros. Esses dados, conjuntamente, podem ser agrupados num banco de

dados SIG para o gerenciamento dos plantios florestais e para o monitoramento ambiental.

### **3.2 A estatística clássica ou de Fisher**

Garcia y Garcia (1997) resume a estatística clássica como sendo aquela que utiliza a média e o desvio padrão para representar um conjunto de dados, e baseia-se na hipótese principal de que as variações de um local a outro são aleatórias.

Segundo Morettin & Bussand (1987), as medidas estatísticas mais utilizadas para expressar a variabilidade de um conjunto de dados são a variância ou desvio padrão, o coeficiente de variação e a amplitude total, por serem fáceis de calcular e de se interpretar.

Para Sokal & Rohlf (1969) os valores em um determinado ponto são estimados levando-se em conta a média da população e a variabilidade dos valores medidos em torno da média. Essa estimativa pressupõe que as amostras sejam independentes e que possuam distribuição normal.

Heath (1981) mostra que se a distribuição de freqüência for diferente da normal, deve-se realizar uma transformação de dados para a normalização e o uso da estatística clássica. A normalidade dos dados é um pré-requisito básico para o uso da estatística clássica.

Segundo Costa Neto (1977), a média constituiu-se na média simples dos dados e o desvio padrão constituiu-se na raiz quadrada da variância, assim, o desvio padrão apresenta as mesmas unidades que a variável em análise. Ainda, conforme o autor, a moda corresponde à classe de maior freqüência da distribuição, podendo, dessa forma não existir, ou ainda, quando existir, pode não ser única.

O coeficiente de variação constituiu-se em uma medida de dispersão relativa e também em uma alternativa para avaliar a simetria das distribuições, nesse sentido, (Sturaro, 1993), nos diz que valores de coeficientes de variação maiores que 1 significam a presença de valores altos e/ou erráticos no conjunto de dados, que representarão problemas para a maioria dos métodos de estimativas (Kim, 1988).

A estatística clássica não permite testar a independência entre as amostras; portanto, ao se aplicá-la, está se assumindo independência entre as amostras sem

testar, ainda que existam alguns testes não-paramétricos de independência amostral, quase não são utilizados. (GUIMARÃES, 1993).

Para o mesmo autor, a quantificação de características e propriedades do solo é influenciada pela variabilidade espacial. Assim, existe uma dependência entre amostras, que a estatística clássica não permite representar. Neste caso, é mais indicado o uso de estimativas que levem em consideração a posição espacial dos valores amostrados.

### **3.3 Variabilidade espacial de atributos de solo**

A análise dos solos que retrata sua variabilidade espacial depende essencialmente do método de amostragem empregado o que, por sua vez, está ligado ao delineamento experimental escolhido e aos objetivos do experimento (Cora & Marques Junior, 1998).

Para Reichardt *et al.* (1986), ocorrem duas formas principais de amostragem: a coleta de amostras inteiramente casualizadas, pertencentes à estatística clássica, sem levar em conta a posição relativa de cada amostra, em que a variabilidade é descrita pela estimativa da variância e pelo coeficiente de variação; e a coleta de amostras é descrita de acordo com um plano espacial determinado, sendo a amostragem segundo transecções em dada direção ou segundo um “*grid*” em duas direções, mantendo uma regularidade na coleta de amostras por toda a área. Os autores salientam que a distância constante entre as amostras não é estritamente necessária, desde que a posição relativa de cada amostra seja conhecida. Libardi *et al.* (1986) salientam que o conhecimento da posição das amostras possibilita avaliar a dependência espacial entre os valores medidos.

As análises estatísticas tradicionais, baseadas na independência das observações, têm sido substituídas por análises espaciais, as quais consideram as correlações entre observações vizinhas (Hamlett *et al.*, 1986). Essas análises são baseadas na teoria das variáveis regionalizadas, base da geoestatística e, como resultado, a variabilidade espacial é caracterizada por meio de auto correlogramas, semivariogramas e métodos de interpolação, como a krigagem, que define o grau de

dependência no espaço da grandeza medida e o alcance ou domínio de cada amostragem medida (Vieira *et al.*, 1997).

Os autores Journel & Huijbregts (1978) sugeriram pelo menos 30 a 50 pares de pontos como mínimo para calcular cada classe de distância “lag” do variograma, para que ocorra a definição da distância e a estabilização dos valores das semivariâncias, havendo a autocorrelação entre os pontos.

Tangmar *et al.* (1985) dizem que no estudo de solos a krigagem fornece melhor estimativa de parâmetro local, onde estes não foram amostrados, utilizando o estudo do semivariograma.

Para Bouma (1997), é necessário um menor número de observações para se caracterizar a variabilidade espacial dos atributos dos solos em áreas homogêneas. Assim, a estatística clássica obteria bons resultados, caso não fosse o julgamento de homogeneidade do solo algo subjetivo, considerando apenas uniformidade quanto à textura, cor, topografia e manejo.

Catani (1954) e Sanchez (1981) citam que, para fins de análise de fertilidade, a área considerada homogênea não deve exceder 20 hectares. Portanto, o procedimento para o estudo da variabilidade dos atributos do solo deve partir da identificação de áreas mais homogêneas.

O manejo pode afetar propriedades químicas, físicas, mineralógicas e biológicas com impacto principalmente nas camadas superficiais do solo. Práticas como aração e gradagem são responsáveis pela alteração e até a eliminação da dependência espacial de certas propriedades físicas do solo, densidade aparente, porosidade e retenção de água (CORA, 1997).

Vieira (1995) mostra que a preocupação com a variabilidade espacial dos solos já estava presente desde o início deste século, ressaltando que, com os princípios de casualização e repetição, introduzidos por Fischer (1935), e com o conhecimento das funções de densidade das variáveis aleatórias, ocorreu uma descontinuidade nos estudos da variabilidade espacial de atributos dos solos.

Essa variabilidade foi classificada para as variáveis de solo, segundo Warrick & Nielsen (1980) em baixa ( $CV > 12\%$ ), média ( $12 < CV < 62\%$ ) e alta ( $CV > 62\%$ ), sendo que um dos aspectos negativos desta estatística, como já foi referido, é que a mesma não considera a continuidade espacial.

### 3.4 A geoestatística ou teoria das variáveis regionalizadas

A geoestatística é um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais têm um comportamento espacial que mostram características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente casuais e as totalmente determinísticas. Apresentam uma aparente continuidade no espaço, sendo representada por funções numéricas ordinárias que assumem um valor definido a cada ponto no espaço e descrevem matematicamente um fenômeno natural. A continuidade geográfica é representada pela tendência que a variável tem, ou seja, valores parecidos à dos pontos vizinhos e mais diferentes à medida que os pontos vão ficando mais distantes. Esse tipo de variável apresenta outros atributos como: localização, anisotropia e transição, LANDIM (1998).

De acordo com Mulla (1997), após a coleta das amostras do solo e sua análise para determinar propriedades, seus resultados são interpolados para as localidades que não foram amostradas por técnicas de geoestatística, e os valores interpolados são classificados usando um sistema de informação geográfica para um número limitado de zonas de gerenciamento. Os contornos dessas zonas são, então, percebidos por meio de um “software” de mapeamento, e as recomendações são firmadas para cada zona.

Segundo Matheron (1963), a geoestatística é uma função que varia de um lugar a outro no espaço com certa aparência de continuidade. São variáveis cujos valores estão relacionados com a posição espacial que ocupam, e já que podem tomar valores diferentes em diferentes lugares de observação, demonstram certa independência de um lugar a outro.

Fanha (1994), diz que as variáveis regionalizadas têm características quantitativas, tais como: localização, continuidade e anisotropia que estão ligadas ao fenômeno natural que elas representam. A variável regionalizada atua no espaço geométrico em que foi definida e onde será estudada sua variação.

Quando se utiliza a ferramenta geoestatística para a análise dos dados, algumas hipóteses de trabalho são assumidas, principalmente a hipótese intrínseca. Por ela, a probabilidade de variação dos valores tomados entre pontos com a mesma distância de separação é igual, ou seja, a relação de dependência espacial é a mesma em qualquer posição de  $h$  ( $h$  é o vetor que separa dois pontos amostrais).

É assumida a estacionaridade dentro do alcance da continuidade espacial. A estacionaridade de primeira ordem é a esperança do valor de um ponto no espaço ser igual à média admitindo-se que a média amostral é igual à média populacional. A estacionaridade de segunda ordem assume que há uma variação da média, mas a variância é constante dentro dos limites da continuidade espacial (Isaaks & Srivastava, 1989 e Vieira, 1995).

A geoestatística aplicada tem por objetivos identificar, na aparente desordem entre as amostras, uma medida da correção espacial, realizar estimativas de valores de locais não amostrados, com base em alguns valores conhecidos na população (krigagem) e identificar inter-relações de propriedade no espaço (análises de correlação entre atributos), além de permitir estudar padrões de amostras adequadas (VIEIRA, 2000).

#### 3.4.1 O variograma

O variograma ou semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Huijbregts, 1975).

Camargo (1997) considera duas variáveis,  $X$  e  $Y$ , onde  $X=Z(x)$  e  $Y=Z(x+h)$ , neste caso, referindo-se ao mesmo atributo (por exemplo, o teor de zinco no solo) medido em duas posições diferentes, conforme ilustra a Figura 01, onde  $x$  denota uma posição em duas dimensões, com componentes  $(x_i, y_i)$ , e  $h$  um vetor distância (módulo e direção) que separa os pontos.

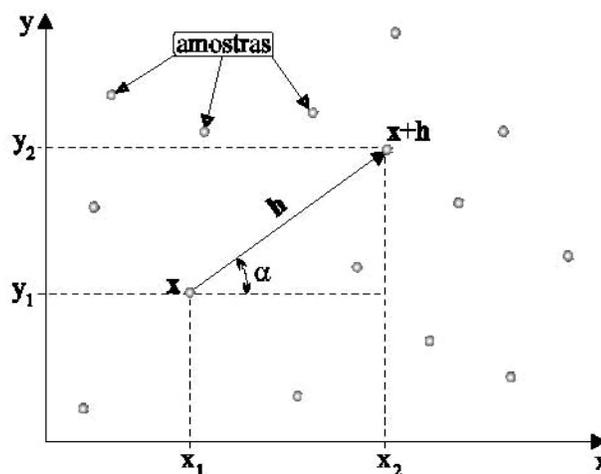


Figura 01 – Amostragem em duas dimensões (Camargo, 1997).

Para Camargo (1997), o nível de dependência entre essas duas variáveis regionalizadas, X e Y, é representado pelo variograma,  $2\gamma(h)$ , o qual é definido como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor distância h, isto é,

$$2\gamma(h) = E \{ [Z(x) - Z(x+h)]^2 \} = \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)]$$

Através de uma amostra  $z(x_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , o variograma pode ser estimado por.

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

Sendo:

$2\hat{\gamma}(h)$  é o variograma estimado;

$N(h)$  - é o número de pares de valores medidos,  $z(x_i)$  e  $z(x_i+h)$ , separados por um vetor distância h;

$z(x_i)$  e  $z(x_i+h)$  - são valores da i-ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos  $x_i$  e  $x_i+h$  ( $i = 1, \dots, n$ ), separados pelo vetor h.

Analogamente, a função semivariograma pode ser estimada por Vieira (1995):

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

Sendo:

$\hat{\gamma}(h)$  é a variância;

$z(x_i)$  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 por um vetor  $h$  e  $z$  é a variável em estudo.

### 3.4.2 Parâmetros do semivariograma

Segundo Camargo (1997), a Figura 02 ilustra um semivariograma experimental com características muito próximas do ideal. O seu padrão representa o que, intuitivamente, se espera de dados de campo, isto é, que as diferenças  $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$  decresçam à medida que  $h$ , a distância que os separa decresce. É esperado que observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Desta maneira, é esperado que  $\gamma(h)$  aumente com a distância  $h$ .

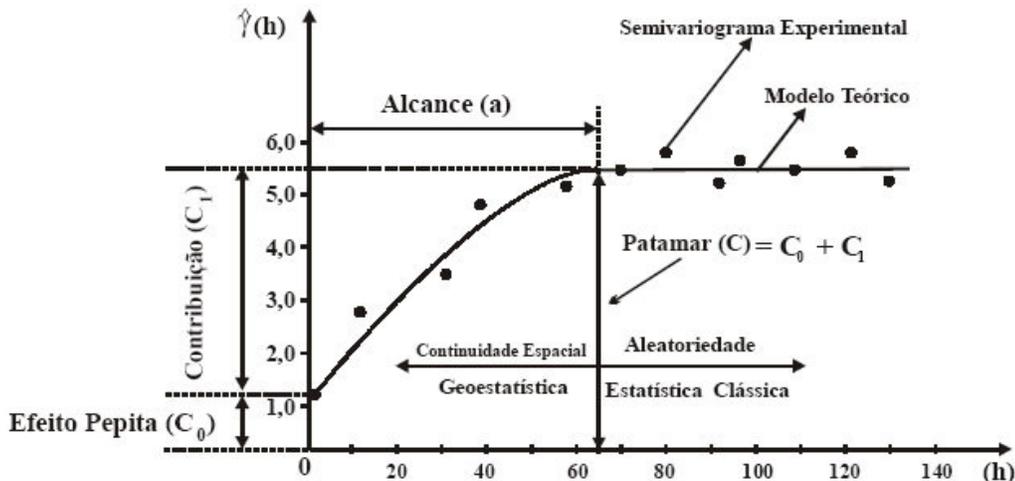


Figura 02 – Semivariograma experimental, modelo teórico e seus componentes (Adaptado de Camargo, 1997).

Segundo este autor, o semivariograma experimental é ajustado à curva que proporciona a máxima correlação possível com os pontos plotados. O modelo ajustado é chamado de modelo teórico do semivariograma. Na região onde se observa a continuidade espacial, a geoestatística é aplicada com eficiência.

Os parâmetros do semivariograma podem ser observados diretamente na Figura 02:

- Alcance (a): distância dentro das quais as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente. Na Figura 02, o alcance ocorre próximo de 65m.
- Patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ( $\text{Var} [Z(x) - Z(x+h)]$ ) torna-se invariante com a distância.
- Efeito Pepita ( $C_0$ ): por definição,  $\gamma(0)=0$ , entretanto, na prática, à medida que  $h$  tende para 0 (zero),  $\gamma(h)$  se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita ( $C_0$ ). O valor de  $C_0$  revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição (Isaaks e Srivastava, 1989), mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.
- Contribuição ( $C_1$ ): é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita ( $C_0$ ).

### 3.4.3 Modelos teóricos do semivariograma

Camargo (1997), diz que o gráfico do semivariograma experimental,  $\hat{\gamma}(h)$ , calculado através da Equação (14), é formado por uma série de valores, conforme ilustra a Figura 03, sobre os quais se objetiva ajustar uma função. É importante que o modelo ajustado represente a tendência de  $\hat{\gamma}(h)$  em relação à  $h$ . Deste modo, as

estimativas obtidas a partir da krigagem serão mais exatas e, portanto mais confiáveis.

O procedimento de ajuste de acordo com este autor não é direto e automático, como no caso de uma regressão, por exemplo, mas sim interativo, pois nesse processo o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, pode ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório.

Os modelos mais utilizados são o esférico, o exponencial e o gaussiano (Vieira, 2000).

Os modelos aqui apresentados são considerados modelos básicos, denominados de modelos isotrópicos por Isaaks e Srivastava (1989). Estão divididos em dois tipos: modelos com patamar e modelos sem patamar.

Modelos do primeiro tipo são referenciados na geoestatística como modelos transitivos. Alguns dos modelos transitivos atingem o patamar (C) assintoticamente. Para tais modelos, o alcance (a) é arbitrariamente definido como a distância correspondente a 95% do patamar. Modelos do segundo tipo não atingem o patamar, e continuam aumentando enquanto a distância aumenta. Tais modelos são utilizados para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão.

#### 3.4.3.1 Modelo efeito pepita de semivariograma

Na literatura geoestatística, o efeito pepita não é classificado como modelo básico, mas aparece como uma constante ( $C_0$ ) na equação do semivariograma, e deve ser entendido que  $C_0 = 0$  quando  $|h| = 0$ . A rigor, a notação para o efeito pepita é  $C_0 \gamma_0(|h|)$ , onde  $C_0$  representa o valor da descontinuidade na origem, e  $\gamma_0(|h|)$  é o modelo de efeito pepita normalizado conforme apresentado na Equação. Esta notação é consistente com a apresentação dos modelos básicos aqui descritos e torna-se conveniente quando se usa um modelo composto, dado pelo modelo teórico seguinte:

$$\gamma_0(h) = \begin{cases} 0 & \text{se } |h|=0 \\ 1 & \text{se } |h|\neq 0 \end{cases}$$

### 3.4.3.2 Modelo esférico de semivariograma

O modelo esférico é um dos modelos mais utilizados, dado pelo seguinte modelo teórico:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & ,|h|=0 \\ C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{|h|}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{|h|}{a} \right)^3 \right] = C_0 + C_1 [Sph(|h|)] & ,0 < |h| < a \\ C_0 + C_1 & ,|h| > a \end{cases}$$

### 3.4.3.3 Modelo exponencial de semivariograma

Este modelo atinge o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (CAMARGO, DRUCK & CÂMARA, 2004), conforme o modelo teórico:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & ,|h|=0 \\ C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-\frac{|h|}{a}} \right] = C_0 + C_1 [Exp(|h|)] & ,|h|\neq 0 \end{cases}$$

### 3.4.3.4 Modelo gaussiano de semivariograma

O modelo gaussiano é um modelo transitivo, muitas vezes usado para modelar fenômenos extremamente contínuos.

Semelhante no modelo exponencial, o modelo gaussiano atinge o patamar assintoticamente e o parâmetro  $a$  é definido como o alcance prático ou distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar. O que caracteriza este modelo é seu comportamento parabólico próximo à origem (CAMARGO, DRUCK & CÂMARA, 2004).

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , |h|=0 \\ C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{|h|}{a}\right)^2} \right] = C_0 + C_1 [Gau(|h|)] & , |h| \neq 0 \end{cases}$$

#### 3.4.3.5 Modelo linear de semivariograma

O modelo linear descreve um variograma de linha reta, observando-se a não existência de nenhuma soleira nele. O alcance ( $a$ ) está arbitrariamente definido para ser o intervalo de distância entre o último ponto do semivariograma, conforme o seguinte modelo teórico:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + \left[ |h| \left( \frac{C_1}{a} \right) \right] = C_0 + C_1 [Lin(|h|)] & , |h| > 0 \end{cases}$$

#### 3.4.3.6 Modelo potência de semivariograma

O modelo potência não é um modelo transitivo, portanto não atinge o patamar. Em geral, este tipo de modelo é utilizado para modelar fenômenos com capacidade infinita de dispersão.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & , |h|=0 \\ C_0 + c \cdot |h|^e = C_0 + [Pot(|h|)] & , |h| \neq 0 \end{cases}$$

Sendo assim, estes são os principais modelos básicos normalizados, os quais são utilizados para modelar ou ajustar o semivariograma experimental.

Na prática, os semivariogramas experimentais possuem valores de efeito pepita ( $C_0$ ) maior que zero e valores de patamar ( $C$ ) maiores que a unidade, conforme ilustrado na Figura 03.

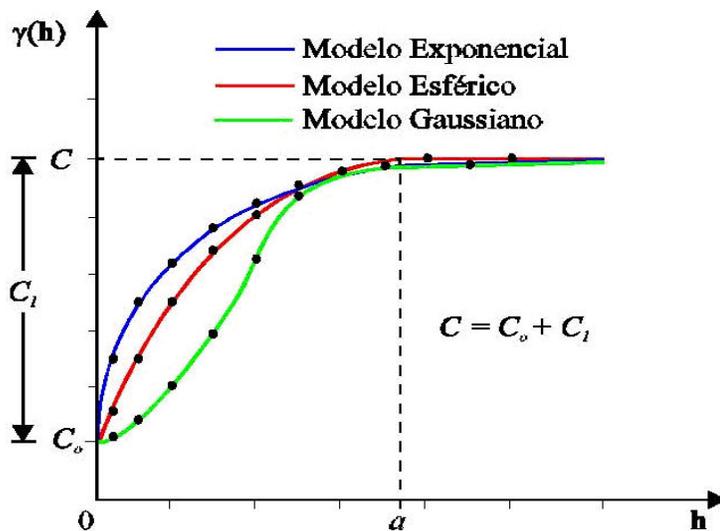


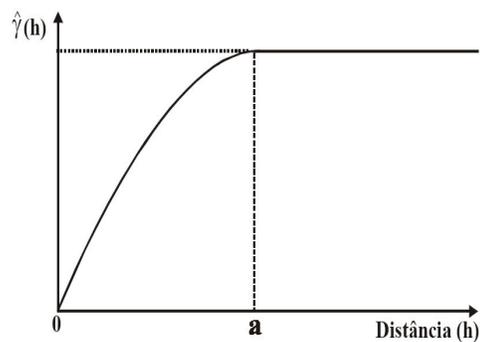
Figura 03 – Representação gráfica dos semivariogramas experimentais e modelos teóricos mais utilizados, com efeito pepita.

Em resumo, os modelos de semivariogramas são definidos conforme a representação gráfica ilustradas na Figura 04:

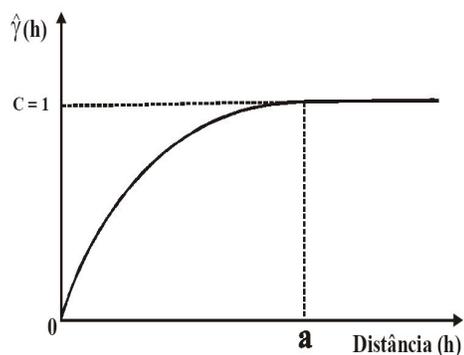
a) Modelo Efeito Pepita



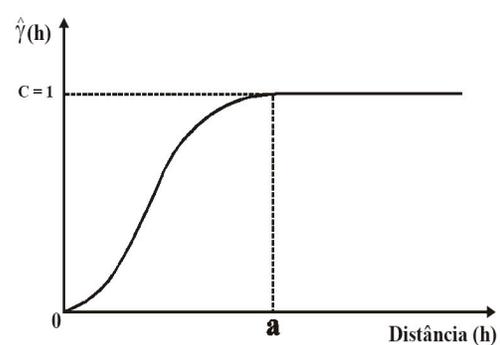
b) Modelo Esférico



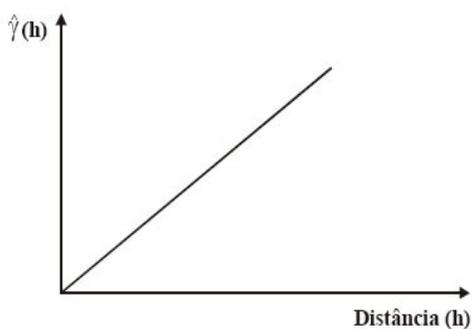
c) Modelo Exponencial



d) Modelo Gaussiano



e) Modelo Linear



f) Modelo Potência

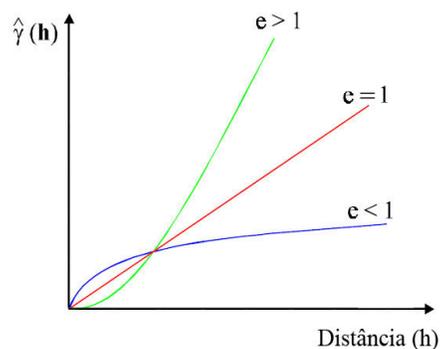


Figura 04 – Representação gráfica de semivariogramas experimentais e modelos teóricos. <sup>a</sup>Modelo efeito pepita (Modificado de Saturaro, 1993). <sup>b</sup> <sup>c</sup> Principais modelos transitivos normalizados (modificado de Isaaks e Srivastava, 1989). <sup>d</sup>Modelo linear (Modificado de Golden Software, 1995).

#### 3.4.4 Seleção do modelo teórico de semivariograma

O modelo ajustado deve aproximar-se ao máximo da descrição do fenômeno ocorrido no campo. Cohen *et.al.* (1990) explana que a verificação do melhor ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental pode ser realizada pela validação cruzada ou *cross-validation*, que envolve a reestimação dos valores conhecidos através dos parâmetros ajustados do semivariograma, analisado pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

O parâmetro  $R^2$  é o coeficiente de determinação utilizado na validação cruzada, que expressa o percentual de ajuste do modelo de semivariograma testado, quanto mais alto este coeficiente encontrado, melhor a eficiência do ajuste entre os valores observados e estimados, para o modelo proposto ao conjunto de dados, NETER (1990).

Como a interpolação por krigagem está fortemente associada ao modelo de semivariograma escolhido, a validação cruzada pode ser usada para se definir qual o modelo a ser usado entre os disponíveis, conforme VIEIRA *et.al.* (1981).

O valor da semivariância média das amostras é um estimador, sem tendência, da semivariância média da população, assumindo que a hipótese intrínseca foi satisfeita, quando o patamar é atingido, tem-se a variância da população e independência entre as amostras (DOURADO NETO, 1989).

O patamar, que é definido a partir da distancia de estabilização dos valores de semivariâncias, estando portanto, associado ao alcance da dependência espacial. O patamar ( $C_1+C_0$ ), associado a contribuição ( $C_1$ ), definem o grau de dependência espacial do modelo, dado pela fórmula  $GDE = (C_1 / (C_1 + C_0)) \times 100$ , sendo considerada fraca se essa razão for  $< 25\%$ , moderada quando a razão estiver entre  $25\%$  e  $75\%$  e forte, se a razão for  $> 75\%$ , (ROBERTSON, 1998).

O critério grau de dependência espacial (GDE), nada mais é do que a razão entre a variância estrutural ( $C_1$ ) e o patamar ( $C_1 + C_0$ ), em porcentagem, é bastante difundida na geoestatística quando precisamos dispor de informações do quanto da variância está sendo explicada pelo modelo ajustado (VIEIRA, 1995).

### 3.4.5 Semivariogramas anisotrópicos e isotrópicos

A anisotropia é uma característica muito freqüente nos elementos da natureza, isto é, a variabilidade ou distribuição espacial de tais elementos ocorre mais intensamente numa direção e menos intensamente em outra. Também pode ser facilmente constatada através da observação dos semivariogramas obtidos para diferentes direções, nos quais apresentam diferenças acentuadas. As convenções direcionais usadas na geoestatística são mostradas na Figura 05. (CAMARGO, DRUCK & CÂMARA, 2004).

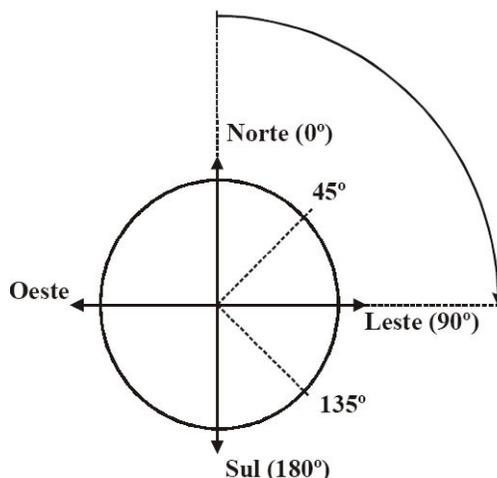


Figura 05 – Convenções direcionais usadas na geoestatística.

Considere os semivariogramas obtidos para as direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , ilustrados na Figura 06. Verifica-se uma similaridade bastante grande entre eles. Esta é a representação de um caso simples e menos freqüente, em que a distribuição espacial do fenômeno é denominada isotrópica. Neste caso, um único modelo é suficiente para descrever a variabilidade espacial do fenômeno em estudo (ANDRIOTTI, 1988).

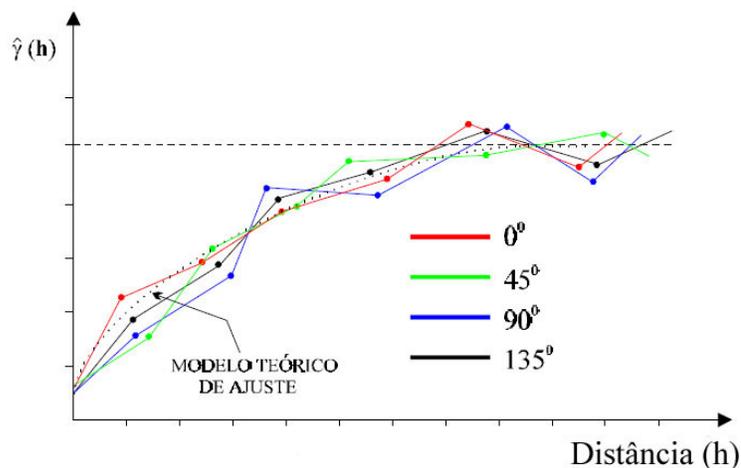


Figura 06 – Representação gráfica de semivariogramas isotrópicos.

Se a anisotropia é observada e é refletida pelo mesmo Patamar (C) com diferentes Alcances (a) do mesmo modelo, então ela é denominada Geométrica.

Considere o semivariograma ilustrado na Figura 07. Os pontos interligados com linhas tracejadas são os semivariogramas experimentais em duas direções ortogonais. O semivariograma que atinge primeiro o patamar (azul) se refere à direção de  $120^\circ$  e o semivariograma com maior alcance (vermelho) se refere à direção de  $30^\circ$ . As linhas sólidas em ambas as direções são os modelos teóricos de ajuste dos semivariogramas experimentais.

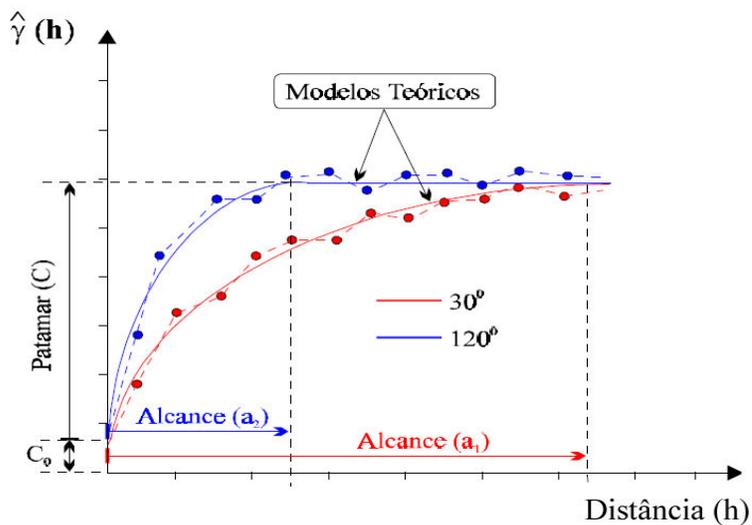


Figura 07 – Representação gráfica de anisotropia geométrica.

Um modo direto de visualizar e calcular os parâmetros (fator e ângulo) da anisotropia geométrica é através do esboço gráfico de uma elipse, calculada através dos alcances obtidos em direções distintas, conforme Figura 08. As convenções que seguem, são as adotadas por Deutsch e Journel (1992). Para o eixo maior da elipse, denominado direção de máxima continuidade, aplica-se o maior alcance ( $a_1$ ). O ângulo da direção de máxima continuidade é definido a partir da direção Norte e no sentido horário. Seu valor corresponde à direção de maior alcance. O eixo menor define o alcance ( $a_2$ ) na direção de menor continuidade, sendo este ortogonal à direção principal.

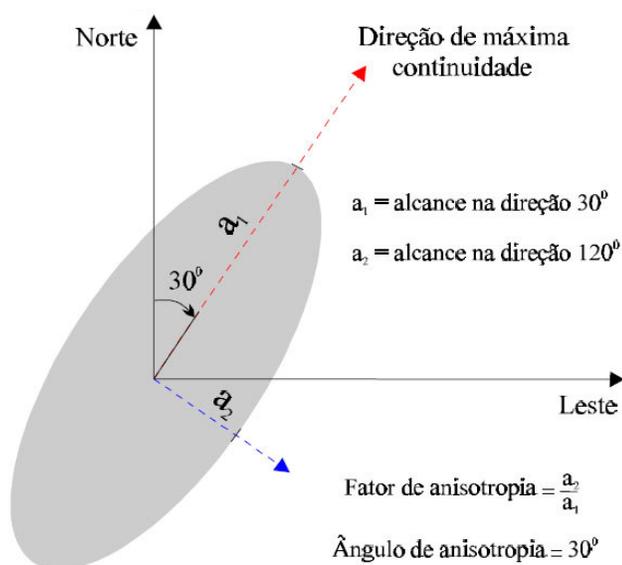


Figura 08 – Representação gráfica da anisotropia geométrica em duas dimensões.  
 FONTE: Modificada de Deutsch e Journel (1992), p. 24.

A anisotropia de distribuição espacial dos dados é um fator relevante na modelagem de variáveis geológicas e é determinada a partir da análise variográfica. Os modelos de krigagem também são determinados na análise variográfica, de acordo com a sua geometria própria, sendo fundamentais na estimativa dos valores desta malha tridimensional (PIRES, 2002).

O fator de anisotropia geométrica é definido como a razão entre o alcance na direção de menor continuidade ( $a_2$ ) e o alcance na direção de maior continuidade ( $a_1$ ). Neste caso, o fator de anisotropia geométrica é sempre menor que a unidade e o ângulo de anisotropia é igual ao ângulo da direção de máxima continuidade.

Existe ainda um outro tipo de anisotropia em que os semivariogramas apresentam os mesmos alcances ( $a$ ) e diferentes patamares ( $C$ ). Neste caso, a anisotropia é denominada “Zonal”. Como a isotropia, a anisotropia zonal também é um caso menos freqüente presente nos fenômenos naturais. O mais comum é encontrar combinações da anisotropia zonal e geométrica, denominada anisotropia combinada.

Considere o semivariograma apresentado na Figura 09. Os pontos interligados com linhas tracejadas correspondem a semivariogramas experimentais em duas direções ortogonais. O semivariograma com maior patamar (azul) refere-se à direção de  $60^\circ$  e o semivariograma com menor patamar (vermelho) refere-se à sua direção perpendicular ( $150^\circ$ ). Os modelos de ajuste aos semivariogramas estão representados por linhas sólidas.

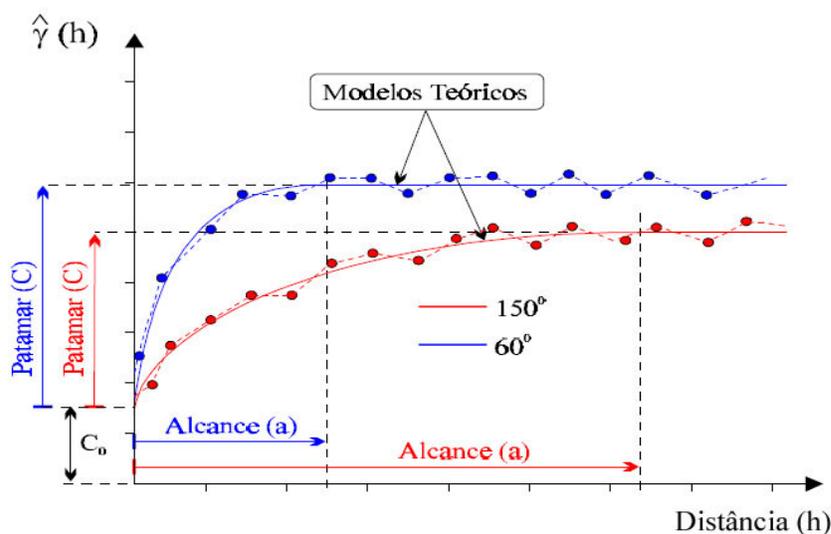


Figura 09 – Representação gráfica de anisotropia combinada.

Segundo Isaaks e Srivastava (1989), citados por Deutsch e Journel (1992, p. 25), a anisotropia zonal pode ser considerada como um caso particular da anisotropia geométrica, ao se supor um fator de anisotropia muito grande. Nesta condição, o alcance implícito na direção de menor continuidade é muito grande. A estrutura do semivariograma é então adicionada somente para a direção de maior continuidade.

A seleção das relações de variograma ou do modelo de krigagem são outras variações de transformação de dados que podem ser necessárias para a geração de estimativas espaciais das variáveis que irão definir uma malha tridimensional, PIRES (2002).

### 3.4.6 Krigagem

Na maioria das vezes o interesse da análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de dependência espacial, desejando-se também prever valores em pontos não amostrados, seja esse um ou mais pontos da área, ou obter uma malha de pontos interpolados, que permitam visualizar o comportamento da variável na região por meio de um mapa de isolinhas ou de superfície. Para se obter esse maior detalhamento da área de estudo, é necessária a aplicação de um método de interpolação, como a krigagem (SILVA JÚNIOR, 2001).

A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a  $1/N$  ( $N$  = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que aqui os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Além disso, a krigagem fornece em média, estimativas não tendenciosas e com variância mínima. Estimativas não tendenciosas significam que, em média, a diferença entre valores estimados e verdadeiros para o mesmo ponto deve ser nula, e a variância mínima significa que estes estimadores possuem a menor variância dentre os estimadores não tendenciosos.

Resumidamente, a krigagem é uma combinação linear que é uma média móvel e leva em conta a estrutura de variabilidade encontrada para aquela variável medida, expressa pelo semivariograma, ou equivalentemente, a função de autocorrelação, e pela localização dos valores conhecidos. Os pontos próximos da

posição a ser interpolada, levam maiores pesos que os mais distantes, (LAMPARELLI, 2001).

Segundo Oliver e Webster (1990), a krigagem engloba um conjunto de métodos de estimação, a saber: krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal, funções intrínsecas de ordem k, co-krigagem, krigagem, entre outros.

O método de krigagem ordinária se distingue dos demais tipos por seu objetivo de minimizar a variância dos erros. Os ponderadores de dados na krigagem são proporcionais às “distâncias estatísticas”, significando que, além de ponderar pelas distâncias euclidianas e entre o ponto a ser estimado e os demais pontos conhecidos, incorporam também a estrutura de variabilidade na região de estimação.

Este trabalho limita-se somente à apresentação da krigagem ordinária e da Co-krigagem, os quais serão descritos nas seções seguintes.

#### 3.4.7 Validação cruzada “*Cross-Validation*”

A etapa de ajuste do modelo ao semivariograma experimental é de grande importância, pois pode influenciar os resultados posteriores. O modelo ajustado deve aproximar-se ao máximo da descrição do fenômeno no campo.

Para Gonçalves *et al.* (1999) a verificação do melhor ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental pode ser realizada pela validação cruzada ou “*Cross-Validation*”. Resumidamente, o processo de validação envolve a reestimação dos valores conhecidos através dos parâmetros ajustados do semivariograma.

Segundo Cressie (1991), a validação cruzada consiste em se retirar do conjunto de dados, alguns valores e estimá-los com base nas observações remanescentes, onde o erro será obtido pela diferença entre os valores preditos e medidos. Com várias repetições, pode-se ter uma estimativa da variabilidade do erro de predição.

A validação cruzada procura verificar o erro reduzido, ou seja, o erro de cada ponto dividido pela variância da krigagem correspondente, tem média nula e variância unitária, além disso, para uma avaliação usual, tem sido usados mapa de

vetores medidos versus estimados e mapas de erros, como os fornecidos por programas como o GeoEAS (ENGLUND & SPARKS, 1988).

Obtido o semivariograma experimental para um conjunto de valores de uma propriedade e ajustado a um modelo matemático, tem-se uma função contínua que descreve a dependência espacial da propriedade, sendo de grande utilidade para a compreensão de vários aspectos da variabilidade do solo, da sua formação, implicações no manejo etc. Trangmar *et al.* (1985) apresentam discussão muito útil sobre essas aplicações. Pode-se dizer que a função de semivariograma descreve uma característica, quantificada e descrita por um modelo matemático, pode ser usada para, talvez, o mais importante recurso da geoestatística: a interpolação por krigagem.

Segundo Vieira, (1995) e Gonçalves *et al.*, (1999), o semivariograma mais bem ajustado é aquele que possui o maior ajuste de dados à reta de 45° (valores reais versus estimados) obtido pela validação cruzada.

### **3.5 Geoprocessamento e silvicultura de precisão**

O Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica, revolucionando as áreas de Cartografia, Análise dos Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional, (CÂMARA & DAVIS, 2005).

Os instrumentos computacionais do Geoprocessamento são chamados de SIG's – Sistemas de Informações Geográficas, os quais permitem a realização de análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e ao criar banco de dados georreferenciados, tornando possível a automatização da produção de documentos cartográficos, (ASSAD & SANO, 2003).

Como informação geográfica considera-se o conjunto de dados cujo significado contém associações ou relações de natureza espacial. Assim um sistema de informação geográfica (SIG) utiliza uma base de dados computadorizada que contém informações espaciais, baseando-se numa tecnologia de armazenamento,

análise e tratamento de dados espaciais, não-espaciais e temporais e na geração de informações correlatas, (TEIXEIRA, MORETTI & CHRISTOFOLETTI, 1992).

O objetivo principal do geoprocessamento é fornecer ferramentas computacionais para que os diferentes analistas determinem as evoluções espacial e temporal de um fenômeno geográfico e as interrelações entre diferentes fenômenos (CÂMARA, MONTEIRO, DRUCK & CARVALHO, 2004).

O entendimento da tecnologia geoprocessamento, requer uma descrição dos diversos tipos de dados utilizados em SIG's e de suas representações computacionais, a exemplo, os mapas temáticos.

O uso das técnicas de geoprocessamento são importantes para a manipulação e integração dos dados temáticos, oferecendo subsídios para a caracterização da área bem como, para o mapeamento e identificação das variáveis que afetam o potencial produtivo e distinção de regiões com menor e maior variabilidade dos atributos estudados, permitindo localizar áreas de menor e maior concentração de cada atributo, além de possibilitarem a análise, em conjunto, de atributos do solo, do relevo e do rendimento dos talhões, o que permite tomada de decisões rápidas e com maior eficiência, minimizando custos, otimizando os recursos e atividades produtivas, acarretando ganho de produtividade e maximização dos lucros.

Os mapas temáticos descrevem, de forma qualitativa, a distribuição espacial de uma grandeza geográfica, como os mapas de pedologia ou de aptidão agrícola de uma região. Estes dados são obtidos a partir do levantamento de campo e inseridos no sistema por digitalização ou, de forma mais automatizada, a partir da classificação de imagens (CÂMARA & MEDEIROS, 2003).

Um SIG necessita armazenar seus atributos e as várias formas de representações gráficas associadas. Devido à sua ampla gama de aplicações, onde estão incluídos temas como agricultura, floresta, cartografia, cadastro urbano e redes de concessionárias (água, energia e telefonia). Os dados da variabilidade espacial podem ser analisados conjuntamente com outros dados (ex. solos, modelos digitais de elevação, mapa de restrições, etc...) para se modelar cenários futuros e avaliar a efetividade do manejo monitorado para cada área. Além disso, as informações podem ser armazenadas e tratadas de maneira flexível e os resultados podem ser documentados num formato mais adequado facilitando a tomada de decisões de maneira rápida e com maior eficiência e controle (PECCOL *et al.*, 1994).

Uma abordagem do gerenciamento localizado das atividades silviculturais é a “Silvicultura de Precisão” que, segundo Vettorazzi & Ferraz (2000), baseiam-se na coleta e análise de dados geoespaciais, viabilizando intervenções localizadas na floresta, com a exatidão e a precisão adequadas. As técnicas de geoprocessamento fornecem subsídios para a identificação e a correlação das variáveis que afetam a produtividade florestal, por meio da sobreposição, cruzamento e regressão, em Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), de mapas digitais do relevo, dos atributos do solo e da capacidade produtiva dos povoamentos.

As principais áreas, dentro do empreendimento florestal, passíveis de serem beneficiadas com o advento da análise espacial, por meio do geoprocessamento no gerenciamento de unidades de produção florestal, possibilitam a geração de um banco de dados, no formato *vetorial* ou *raster*, georreferenciados, de acordo com uma única base cartográfica, o que permite efetuar avaliações, análises espaciais e simulações em função de variáveis como pedologia, declividade, geologia, fertilidade, irrigação, produtividade, entre outros, subsidiando tomadas de decisão técnicas e administrativas, de viabilidade, implantação, condução, colheita, manejo, exploração e monitoramento florestal a serem implantadas, conforme VETTORAZZI & FERRAZ (2000), BECKER (2001) e RIBEIRO (2002).

### 3.6 Localização e caracterização da região de estudo

Quanto a sua localização, o trabalho foi realizado na Fazenda Tupi, estando localizado no Distrito de Rio Branco, município de Nova Prata, RS, na mesorregião nordeste riograndense e na microrregião de Guaporé.

A propriedade pertence a Paludo Agropecuária S.A., empresa do Grupo Vipal, possuindo uma área total de 962 ha, sendo 780 ha cobertos por Floresta Ombrófila Mista (Floresta de Araucária) em estágio médio e avançado de desenvolvimento, 117 ha de erva-mate, 62 ha de campo e 03 ha em infra-estruturas.

Vale ressaltar que a propriedade, é de imensa beleza cênica, devido as riquezas naturais que possui, sendo passagem de três arroios, cujas nascentes situam-se dentro da floresta, possuindo lagos e açudes.

### 3.6.1 Meio físico da região

O diagnóstico do meio físico da região foi realizado através de revisão de literatura, caracterizando os fatores ambientais da região onde está inserida a área de estudo.

#### 3.6.1.1 Características geomorfológicas e relevo

A região de Nova Prata apresenta geomorfologia do tipo aplainado, com altitude ao redor de 750 m. Predomina o relevo ondulado, formado por elevações com declives em dezenas ou centenas de metros, as quais apresentam pequenas protuberâncias que quebram a harmonia do relevo (LEMOS *et alii*, 1973).

A unidade de relevo que ocorre na região é do tipo Planalto das Araucárias, situado na parte intermediária da serra e as declividades médias do local não ultrapassam 30% (HERRMANN & ROSA, 1991).

#### 3.6.1.2 Características geológicas

A região pertence a unidade geotectônica denominada Derrame Fissural Basáltico ou Efusão Basáltica.

Conforme CORDANI & VANDROS (1967), citado por CARRARO et al (1973), os principais constituintes dos basaltos são plagioclásio (labradorita) e piroxênos (anonita e nioanonita); os acessórios mais comuns são titanomagnetita e apatita. Ocasionalmente ocorre olivina, anfibólio e biotita. Quartzo, feldespato potássico, cloritas e serpentinas são constituintes normais da matriz, assim como vidro de composição variada. A composição química das rochas basálticas não é diferenciada e seu conteúdo de elementos traços, identificam-as com lavas toleíticas.

O principal vulcanismo ocorreu na parte média do cretáceo inferior (120-130 milhões de anos) tendo, porém, as principais manifestações ocorridas no jurássico superior ou mesmo antes.

### 3.6.1.3 Características dos solos

Os solos da região são enquadrados na Unidade de Mapeamento Durox, classificados como Latossolo Húmico Distrófico Álico, segundo BRASIL (1973).

Predominam nesta unidade os solos profundos (mais de 200 cm de espessura), bem drenados, de coloração avermelhada, argilosos, compactos, desenvolvidos sobre rochas básicas.

Quimicamente são ácidos, com saturação de bases baixa e elevadas trocas de matéria orgânica e alumínio trocável.

Estes solos apresentam horizonte A, B e C com as seguintes características morfológicas:

a) Horizonte A espesso (mais de 40 cm), coloração bruno-avermelhada-escuro no matiz 2,5 YR, argiloso pesado (mais de 60% de argila) e estrutura granular fraca a moderadamente desenvolvida. É poroso sendo muito duro quando seco e firme quando úmido;

b) Horizonte B com cerca de 150 cm de espessura, coloração vermelha-escuro ou vermelha nos matizes 2,5 YR e 10 R. Textura argilosa (mais de 70% de argila) e estrutura em blocos subangulares fraca a moderadamente desenvolvida, possuindo cerosidade fraca e pouca entre os agregados. É poroso, de consistência muito dura quando seco e friável quando úmido, ligeiramente plástico e pegajoso quando molhado;

c) Horizonte C formado pelo basalto decomposto, pouco intemperizado.

Como inclusões ocorrem: Solos da associação Ciríaco-Charrua, principalmente nas áreas mais declivosas; solos Guassupi associados indiscriminadamente; solos hidromórficos indiscriminados, localizados nas depressões do relevo, com topografia plana; afloramento de rochas visíveis em várias elevações quebrando a monotonia da elevação.

#### 3.6.1.4 Características regionais do clima

Segundo a classificação climática de Koppen, o Rio Grande do Sul se enquadra na zona fundamental temperada e no tipo temperado úmido (MORENO, 1961).

De acordo com o autor, a região em estudo apresenta a variedade climática do tipo "CfbI", caracterizada pela ocorrência de chuvas durante todos os meses do ano. Possui a temperatura do mês mais quente inferior a 22° C e a do mês mais frio oscilando entre -3 e 18° C. Durante o ano, o mês mais quente é janeiro com uma temperatura média de 20,3° C e o mês mais frio é julho com uma temperatura média de 11,3° C.

As precipitações são regularmente distribuídas em todos os meses do ano, sendo o mês de agosto o mais chuvoso com 183,8 mm e maio o mais seco com 84,4 mm. A precipitação média anual é de 1.628,8 mm.

Os ventos predominantes na região são do nordeste, com umidade relativa do ar elevada, variando de 75 a 80% e a insolação média anual é de 2.362,3 horas.

#### 3.6.1.5 Características hidrográficas

A bacia do Taquari-Antas abrange uma superfície de 26.277,09 km<sup>2</sup>. Localizam-se em partes das regiões do Planalto Médio, Campos de Cima da Serra, Encosta Superior do Nordeste e Encosta Inferior do Nordeste. Limita-se ao norte com a bacia do Apuae-Inhandaua; ao sul com as bacias do Caí e Baixo Jacuí; a oeste com a bacia do Alto Jacuí e Pardo; e a leste com o Estado de Santa Catarina.

É composto pelos Rios Taquari, das Antas, Buriti, Tainhas, Camisas, da Telha, Ituim, Turvo, da Prata, Carreiro, Guaporé, Forqueta e o Arroio de Fão.

O Rio Taquari e seu principal formador, o Rio das Antas, oriundo do extremo nordeste, recebe em sua bacia grande volume de água proveniente de índices pluviométricos superiores a 2.000 mm. Possui declives muito acentuados, com seu

leito escavado em vales apertados, nas regiões mais elevadas do Estado. As nascentes do Taquari-Antas estão a mais de 1.200 m de altitude (VIEIRA, 1984).

A área em estudo localiza-se próximo ao rio da Prata, afluente do rio Turvo, que juntamente com o rio das Antas forma o rio Taquari, afluente maior do rio Jacuí.

### 3.6.2 Meio biológico da região

O diagnóstico do meio biológico da região foi realizado através de revisão de literatura e de outros trabalhos acadêmicos realizados na mesma propriedade, caracterizando os fatores ambientais da região onde está inserida a área de estudo.

#### 3.6.2.1 Características da vegetação

A vegetação natural da região pertence ao tipo fitogeográfico "Mata de Araucária ou Pinheiro Brasileiro", segundo RAMBO (1956), HUECK (1972), KLEIN (1960), REITZ & KLEIN (1966), LINDMAN & FERRI (1974), ou "Floresta Ombrófila Mista", com o domínio de Myrtaceas e Nectrandas no sub bosque e no estrato superior destaca-se a araucaria, VELOSO *et al* (1991).

Segundo HUECK (1972) e KLEIN (1960) a Mata de Araucária, no Brasil, ocorre nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Sul de São Paulo e em manchas isoladas nos Estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, atingindo ainda a Província de Misiones na Argentina e Oeste do Paraguai.

O estrato herbáceo depende muito da umidade do solo, mas em geral, ciperáceas e gramíneas formam a massa principal da vegetação misturada com representantes de outras famílias, especialmente compostas por rubiáceas, labiáceas, poligaláceas, solanáceas, verbenáceas e oxalidáceas. Entre as epífitas, são freqüentes as espécies do gênero *Peperomia*, além de alguns representantes de cactos do gênero *Rhipsalis*, que vivem sobre árvores (HUECK, 1972).

A vegetação característica desta bacia é composta pela Floresta Ombrófila Mista, Savana e Floresta Estacional Decidual.

## **4 MATERIAIS E METODOLOGIA APLICADA**

### **4.1 Materiais e equipamentos utilizados**

Foram utilizados para realização do presente trabalho os seguintes materiais e equipamentos:

- Microcomputador Duron 1.8, 40 GB, 512 MÉMORIA RAN;
- Fotografias aéreas da propriedade (mosaico digital);
- GPS de navegação, modelo Garmin 12 XL;
- Mapas topográficos e de talhamento, nas extensões dxf e dwg;
- Marreta, extrator e anéis de Kopecky, para coleta de análises físicas;
- Pá de pequeno porte para coleta de solo;
- Cavadeira e pá para abertura das cavas, para realização das coletas de solo;
- Sacos plásticos e de papel para recolhimento das amostras de solo;
- Trena, material de escritório, entre outros;
- Aplicativos computacionais relacionados à cartografia digital, a estatística, a geoestatística e a sistemas de informações geográficas: CR – CAMPEIRO 5, Microsoft Office Excel 2003, Microsoft Office Word 2003, VARIOWIN® 2.21 – “Software for Spatial Data Analysis”, GSLIB 90 – “Geostatistical Software Library” e SURFER® versão 8.0 (2002).

### **4.2 Metodologia aplicada**

A Fazenda Tupi possui uma área de 116,52 ha de erva-mate plantada, num total de 14 glebas. O presente trabalho foi conduzido na gleba denominada “Campo Novo”, com uma área de 36 ha, entre as coordenadas UTM 440177E, 440877E, 6825400N e 6826200N, *Datum* SAD 69, visando à maior área de plantio, com o maior número de pontos amostrais.

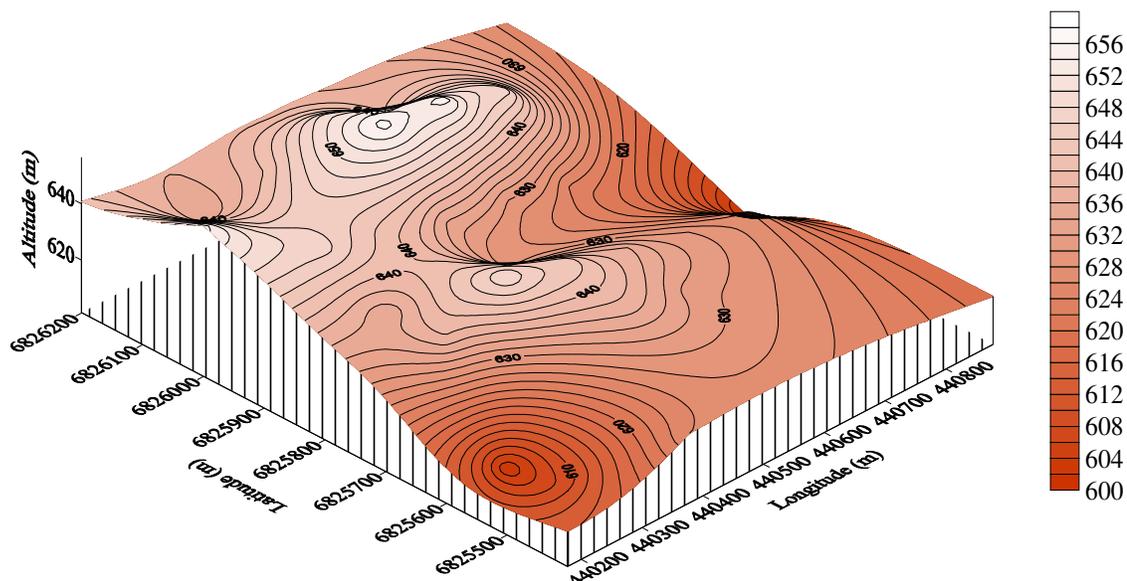


Figura 10 – Detalhe do relevo na área de instalação do experimento (gleba), denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, Nova Prata, RS.

#### 4.2.1 Plano de amostragem utilizado

Foi instalada na referida gleba uma grade regular totalizando 36 pontos amostrais. Para materialização dos pontos de amostra foram empregadas estacas de madeira com marcas indicativas. A instalação da grade foi realizada com emprego do GPS de navegação.

Para locação dos pontos amostrais na presente área, fez-se o uso do programa CR – CAMPEIRO 5, para realização da amostragem sistemática, o qual consiste em subdividir a área total em várias células, com área igual e usualmente quadradas. Foram utilizadas células com área total de 10.000 m<sup>2</sup> (100m X 100m).

Com o emprego do GPS, foram encontrados os valores de coordenadas, no sistema UTM, atributos x e y de cada ponto amostral, conforme tabela “grade de amostragem”, no anexo 01. Abaixo, na Figura 11, a distribuição dos pontos amostrais e a grade de amostragem na área de estudo, onde a lista dos pontos de amostragem com as devidas coordenadas encontram-se no final do presente trabalho (Apêndice).

Coordenadas UTM: 440177E - 6825400N; 440877E - 6826200N – Datum: SAD 69.

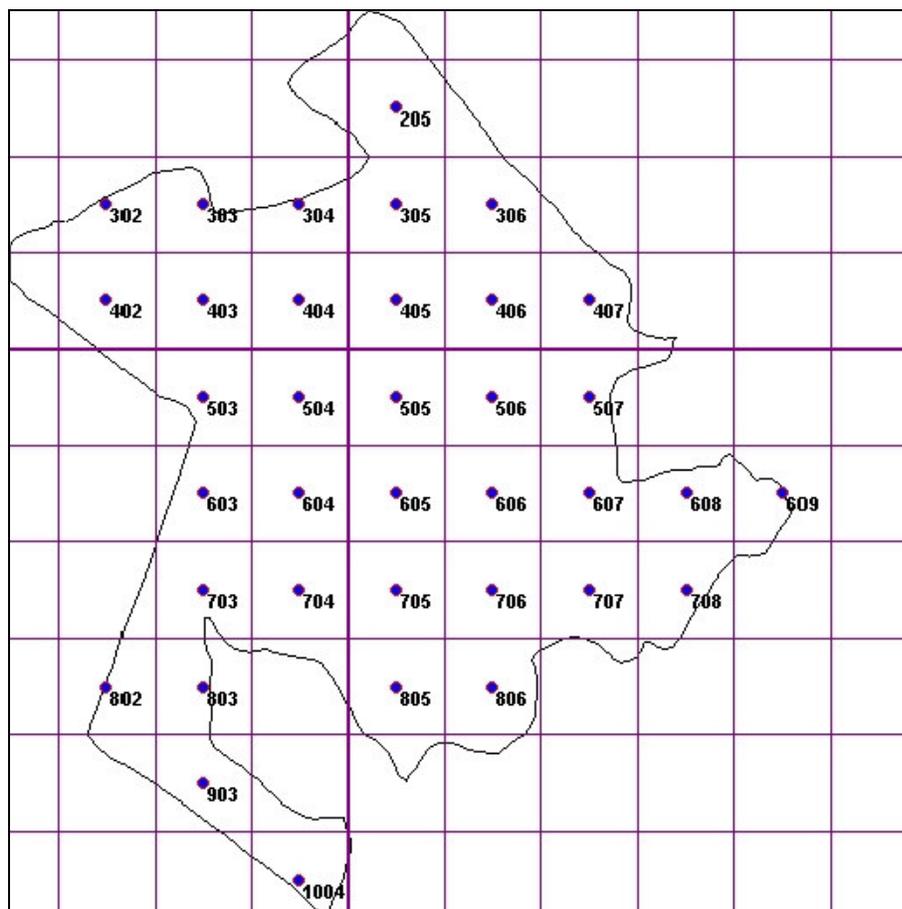


Figura 11 – Distribuição dos pontos amostrais na área de estudo sobre malha de amostragem.

A área do trabalho é heterogênea em relação ao relevo, com diferença de nível acentuada, observados aos atributos do solo, tanto os físicos como os químicos.

#### 4.2.2 Coleta e obtenção dos dados

Para realização da coleta e preparo dos dados, no programa CR – CAMPEIRO 5, foram manipuladas as informações referentes a construção do mapa base, com informações do talhamento e topografia da gleba e realização da grade

amostral. O mesmo programa serviu como ferramenta para interface com o GPS de navegação, usado para delimitação da área e busca dos pontos amostrais.

Com o emprego do GPS de navegação, foram levantados os valores das coordenadas planas, em metros, no sistema UTM, ou seja, os atributos (coordenadas) "X" e "Y" de cada ponto amostral e as cotas altimétricas, atributo (altitude) "Z", com uso de altímetro (barômetro).

Primeiramente, foram coletadas as amostras de solo para análise física, com a utilização de extrator e os anéis de Kopecky, em número de 05 anéis por ponto amostral, nas profundidades de 0-10 cm; 10-20 cm; 20-30 cm; 30-40 cm e 40-50 cm de profundidade.

No presente trabalho, serão discutidas e apresentados resultados para as profundidades 0 a 20 cm de profundidade, para as análises físicas.

Os atributos físicos analisados foram as seguintes variáveis: porcentagem de areia grossa, areia fina, silte e argila, além do estudo do tamanho de partículas, nas variáveis densidade de solo, densidade de partícula e porosidade total.

Posteriormente, foram coletadas as amostras de solo para realização da análise química, com utilização de uma pequena pá, na profundidade de 0-20 cm. Para isso, se valeu dos estudos realizados por GONÇALVES *et al* (1990) e MELO (1994), onde na amostragem de solos, em áreas plantadas com *Eucalyptus sp.*, na camada mais superficial do solo, é sugerida a análise das variações nos teores dos nutrientes na planta e, conseqüentemente, nas variações de produtividade obtidas. WITSCHORECK *et al* (2003) estimaram a biomassa contida em raízes finas numa população de *Eucalyptus urophylla S.T.Blake*. Chegaram a conclusão que a maior concentração da biomassa (57,9%) está presente nos primeiros 20 cm do solo.

Os atributos químicos analisados foram: argila, textura, pH (H<sub>2</sub>O), fósforo, potássio, matéria orgânica, alumínio, cálcio, magnésio, alumínio trocável, capacidade de troca de cátions efetiva, capacidade de troca de cátions à pH<sup>7</sup> e saturação de bases.

As análises foram realizadas pelos Laboratórios de Física e Química do Solo, do Departamento de Solos do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria. As análises laboratoriais bem como os procedimentos de coleta das amostras, foram realizadas de acordo com recomendações de TEDESCO *et al* (1995) e EMBRAPA (1997).

#### 4.2.3 Análise descritiva e exploratória dos dados

Os dados obtidos para cada variável foram armazenados em planilhas eletrônicas com o posicionamento geográfico de cada amostra. Estes dados foram utilizados na análise estatística, geoestatística e no mapeamento das variáveis estudadas.

Inicialmente foi analisado o comportamento das variáveis dos atributos físicos e químicos do solo, elaborando uma tabela com o resumo estatístico, através do aplicativo computacional Microsoft Office Excel 2003, obtendo os seguintes parâmetros estatísticos: média ( $\bar{X}$ ), variância ( $S^2$ ), desvio padrão ( $S$ ), valores mínimos (Min.), mediana (Mi), valores máximos (Max.) e coeficiente de variação (CV%).

Após a organização do banco de dados em tabelas do Microsoft Office Excel, os mesmos foram transformados em Bloco de Notas, para exportá-los em arquivos com extensão *arquivo\*.dat*, para serem exportados para o programa VARIOWIN® 2.21 – “Software for Spatial Data Analysis”, de autoria de PANATIER (1996), a fim de realizar a análise variográfica das variáveis estudadas, bem como definir o modelo matemático de melhor ajuste.

#### 4.2.4 Análise geoestatística e exploratória dos dados

Após a realização da análise estatística descritiva, no aplicativo computacional Microsoft Office Excel 2003, o banco de dados foi transformado em *arquivo\*.dat*, a fim de ser exportado para o aplicativo computacional geoestatístico.

O programa VARIOWIN® 2.21 é composto por mais quatro programas, *arquivos\*.exe*, os quais são executados isoladamente. São eles o Prevar2D, utilitário que constrói a matriz de distâncias para todos os possíveis pares de dados existentes nos arquivos *arquivo\*.dat*; o Vario2D, utilitário que usa a extensão *arquivo\*.pcf*, originado pelo Prevar2D, no qual realiza a variografia exploratória em 2D; o programa Model, responsável pela execução, de modo interativo o ajuste variográfico a um modelo teórico, fazendo a modelagem para a anisotropia

geométrica e zonal e o programa Gdisplay, que permite a exibição do arquivo com dados dispostos, num arranjo reticulado em extensão *arquivo\*.grid*, na forma de mapa em *pixels*.

A geoestatística foi utilizada com o objetivo de definir o melhor modelo de variabilidade espacial dos atributos estudados, realizado os semivariogramas, onde para cada atributo (variável) estudado, foram realizados os devidos cálculos das semivariâncias e a representação dos modelos de semivariogramas, mostrada por meio de gráficos da semivariância, em função da distância (alcance).

As causas para variabilidade espacial na área em estudo foi determinada a partir dos modelos de semivariogramas e seus parâmetros, principalmente o efeito pepita e a distância (alcance) da dependência espacial.

No programa VARIOWIN® 2.21 foi realizado o cálculo e o ajuste dos semivariogramas, de cada variável estudada, nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.

Após a realização da análise variográfica, com a escolha do modelo e o melhor ajustamento, os mesmos foram exportados para um terceiro programa, para realização da validação cruzada, buscando a correlação matemática entre os pontos krigados.

Assim, para realização da validação cruzada e obtenção dos valores de correlação  $R^2$  (%), foi utilizado o GSLIB 90 – “Geostatistical Software Library”, no qual foi necessário ter a disposição *arquivos\*.exe* e *arquivos\*.par*, e o mesmo banco de dados utilizado no VARIOWIN® 2.21, *arquivo\*.dat*. Na secção modelagem do variograma, foi utilizado os dados gerados quanto ao ajustamento da variável analisada, ou seja, os ângulos de maior e menor distância (alcance), o patamar e o efeito pepita encontrado, além do modelo matemático sugerido, no programa anterior, realizando a validação cruzada e obtendo o valor de correlação ( $R^2\%$ ) em cada variável estudada, conforme disposto nas discussões do presente trabalho.

Cabe ressaltar que a técnica de validação cruzada, fornece o coeficiente de determinação do modelo de regressão ( $R^2$ ), como resultado das estimativas, ajustando uma reta que passa entre as observações reais e estimadas, gerando uma nova tabela que permite visualizar os valores reais, os valores estimados, a variância estimada e o erro estimado.

Os valores do modelo de regressão ( $R^2$ ) variam com valores entre 0 e 1, e assim, quanto mais próximo de 1 o resultado deste valor no ajuste do

semivariograma, mais eficiente é o modelo para representar o fenômeno estudado (RIBEIRO JÚNIOR, 1995).

Para a confecção dos mapas de distribuição e visualização da espacialidade das variáveis estudadas, os arquivos resultantes anteriormente no processo de interpolação por krigagem e validação cruzada, foram exportados para o aplicativo computacional gráfico SURFER® 8.0 (2002), no qual foram elaborados os mapas de isolinhas, em *grid*, bidimensional.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os resultados para as variáveis físico-químicas estudadas, em número de 20 (vinte) variáveis, inicialmente pela análise estatística realizada no aplicativo computacional Microsoft Office Excel 2003 e a análise geoestatística variográfica, apresentando os modelos escolhidos e os semivariogramas experimentais ajustados na direção de maior alcance espacial. Por último, a confecção dos mapas de isolinhas, originados da realização de krigagem e validação cruzada, para as variáveis estudadas, em plantios de erva-mate, na gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata, RS.

### **5.1 Análise estatística descritiva dos dados**

A análise estatística descritiva dos dados foi realizada para cada uma das variáveis estudadas, obtendo-se os valores de média, variância, desvio padrão, valores mínimos e máximos, mediana e coeficiente de variação, como mostram as Tabelas 01 e 02.

Com os valores mínimos e máximos dos parâmetros estudados, podem-se observar os intervalos demonstrados pelas variáveis no presente estudo.

Também foi possível presenciar no estudo, como na maioria dos dados presentes na natureza, tanto os resultados de desvio padrão bem como os resultados obtidos na variância, apresentaram grande amplitude de variação para a maioria dos parâmetros analisados, concordando com o exposto por LANDIM (1998).

Os atributos químicos analisados foram: argila, textura, pH, fósforo, potássio, matéria orgânica, alumínio, cálcio, alumínio trocável, capacidade de troca de cátions efetiva, capacidade de troca de cátions à pH<sup>7</sup> e saturação de bases, conforme dispostas nas Tabelas 01 e 02.

**Tabela 01 – Estatística descritiva realizada para as variáveis químicas: argila, textura, pH, fósforo, potássio e matéria orgânica.**

*Parâmetros Estatísticos	Atributos químicos					
	Argila (%)	Textura (%)	pH (H <sub>2</sub> O)	P (mg/dm <sup>3</sup> )	K (mg/dm <sup>3</sup> )	M.O (%)
n	36	36	36	36	36	36
$\bar{X}$	53.58333	1.833333	5.047222	9.380556	96.83333	5.1
S <sup>2</sup>	191.05	0.542857	0.484849	143.5713	3708.2	0.774286
S	13.82208	0.736788	0.696311	11.98213	60.89499	0.879935
Min.	29	1	4	2.2	32	3.4
Mi	56.5	2	4.8	5.3	74	5.1
Max.	74	3	7.2	56.2	200	7.6
CV (%)	25.79	40.19	13.79	127.73	62.89	17.25

\* Parâmetros estatísticos: média ( $\bar{X}$ ), variância (S<sup>2</sup>), desvio padrão (S), valores mínimos (Min.), mediana (Mi), valores máximos (Max.) e coeficiente de variação (CV%).

**Tabela 02 – Estatística descritiva realizada para as variáveis químicas: alumínio, cálcio, magnésio, H+Al, CTC efetiva e CTC pH 7 e saturação de bases.**

*Parâmetros Estatísticos	Atributos químicos						
	Al (cmol/dm <sup>3</sup> )	Ca (cmol/dm <sup>3</sup> )	Mg (cmol/dm <sup>3</sup> )	H+Al (cmol/dm <sup>3</sup> )	CTC efet (cmol/dm <sup>3</sup> )	CTC pH7 (cmol/dm <sup>3</sup> )	S.Bases (%)
n	36	36	36	36	36	36	36
$\bar{X}$	1.488889	4.963889	2.472222	10.36667	9.172222	18.05	43.91667
S <sup>2</sup>	2.18273	11.73266	2.439778	36.20629	13.85521	10.85343	713.3929
S	1.477407	3.425297	1.561979	6.017166	3.722258	3.294454	26.70942
Min.	0	0.6	0.2	1.2	5.2	12.5	5
Mi	1	4	2.2	10.3	7.65	17.6	40
Max.	4.5	14.4	5.6	24.4	19.8	27.8	94
CV (%)	99.23	69.00	63.18	58.04	40.58	18.25	60.82

\* Parâmetros estatísticos: média ( $\bar{X}$ ), variância (S<sup>2</sup>), desvio padrão (S), valores mínimos (Min.), mediana (Mi), valores máximos (Max.) e coeficiente de variação (CV%).

Os atributos pH(H<sub>2</sub>O) e matéria orgânica (M.O), na Tabela 01, apresentaram menor variância na distribuição dos dados, e assim, menores valores de coeficientes de variação (CV%).

O atributo fósforo (P) apresentou maior variabilidade de coeficiente de variação, apresentando CV%=127,73, seguido do alumínio (Al), com CV%=99,23 e do cálcio (Ca), com CV%=69,00.

Abaixo, na Tabela 03, os atributos físicos analisados a fim de avaliar a distribuição do tamanho de partículas. São eles os atributos porcentagem de areia grossa, porcentagem de areia fina, porcentagem de silte e porcentagem de argila.

**Tabela 03 – Estatística descritiva realizada para distribuição do tamanho de partículas (%), para as variáveis físicas areia grossa (2-0,2mm), areia fina (0,2-0,05mm), silte (0,05-0,002mm) e argila (<0,002mm).**

* Parâmetros Estatísticos	Atributos físicos			
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
n	36	36	36	36
$\bar{X}$	4.736627	7.147227	28.93231	59.18865
Mi	4.488762	6.719115	29.45552	59.16723
S	1.723649	2.547525	4.858125	7.294581
S <sup>2</sup>	2.970965	6.489882	23.60138	53.21091
Min	1.908195	2.836507	18.09402	38.54435
Max	9.636087	16.36605	37.7	71.02147
CV (%)	36.39	35.64	16.79	12.32

\* Parâmetros estatísticos: média ( $\bar{X}$ ), mediana (Mi), desvio padrão (S), variância (S<sup>2</sup>), valores mínimos (Min.), valores máximos (Max.) e coeficiente de variação (CV%).

Na Tabela 04, o atributo físico preponderante foi a densidade. Neste, encontra-se analisados as variáveis densidade de solo (DS), densidade de partícula (DP) e porosidade total (PoT).

**Tabela 04 – Estatística descritiva realizada para as variáveis físicas densidade de solo (DS), densidade de partícula (DP) e porosidade total (PoT), nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm.**

* Parâmetros Estatísticos	Atributos físicos		
	DS (g/cm <sup>3</sup> )	DP (g/cm <sup>3</sup> )	PoT (%)
n	36	36	36
$\bar{X}$	1.849539	4.327833	95.49097
Mi	1.93	5.02	95.96017
S	1.097022	2.436277	51.99596
S <sup>2</sup>	1.203458	5.935443	2703.579
Min	0.845873	2.5	39.2093
Max	7.066688	15.934	338.2139
CV (%)	59.31329	56.29321	95.49097

\* Parâmetros estatísticos: média ( $\bar{X}$ ), mediana (Mi), desvio padrão (S), variância (S<sup>2</sup>), valores mínimos (Min.), valores máximos (Max.) e coeficiente de variação (CV%).

Na estatística descritiva, quanto aos atributos físicos, realizada para distribuição do tamanho de partículas (%), a variável areia grossa apresentou maior variabilidade, com CV%=36,39, seguido da variável areia fina, com CV%=35,64.

Quanto a avaliação dos atributos físicos densidade, o de maior variabilidade, apresentou o atributo porosidade total (PoT%), com CV%=95,49, onde as demais variáveis densidade, de solo e partícula, também apresentaram grande variabilidade, com CV%=59,31 e CV%=56,29, respectivamente.

## 5.2 Análise espacial dos dados

Os resultados e a discussão da análise espacial dos dados são apresentados separadamente, a fim de obter melhor compreensão dos dados, subdivididos em análise geoestatística teórica e análise variográfica, com visualização dos gráficos de ajustamento do modelo utilizado.

### 5.2.1 Análise geoestatística

As análises espaciais foram executadas pelos módulos PREVAR2D e VARIO *with* PCF, ambos do aplicativo computacional VARIOWIN® 2.21, conforme descrito por LANDIM (2004).

Na análise da superfície de tendência, fornecida pelas ferramentas dispostas no próprio programa, foi observada evidente aparência anisotrópica para os atributos do solo estudados, segundo parâmetros estabelecidos por ZIMMERMAN (1993). *apud* ZIMBACK (2001).

Para o ajuste e escolha do modelo matemático representativo, foi realizado o método de ajuste visual, denominado “a sentimento”, tendo como base a visualização e ajuste manual para melhor determinação do mesmo, no que foi possível também a realização dos mesmos através do método de avaliação das discrepâncias obtidas nos valores.

Os parâmetros obtidos pela análise variográfica encontram-se dispostos nas Tabelas 05, 06, 07 e 08.

A escala de trabalho empregada neste estudo, considerando a distância entre os pontos amostrais na malha (*grade*), mostrou-se eficiente, para detectar a dependência espacial para as variáveis estudadas.

Para ajuste dos semivariogramas, nas variáveis químicas estudadas, o modelo esférico e o modelo gaussiano foram escolhidos na maior parte das análises, devido a auto-correlação ou dependência espacial nestes atributos.

A Tabela 05 resulta do ajuste dos modelos de semivariogramas propostos, apresentando o resumo dos parâmetros geoestatísticos (efeito pepita, alcance, patamar e GDE), para as variáveis químicas argila, textura, pH(H<sub>2</sub>O), fósforo, potássio e matéria orgânica, na área experimental.

**Tabela 05 – Modelos se semivariograma ajustados aos dados experimentais para os atributos argila, textura, pH, fósforo, potássio e matéria orgânica.**

Atributos	Semivariograma							
	Modelos	Direções	Co	Co+C <sub>1</sub>	a (m)	IDE (%) [C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> ).100]	GDE	R <sup>2</sup> (%)
Argila (%)	Esférico	135°	62	232	315	26.72	Moderada	0.645
Textura (%)	Gaussiano	135°	0.20	0.58	421	34.48	Moderada	0.699
pH (H <sub>2</sub> O)	Gaussiano	90°	0.20	0.60	290	33.33	Moderada	0.547
P (mg/dm <sup>3</sup> )	Gaussiano	90°	65	148	294	43.91	Moderada	0.638
K (mg/dm <sup>3</sup> )	Exponencial	135°	1705	3550	381	48.02	Moderada	0.525
M.O (%)	Esférica	90°	0.40	0.85	360	47.05	Moderada	0.555

Parâmetros do Semivariograma: C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> – Contribuição; a – amplitude; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; IDE (%) = Índice de Dependência Espacial em Porcentagem; GDE = Grau de Dependência espacial e R<sup>2</sup>(%) – Coeficiente de determinação em porcentagem.

### 5.2.2 Análise variográfica dos atributos químicos argila, textura, pH(H<sub>2</sub>O), fósforo, potássio e matéria orgânica.

Foram ajustados os semivariogramas experimentais anisotrópicos para cada variável estudada, nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.

Após realização dos ajustes, são apresentados no presente trabalho os semivariogramas de maior amplitude, ou seja, de maior continuidade amostral (autocorrelação) obtida.

### 5.2.2.1 Variável argila

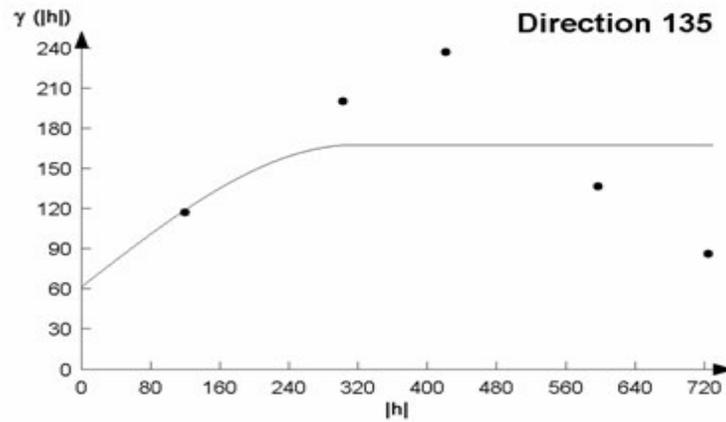


Figura 12 – Semivariograma experimental da variável argila no solo (%) para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.2.2 Variável textura

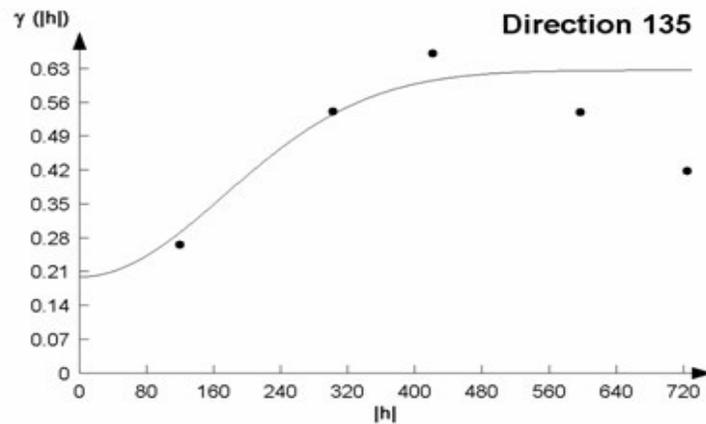


Figura 13 – Semivariograma experimental da variável textura do solo (%) para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.2.3 Variável pH (H<sub>2</sub>O)

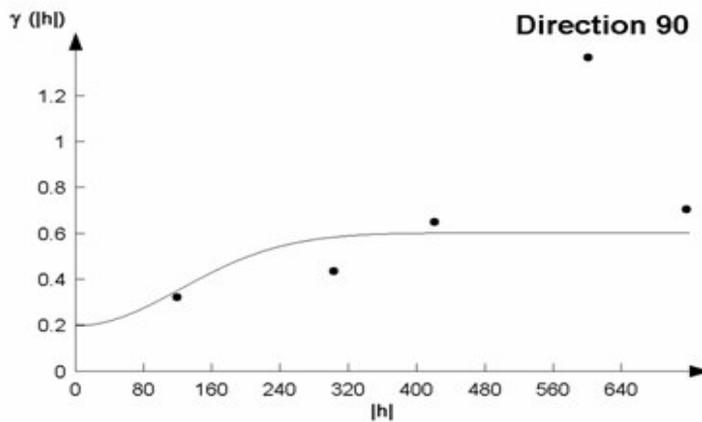


Figura 14 – Semivariograma experimental da variável pH (H<sub>2</sub>O), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.2.4 Variável fósforo P

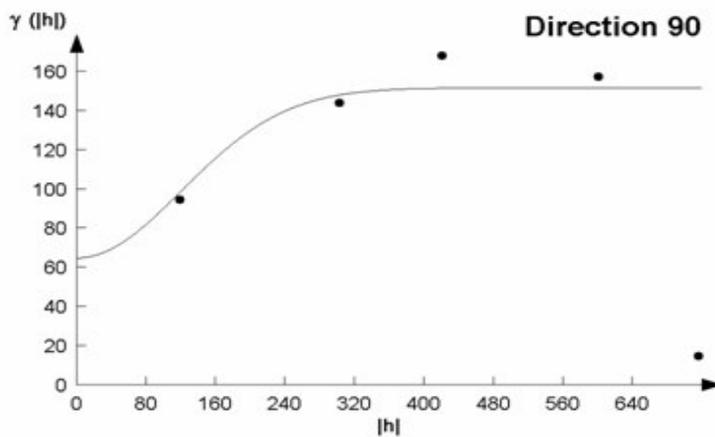


Figura 15 – Semivariograma experimental da variável fósforo (mg/dm<sup>3</sup>), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.2.5 Variável potássio K

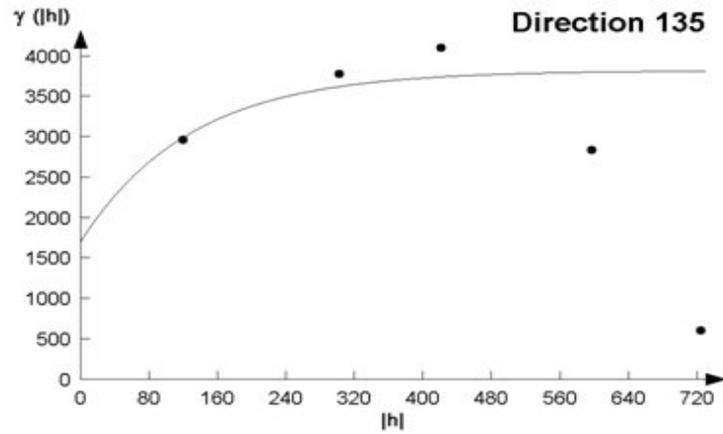


Figura 16 – Semivariograma experimental da variável potássio ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.2.6 Variável matéria orgânica

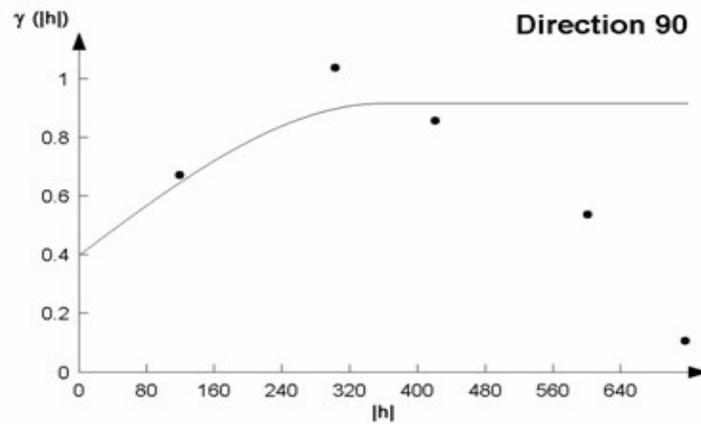


Figura 17 – Semivariograma experimental da variável matéria orgânica no solo (%), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

A variável argila (%) apresentou melhor ajuste com o modelo matemático esférico, obtendo uma autocorrelação entre a observação até a distância (amplitude) de 315 m, apresentando-se moderada dependência espacial, segundo critério de Cambardella *et al* (1994).

Também apresentando melhor ajuste com o modelo matemático esférico, apresentou-se a variável matéria orgânica (M.O), com autocorrelação a uma distancia de 360 m, com dependência espacial moderada.

Os atributos variáveis textura, pH (H<sub>2</sub>O) e fósforo, apresentaram melhor ajuste com o modelo matemático Gaussiano, com direção de 135° para variável textura e direção de 90° para as variáveis pH (H<sub>2</sub>O) e fósforo.

Entre os atributos estudados na Tabela 05, a variável textura encontrou melhor coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), explicando 69,9% da variabilidade na área de estudo, mostrando melhor precisão para as estimativas de krigagem desejadas.

Pode-se também observar que os atributos apresentados na Tabela 05 apresentaram dependência espacial moderada e coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) superiores a 50%, embora os resultados de maior confiabilidade foram apresentados pelas variáveis argila, textura e fósforo, com R<sup>2</sup> superior a 60%.

A Tabela 06 resulta do ajuste dos modelos de semivariogramas propostos, apresentando o resumo dos parâmetros geoestatísticos (efeito pepita, alcance, patamar e GDE), para as variáveis químicas alumínio, cálcio, magnésio, H+Al, CTC efetiva e CTC pH<sup>7</sup> e saturação de bases.

**Tabela 06 – Modelos se semivariograma ajustados aos dados experimentais para os atributos alumínio, cálcio, magnésio, H+Al, CTC efetiva e CTC pH<sup>7</sup> e saturação de bases.**

Atributos	Semivariograma							
	Modelos	Direções	Co	Co+C <sub>1</sub>	a (m)	IDE (%) [C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> )].100	GDE	R <sup>2</sup> (%)
Al (cmol/dm <sup>3</sup> )	Esférico	90°	0.85	2.4	373	35.41	Moderada	0.705
Ca (cmol/dm <sup>3</sup> )	Gaussiano	0°	6.12	9.5	359	64.42	Moderada	0.841
Mg (cmol/dm <sup>3</sup> )	Esférico	90°	1.2	2.2	346	54.54	Moderada	0.554
H+Al (cmol/dm <sup>3</sup> )	Esférico	135°	15	38	276	39.47	Moderada	0.602
CTCefet (cmol/dm <sup>3</sup> )	Gaussiano	90°	6	12	347	50	Moderada	0.742
CTC pH <sup>7</sup> (cmol/dm <sup>3</sup> )	Esférico	90°	6.1	11.5	282	53.04	Moderada	0.113
S.Bases (%)	Esférico	135°	350	610	435	57.37	Moderada	0.548

Parâmetros do Semivariograma: C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> – Contribuição; a – amplitude; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; IDE (%) = Índice de Dependência Espacial em Porcentagem; GDE = Grau de Dependência Espacial e R<sup>2</sup>(%) – Coeficiente de determinação em porcentagem.

### 5.2.3 Análise variográfica dos atributos químicos alumínio, cálcio, magnésio, H+Al, CTC efetiva e CTC pH<sup>7</sup> e saturação de bases.

Da mesma forma que os dados anteriores, a análise variográfica foi realizada com o ajuste dos semivariogramas experimentais anisotrópicos para cada variável estudada, nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.

Após realização dos ajustes, são apresentados no presente trabalho os semivariogramas de maior distância (amplitude), ou seja, que apresentou maior autocorrelação.

### 5.2.3.1 Variável alumínio Al

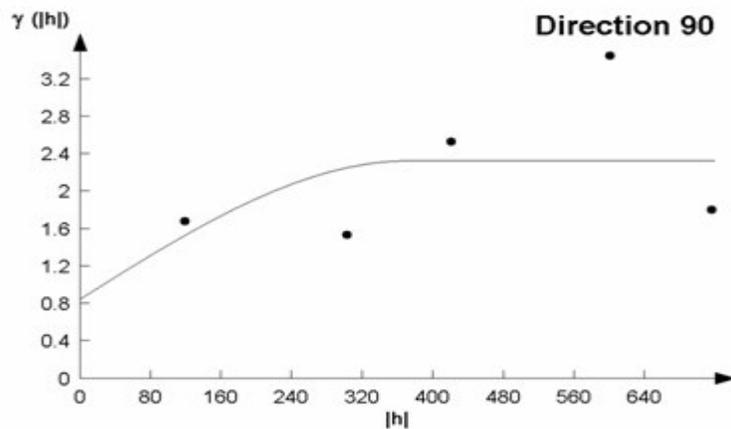


Figura 18 – Semivariograma experimental da variável alumínio no solo (cmol/dm<sup>3</sup>) para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.3.2 Variável cálcio Ca

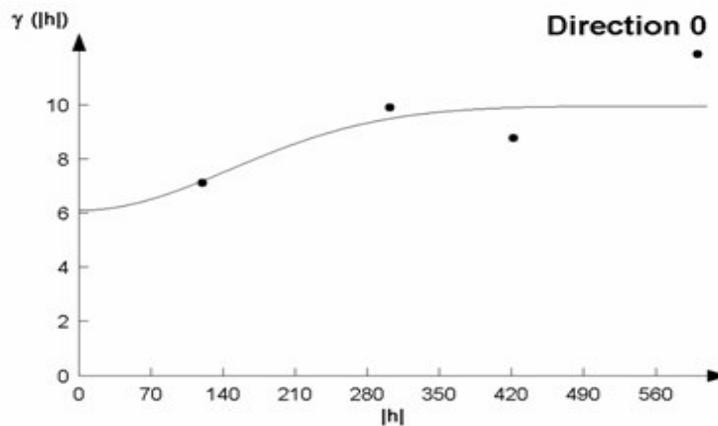


Figura 19 – Semivariograma experimental da variável cálcio no solo (cmol/dm<sup>3</sup>) para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.3.3 Variável magnésio Mg

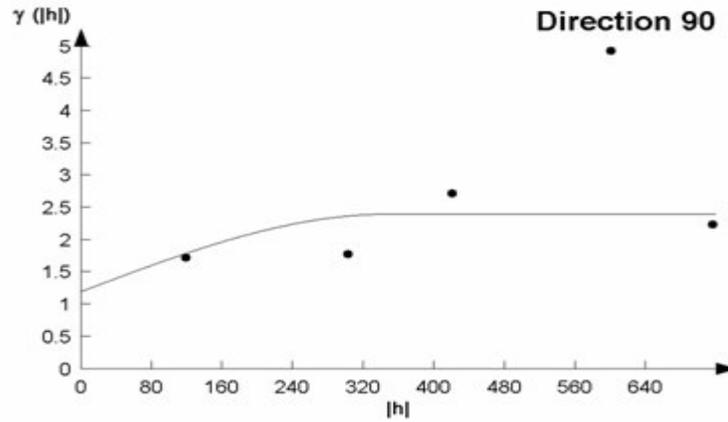


Figura 20 – Semivariograma experimental da variável magnésio no solo (cmol/dm<sup>3</sup>) para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.3.4 Variável alumínio trocável H+Al

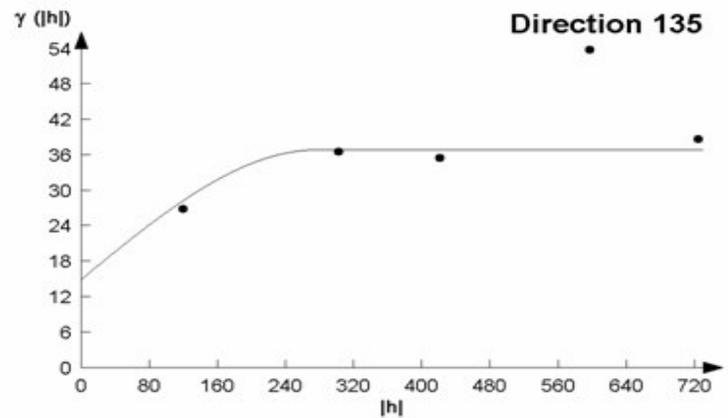


Figura 21 – Semivariograma experimental da variável alumínio trocável no solo (cmol/dm<sup>3</sup>) para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.3.5 Variável capacidade de troca de cátions efetiva CTC

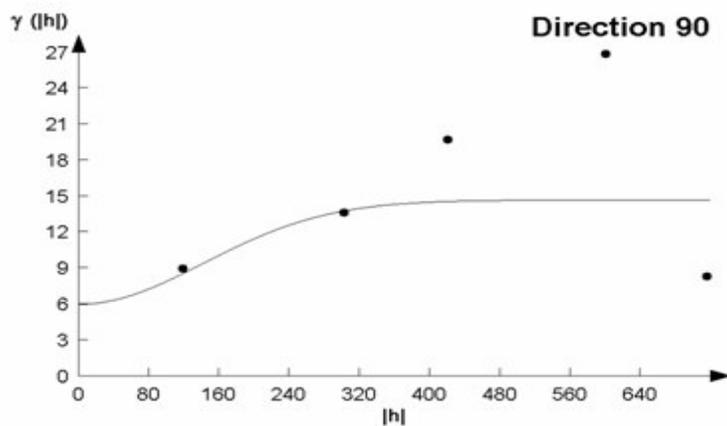


Figura 22 – Semivariograma experimental da variável capacidade de troca de cátions efetiva do solo (cmol/dm<sup>3</sup>) para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.3.6 Variável capacidade de troca de cátions efetiva em pH<sup>7</sup>

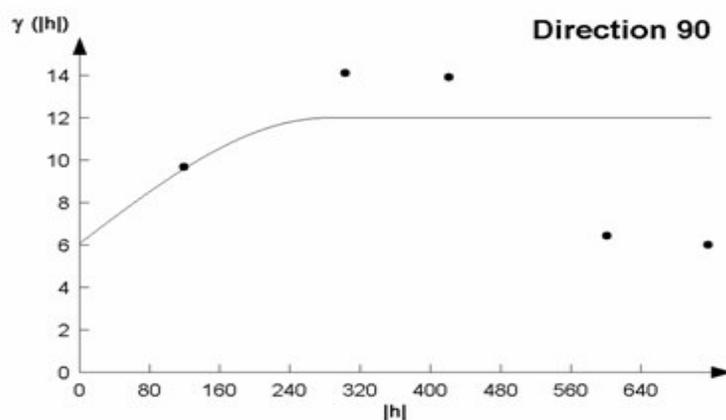


Figura 23 – Semivariograma experimental da variável capacidade de troca de cátions à pH<sup>7</sup> do solo (cmol/dm<sup>3</sup>), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.3.7 Variável saturação de bases (V%)

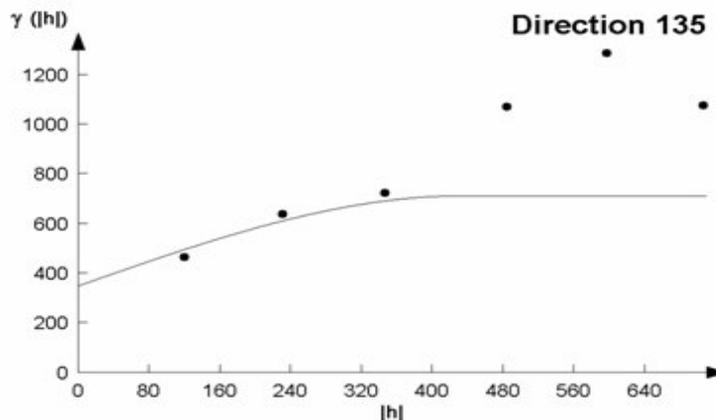


Figura 24 – Semivariograma experimental da variável saturação de bases no solo (%), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

Os semivariogramas experimentais dos dados alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio trocável (H+Al), capacidade de troca de cátions efetiva (CTCefet), capacidade de troca de cátions a pH<sup>7</sup> (CTC pH<sup>7</sup>) e saturação de bases (SB), foram ajustados visualmente nas diferentes direções, estando representado a direção do semivariograma de maior amplitude da continuidade espacial na área experimental.

A partir do cálculo das semivariâncias, ajustou-se aos modelos Esférico ou Gaussiano, conforme melhor ajuste “a sentimento” realizado.

As variáveis Al, Mg e H+Al, apresentaram melhor ajuste com o modelo matemático Esférico, com distância de 373 m, 346 m e 276 m, respectivamente, apresentando dependência espacial moderada.

As variáveis Ca e CTCefet apresentaram melhor ajuste com o modelo matemático Gaussiano, ambas com direção de 90° e distâncias de 359 m e 347 m, respectivamente.

Dentre as variáveis da Tabela 06, destacam-se os atributos Ca e CTC pH<sup>7</sup>, devido aos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>). a primeira, apresentou a melhor R<sup>2</sup> das variáveis químicas, explicando 84,1% da variabilidade na área, enquanto a segunda, apresentou o menor R<sup>2</sup>, explicando apenas 11,3% da variabilidade

encontrada, ou seja, a possibilidade de que o tamanho do campo amostral não tenha sido suficiente para exibir toda a variação espacial atribuída à esta variável, ou ainda, que o comportamento desta mesma variável tenha efetivamente esta característica.

Para Cambardella *et al* (1994), uma forte dependência espacial dos atributos do solo é essencialmente atribuída a fatores intrínsecos (relevo, material de origem, etc.), ao passo que os extrínsecos (plantios, adubações ou calagens), pode-se atribuir a fraca dependência.

Nas variáveis físicas estudadas, quanto ao ajuste dos semivariogramas, os mesmos praticamente se comportaram da mesma forma, observando os modelos matemáticos escolhidos.

A Tabela 07 resulta do ajuste dos modelos de semivariogramas distribuição do tamanho de partículas, apresentando o resumo dos parâmetros geoestatísticos (efeito pepita, alcance, patamar e GDE), para as variáveis físicas: areia grossa, areia fina, silte e argila.

**Tabela 07 – Modelos se semivariograma ajustados aos dados experimentais distribuição do tamanho de partículas (%), para os atributos físicos areia grossa, areia fina, silte e argila.**

Atributos	Semivariograma							
	Modelos	Direções	Co	Co+C <sub>1</sub>	a (m)	IDE (%) [C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> ).100]	GDE	R <sup>2</sup> (%)
Areia grossa	Gaussiano	90°	1.2	3.2	345	37.5	Moderada	0.630
Areia fina	Gaussiano	90°	3	8.5	373	35.29	Moderada	0.515
Silte	Gaussiano	90°	14.5	28	214	51.78	Moderada	0.267
Argila	Esférico	135°	30	48	254	62.50	Moderada	0.760

Parâmetros do Semivariograma: C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> – Contribuição; a – amplitude; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; IDE (%) = Índice de Dependência Espacial em Porcentagem; GDE = Grau de Dependência Espacial e R<sup>2</sup>(%) – Coeficiente de determinação em porcentagem.

Face à observação quanto aos atributos de distribuição do tamanho de partículas (%), de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, dentre as 36 unidades amostrais de solo analisadas, 25 apresentaram classe textural argilosa (teor de argila variando de 35 a 60%), 10 apresentaram classe muito argilosa (teor de argila superior a 60%) e somente 01, apresentou classe textural franco argilosa (teor de argila + silte maior que 15% e argila menor de 35%).

#### 5.2.4 Análise variográfica dos atributos físicos areia grossa, areia fina, silte e argila.

Assim como realizado com os atributos anteriores, foi realizada a análise variográfica com o ajuste dos semivariogramas experimentais anisotrópicos nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.

Como anteriormente feito nas análises químicas, a seguir são apresentados os semivariogramas ajustados, somente com a direção de maior amplitude.

##### 5.2.4.1 Variável areia grossa

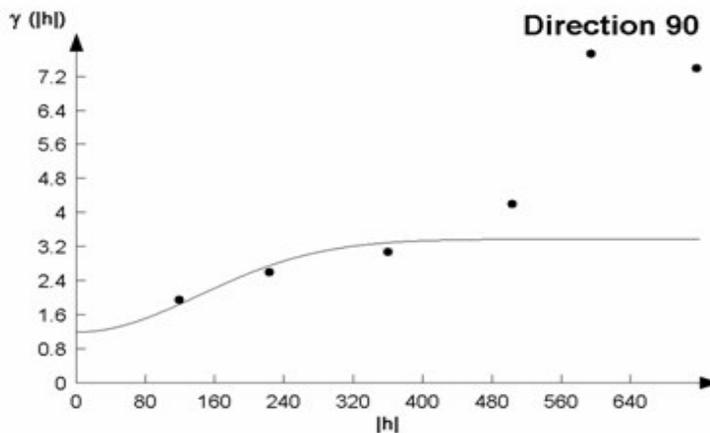


Figura 25 – Semivariograma experimental da variável areia grossa (%), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.4.2 Variável areia fina

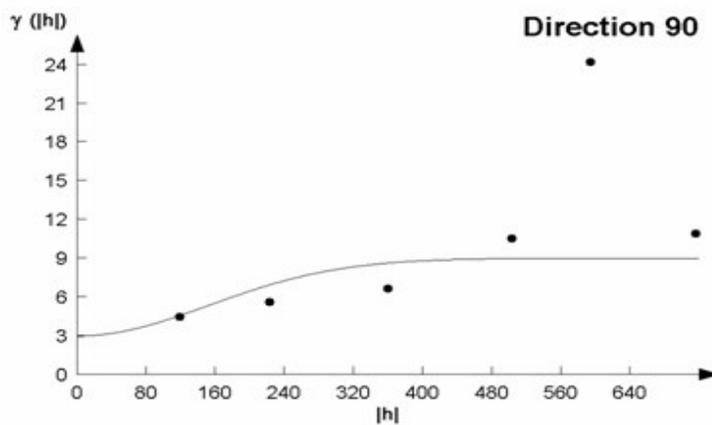


Figura 26 – Semivariograma experimental da variável areia fina (%), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.4.3 Variável silte

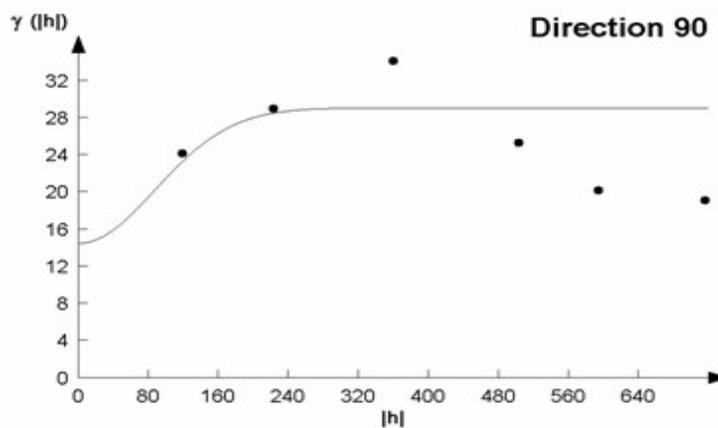


Figura 27 – Semivariograma experimental da variável silte (%), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

#### 5.2.4.4 Variável argila

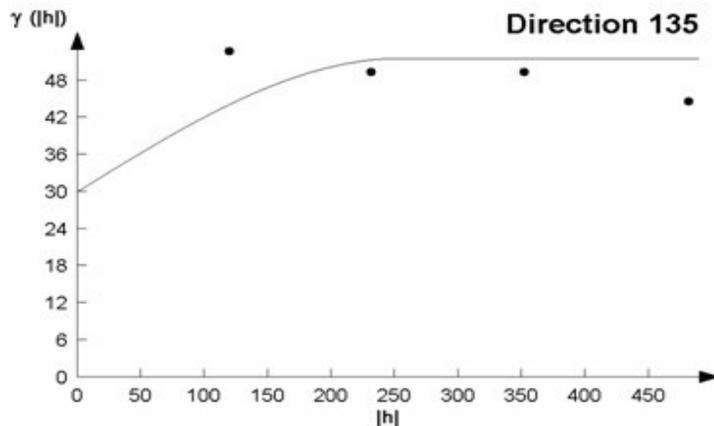


Figura 28 – Semivariograma experimental da variável argila (%), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

Segundo BOYER *et al* (1996), grande parte dos trabalhos em geoestatística, que estudaram as variações espaciais das propriedades do solo, utilizam o modelo esférico para ajuste do semivariograma. PAZ-GONZALES *et al* (2000) afirma que, porém quando um conjunto de dados não apresenta distribuição normal, o modelo Gaussiano tem maior preferência em relação ao modelo esférico.

Dos atributos apresentados na Tabela 07, somente a variável argila não foi ajustada com modelo matemático Gaussiano, no qual o modelo que melhor ajustou-se foi o modelo Esférico, no qual também melhor apresentou  $R^2$ , com 76% de explicação quanto a sua variabilidade, e ainda, com direção de  $135^\circ$ , diferentemente das demais variáveis, que foram melhores ajustadas em direções com ângulo de  $90^\circ$ .

Também na Tabela 07, destaca-se a variável silte, com baixo  $R^2$ , de apenas 26,7%, o que representa baixa confiabilidade no resultado apresentado.

A Tabela 08 apresenta os ajustes dos modelos de semivariogramas densidade, apresentando o resumo dos parâmetros geoestatísticos (efeito pepita, alcance, patamar e GDE), para as variáveis físicas densidades: densidade de solo, densidade de partícula e porosidade total.

**Tabela 08 – Modelos se semivariograma ajustados aos dados experimentais para os atributos físicos densidade de solo (DS), densidade de partícula (DP) e porosidade total (PoT).**

Atributos	Semivariograma							
	Modelos	Direções	Co	Co+C <sub>1</sub>	a (m)	IDE (%) [C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> ).100]	GDE	R <sup>2</sup> (%)
DS (g/cm <sup>3</sup> )	Esférico	90°	0.004	0.009	263	44.44	Moderada	0.572
DP (g/cm <sup>3</sup> )	Esférico	135°	0.0016	0.0031	379	51.61	Moderada	0.593
PoT (%)	Esférico	135°	6	10.5	304	57.14	Moderada	0.621

Parâmetros do Semivariograma: C<sub>0</sub> – Efeito Pepita; C<sub>1</sub> – Contribuição; a – amplitude; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> – Patamar; IDE (%) = Índice de Dependência Espacial em Porcentagem; GDE = Grau de Dependência Espacial e R<sup>2</sup>(%) – Coeficiente de determinação em porcentagem.

## 5.2.5 Análise variográfica dos atributos físicos densidade de solo, densidade de partícula e porosidade total.

### 5.2.5.1 Variável densidade de solo

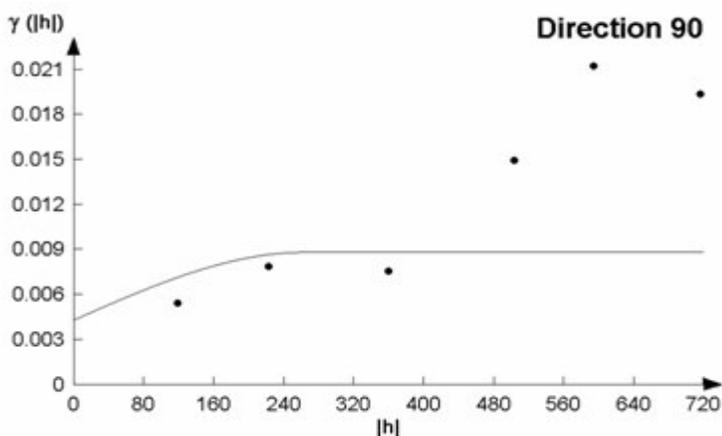


Figura 29 – Semivariograma experimental da variável densidade do solo (gm/cm<sup>3</sup>), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.5.2 Variável densidade de partícula

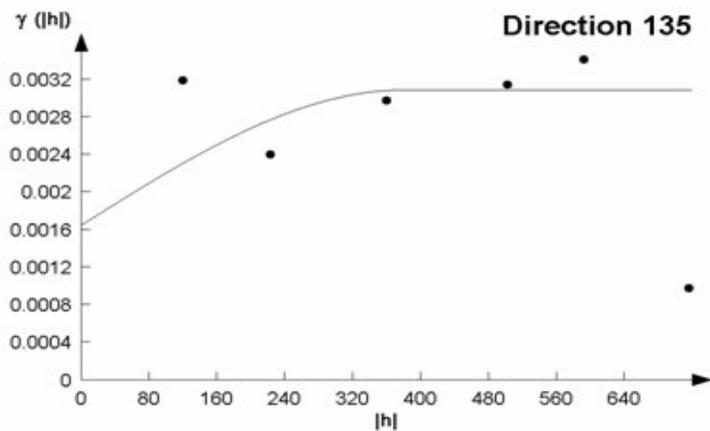


Figura 30 – Semivariograma experimental da variável densidade de partícula ( $\text{gm}/\text{cm}^3$ ), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

### 5.2.5.3 Variável porosidade total

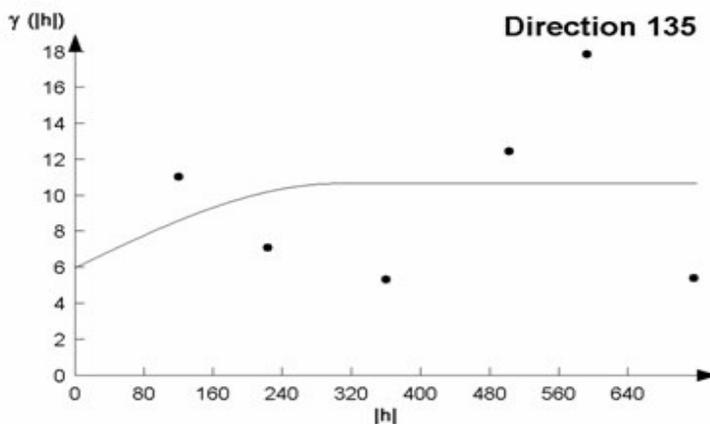


Figura 31 – Semivariograma experimental da variável porosidade total do solo ( $\text{gm}/\text{cm}^3$ ), para a gleba denominada Campo Novo, na Fazenda Tupi, em Nova Prata – RS.

Os três atributos estudados na Tabela 08 apresentaram como melhor modelo de ajuste o modelo matemático Esférico. Também foi possível observar que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) destas variáveis obteve valores próximos.

O cálculo e o ajuste (a “sentimento”) das semivariâncias para posterior escolha do modelo foram feitos pelo aplicativo computacional geoestatístico VARIOWIN® 2.21 “Software for Spatial Data Analysis”. Para realização da validação cruzada, foi utilizado o GSLIB 90 – “Geostatistical Software Library).

Como seleção de modelo, foi considerado o parâmetro  $R^2$ , como critério, ajustado entre as observações reais e estimadas, conforme descrito por VIEIRA (1995) e RIBEIRO JÚNIOR (1995).

Entre os modelos de semivariogramas com base na validação cruzada, o modelo Gaussiano seria o mais indicado para os atributos (variáveis) químicos textura, pH, fósforo, cálcio e CTC efetiva, e aos atributos (variáveis) físicos areia grossa, areia fina e silte.

O segundo modelo ajustado de maior ocorrência foi o modelo Esférico, indicado para os atributos químicos argila, matéria orgânica, alumínio, magnésio, H+Al, CTC pH<sup>7</sup> e saturação de bases, além dos atributos físicos argila, densidades de solo, de partícula e porosidade total.

Somente a variável potássio teve a indicação de um terceiro modelo, o modelo Exponencial.

O coeficiente de determinação  $R^2$  apontou apenas as variáveis CTC pH<sup>7</sup> e silte com coeficiente  $R^2$  abaixo de 0,5, atingindo os valores de 0,113 e 0,267, respectivamente.

Não houve variável estudada que apresentasse ausência de dependência espacial ou efeito pepita puro, mas do total das variáveis estudadas grande parte apresentou coeficiente  $R^2$  menor que 0,6. De acordo com Isaaks & Srivastava (1989), estes resultados com baixo  $R^2$ , são considerados de baixa confiabilidade.

Das variáveis estudadas, somado as químicas e físicas, apenas 10 variáveis apresentam  $R^2$  superior a 60%.

As variáveis que apresentaram  $R^2$  superior a 0,6 são as químicas: argila, textura, fósforo (P), alumínio (Al), cálcio (Ca), alumínio trocável (H+Al), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC) e as físicas areia grossa e argila, da avaliação da distribuição e tamanho de partículas, além da porosidade total.

Tais resultados são justificados, devido aos altos valores de variância e coeficiente de variação encontrada, na análise estatística descritiva, somado ao número de pontos amostrais levantados e a heterogeneidade do terreno.

### 5.3 Krigagem e mapeamento dos atributos do solo estudados

A utilização do interpolador krigagem ordinária proporcionou o detalhamento da distribuição espacial dos valores dos atributos (variáveis) estudados.

A partir deste interpolador, elaborou-se os mapas de isovalores ou mapas de isolinhas de cada variável, na área experimental, com boa precisão e em escala desejada, com malha regular de 100 x 100 m para interpolação, suficiente para o bom delineamento e representação dos contornos na geração dos mapas.

#### 5.3.1 Mapas do solo na gleba denominada Campo Novo

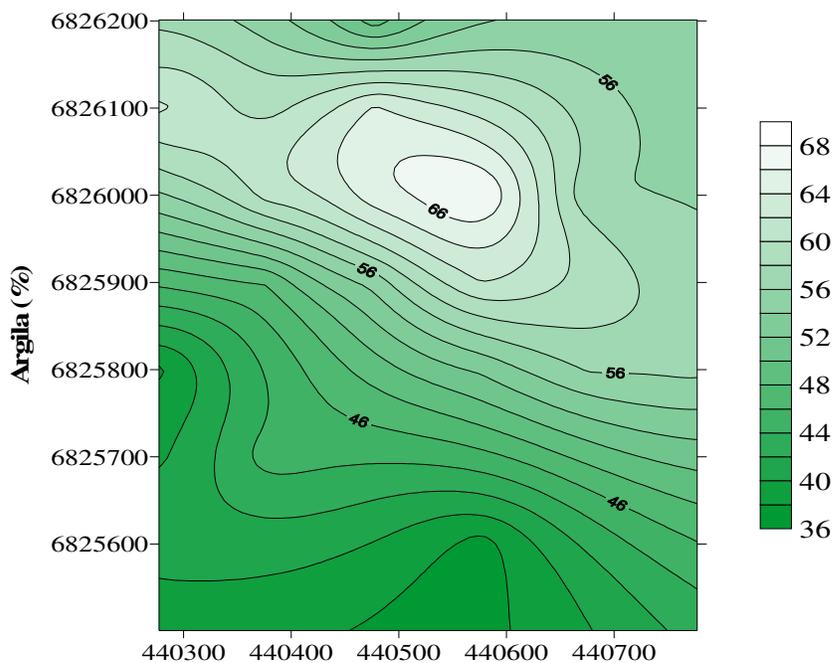


Figura 32 – Mapa de isolinhas da variável argila (%) na gleba de estudo.



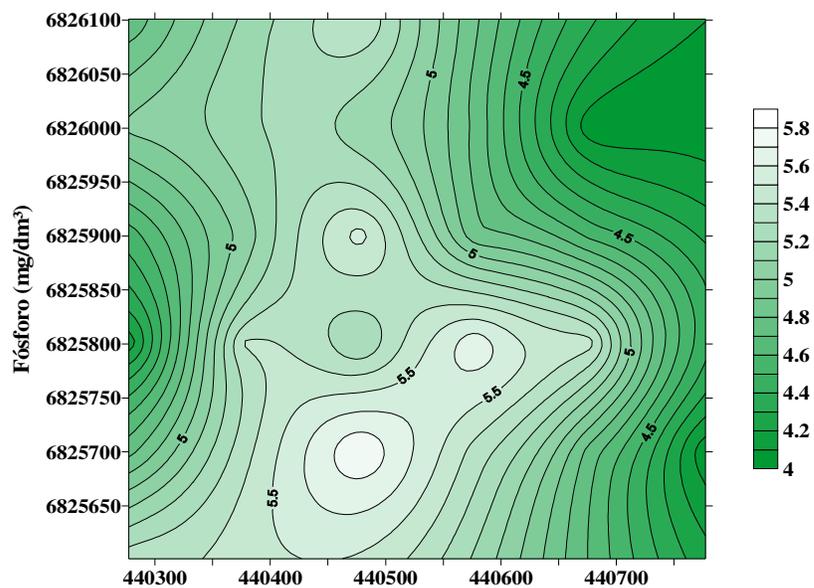


Figura 35 – Mapa de isolinhas da variável fósforo ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ) na gleba de estudo.

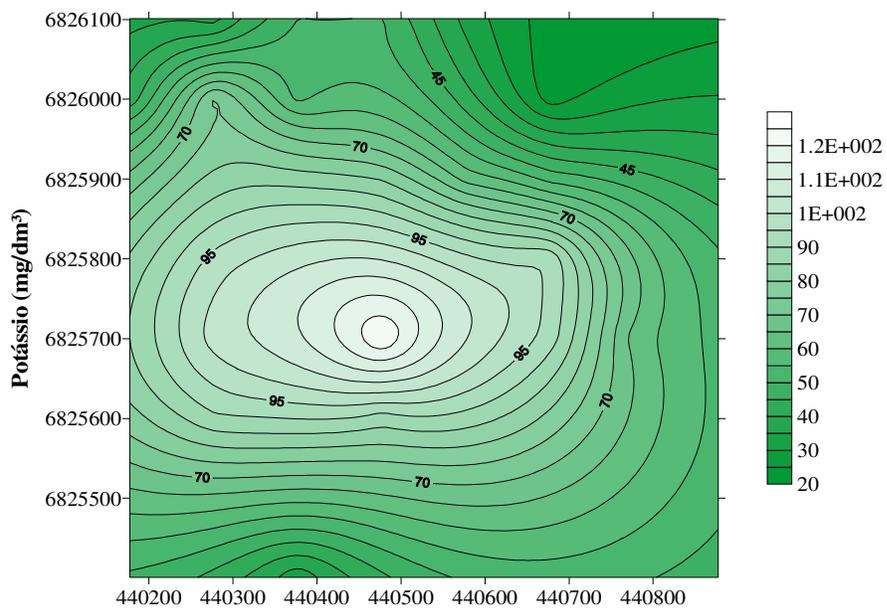


Figura 36 – Mapa de isolinhas da variável potássio ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ) na gleba de estudo.

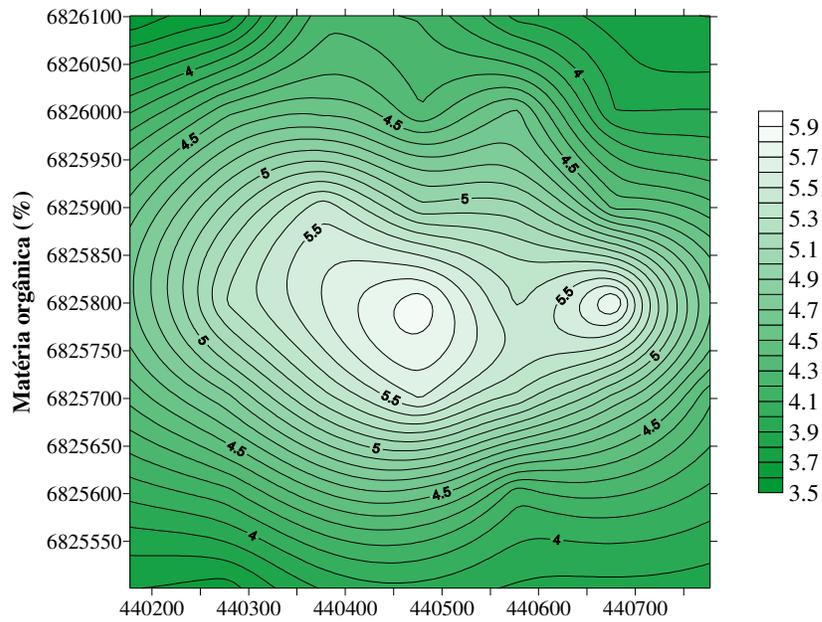


Figura 37 – Mapa de isolinhas da variável matéria orgânica (%) na gleba de estudo.

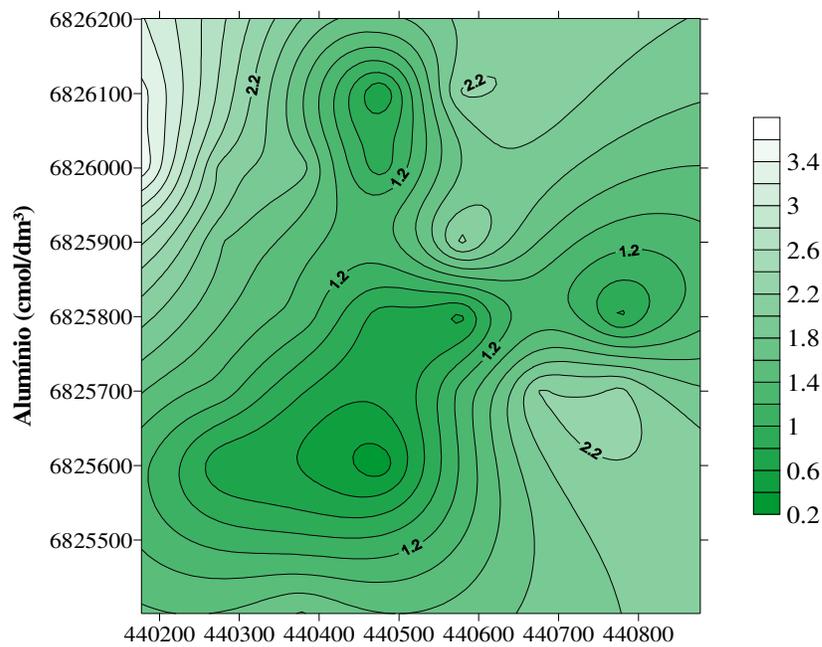


Figura 38 – Mapa de isolinhas da variável alumínio (mg/dm³) na gleba de estudo.

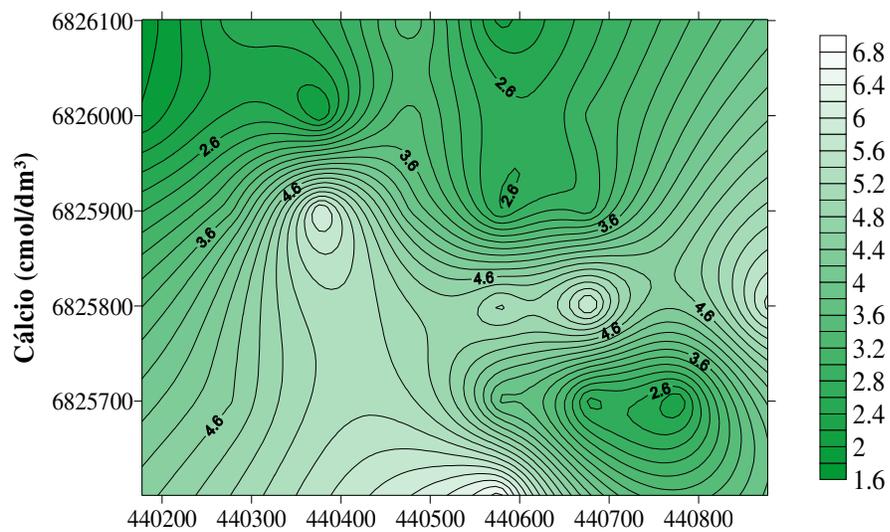


Figura 39 – Mapa de isolinhas da variável cálcio (mg/dm³) na gleba de estudo.

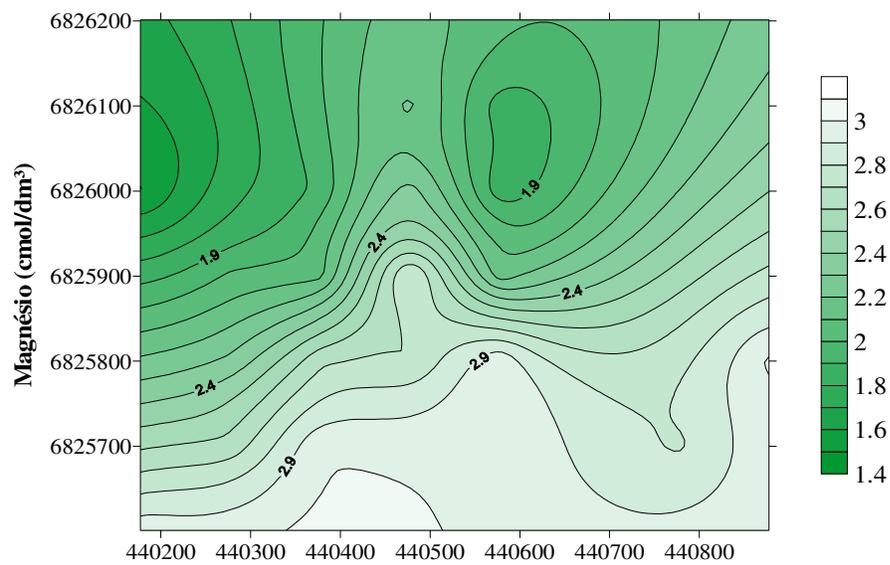


Figura 40 – Mapa de isolinhas da variável magnésio (mg/dm³) na gleba de estudo.

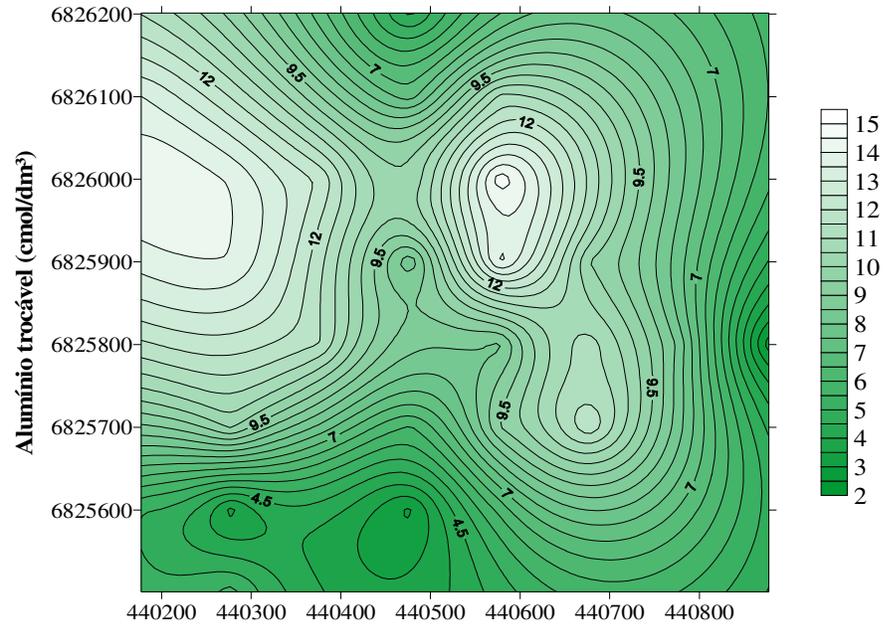


Figura 41– Mapa de isolinhas da variável alumínio trocável ( $\text{mg/dm}^3$ ) na gleba de estudo.

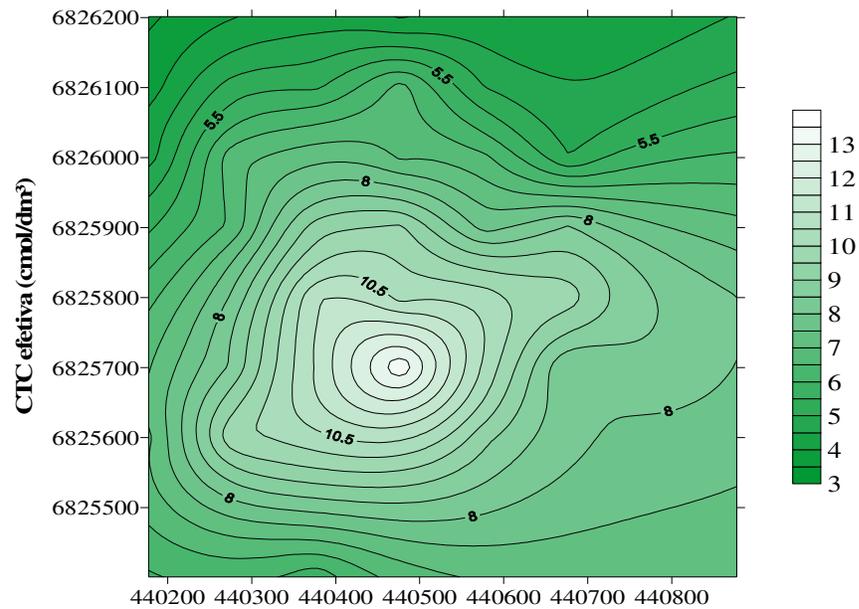


Figura 42 – Mapa de isolinhas da variável CTC efetiva ( $\text{cmol/dm}^3$ ) na gleba de estudo.

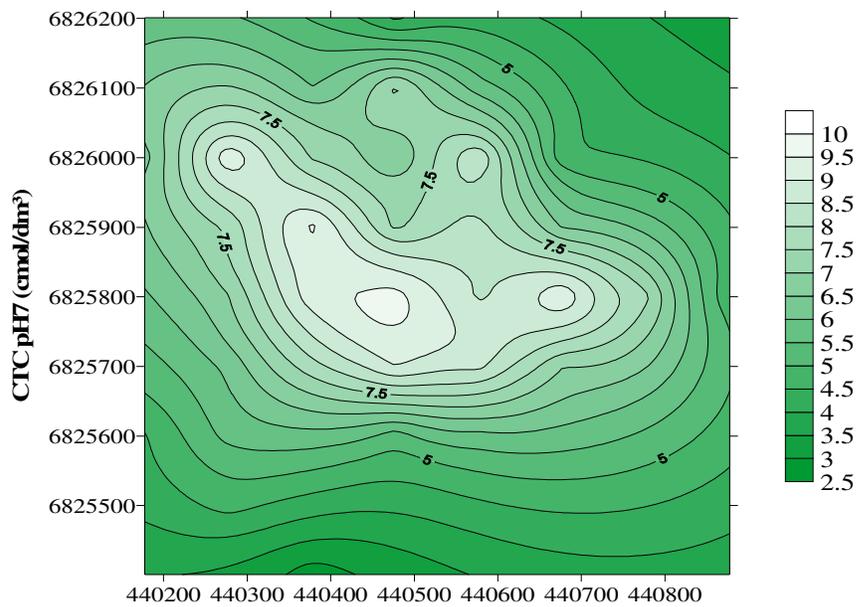


Figura 43 – Mapa de isolinhas da variável CTC pH<sup>7</sup> (cmol/dm<sup>3</sup>) na gleba de estudo.

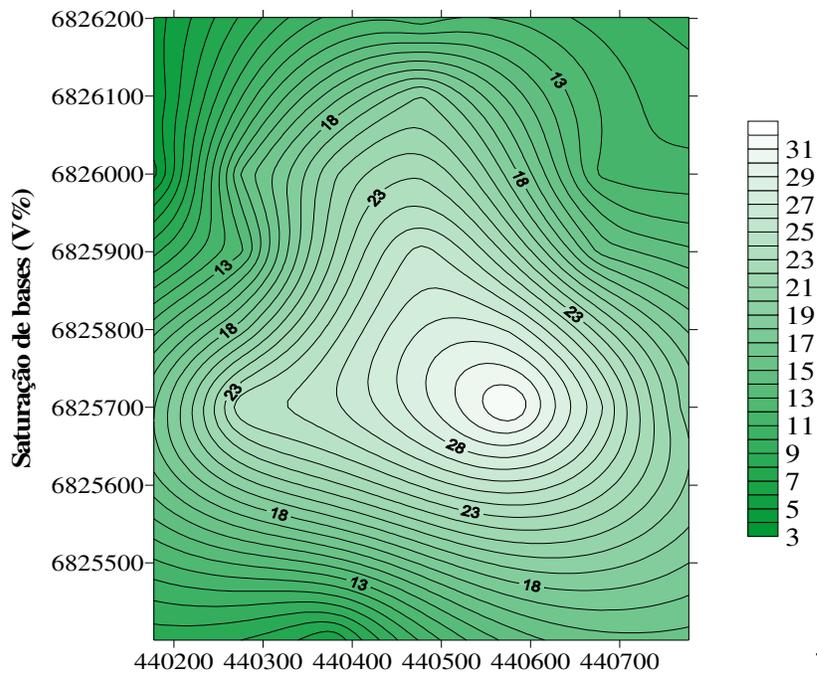


Figura 44 – Mapa de isolinhas da variável saturação de bases (V%) na gleba de estudo.

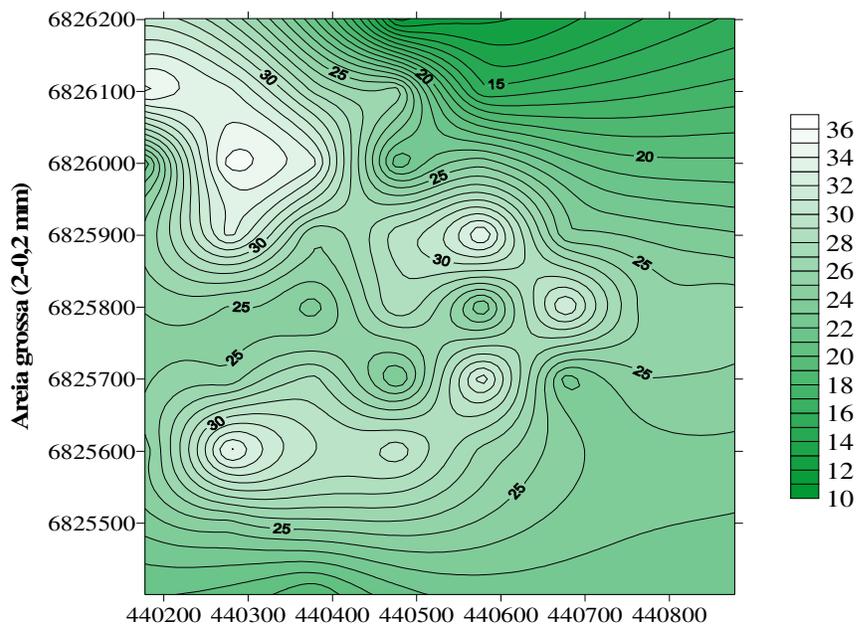


Figura 45 – Mapa de isolinhas da variável areia grossa (%) na gleba de estudo.

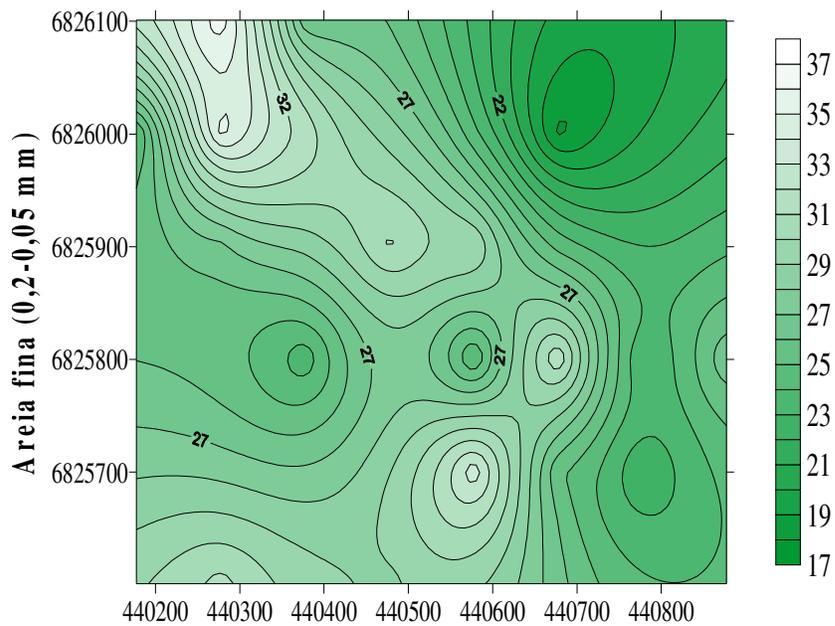


Figura 46 – Mapa de isolinhas da variável areia fina (%) na gleba de estudo.

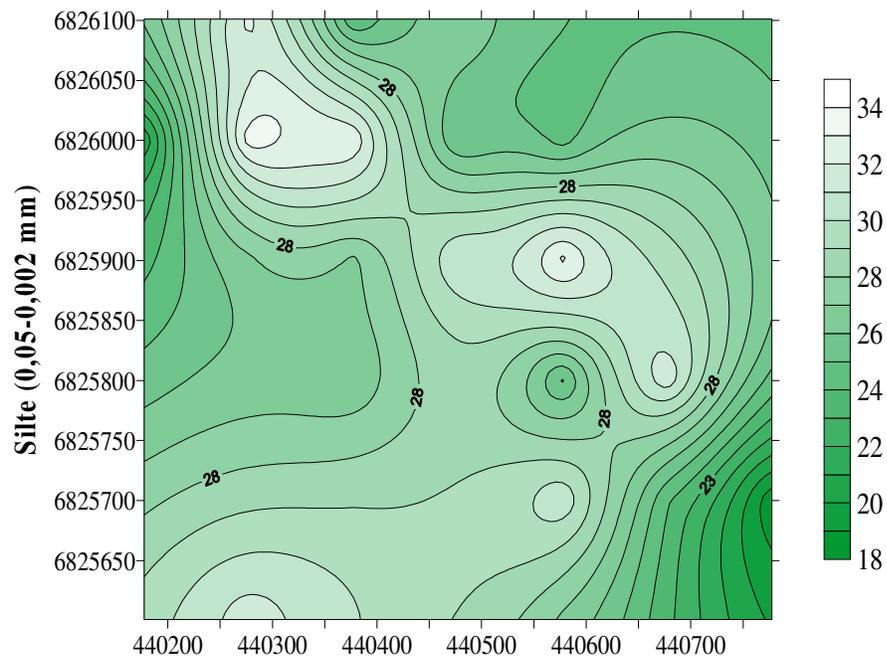


Figura 47 – Mapa de isolinhas da variável silte (%) na gleba de estudo.

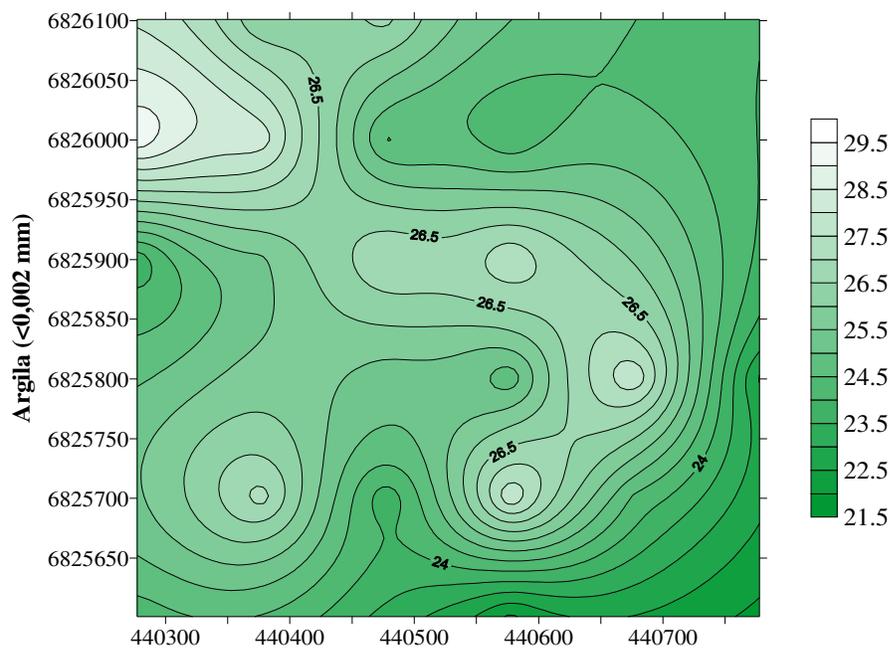


Figura 48 – Mapa de isolinhas da variável argila (%) na gleba de estudo.

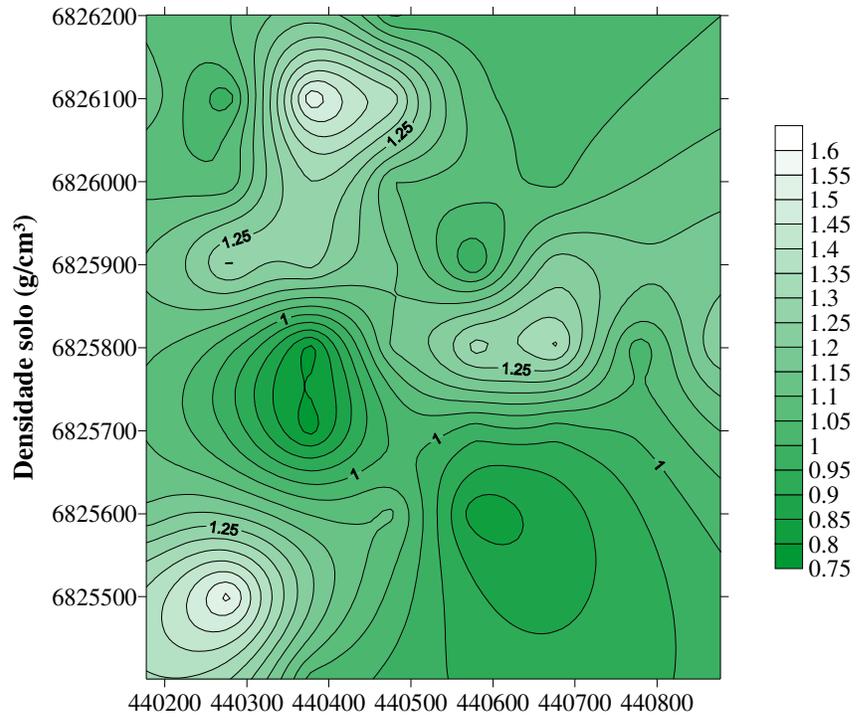


Figura 49 – Mapa de isolinhas da variável densidade do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) na gleba de estudo.

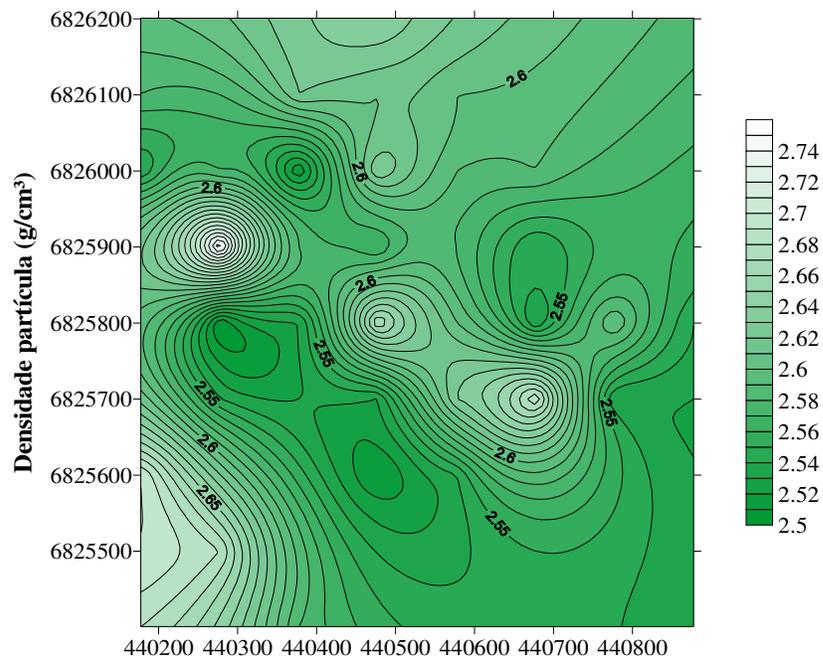


Figura 50 – Mapa de isolinhas da variável densidade de partícula ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) na gleba de estudo.

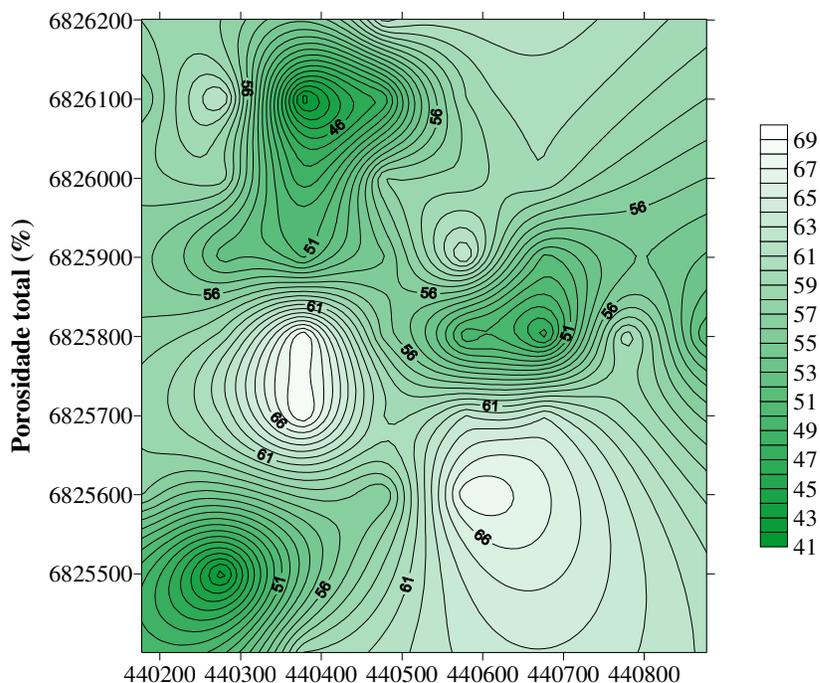


Figura 51 – Mapa de isolinhas da variável porosidade total (%) na gleba de estudo.

Para realização do mapeamento dos atributos de solo, utilizou-se os vinte atributos estudados, o que se pode notar nas Figuras 32 a 51 sua amplitude de distribuição e variabilidade, conforme se apresentam em cada mapa confeccionado. Porém, a seguir os maiores detalhes e comentários se darão com os atributos estudados que apresentaram  $R^2$  superior a 0,6, ou seja, às variáveis argila, textura, fósforo, alumínio, cálcio, alumínio trocável e capacidade de troca de cátions efetiva.

É conhecido que as características físicas, químicas e biológicas de um perfil estão diretamente relacionadas com a vida da planta, sendo que o crescimento do sistema radicular, bem como o suprimento nutritivo e a capacidade de armazenamento de água e a aeração, são exemplo de características apresentadas em um perfil que define o valor agriculturável do solo.

Nota-se pelo mapa de solo que a maior parte do teor argila (Figura 32) encontra-se entre 36 e 56%, tendo amplitude na variação de 36 a 68%.

A Figura 33, apresenta a distribuição da variável textura, obtendo amplitude de variabilidade de sua distribuição espacial de 1.35 à 2.75 %, encontrando-se com maior concentração nas amplitudes 1.35 a 2.35 %. Vale frisar que, a textura do solo

é expressa pelas classes de tamanho de partículas, dentro das determinadas amplitudes de variação, englobando material com diferentes composições e características que permitem conhecer o grau de estabilidade dos agregados do solo e sua classe textural.

Quanto à variável fósforo, na Figura 35, observa-se que os valores de maior concentração correspondem as cotas mais baixas da área de estudo, apresentando amplitude de variabilidade de distribuição espacial de 4.0 a 5.8 (mg/dm<sup>3</sup>).

As variáveis alumínio (Figura 38) e alumínio trocável (Figura 41), encontram-se perfeitamente distribuídas espacialmente em sua amplitude, relacionado aos baixos teores de pH encontrados na área, conforme Laudo de Análise do Solo (Anexo). Embora a erva-mate seja suscetível a baixos teores de pH, pode-se tornar deficitária a disponibilidade de outros elementos importantes como Ca, Mg, P, Mo, B ou mesmo a ocorrência de toxidez do Al, Mn, Zn.

O cálcio (Figura 39) apresentou um R<sup>2</sup>% de 0,84, tendo sua amplitude de 1.6 a 6.8 (mg/dm<sup>3</sup>), com distribuição espacial com maior concentração entre 1.6 e 4.4.

A CTCefetiva (Figura 42) é uma das mais importantes propriedades à fertilidade dos solos, onde solos com alta CTC são considerados como possuidores de boa fertilidade, devido sua elevada capacidade de armazenar elementos nutricionais às plantas, o que influi diretamente no cálculo da necessidade de calagem, onde capacidade de troca de cátions elevada, doses elevadas de calcário são recomendadas. No mapa do solo, apresentou-se muito bem distribuída espacialmente na área de estudo, com amplitude de 3 a 13 (c<sub>mol</sub> /dm<sup>3</sup>).

## 6. CONCLUSÕES

A análise exploratória dos dados através da estatística permitiu prever não somente a média aritmética ( $\bar{x}$ ), mas também fundamentalmente a variância ( $S^2$ ), a mediana ( $M_i$ ), o desvio padrão ( $S$ ) e o coeficiente de variação ( $CV\%$ ) dos atributos estudados, observando a sua variabilidade no banco de dados original;

Na estatística descritiva, com nível de confiança de 95,0%, o atributo químico fósforo (P) apresentou a maior variabilidade, com  $CV\% = 127,73$  (coeficiente de variação); seguido do atributo químico alumínio (Al), com  $CV\% = 99,23$  (coeficiente de variação);

Para distribuição do tamanho de partículas (%), na estatística descritiva realizada, o atributo físico de maior variabilidade foi areia grossa, com  $CV\% = 36,39$  (coeficiente de variação), enquanto a estatística realizada para os atributos densidade do solo, o que apresentou maior variabilidade foi o atributo físico porosidade total, com  $CV\% = 95,4909$  (coeficiente de variação);

Com o emprego da análise geoestatística, combinada com as técnicas de geoprocessamento, foi possível mapear a variabilidade espacial dos atributos físico-químicos estudados;

A anisotropia geométrica, constatada na forma elíptica do campo amostral, foi verificada nos modelos teóricos dos semivariogramas experimentais, o qual apresentou dependência espacial e inclinação, demonstrando assim coerência com as variações da declividade a campo na área da gleba experimental;

Todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial, sendo que o modelo Gaussiano e o modelo Esférico após tentativas e repetições, foi o que melhor se ajustaram no cálculo a “sentimento” dos semivariogramas, considerando o parâmetro  $R^2$ , como critério de ajuste entre as observações reais e estimadas;

O modelo Gaussiano apresentou os melhores resultados para os atributos físicos, importantes para distribuição do tamanho de partículas, areia grossa (%), areia fina (%) e silte (%) e para os atributos químicos textura (%), pH, fósforo (P  $mg/dm^3$ ), cálcio (Ca  $c_{mol}/dm^3$ ) e capacidade de troca de cátions efetiva (CTCe  $c_{mol}/dm^3$ );

O modelo Esférico obteve melhores resultados para os atributos físicos argila (%), densidades de solo (DS  $g/cm^3$ ), de partícula (DP  $g/cm^3$ ) e porosidade total (PT

%), bem como nos atributos químicos argila (%), matéria orgânica (M.O.%), alumínio (Al  $c_{mol}/dm^3$ ), magnésio (Mg  $c_{mol}/dm^3$ ), alumínio trocável (H+Al  $c_{mol}/dm^3$ ), capacidade de troca de cátions em pH<sup>7</sup> (CTCpH<sup>7</sup>  $c_{mol}/dm^3$ ) e saturação de bases (V%);

O modelo Exponencial foi o que apresentou melhor resultado para o atributo químico potássio (K  $mg/dm^3$ ), com IDE de 48,02% e R<sup>2</sup> 0,525;

Não houve variável estudada que apresentasse ausência de dependência espacial ou isotropia, mas do total das variáveis estudadas grande parte apresentou coeficiente R<sup>2</sup> menor que 0,6, considerados de baixa confiabilidade;

O coeficiente de determinação R<sup>2</sup> apontou apenas as variáveis CTC pH<sup>7</sup> e silte com coeficiente R<sup>2</sup> abaixo de 0,5, atingindo os valores de 0,113 e 0,267 respectivamente;

Das variáveis estudadas, somado as químicas e físicas, apenas 10 variáveis apresentam R<sup>2</sup> superior a 0,6;

As variáveis que apresentaram R<sup>2</sup> superior a 0,6 são as químicas argila, textura, fósforo (P), alumínio (Al), cálcio (Ca), alumínio trocável (H+Al), capacidade de troca de cátions efetiva (CTCe) e as físicas areia grossa e argila, da avaliação da distribuição e tamanho de partículas, além da porosidade total;

Os resultados demonstraram que o melhor modelo de regressão espacial ajustado explicou 84,1 % para atributo químico cálcio e 76,0 % para o atributo físico argila; justificados devido a variabilidade dos atributos do banco de dados, comprovados na estatística descritiva, somado ao limitado número de pontos amostrais e a heterogeneidade do terreno;

A técnica de krigagem ordinária permitiu o detalhamento da distribuição das variáveis estudadas, a partir do mapa de isolinhas, onde todos os modelos de semivariogramas apresentaram zonas de influência anisotrópica, tendo na variabilidade espacial maior sentido perpendicular a declividade destas áreas;

Para a área estudada, pode-se concluir que os dados não foram suficientes para a realização da análise espacial desejada, comprovado pelo baixo coeficiente R<sup>2</sup> em grande parte dos atributos estudados, porém, os métodos de interpolação com os dados disponíveis, foram eficientes na geração dos mapas de isoelementos, considerando principalmente as zonas de influência isotrópica, onde é explicado a variação no espaço da maioria dos atributos do solo encontrado em ambientes naturais;

As técnicas de estatística descritiva, de geoestatística e de geoprocessamento se complementaram, o qual permitiu a possibilidade de obter-se a magnitude da variação dos dados presentes no banco de dados inicial e em seguida, o comportamento desta estrutura na variabilidade espacial;

Os programas geoestatísticos VARIOWIN® 2.21 – “Software for Spatial Data Analysis” e GSLIB 90 – “Geostatistical Software Library”, demonstraram ser ferramentas eficientes para o cálculo e ajustamento dos dados, bem como o programa SURFER® versão 8.0 (2002) para confecção dos mapas de isolinhas.

## 7 BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, C. F. P.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Estimativa da distancia espacial de retenção de água em solo utilizado krigagem indicatriz.** Curitiba, 1996. 37p. Universidade Federal do Paraná.

ANDRIOTTI, J. L. S. Introdução a geoestatística. **Acta Geológica Leopoldensia**, v.6, p.5-81, 1988.

ANSELMO, C. Plantacion de yerba mate. In: Curso de Capatacion en Produccion de yerba mate, 1., (1992:Cerro Azul). **Anais...Cerro Azul**:

BACKES, P; IRGANG, B. **Árvores do Sul.** Guia de Identificação e Interesse Ecológico, Instituto Souza Cruz, RS. 2002. 325p.

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. **Relação solo eucalipto.** Viçosa. Editora Folha de Viçosa, 1990b. p.127-186.

BERGER, G. **Biomassa e nutrientes em plantios de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), no município de Nova Prata, RS.** Santa Maria: UFSM, 2006, 97p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria.

BRAGA, F. A. **Uso da análise discriminante na identificação de características ambientais e determinação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto.** Viçosa, 1997. 65p. Tese (Doutorado). UFV.

BRAGA, F. A.; SOUZA, L. A.; COSTA, G. M. Características ambientais na determinação da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** Vol 23. p.291-298, 1999.

BRAGA, L. P. V. Geoestatística e aplicações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 9. São Paulo, 1990. **Resumos**, SP: IME – USP, 1990, p.36.

BRASIL. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE.** Brasília, 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 29 jun. 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Florestas**. Brasília, 2006. Disponível em: <<http://www.cnpf.embrapa.br>>. Acesso em: 27 jun. 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. **Inventário Florestal Nacional: Floresta Nativa, Rio Grande do Sul**. Brasília: IBAMA, 1983.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul**.: 1973. 430p. (Boletim Técnico, nº 30).

CAMARA, G.. Anatomia de SIGs: visão atual e perspectivas de evolução. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E.. **Sistema de Informações Geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília. EMBRAPA, 1993.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, p1501-1511, Sept.-Oct., 1994.

CAMPOS, M.A.A. **Balanco de biomassa e nutrientes em povoamentos de Ilex paraguariensis. Avaliação na safra e na safrinha**. Curitiba, 1997. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Embrapa Informações Tecnológicas; Colombo, PR: Embrapa Floresta, 2003. 1039p.

CATANI, R.A. Amostragem de solo para fins de fertilidade. **Bragantia**, v.14, p. 19-26, 1954.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977. 264p.

DEUTSCH, C. V., JOURNAL, A. G. **GSLIB: Geostatistical software library**. New York: Oxford University, Press, 1998.

DOURADO NETO, D. **Variabilidade espacial das alturas de chuva e irrigação e de potenciais da solução do solo**. Piracicaba: 1989. 180p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília. EMBRAPA, 2004.

ERVA-MATE.COM – O Site da Erva-mate. Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<http://www.erva-mate.com>>. Acesso em: 27 abr. 2006.

FIETZ, C.R. **Variabilidade espacial do armazenamento de água no solo visando o manejo da irrigação por aspersão**. Piracicaba, 1998. 97p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

FLEIG, F.D. **Morfometria e Quantificação da Biomassa Comercial e Residual da poda de erva-mate (Ilex paraguariensis St. Hil.) em reflorestamentos**. Santa Maria: UFSM, 2002, 140p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria.

GARCIA Y GARCIA, A. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e resposta espectral da cultura de feijão irrigado, em imagens aéreas digitais**. Piracicaba, 1997. 79p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

GONÇALVES, A.C.A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação**. Piracicaba, 1997. 118p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

GONÇALVES, J. L. M.. **Interpretação e levantamento de solo para fins silviculturais**. IPF. Vol 39. p.65-72, 1988.

GONÇALVES, J.L.M. **Interações genótipo-ambiente e relações entre a produtividade de sítios florestais de Eucalyptus grandis e Eucalyptus saligna com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo**. Piracicaba, 1990. 135p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

IEDE, E.T., MACHADO, D.C. Pragas da erva-mate (Ilex paraguariensis St. Hil.) e seu controle. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, n. 18/19, p. 51-60, 1989.

INTA, Centro Regional Sul. **Estacion Experimental Agropecuaria Cerro Azul**, 1992. p.23-27.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia. Relações solo-planta.** São Paulo. ESALQ/USP, 1979.

LANDIM, P. M. B. **Análise Estatística de Dados Geológicos.** São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998.

LANDIM, P. M. B. **Introdução à análise variográfica com o Variowin.** Rio Claro. UNESP/DGA/IGCE, 2004. 25p.

LANDIM, P. M. B.; MONTEIRO, R. C. **Introdução ao GSLIB (Geostatistical Software Library).** Rio Claro. UNESP/DGA/IGCE, 2000. 19p.

LANDIM, P. M. B.; MONTEIRO, R. C.; CORSI, A. C. **Introdução à confecção de mapas pelo software Surfer.** Rio Claro. UNESP/DGA/IGCE, 2002. 29p.

LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n.1, p.1-12, 1996.

MAZUCHOWSKI, J.Z. **Manual da erva-mate (Ilex paraguariensis St. Hil.).** 2.ed. Curitiba: EMATER, PR, 1991. 104p.

MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal.** Piracicaba, 2004. 110p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

MORENO, J. A.. **Clima do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, RS, 1961. 48p.

OLIVEIRA, Y.M.M.;ROTTA, E. Área de distribuição natural da erva-mate. In.\_\_\_\_\_ X Seminário sobre atualidades e perspectivas florestais: **Silvicultura da Erva-mate (Ilex paraguariensis St. Hil.).** EMBRAPA – CNPF, Anais...Curitiba, 1985. 145p. p.17-36. (Documento 15).

ORTIZ, G.C. **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo,** 2002, Piracicaba. 75p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

ORTIZ, J. L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo.** Piracicaba, 2003. 186p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

PIRES, C. A. F. **Modelagem e avaliação de dados geofísicos e geoquímicos aplicada na pesquisa de metais básicos e Au no prospecto volta grande (complexo intrusivo Lavras do Sul, RS, Brasil).** Porto Alegre, 2002. 208p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PRADO, H. **Manejo dos solos. Descrições pedológicas e suas implicações..** Ed. Nobel. São Paulo. SP, 1991.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** 4.ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 473 p.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** V.10, n.1, p.1-6, 1986.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial dos parâmetros do solo,** 1995, Piracicaba. 99p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

RIO GRANDE VIRTUAL. RS VIRTUAL. Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<http://www.riogrande.com.br>>. Acesso em: 20 jun. 2006.

ROSA, R.; BRITO, J. C. S.. Introdução ao geoprocessamento: **Sistema de Informações Geográficas.** Uberlândia: EUDFU, 1996. 104p.

SAIDELLES, F. L. F. **Crescimento inicial da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) em três classes de solo, na Região Central do Rio Grande do Sul.** Santa Maria: UFSM, 2000, 70p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria.

SALVIANO, A.A.C. **Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* em solo degradado do município de Piracicaba-SP.** Piracicaba, 1996. 91p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

SANCHEZ, P.A. **Suelos del trópico. Características y manejo.** San José: IICA, 1981. 634 p.

SCHNEIDER, P.R. **Análise de Regressão Aplicada à Engenharia Florestal.** Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1997. 217p.

SCHONAU, A. P. G. Problems in using vegetation or soil classification in determining site quality. **South Forestry Journal**, n 141. p.13-18, 1987.

SCHONAU, A. P. G.; PURNELL, R.C. A different approach to site evaluation and some preliminary results. **South African Forestry Journal**, n.141, p.19-25, 1987.

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal: métodos para classificação de sítios florestais.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 151p.

SILVA, A. P. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo.** Piracicaba, 1988. 105p. Tese (Doutorado). USP. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

SISTEMA FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO PARANÁ. SINDIMATE – Sindicato da Indústria do Mate. São Mateus do Sul, 2006. Disponível em: <<http://www.fiepr.org.br>>. Acesso em: 7 jul. 2006.

SOARES, A. G. **Geoestatística para ciências da terra e do ambiente.** Lisboa: IST Press, 2000. 206p.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal.** Viçosa. UFV, 2006.

SOUZA, C. S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo.** Porto Alegre, 1992. 162p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 118 p. (**Boletim Técnico**).

TEIXEIRA, A. L. A.; MORETTI, E.; CHRISTOFOLETTI, A. **Introdução aos Sistemas de Informação Geográfica.** Rio Claro. Edição do Autor, 1992.80p.

TERRA BRASILEIRA. São Paulo, 2006. Disponível em:  
<<http://www.terrabrasileira.net>>. Acesso em: 27 abr. 2006.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A.. **Classificação da Vegetação Brasileira, adaptada a um Sistema Universal**. Rio de Janeiro: IBGE/PROJETO RADAM BRASIL, 1991. 165p.

VETTORATO, J. A. **Mapeamento da fertilidade do solo utilizando sistema de informação geográfica**. Botucatu, 2003. 84p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Botucatu, São Paulo, 2003.

VETTORAZZI, C. A.; FERRAZ, S. F. B. **Silvicultura de Precisão: uma nova perspectiva para o gerenciamento das atividades florestais**. Viçosa: UFV, Editora UFV, 2000. 248p.

VETTORAZZI, C.A.; FERRAZ, S.F.B. Silvicultura de precisão: uma nova perspectiva para o gerenciamento de atividades florestais. In: BORÉM, A.; GIUDICE, M.P.; QUEIROZ, D.M. de; et al. (Ed.). **Agricultura de Precisão**. Viçosa: Os autores, 2000. P. 65-75.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial. In: **Curso de atualização em conservação do solo**, Campinas, 1995. Apostila. Campinas: IAC, 1995. 61p.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. **Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties**. Hilgardia, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F. **Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo**. Bragantia, v.54, n.2, p.405-412, 1995.

WOJCIECHOWSKI, J. C. **Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual**. Santa Maria: UFSM, 2006, 88p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria.

ZIMBACK, C. R. L. **Apostila de geoestatística**. Botucatu. UNESP/FCA/GEPAG, 2003. 25p.

ZIMBACK, C. R. L. **Utilização dos programas GS+ e Variowin.** Botucatu. UNESP/FCA/GEPAG, 2003. 16p.

## APÊNDICE A - Pontos amostrais e respectivas coordenadas da malha de amostragem

### Grade de Amostragem

Pontos da Malha de Amostragem

MA: ÁREA 05 - CAMPO NOVO - FAZENDA TUPI - NOVA PRATA - RS

NP	CD	E	N	VALOR
1	205	440477.43	6826200.75	0
2	302	440177.43	6826100.75	0
3	303	440277.43	6826100.75	0
4	304	440377.43	6826100.75	0
5	305	440477.43	6826100.75	0
6	306	440577.43	6826100.75	0
7	402	440177.43	6826000.75	0
8	403	440277.43	6826000.75	0
9	404	440377.43	6826000.75	0
10	405	440477.43	6826000.75	0
11	406	440577.43	6826000.75	0
12	407	440677.43	6826000.75	0
13	503	440277.43	6825900.75	0
14	504	440377.43	6825900.75	0
15	505	440477.43	6825900.75	0
16	506	440577.43	6825900.75	0
17	507	440677.43	6825900.75	0
18	603	440277.43	6825800.75	0
19	604	440377.43	6825800.75	0
20	605	440477.43	6825800.75	0
21	606	440577.43	6825800.75	0
22	607	440677.43	6825800.75	0
23	608	440777.43	6825800.75	0
24	609	440877.43	6825800.75	0
25	703	440277.43	6825700.75	0
26	704	440377.43	6825700.75	0
27	705	440477.43	6825700.75	0
28	706	440577.43	6825700.75	0
29	707	440677.43	6825700.75	0
30	708	440777.43	6825700.75	0
31	802	440177.43	6825600.75	0

32	803	440277.43	6825600.75	0
33	805	440477.43	6825600.75	0
34	806	440577.43	6825600.75	0
35	903	440277.43	6825500.75	0
36	1004	440377.43	6825400.75	0

**CR CAMPEIRO 5**

**ANEXO A – Laudo de análise química do solo**