

**TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E
GEOESTATÍSTICA APLICADAS EM UM POVOAMENTO
DE *Eucalyptus urophylla* S. T. BLAKE PARA ESTIMATIVA
DE VOLUME**

FABRÍCIO ASSIS LEAL

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E
GEOESTATÍSTICA APLICADAS EM UM POVOAMENTO
DE *Eucalyptus urophylla* S. T. BLAKE PARA ESTIMATIVA
DE VOLUME**

FABRÍCIO ASSIS LEAL
Engenheiro Florestal

ORIENTADOR: PROF. DR. ERALDO MATRICARDI

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL - UnB**

**PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM-190/2013
BRASÍLIA/DF FEVEREIRO DE 2013**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOESTATÍSTICA
APLICADAS EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus urophylla* S. T.
BLAKE PARA ESTIMATIVA DE VOLUME

FABRÍCIO ASSIS LEAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM-190/2013

DISSERTAÇÃO APROVADA POR:

Prof. Dr. ERALDO APARECIDO TRONDOLI MATRICARDI
Professor do Departamento de Engenharia Florestal – UnB
ematricardi@unb.br (ORIENTADOR)

Prof. Dr^a. ALBA VALERIA REZENDE
Professora do Departamento de Engenharia Florestal – UnB
albavr@unb.br (EXAMINADOR INTERNO)

Prof. Dr. NILSON CLEMENTINO FERREIRA
Professor da Universidade Federal de Goiás - UFG
ncferreira@uol.com.br (EXAMINADOR EXTERNO)

Prof. Dr. REGINALDO SÉRGIO PEREIRA
Professor do Departamento de Engenharia Florestal – UnB
reginaldosp@unb.br (SUPLENTE INTERNO)

Brasília/DF, 22 de fevereiro de 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

L435t Leal, Fabrício Assis.
Técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística aplicadas em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake para estimativa de volume / Fabrício Assis Leal. -- 2013.
96 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, 2013.

Inclui bibliografia.

Orientação: Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi.

1. Eucalipto. 2. Sensoriamento remoto. 3. Mapeamento geológico. I. Matricardi, Eraldo A. T. II. Título.

CDU 633.878.91

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEAL, F. A. (2013). Técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística aplicadas em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake para estimativa de volume. Dissertação de mestrado em Ciências Florestais. Publicação **PPGEFL.DM-190/2013**. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília - UnB, Brasília/DF. 2013. 96p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Fabrício Assis Leal

TÍTULO: Técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística aplicadas em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake para estimativa de volume.

GRAU: MESTRE

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília (UnB) permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Fabrício Assis Leal
fabricaoassisleal@yahoo.com.br

Aos meus pais, Jesus & Lindaura, às
minhas irmãs Flávia e Fabiana e aos
meus sobrinhos Pedro e Bruna,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família que, mesmo estando distante, em momento algum me deixou desamparado. Pai, muito obrigado pelos ensinamentos e educação a mim proporcionados ao longo da vida. Você é o meu melhor amigo... Mãe, muito obrigado por sua doação incondicional em todos esses anos de minha existência, pelas palavras de carinho e conforto a cada telefonema.

Minhas irmãs, Flávia e Fabiana, vocês são surpreendentes. Obrigado pelo constante incentivo e preocupação com o meu bem-estar. Vocês sempre foram e serão especiais para mim. E não podia deixar de agradecer também aos meus sobrinhos PEDRO e BRUNA que, sem saberem, foram meu grande incentivo... O TIO AMA MUITO VOCÊS.

Em especial quero deixar os meus sinceros votos de boas vindas e de muita saúde a nova CRIANCINHA que está chegando à Família. Flávia e Alcides que DEUS abençoe ricamente vocês.

Aos meus avôs que sempre torceram muito por mim e sem dúvida nenhuma são meus exemplos de vida: Vovô Sebastião, Vovó Filinha, Vovó Maria e Vovô Emídio (*in memoriam*).

Aos meus cunhados Fabrício e Alcides pela amizade e forma com que zelam das minhas irmãs (Fabiana e Flávia) e dos meus sobrinhos (Pedro e Bruna). Um abraço.

Ao ilustre professor e amigo Eraldo Matricardi (orientador) pela paciência e compreensão na realização deste trabalho. Meu muito obrigado por todas as oportunidades, pelo ótimo relacionamento e entendimento. Você foi fundamental e muito generoso. OBRIGADO!

Á Núbia por sua ajuda e incentivo durante o tempo de convívio. Aos sobrinhos José Miguel e Maria Fernanda um abraço forte e muito especial do tio. Que DEUS abençoe ricamente vocês. Ao JOSÉ MIGUEL meu carinho especial e eterno.

Ao Leandro Afonso de Lima por toda colaboração e incentivo constante. Pelos trabalhos profissionais realizados juntos e oportunidades ofertadas. Obrigado Leandro.

Aos ilustres amigos (as) do Departamento de Engenharia Florestal da UnB, pela valiosa companhia: Alexandre, Bárbara, Bruno, Clarissa, Eder, Ekena, Fabiano, Fabrícia, Fagno, Gean, Glória, Helena, Henrique, Kamilla, Lamartine, Luciane (Lú), Noara, Olívia e Raul.

Ao amigo Eder Pereira Miguel pela ajuda imensurável e incondicional durante todo esse tempo. Você foi extraordinário comigo. *Eu graduei esse menino!* Boa sorte.

Aos professores pela valiosa contribuição com meus estudos e excelente amizade: Alba Valéria, Álvaro Nogueira, Anderson Marcos, Edson Eyji Sano (IBAMA/CSR), Eraldo Matricardi, Ildeu Soares, Paulo Roberto Meneses (Geociências/UnB) e Reginaldo Pereira.

Em especial ao amigo e professor Álvaro Nogueira que foi o precursor do meu interesse pela carreira acadêmica, indicando o meu primeiro estágio na UFLA.

Aos ilustres amigos da Secretaria da Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Florestal da UnB, pelo apoio e o inesgotável auxílio acadêmico: Pedro e Francisco César.

Aos amigos José Ricardo e Alessandra (Maputo/Moçambique), Marcelo e Rosana (Jardinópolis/SP), pela grande amizade e apreço. Vocês são especiais.

A COMIGO - Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano pela área de estudo. E as pessoas que me ajudaram: Ubirajara, João Pereira, Arnaldo Pereira, Antônio Dourado e ao meu grande amigo Wilson Gomes (Engenheiro Florestal).

Alexandre: Obrigado pela valiosa amizade; Henrique: Seus auxílios foram fundamentais; Eder: Obrigado pela ajuda; Glória: Sua determinação surpreende; Fabrícia: Você é sensacional; Lamartine: Sua dedicação é incrível; Raul: Companheiro, sua amizade é 100%; Kamilla: Você é surpreendente; Helena: Amizade fantástica. ALEXANDRE, FABRÍCIA & GLÓRIA: Gosto muito de vocês. *Fé na vida, Fé no homem, Fé no que virá... Nós podemos tudo, nós podemos mais. Vamos lá fazer o que será.*

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de mestrado.

Um Agradecimento especial a todos os brasileiros que financiaram os meus estudos por meio desta instituição pública de ensino superior.

A DEUS, O MEU OBRIGADO POR TUDO!!!

RESUMO

Os métodos tradicionais de estatística aplicados em inventários florestais não exploram suficientemente as relações que existem entre as unidades amostrais e não utilizam médias móveis para descrição de determinadas características espaciais em superfícies contínuas nos povoamentos florestais, ao contrário do método de geoestatística. O uso de dados orbitais constitui um método indireto e não destrutivo para estimativa de parâmetros biofísicos em florestas plantadas, possibilitando de forma efetiva a estimativa de variáveis importantes sobre um determinado povoamento florestal. O presente estudo buscou comparar estimativas do interpolador geoespacial em relação ao inventário florestal tradicional e as estimativas indiretas do volume a partir de índices de vegetação como variável independente no modelo matemático e também como fator de correção do volume por unidade de área. A área de estudo envolveu um total de 116 hectares de floresta de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake em Rio Verde/GO. Esta floresta, com 6,5 anos, foi plantada em 2005, com espaçamento de 2,8 m x 1,8 m. Foram amostradas 23 parcelas de 400 m² cada. Para avaliação do processo de interpolação foram utilizadas de forma aleatória 13 parcelas das 23 alocadas. As outras 10 parcelas foram utilizadas para validação da interpolação e comparação com os dados do inventário florestal. Para a interpolação e estimativa final do volume para a área de estudo foram utilizados os dados das 23 parcelas do inventário florestal. A média do volume encontrado com o interpolador utilizado foi de 9,8 (m³/parcela) e para o inventário florestal foi de 9,4 (m³/parcela), não sendo significativa a diferença pelo teste *t*. Já o erro amostral relativo ao interpolador foi de 8,3% e para o inventário de 8,4%, evidenciando que não existe diferença entre os procedimentos adotados neste estudo. O menor erro amostral relativo, advindo do interpolador está relacionado ao uso de médias móveis não usuais em procedimentos de inventário florestal. O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foi o índice escolhido como variável independente no modelo matemático, por apresentar melhor correlação com o volume (0,20), em relação aos demais índices. Nas estatísticas de ajuste e precisão o modelo de Berkhout apresentou os melhores resultados e seu coeficiente de determinação (R²) foi de 0,54, com o erro padrão da estimativa de 1,29 m³/parcela ou 13,1%. Na estimativa de volume total (m³) para o povoamento, a equação apresentou um volume de 28.555 (m³/116 ha), apenas 73 m³ a mais que o intervalo de confiança do inventário florestal. Com a estimativa do volume por parcela, utilizando os índices de vegetação como fator de correção (FC) do volume, foi possível notar que nenhum dos procedimentos pode estimar o volume (m³) com precisão, em relação ao inventário, verificado pelo Teste *t*, ao nível de 5% de significância. O estimador geoestatístico gerou com bastante coerência o mapeamento de unidades produtivas. Essa pesquisa buscou fortalecer a utilização das técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística em levantamentos florestais.

Palavras-Chave: Eucalipto, Geoprocessamento, Índice de vegetação, Krigagem, Fator de correção.

ABSTRACT

Ordinary statistical techniques applied to forest inventories do not properly assess relationships among sampling units, neither do they utilize moving averages to describe given spatial forest characteristics, as a result of the applied Geostatistics method. The use of orbital data regards an indirect and non-destructive method for estimating biophysical parameters in planted forests, effectively enabling the estimation of important variables about a certain forest stand. This research intended to compare forest volume estimations based on geospatial interpolation and the indirect volume estimations using vegetation indices as independent variables in the mathematical equations, as well as the forest volume correction (factor per area). Study area comprises 116 hectares of a *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake forest in Rio Verde/GO. This forest, with 6.5 years, was planted in 2005, with 2.8 x 1.8 m spacing. Twenty-three 400-m² plots were sampled. To evaluate the interpolation process, 13 within the 23 plots were randomly used. The other ten plots were used to validate interpolation and comparison with the forest inventory. Data from the 23 plots was used for the interpolation and final estimation of the volume for the study area. The average found by the use of the interpolator was 9.8 (m³/plot) and 9.4 (m³/plot) was found for the forest inventory, whereas there was no significant difference by t test. Yet, kriging relative sampling error was 8.3% and 8.4% was found for the forest inventory, with no difference among both proceedings used in this study. The lowest relative sampling error, observed for kriging, is related to the use of moving averages, unusual for forest inventories. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was the index chosen as independent variable in the mathematical model, for presenting higher correlation with volume compared to the other indices (0.20). In the Berkhout model statistics of adjustment and precision, it presented the best results and the coefficient of determination (R²) was 0.54, with estimated standard error of 1.29 m³/plot or 13.1%. For the stand total volume estimation (m³), the equation presented a volume of 28,555 (m³/116 ha), only 73 m³ higher than the average of the interval of confidence for the forest inventory. With volume estimation per plot, using the vegetation indices as volume correction factor (FC), it was possible to notice that none of the proceedings can precisely estimate volume (m³) compared to the inventory, analysis through t test, at 5% level of confidence. The geostatistic estimator generated, with high coherence, the mapping of the production unities. Therefore, this research aimed at subsidizing the utilization of remote sensing techniques and geostatistics in forest surveys.

Key-words: Eucalypts, Geoprocessing, Vegetation Index, Kriging, Correction factor.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
CAPÍTULO I	17
1.1 - ASPECTOS GERAIS SOBRE O FORMATO DESTE MANUSCRITO	17
1.2 - INTRODUÇÃO GERAL	18
1.3 - OBJETIVO GERAL	20
1.4 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.5 - QUESTÕES DE PESQUISA	20
1.6 - HIPÓTESES ABORDADAS NO PRESENTE ESTUDO	21
1.7 - TEORIA DA AMOSTRAGEM PARA INVENTÁRIO FLORESTAL	23
1.8 - TEORIA GEOESTATÍSTICA	24
1.8.1 - Krigagem	24
1.8.2 - Semivariograma	26
1.8.3 - Modelos teóricos de semivariogramas	29
1.8.4 - Análise exploratória de dados em geoestatística (AED)	30
1.9 - USO DA ESTATÍSTICA ESPACIAL EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS	31
1.10 - CUBAGEM RIGOROSA	33
1.11 - EQUAÇÕES DE VOLUME E RELAÇÕES HIPSOMÉTRICAS	34
1.12 - IMAGENS DE SATÉLITE LANDSAT 5 TM	36
1.13 - USOS E APLICAÇÕES DE IMAGENS LANDSAT 5 TM	38
1.14 - CORREÇÃO RADIOMÉTRICA EM IMAGENS LANDSAT 5 TM	40
1.15 - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	41
1.15.1 - Índices de vegetação considerados neste estudo	43
1.15.1.1 - <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI)	43
1.15.1.2 - <i>Soil Adjusted Vegetation Index</i> (SAVI)	43
1.15.1.3 - <i>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</i> (MSAVI ₂)	44
1.15.1.4 - <i>Enhanced Vegetation Index</i> (EVI)	44
1.15.1.5 - <i>Enhanced Vegetation Index 2</i> (EVI ₂)	45

CAPÍTULO II: MAPEAMENTO DE UNIDADES PRODUTIVAS UTILIZANDO A INTERPOLAÇÃO GEOESPACIAL KRIGAGEM A PARTIR DO INVENTÁRIO FLORESTAL EM UM POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. BLAKE	46
2.1 - INTRODUÇÃO	46
2.2 - MATERIAL E MÉTODOS	47
2.2.1 - Caracterização e localização da área de estudo	47
2.2.2 - Inventário florestal	48
2.2.2.1 - Cubagem rigorosa	49
2.2.2.2 - Modelos hipsométricos e volumétricos.....	49
2.2.3 - Geoestatística - Krigagem	51
2.2.4 - Comparação entre os resultados do inventário florestal e da geoestatística.....	51
2.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
2.3.1 - Modelos hipsométricos	52
2.3.2 - Modelos volumétricos	54
2.3.3 - Análise do inventário florestal.....	58
2.3.4 - Geoestatística - Krigagem Ordinária.....	59
2.3.4.1 - Análise exploratória dos dados (AED).....	59
2.3.4.2 - Semivariograma $\gamma(h)$	62
2.3.5 - Comparação entre as estimativas do inventário florestal e a Krigagem	65
2.3.5.1 - Teste t para dados pareados e outras comparações	66
2.3.6 - Mapeamento de unidades produtivas utilizando a krigagem	66
2.3.7 - Interpolação utilizando todas as parcelas (23) do inventário florestal.....	68
2.4 - CONCLUSÕES	69
CAPÍTULO III: ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E FATOR DE CORREÇÃO NA ESTIMATIVA DO VOLUME (m³) EM UM POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. BLAKE	71
3.1 - INTRODUÇÃO	71
3.2 - MATERIAL E MÉTODOS	72

3.2.1 - Caracterização e localização da área de estudo	72
3.2.2 - Coleta de dados.....	72
3.2.2.1 - Imagem de satélite <i>Landsat 5 TM</i>	72
3.2.2.2 - Índices de vegetação.....	73
3.2.3 - Análise de regressão e correlação entre os índices de vegetação e o volume (m ³) por parcela	75
3.2.4 - Estimativa do volume (m ³) utilizando a média do índice de vegetação como fator de correção	75
3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
3.3.1 - Análise de regressão e correlação entre os índices de vegetação com o volume (m ³) por parcela	76
3.3.2 - Estimativa do volume (m ³) por parcela utilizando a média do índice de vegetação como fator de correção.....	80
3.3.2.1 - Comparação entre os fatores de correção e o inventário florestal	81
3.4 - CONCLUSÕES	82
CAPÍTULO IV: OBSERVAÇÕES FINAIS	84
4.1 - PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA ABORDADO	84
4.2 - QUESTÕES DE PESQUISA REVISITADAS	85
4.3 - HIPÓTESES REVISITADAS	86
4.4 - OPORTUNIDADES PARA NOVOS ESTUDOS	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

TABELA 1.1 - Características do satélite <i>Landsat 5</i> e do sensor TM.....	37
---	----

CAPÍTULO II

TABELA 2.1 - Modelos hipsométricos testados para obtenção da variável altura total.	49
TABELA 2.2 - Modelos volumétricos testados para obtenção da variável volume (m ³)....	50
TABELA 2.3 - Modelos hipsométricos ajustados.	52
TABELA 2.4 - Estatísticas de precisão para as equações hipsométricas.	52
TABELA 2.5 - Equações volumétricas ajustadas para obtenção da variável volume (m ³).	54
TABELA 2.6 - Estatísticas de precisão e ajuste para as equações volumétricas.	55
TABELA 2.7 - Volume (m ³) para todas as parcelas (23) lançadas na área de estudo.....	58
TABELA 2.8 - Parcelas (13) sorteadas aleatoriamente para o processamento do inventário florestal e para a interpolação pelo procedimento da krigagem ordinária.	58
TABELA 2.9 - Volume (m ³ /parcela) do inventário florestal e predito na Krigagem para as 10 parcelas de validação.....	65
TABELA 2.10 - Intervalos de confiança para o volume (m ³).....	65

CAPÍTULO III

TABELA 3.1 - Índices de vegetação ajustados para o trabalho.....	74
TABELA 3.2 - Modelos que foram ajustados para a estimativa do volume por parcela em função dos índices de vegetação.....	75
TABELA 3.3 - Imagens dos diferentes índices de vegetação ajustados.....	76
TABELA 3.4 - Valores médios dos índices de vegetação e volume (m ³ /parcela) correspondente para as 23 parcelas amostradas.	76
TABELA 3.5 - Matriz de correlação entre variáveis para identificação da variável mais correlacionada com o volume.....	77
TABELA 3.6 - Equações ajustadas para estimativa do volume (m ³ /parcela), utilizando apenas o índice de vegetação NDVI como variável independente.....	78
TABELA 3.7 - Estatísticas de precisão para as equações ajustadas.....	78

TABELA 3.8 - Valores médios dos índices de vegetação utilizados para estimativa do volume (m ³), encontrados para as 23 parcelas.....	80
TABELA 3.9 - Volumes (m ³ /parcela) agrupados, após estimativa com os fatores de forma e correção, para cada procedimento.....	81
TABELA 3.10 - Valores significativos para o Teste <i>t</i> entre os fatores de correção e o volume (m ³ /parcela) do inventário florestal.	82

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

FIGURA 1.1: Modelo de um semivariograma experimental e suas propriedades. Fonte: Adaptado de Andriotti (2005).....27

CAPÍTULO II

FIGURA 2.1: Localização da área de estudo e espacialização dos talhões do povoamento florestal estudado.	47
FIGURA 2.2: Distribuição residual dos modelos hipsométricos ajustados.....	53
FIGURA 2.3: Distribuição residual dos modelos ajustados para obtenção do volume.....	56
FIGURA 2.4: Mapa com a espacialização do erro padronizado na área de estudo.....	59
FIGURA 2.5: Gráfico <i>Box Plot</i> para os dados de volume (m ³ /parcela), considerando as 13 parcelas utilizadas para o procedimento de krigagem.	60
FIGURA 2.6: Comportamento da variável volume (m ³ /parcela) em relação ao sentido Leste-Oeste (A).....	61
FIGURA 2.7: Comportamento da variável volume (m ³ /parcela) em relação ao sentido Norte-Sul (B).	61
FIGURA 2.8: Modelo esférico ajustado ao semivariograma para dados de volume (m ³ /parcela), na direção de 0°, isotrópico.	62
FIGURA 2.9: Modelagem semivariográfica para a variável volume (m ³ /parcela) e a constatação de anisotropia (A) e o sentido de interpolação (B) a 5°.	63
FIGURA 2.10: Modelo esférico ajustado ao semivariograma para dados de volume (m ³ /parcela), na direção de 5°, e abertura angular de 49°.	63
FIGURA 2.11: Mapa de predição do volume (m ³) para o povoamento estudado.....	64
FIGURA 2.12: Resultado do mapeamento das unidades produtivas no povoamento em estudo.	67
FIGURA 2.13: Áreas das unidades produtivas após mapeamento e inferência pelo interpolador Krigagem.	68
FIGURA 2.14: Valores interpolados de volume (m ³ /parcela) para o povoamento, utilizando as 23 parcelas do inventário florestal.	69

CAPÍTULO III

FIGURA 3.1: Cena 223/72 do satélite <i>Landsat 5 TM</i> e localização da área de estudo.....	73
FIGURA 3.2: <i>Buffer</i> utilizado para a obtenção dos valores médios de cada índice de vegetação, nas parcelas amostradas.	74
FIGURA 3.3: Dispersão dos resíduos para as equações ajustadas.	79

CAPÍTULO I

1.1 - ASPECTOS GERAIS SOBRE O FORMATO DESTE MANUSCRITO

A presente dissertação foi dividida em quatro capítulos. O primeiro trata do referencial teórico de todos os assuntos abordados no trabalho. Neste capítulo foram fornecidas bases sobre a fundamentação teórica para a aplicação das técnicas de geoprocessamento, entendimento dos dados de sensores remoto e os procedimentos de laboratório e campo, de modo a dar suporte às análises e discussões previstas neste manuscrito.

No segundo capítulo foram feitas análises estatísticas com dados de volumes (m^3 /parcela) obtidos no inventário florestal e valores estimados com o interpolador geoespacial Krigagem Ordinária. O capítulo 2 aborda ainda os aspectos da quantidade amostral requerida em inventário florestal levando em conta o apoio de um interpolador geoespacial.

O terceiro capítulo apresenta algumas equações matemáticas para identificar a relação entre dados de campo e dados obtidos de sensoriamento remoto, mais especificamente, estimativas de volume de um povoamento florestal a partir de estimativas de índices de vegetação. Deste modo, o capítulo 3 apresenta alternativas para estimativa do volume de madeira na área de estudo a partir de dados de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento.

No quarto e último capítulo são apresentados os principais tópicos abordados, as considerações gerais e as principais conclusões deste trabalho. No tópico, as questões de pesquisa e hipóteses apresentadas no início deste manuscrito também são revisitadas. Finalmente, são apresentadas algumas oportunidades de estudos futuros no intuito de complementar o presente trabalho.

1.2 - INTRODUÇÃO GERAL

O conhecimento das variáveis dendrométricas de uma floresta é de extrema importância para nortear ações e intervenções apropriadas em um povoamento florestal, subsidiando as técnicas de manejo e o planejamento da exploração. Tal conhecimento advém da utilização de técnicas de inventários florestais, que consistem na medição de parte da população com o uso de unidades amostrais (parcelas), de modo que há uma extrapolação dos resultados para a área total.

O inventário florestal utiliza os fundamentos e recursos da teoria da amostragem, com o objetivo de, a partir de uma unidade amostral, determinar ou estimar uma característica, podendo essa ser quantitativa e/ou qualitativa (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997).

Para Mello (2004), os métodos tradicionais de estatística, adotados para análises dos inventários florestais, utilizam uma medida central (média fixa) e uma dispersão (variância), para descrever então um determinado fenômeno. Com isso não há exploração suficiente das relações que possam existir entre as unidades amostrais e tampouco, das possíveis correlações existentes entre observações vizinhas.

Por outro lado, técnicas de interpolação de dados podem contribuir com a estimativa de variáveis de interesse numa dada área. Por exemplo, Daniel Gerhardus Krige, em 1951, em trabalho com dados de mineração de ouro concluiu que as variâncias obtidas a partir da abordagem clássica de amostragem não faziam sentido se as distâncias entre as amostras não fosse considerada. Iniciava-se ali o entendimento da dependência espacial e geoestatística (MELLO et al., 2006).

Matheron em 1963 desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas, outro nome dado à geoestatística. Essa teoria foi definida como uma função espacial numérica, variando de um local para outro, apresentando continuidade aparente, cuja variação não pode ser representada por uma simples função matemática (ANDRIOTTI, 2005).

Com isso a geoestatística pode ser vista como um grande ramo da estatística espacial que estuda a relação de uma variável regionalizada, com ela mesma, numa outra posição, melhorando as inferências e prognósticos dessa variável a ser interpolada (CRESSIE, 1993).

A geoestatística utiliza-se de dois procedimentos de interpolação: a Krigagem e a Simulação Estocástica. O interpolador geoespacial Krigagem, tem o procedimento onde

em cada ponto u_0 , um valor da variável Z é estimado $\hat{z}(u_0)$, utilizando-se um estimador. Esses estimadores apresentam algumas propriedades importantes: são não tendenciosos e ótimos no sentido de que minimizam funções dos erros inferenciais (CAMARGO et al., 2002).

Segundo Câmara et al. (2002), o procedimento de interpolação geoespacial Krigagem é pioneiro em introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática para as variáveis estudadas, abolindo o uso de média fixa, entendendo que a partir de uma determinada distância, certamente não se encontrarão valores aproximados devido a probabilidade da correlação espacial deixar de existir.

A Krigagem parte do princípio que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados. Com isso a técnica de Krigagem assume que os dados recolhidos em uma determinada população se encontram autocorrelacionados no espaço (CÂMARA et al., 2002).

Como a geoestatística se apresenta com potencial aplicação no meio florestal, melhorando as estimativas e tornando-as mais precisas, há necessidade também da integração de outras ferramentas e tecnologias que aperfeiçoem, simplifiquem e desonerem a obtenção de informações com relevante interesse, por exemplo, o volume de madeira em povoamentos florestais, cuja dinâmica exige um monitoramento contínuo e eficaz.

Segundo Mello (2004), essa dinâmica necessita de acompanhamento que leve em consideração técnicas de amostragem eficientes na representação do estado atual e temporal da floresta, objetivando produzir informações concisas e com menor custo possível, subsidiando ações de manejo e planejamento florestal.

Assim, as técnicas de geoprocessamento aliadas a dados de campo e de sensores remotos, apresentam-se como alternativas viáveis para fornecer subsídios na sistematização de informações e predição de variáveis dendrométricas, derivadas de diferentes fontes de sensores, tornando possível a integração de dados espaciais e não espaciais, o monitoramento de informações e a atualização constante das mesmas (SOUZA et al., 2007).

O presente estudo envolveu a aplicação de técnicas de geoprocessamento, geoestatística e dados de sensoriamento remoto e campo para a estimativa do volume de madeira em um povoamento de eucalipto, no município de Rio Verde/GO. Os resultados obtidos nesta pesquisa potencialmente podem facilitar a obtenção desta importante variável

aos silvicultores, podendo ainda contribuir com a redução de custos, tempo e danos aos plantios em função das atividades de campo.

1.3 - OBJETIVO GERAL

Avaliar e testar o uso de técnicas de geoprocessamento e dados de sensores remoto para estimar o volume em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, abordando as relações existentes entre os dados advindos do inventário florestal tradicional com os dados estimados por essas técnicas.

1.4 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar o volume (m³) para a área de estudo a partir do inventário florestal por amostragem;
- Comparar os volumes (m³) obtidos a partir de inventário florestal, com os valores encontrados com a técnica de geoestatística krigagem;
- Testar e selecionar modelos de regressão para estimar volume de madeira (m³), em função de índices de vegetação gerados a partir de imagens multiespectrais;
- Utilizar a média dos índices de vegetação por parcela amostrada como fator de correção do volume do cilindro e comparar estatisticamente este volume (m³/parcela) com os valores advindos do inventário florestal.

1.5 - QUESTÕES DE PESQUISA

Os inventários florestais, de modo geral, são onerosos e ao mesmo tempo envolvem procedimentos que podem ser morosos. Por outro lado, tais inventários são imprescindíveis, pois possibilitam a obtenção de estimativas de diversas variáveis de interesse relevante aos silvicultores, em especial sobre o estoque de madeira de povoamentos florestais. A intensidade amostral se apresenta como um dos principais vilões na onerosidade dos inventários florestais (MELLO, 2004), e por isso implica em desafios para o desenvolvimento de técnicas e métodos mais acessíveis para obtenção de informações de florestas plantadas, destacando-se aqui o volume de madeira. Com base nesta demanda, o presente trabalho tem as seguintes questões de pesquisa:

- O interpolador geoespacial Krigagem pode ser utilizado para estimar o volume de madeira em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake? Qual a precisão de tais estimativas em relação ao método tradicional de inventário florestal?
- É possível utilizar Índices de vegetação, gerados a partir de imagens multiespectrais, como variáveis independentes em modelos matemáticos e como fatores de correção para estimar o volume de madeira em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake?

1.6 - HIPÓTESES ABORDADAS NO PRESENTE ESTUDO

HIPÓTESE I: O volume (m³) de madeira do povoamento florestal em estudo pode ser estimado para toda a sua superfície a partir de volumes amostrais e técnicas de interpolação geoestatísticas.

Uma característica marcante em área reflorestada é a sua aparente homogeneidade, embora a observação de variações ao longo do plantio seja frequente. Essa variabilidade espacial pode, muitas vezes, afetar de forma marcante a qualidade das estimativas feitas pelo inventariador (MELLO et al., 2006). Pioneiramente, na área florestal, Matern (1960) desenvolveu, paralelamente com Matheron (1963), a Teoria das Variáveis Regionalizadas. Assim, é antiga a ideia de que as variáveis dendrométricas variam de um lugar a outro na paisagem com certa aparência de continuidade espacial. Essa continuidade é atribuída às variáveis regionalizadas a qual se manifesta, sobretudo, pela tendência de se tomar valores mais próximos em dois pontos amostrados, quanto menos afastados estiverem os referidos pontos. A teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Tradicionalmente, das técnicas de geoestatísticas, as baseadas em semivariogramas têm sido as mais utilizadas para modelar a estrutura de continuidade espacial (PLONER; DUTTER, 2000). Deste modo, o estudo semivariográfico permite avaliar a dispersão natural das variáveis regionalizadas e inferir sobre as zonas de influência e a de pura aleatoriedade (ROBERTSON, 2008). Para essa hipótese foram utilizadas 10 parcelas do inventário florestal com volume (m³) conhecido, para validação da superfície interpolada. Nessa validação foram utilizados os volumes (m³) interpolados nos mesmos

pontos do inventário florestal e posteriormente aplicado um Teste t , ao nível de 5% de significância.

HIPÓTESE II: O volume (m^3) de madeira obtido a partir do inventário florestal apresenta correlação com os índices de vegetação e a estimativa dessa variável pode ser feita a partir de dados de sensoriamento remoto.

Desde a descoberta de que os vegetais extraem da radiação eletromagnética parte da energia que necessitam para viver, a interação entre essa radiação e a vegetação passou a ser estudada detalhadamente. O sensoriamento remoto é uma das tecnologias que mais contribuíram e ainda contribui e motiva o avanço nos conhecimentos de como a vegetação processa essa radiação eletromagnética (ROSENDO, 2005). Assim, as técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas em estudos e aplicações na área florestal, merecendo destaque os projetos que visam a quantificação de biomassa florestal. As estimativas de biomassa florestal por meio de informações orbitais podem ser realizadas mediante a utilização de dados coletados em campo, aeronave ou nível orbital. Em qualquer um destes níveis, tem sido explorada, entre outras, a relação entre índices de vegetação (IV) e a biomassa (SOUSA; PONZONI, 1998). Esses índices foram desenvolvidos a partir dos valores de radiância refletida nas bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo. Portanto, eles exploram o contraste existente entre estas duas regiões espectrais no que diz respeito à radiância refletida pela vegetação e, com isso, refletem os valores dos índices em medidas quantitativas. Os índices de vegetação são importantes descritores de florestas nativas e plantadas e sua predição tem sido realizada com sucesso no meio florestal, incorporando técnicas tradicionais e não convencionais na estimativa de variáveis de grande interesse aos silvicultores (FERNANDES et al., 2011). Assim, para essa hipótese, este estudo testou o uso de índices de vegetação como variável independente no modelo matemático, selecionando a melhor equação ajustada com base nas estatísticas de precisão utilizadas nas análises de regressão, sendo: Gráfico de distribuição dos resíduos, Erro padrão da estimativa (S_{yx}) e Coeficiente de determinação (R^2); E posteriormente foi comparado o volume (m^3) estimado para o povoamento, advindo dessa equação, com aquele gerado pelo intervalo de confiança, no inventário florestal. Para testar o índice de vegetação como fator de correção do volume cilíndrico, nas parcelas amostradas, foi aplicado o Teste t para dados pareados, ao nível de 5% de significância.

1.7 - TEORIA DA AMOSTRAGEM PARA INVENTÁRIO FLORESTAL

Segundo Péllico Netto e Brena (1997), o inventário florestal consiste em atividade que utiliza fundamentos e recursos da teoria da amostragem com o objetivo de determinar ou estimar, a partir de uma unidade amostral, uma dada característica quantitativa e/ou qualitativa.

As amostras ou unidades amostrais são selecionadas seguindo critérios e procedimentos de um delineamento amostral. Diante disso, existem diversos estudos com o objetivo de avaliar o comportamento e desempenho de diferentes procedimentos de amostragem (HIGUCHI, 1986/87; KORNING et al., 1991; MACHADO, 1988; MELLO; SCOLFORO, 2000).

De acordo com Cochran (1977), os métodos de estatística tradicionais utilizados para análises desses procedimentos de amostragem foram idealizados com base na Teoria Clássica de Amostragem.

Assim sendo, segundo Trangmar et al. (1985), por esta teoria o valor médio de uma determinada característica, em uma área amostrada, é igual ao valor da esperança matemática desta característica em qualquer ponto dentro dessa área, com um erro de estimativa correspondente à variância dos dados amostrados.

Portanto, a teoria de amostragem clássica foi baseada no princípio da casualização, onde segundo Duarte (2000), fica imputado nesse princípio à capacidade do procedimento em neutralizar os efeitos da correlação espacial, com isso as posições das unidades amostrais no campo podem ser ignoradas nesta abordagem. A suposição desses métodos é que as variações de uma determinada característica, de um local para outro, são aleatórias e independentes.

Segundo Hoef (2002), o desenvolvimento teórico da amostragem clássica foi efetuado com base no conceito de populações fixas, ou seja, aquelas cujo conjunto de unidades amostrais é finito e que, para cada unidade amostral, o valor da variável avaliada é fixado.

Os métodos tradicionais de estatística, usados para análise dos inventários florestais, utilizam uma medida central (média) e outra de dispersão (variância) para descrever um determinado fenômeno, sem levar em consideração, as possíveis correlações entre observações vizinhas. Portanto, eles não exploram suficientemente as relações que possam existir entre as unidades amostrais, (MELLO, 2004).

1.8 - TEORIA GEOESTATÍSTICA

Em 1951, *Daniel Gerhardus Krige* trabalhando com dados de mineração de ouro concluiu que as variâncias obtidas, através da abordagem clássica de amostragem, não faziam sentido se não considerasse as distâncias entre as amostras (MELLO, 2004).

Com isso, Matheron (1963) se baseando nessas informações e observações, desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, outro nome dado a geoestatística. Segundo o autor, essa teoria foi definida como uma função espacial numérica, que varia de um local para outro e apresenta continuidade aparente, cuja variação não pode ser representada por uma simples função matemática.

Segundo Mello (2004), a teoria das variáveis regionalizadas pressupõe que cada dado $z(xi)$ é modelado como uma variável aleatória, que pode ser expressa pela soma de três componentes: um componente estrutural associado a um valor médio constante ou a uma tendência constante; um componente aleatório, espacialmente correlacionado; e um erro aleatório.

De acordo Cressie (1993), a geoestatística pode ser vista como um grande ramo da estatística espacial que estuda a relação de uma variável regionalizada com ela mesma numa outra posição, melhorando as inferências e prognósticos dessa variável.

Conforme Camargo et al. (2002), a geoestatística utiliza dois tipos de procedimentos de interpolação, ou seja, Krigagem e Simulação Estocástica. Neste estudo foi considerado apenas do interpolador geoespacial Krigagem, onde para cada ponto u_0 é estimado um valor da variável Z , $\hat{z}(u_0)$. Os estimadores apresentam algumas propriedades importantes: são não tendenciosos e ótimos no sentido de que minimizam funções dos erros inferenciais.

1.8.1 - Krigagem

Câmara et al. (2002) afirmaram que o procedimento de interpolação geoespacial Krigagem é pioneiro em introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimativa sistemática para as variáveis estudadas. Diferencia-se também de outros métodos de interpolação por estimar uma matriz de covariância espacial, que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a

ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Além disso, a Krigagem também fornece estimadores com propriedades de não tendenciosidade e eficiência.

A Krigagem parte do princípio que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados. Com isso a técnica de Krigagem assume que os dados recolhidos de uma determinada população se encontram autocorrelacionados no espaço. Porém, a partir de uma determinada distância, certamente não se encontrarão valores aproximados, devido à probabilidade de correlação espacial deixar de existir (CÂMARA et al., 2002).

O estimador geoespacial Krigagem é uma combinação linear das observações das variáveis e suas características são apresentadas abaixo (KANEGAE JUNIOR et al., 2007):

- Linear: As suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados existentes;
- Não enviesada: Procura que a média dos erros seja nula (desvios entre o valor real e o valor estimado);
- Mitigação de erros na estimativa: Minimiza os erros de estimativa por apresentar uma variância mínima (variância de estimativa).

Sua expressão matemática é dada por:

$$[Z(x_0)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha}) \quad (1.1)$$

Onde: λ_{α} = ponderadores da variável $Z(x_{\alpha})$; N = número de observações. Por ser estimador não-viesado $[Z(x_0)]^*$ segue as seguintes condições:

$$\sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} = 1 \quad (1.2)$$

Onde: Esperança do erro de estimação $E\{\varepsilon(x_0)\} = 0$ e variância de estimação mínima, $\min\{\text{var}(\varepsilon(x_0))\}$.

O termo Krigagem abrange um conjunto de métodos. Os mais usuais são (ANDRIOTTI, 2005):

- Krigagem Simples: Assume que as médias locais são relativamente constantes e de valor muito semelhante à média da população que é conhecida. A média da população é utilizada para cada estimação local, em conjunto com os pontos vizinhos estabelecidos como necessários para a estimação;

- Krigagem Ordinária: Assume que as médias locais não são necessariamente próximas da média da população e usa apenas os pontos vizinhos para a estimação. É o método mais usado em problemas ambientais e em estimativas biológicas;
- Co-Krigagem: É uma extensão do método Krigagem Ordinária aplicada em situações em que duas ou mais variáveis são espacialmente dependentes e a variável que se quer estimar não está amostrada com a intensidade com que estão as outras variáveis dependentes. Utiliza os valores destas e as suas dependências para estimar a variável requerida.

A técnica de Krigagem assume que os dados recolhidos, de uma determinada população se encontram correlacionados no espaço. Porém, há necessidade de medir e quantificar essa dependência espacial e com isso surge o semivariograma, que mede a dependência espacial entre as amostras.

1.8.2 - Semivariograma

De acordo com Andriotti (2005), a estatística clássica considera as amostras como completamente independentes entre si, enquanto que a geoestatística assume correlação entre elas, e a forma de expressar esta correlação é por meio da função variograma ou semivariograma.

O variograma e o semivariograma são uma função intrínseca que reflete a estrutura de um fenômeno estudado e mede as relações estatísticas pelas covariâncias que existem entre amostras espaçadas, de sucessivos valores de h (distância entre amostras). É uma função que aumenta à medida que aumenta o valor de h até tornar-se constante.

Define-se variograma ou semivariograma como a variância do erro que se comete ao estimar um dado desconhecido em $x + h$ pela ajuda de um ponto dado em x . Em Yamamoto (2001), a função variograma $2\gamma(h)$ é definida como sendo a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância h , conforme a seguinte equação:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (1.3)$$

Onde: $2\gamma(h)$ é a função variograma; n é o número de pares de pontos separados por uma distância h ; $Z(x)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x ; $Z(x+h)$ é o valor da variável regionalizada no ponto $(x+h)$.

Conforme Andriotti (2005), os termos variograma e semivariograma são utilizados extensivamente e muitas vezes se referindo à mesma quantidade. O mais comum é a utilização da palavra variograma quando, na realidade, se está tratando de semivariograma. São duas quantidades diferentes, pois o variograma vale o dobro do semivariograma, respectivamente, $2\gamma(h)$ e $\gamma(h)$.

Assim, Yamamoto (2001) define o semivariograma como uma ferramenta básica que permite descrever a variação de um fenômeno regionalizado no espaço, onde a forma usual de plotagem do semivariograma e a colocação dos valores de $\gamma(h)$ no eixo das ordenadas e a dos valores de h no eixo das abscissas, fazendo as duas origens iguais a zero coincidirem. A Figura 1.1 apresenta um exemplo clássico de semivariograma experimental e suas propriedades.

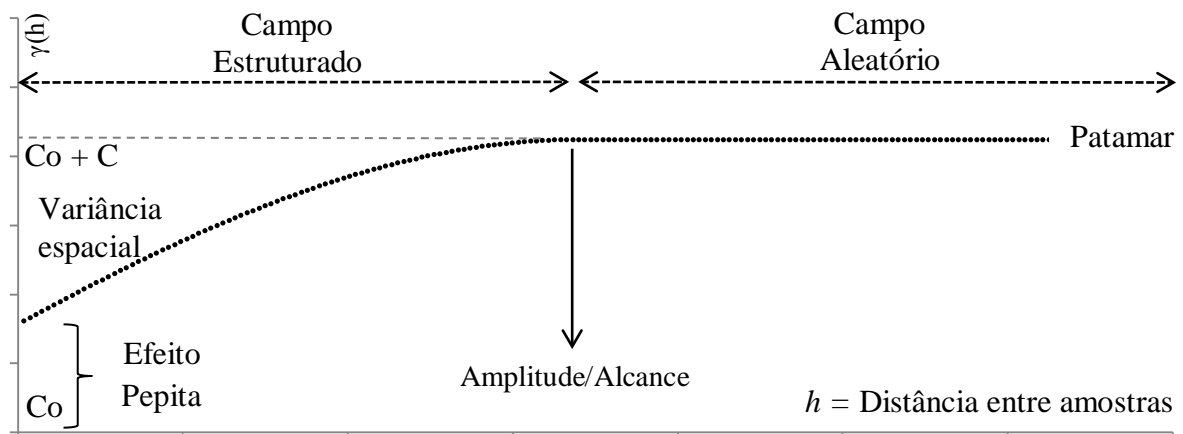


FIGURA 1.1: Modelo de um semivariograma experimental e suas propriedades. Fonte: Adaptado de Andriotti (2005).

Segundo Andriotti (2005):

- Amplitude/Alcance: É a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes. A amplitude reflete o grau de homogeneização entre as amostras, ou seja, quanto maior for a amplitude maior será a homogeneidade entre as amostras. Nesse sentido, o variograma dá um significado preciso da noção tradicional de zona de influência. A amplitude (a) é a distância que separa o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes). Um semivariograma de alcance finito caracteriza o que se chama de 'fenômeno de transição'; além da distância, espera-se independência, e o alcance dá a escala das estruturas elementares do fenômeno regionalizado correspondente.

- Patamar: É o valor no qual o semivariograma se estabiliza (no campo aleatório). É o ponto a partir do qual as amostras tornam-se independentes devido à grande distância que as separa. Corresponde à variância total que pode ser obtida pela estatística clássica.
- Efeito Pepita (*nugget* (τ^2) ou Variância Aleatória: O semivariograma por definição é nulo na origem, mas na prática as funções obtidas podem apresentar descontinuidade na origem, à qual se dá o nome de ‘efeito pepita’, que pode ser obtido traçando-se uma linha reta entre os primeiros pontos do semivariograma teórico, de modo que esta linha intercepte o eixo Y. Se esta interseção ocorre abaixo do valor zero, então o valor assumido por este efeito é também zero. O efeito pepita é representado por C_0 e é o valor da função semivariograma na origem ($h=0$). Teoricamente esse valor deveria ser zero, pois duas amostras tomadas no mesmo ponto ($h=0$) deveriam ter os mesmos valores; entretanto, quando não é assim, geralmente atribui-se esta diferença a erros de amostragem e/ou análise. Como os erros analíticos são desprezíveis com os equipamentos disponíveis atualmente, o efeito pepita deve-se a erros de amostragem decorrentes da variabilidade natural do depósito; o efeito pepita também é chamado de ‘variância aleatória’. Quando o efeito pepita for aproximadamente igual ao patamar ($C + C_0$), recebe o nome de efeito pepita puro, demonstrando que as amostras não recebem influência espacial.
- Variância Espacial: É dada pela diferença entre a variância advinda do próprio dado *a priori* e o efeito pepita.
- Anisotropia: Todas as variáveis apresentam uma continuidade espacial similar ao longo das diferentes direções do plano ou do espaço, gerando o chamado efeito de anisotropia. A principal incidência que este fenômeno tem no processo de estimativa é o maior peso que dá às amostras incluídas na direção de máxima continuidade, o eixo maior da elipse teórica de busca, frente a uma menor importância nas amostras situadas na direção de menor continuidade, o eixo menor da elipse de busca. Esta situação é relevante, mesmo que as amostras localizadas na direção de menor continuidade estejam mais próximas geometricamente que as outras.

Segundo Yamamoto (2001), a anisotropia pode ser: a) Geométrica: quando a amplitude varia conforme a direção, mas sob um patamar constante; b) Zonal: quando a amplitude permanece constante e o patamar varia de acordo com a direção, a anisotropia;

e, por fim, c) Mista: quando variam tanto a amplitude quanto o patamar, ou seja, quando as várias direções resultam em diferentes variogramas.

1.8.3 - Modelos teóricos de semivariogramas

De acordo com Gil (2006), os modelos de semivariogramas teóricos utilizados no processo de estimativa ou simulação devem satisfazer certas condições, ou seja, tem que ser ‘definido positivo’ ou de ‘tipo positivo’, do contrário pode existir o risco de encontrar variâncias negativas que não tem sentido. Geralmente, o ajuste de modelos teóricos para a determinação dos parâmetros do semivariograma se realiza de forma visual.

Para Faria Junior (2010), ainda que o ajuste de um modelo de semivariograma experimental seja a forma mais comum de aproximação da continuidade espacial, não é a única e nem necessariamente a melhor. Existem numerosas situações nas quais a seleção do modelo adequado deve se basear principalmente em aproximações qualitativas.

Os modelos de semivariograma são considerados modelos básicos, denominados de modelos isotrópicos por Isaaks e Srivastava (1989) e podem ser agrupados em duas grandes categorias: (a) os que alcançam um patamar, ou modelos de transição e (b) os que não alcançam um patamar.

O primeiro grupo inclui aqueles modelos em que a curva é ascendente de forma continuada até alcançar um nível que é conhecido como patamar; À distância em que alcançam o patamar é denominada de alcance ou amplitude. Entre estes modelos os mais utilizados são o exponencial, o esférico ou Matheron e o gaussiano.

No segundo grupo estão os que vão recebendo incrementos à medida que a distância aumenta, sem chegar a alcançar um patamar. Os mais representativos são o modelo linear e o de Wijsian, utilizados para modelar fenômenos com capacidade infinita de dispersão.

Por serem os modelos de transição os mais comumente utilizados, julga-se necessário uma breve descrição destes modelos. O modelo esférico ou Matheron é o que melhor se ajusta quando se trata de variáveis minerais e biológicas (FARIA JUNIOR, 2010).

O modelo esférico apresenta crescimento rápido na origem, onde tem um comportamento linear. Sua expressão é dada a seguir:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_o + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a \\ \gamma(h) &= C_o + C \text{ para } h > a \end{aligned} \quad (1.4)$$

Onde: C_o é o efeito pepita, $C_o + C$ é o valor do patamar, a é o alcance ou amplitude e h é o valor do correspondente passo (LAG). A tangente à origem encontra o patamar no ponto de abscissa em (2/3) de a . E a expressão $C_o + C$, representa o equivalente geostatístico da variância do conjunto de dados.

1.8.4 - Análise exploratória de dados em geostatística (AED)

Segundo Scolforo e Mello (2006), a primeira etapa de uma análise geostatística, após a coleta de dados, é a análise exploratória de dados (AED), que segundo os autores essa análise tem por objetivo observar o comportamento geral dos dados (forma, distribuição, tendência, tipo de estacionaridade, etc.).

Esse tipo de análise, embora desconsidere a estrutura de dependência espacial, é importante por permitir a identificação de dados atípicos que podem exercer algum tipo de influência nas análises geostatísticas, como também para comparação entre resultados obtidos em outros trabalhos (SCOLFORO; MELLO, 2006).

Conforme Scolforo e Mello (2006), a análise exploratória dos dados consiste na construção de gráficos de histograma e Box Plot. A distribuição estatística dos dados originais permite perceber o tipo de distribuição que os dados possuem. De acordo com Bussab e Morettin (2011), o gráfico Box Plot dá uma ideia da posição, dispersão e assimetria dos dados, bem como da presença ou ocorrência de dados discrepantes.

Outra importante ferramenta para AED, segundo Scolforo e Mello (2006), é o gráfico que analisa o comportamento da variável estudada em relação aos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste. Esses gráficos são importantes em estudos geostatísticos, pois apresentam a plausibilidade de se aplicar às condições da hipótese intrínseca, ou seja, média constante em toda a área.

Os autores citam ainda que é importante destacar que a presença de tendência pode afetar a favor ou contra a estrutura de dependência espacial, pois em um semivariograma com estrutura, ao incorporar a presença e tendência na modelagem, esta estrutura pode desaparecer e os dados serem independentes.

1.9 - USO DA ESTATÍSTICA ESPACIAL EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS

De acordo com Mello et al. (2005), embora a geoestatística seja amplamente aplicada na Geologia e Ciência do Solo, apresenta também grande potencial para ser aplicada em outras áreas da ciência, podendo caracterizar o comportamento espacial de variáveis, tais como as características dendrométricas.

A preocupação com a estrutura espacial de características dendrométricas não é assunto novo. Matérn (1960) e Osborne (1942) e Mello (2004) apresentaram a função exponencial para caracterizar a continuidade espacial de volumes de madeira obtidos de amostras sistemáticas.

Nos estudos de Samra et al. (1989), os autores procuraram modelar o crescimento de altura para *Melia azedarach* na Índia fazendo uso de técnicas da Geoestatística. A associação de técnicas geoestatísticas com sensoriamento remoto foi trabalhada por Cochen et al. (1990) e Wulder et al. (1996).

Esses autores procuraram caracterizar a estrutura de copa de coníferas a partir de imagens de satélite e parâmetros biofísicos, tais como índice de área foliar e área basal. Eles concluíram ter sido possível usar métodos geoestatísticos de krigagem para mapeamento da altura dominante e área basal na área estudada.

Outras aplicações da Geoestatística na área florestal são: estimativa de índices de sítio (HÖCK et al., 1998), estimativa do volume total de madeira num povoamento de *Pinus* sp. (GUNNARSON et al., 1998) e na determinação do grau de dependência espacial para área basal de *Pinus ponderosa* (BIONDI et al., 1994).

Thompson (1992) mostrou a importância da krigagem em estudos ecológicos, utilizando informações de uma área amostrada para prever determinada característica em toda a região.

Matérn (1960) avaliou o desempenho da amostragem sistemática com grade quadrada e casual simples. Usando a função exponencial para obtenção da correlação, o autor verificou que a grade sistemática quadrada foi superior à amostragem casual simples no controle da variação do volume de madeira.

Mello et al. (2005), no estudo da dependência espacial de características dendrométricas, para *Eucalyptus grandis*, descobriram que independente do procedimento de amostragem, as características volume e altura dominante apresentaram forte dependência espacial. Segundo ainda os mesmos autores, para esta característica, o alcance

prático foi de 700 metros, mostrando que as parcelas do inventário florestal, lançadas a distância inferior a 700 metros, não devem ser tratadas como independentes.

Trabalhando com uso da krigagem na definição de estratos para o inventário florestal, Ré et al. (2009), observaram que o volume total com casca (m^3/ha) apresenta dependência espacial, ou seja, existe uma função estrutural, com semivariância de comportamento modelável.

Segundo Freitas (2000) quando um determinado atributo da população varia de um local para o outro com algum grau de organização ou continuidade, expressando assim uma certa dependência espacial, a estatística clássica não deveria ser aplicada e, portanto uma estatística relativamente nova, a Geoestatística, poderia substituir a metodologia clássica, produzindo assim melhores resultados para as estimativas.

Mello et al. (2006), trabalhando com dados de inventário de plantios de eucalipto localizados no município de Luiz Antônio/SP, compararam estimativas de volume por talhão, usando estimador clássico e geoestatístico. Os autores propuseram que uma alternativa sem agregação de custo seria usar estimadores capazes de gerar estimativas de volume com grande eficácia para toda a área usando apenas as parcelas permanentes remedidas no ano de corte da floresta. A krigagem poderia gerar esses estimadores, pois permitiria considerar a autocorrelação entre as parcelas e, conseqüentemente, aumentar a eficiência da estimativa.

Os autores concluíram que a diferença média entre o volume total gerado pelo estimador clássico e o geoestatístico foi de 1%, com a variação do erro de 9 a 32% para o estimador clássico, e 8 a 12% para o estimador geoestatístico. O erro amostral por talhão em percentagem do estimador geoestatístico variou menos do que o do estimador clássico; Que a amplitude do intervalo de confiança do estimador geoestatístico oscilou pouco entre os talhões avaliados.

Segundo Mello et al. (2006), de maneira geral, as estimativas do estimador geoestatístico foram semelhantes quando comparadas com as do estimador clássico. Na presença de continuidade espacial, o uso do estimador geoestatístico para estimativa de volume por talhão é preferido, por duas razões: proporciona estimativa da precisão sem viés e é de baixo custo quando comparado com o estimador clássico.

Zonete (2009) ao avaliar o uso de técnicas de interpolação para estimativa de volume em florestas clonais de *Eucalyptus* sp. concluiu que a análise exploratória dos dados mostrou que é possível ajustar um modelo geoestatístico e este modelo pode ser

ajustado de maneira a eliminar tendências e gerar estimativas sem viés. Além disso, concluiu que o uso de modelos de interpolação em pacotes geoestatísticos, para confecção de mapas, pode ser feito para estimativa de volume em locais não amostrados, desde que o conjunto de parcelas possua uma distribuição adequada às tendências da variável no local.

1.10 - CUBAGEM RIGOROSA

Segundo Machado e Filho (2009) estimar o volume das árvores é, na maioria das vezes, a principal finalidade dos levantamentos florestais, notadamente quando se trata de povoamentos destinados para fins comerciais.

Para Soares et al. (2006), na execução de inventários florestais, torna-se necessário definir, *a priori*, a unidade de medida em que o volume será expresso, bem como as referências para a obtenção dos volumes, ou seja, os diâmetros mínimos de inclusão das árvores e quais as partes destas serão incluídas nas estimativas de volume.

A medição de todas as árvores de uma floresta com a finalidade de conhecer seus volumes é, muitas vezes, uma tarefa impraticável. Por isso, quase sempre, ela é inventariada por amostragem. E sendo a árvore um sólido irregular, como afirma Machado e Filho (2009), seu volume pode ser determinado analiticamente, através da cubagem rigorosa.

A partir do estudo da forma das árvores, Soares et al. (2006) citam que algumas expressões matemáticas foram desenvolvidas para a determinação do volume com ou sem casca das árvores, entre elas: Huber, Smalian e Newton. As três expressões propiciam estimativas volumétricas diferentes. No entanto, quanto menor o comprimento da seção, menor a diferença entre as estimativas.

Segundo Machado e Filho (2009) outras fórmulas surgiram posteriormente, como a de Newton e a de Hohenadl, bastante difundidas no meio florestal e sempre com a finalidade de resolver os problemas inerentes à cubagem de árvores.

O método de Hohenadl original é caracterizado pela divisão do tronco em cinco (5) seções de iguais comprimentos, que são estabelecidos em função da altura (h), sendo o volume calculado por apenas uma medida de diâmetro e circunferência no centro de cada seção como em Huber (MACHADO; FILHO, 2009). Neste caso o volume é obtido pela fórmula a seguir:

$$vol = \frac{h}{5} (g_{0,1} + g_{0,3} + g_{0,5} + g_{0,7} + g_{0,9}) \quad (1.5)$$

Onde: vol = volume da árvore (m³); $g_{0,i}$ = áreas transversais calculadas a 10, 30, 50, 70 e 90% de h; h = altura do fuste.

Assim sendo, Machado e Filho (2009) dizem que o método relativo de HOHENADL tem sido bastante empregado, mas os mensuradores têm preferido medir mais pontos sobre o tronco, sendo este dividido em dez (10) ou mais seções relativas, e neste caso o volume é obtido pela fórmula a seguir:

$$vol = \frac{h}{10} (g_{0,05} + g_{0,15} + g_{0,25} + \dots + g_{0,95}) \quad (1.6)$$

Onde: vol = volume da árvore (m³); $g_{0,i}$ = áreas transversais calculadas a 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 e 95% de h; h = altura do fuste.

1.11 - EQUAÇÕES DE VOLUME E RELAÇÕES HIPSOMÉTRICAS

O uso de equações de volume e relações hipsométricas em inventário florestal vem se constituindo em uma operação rotineira para cálculo de volume de madeira em pé e estimativa da altura das árvores através da relação DAP e altura.

De acordo com Couto e Bastos (1987) a determinação da altura das árvores em pé através de instrumentos é uma operação onerosa e sujeita a erros. Desse modo, procura-se medir algumas alturas nas parcelas de inventário e, através de relações hipsométricas, estimar as demais. Em seguida, conhecendo-se a altura total e o DAP de cada árvore da parcela pode-se estimar o volume de cada uma, através das equações de volume.

Os mesmos autores dizem que o método da equação de volume é o mais preciso dos métodos de determinação de volume de árvores em pé, contrapondo-se aos métodos de volume cilíndrico e da área basal.

No método de volume cilíndrico, o volume real da madeira é obtido através da multiplicação do volume cilíndrico por um fator de forma médio da floresta. O volume real é calculado através do método da área basal, pela multiplicação da área basal do povoamento, pela altura média e pelo fator de forma médio.

Para Couto (1984), os dois últimos métodos apresentam erros conceituais, pois em um deles parte-se do princípio de que o somatório dos produtos é igual ao produto dos somatórios, o que matematicamente não é correto para as condições de alta variabilidade que ocorrem nos povoamentos florestais.

A vantagem das equações de volume é o cálculo de volume sólido, árvore a árvore, através de modelos matemáticos, especialmente testados para apresentar os menores erros possíveis.

Segundo Couto e Bastos (1987), as equações de volume, cujos modelos incluem como variável independente, a altura e o DAP da árvore, são mais gerais podendo abranger sítios diferentes. O uso do fator de forma médio deve ser restrito às condições locais de sítio. Qualquer extrapolação além desses limites pode ser perigosa sob o ponto de vista de previsão dos resultados finais.

Veiga (1984), afirma que apesar dos bons resultados que comprovadamente são obtidos na estimativa do volume de madeira através de equações o seu uso era pouco frequente, por causa das dificuldades de cálculo e desconhecimento sobre o assunto por parte de técnicos ligados à área florestal.

Os primeiros estudos envolvendo a geração de equações de volume para cada situação florestal (espécie, idade, local, ciclo, rotação, etc.) foram realizados por Bastos (1984).

Em trabalho recente de Miguel e Leal (2012), com a seleção de equações volumétricas para a predição do volume total de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, na região norte do estado de Goiás, concluíram que as equações de volume se mostraram como uma excelente ferramenta para predição da variável volume. Os autores ainda citam que para a estimativa da variável volume total com casca, o modelo de simples entrada de Brenac se mostrou superior aos demais em todos os casos e em geral os modelos de dupla entrada foram superiores aos de simples entrada, resultados estes que estão em consonância com a literatura, pois estes mesmos conseguem representar melhor a população amostrada, captando e explicando melhor suas variações em função do DAP e da altura.

Ao trabalhar com ajuste de modelo volumétrico e desenvolvimento de fator de forma para plantios de *Eucalyptus grandis*, localizados no município de Rio Verde – GO, Miguel et al. (2010), verificaram que, de forma geral, os modelos volumétricos de dupla entrada apresentaram estatística de ajuste e de precisão superiores aos modelos de simples entrada, o que já era esperado pelo fato do volume ser obtido por mais de uma variável.

Leal et al. (2011), em trabalho de mapeamento de unidades produtivas utilizando a interpolação geoespacial krigagem a partir do inventário florestal em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, verificou que o modelo de Schumacher e Hall se mostrou

como melhor modelo para estimar a variável volume (m³), apresentando, no conjunto, as melhores estatística de ajuste, precisão e gráfico de distribuição dos resíduos e o modelo de Prodan apresentou, para a estimativa da variável altura, as melhores estatísticas de ajuste, precisão e distribuição gráfica dos resíduos.

Para Scolforo (1997), os resultados estão em consonância com a literatura que considera o modelo de Schumacher e Hall e o da variável combinada Spurr como modelos superiores dentre os vários modelos volumétricos. Onde os modelos volumétricos de dupla entrada, comumente, conseguem melhores resultados estatísticos que os modelos de simples entrada, em decorrência de melhor representar as características da população amostrada, em função das variáveis diâmetro e altura.

Dimitrov e Vichev (1980), testaram modelos para relação hipsométrica em povoamento de *Pinus sylvestris* e considerou o modelo de Prodan como o mais adequado de todos testados por eles.

Da mesma forma, Barros (2000), estudando o comportamento de modelos hipsométricos para plantação de *Pinus oocarpa*, considerou também o modelo de Prodan o mais adequado para estimativa de altura. E por fim Miguel et al. (2010) chegou a mesma conclusão ao ajustar modelos hipsométricos para a obtenção da variável altura em povoamentos de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.

Segundo Schneider et al. (1988), a escolha da melhor equação de volume deve ser isenta de critérios pessoais, devendo ser baseada nos valores calculados de coeficiente de determinação, erro padrão residual, distribuição uniforme dos valores residuais, alertando ainda que a distribuição residual é a mais importante é criteriosa estatística a ser avaliada. Uma vez que se verifica tendenciosidade na referida dispersão todas as demais estatísticas devem ser abandonadas e o modelo descartado, corroborando assim com o postulado de Draper e Smith (1980).

1.12 - IMAGENS DE SATÉLITE LANDSAT 5 TM

A série *LANDSAT* teve início na segunda metade da década de 60, a partir de um projeto desenvolvido pela Agência Espacial Americana e dedicado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres. Essa missão foi denominada *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS) e em 1975 passou a se denominar Landsat.

O satélite *Landsat 5* foi lançado em 01 de Março de 1984 e funciona em órbita equatorial a 705 km de altitude. O sensor TM (*Thematic Mapper*), lançado a bordo dos satélites *Landsat 4* e *Landsat 5*, possui separação espectral adequada ao seu principal propósito, ou seja, oferecer subsídios para mapeamentos temáticos na área de recursos naturais.

Tal sensor opera com sete (7) bandas espectrais nas regiões do: visível, infravermelho próximo, médio e termal. Apresenta melhor resolução espacial, acurácia radiométrica e posicionamento geométrico que seu antecessor, o sensor MSS (*Multispectral Scanner System*).

Os dados do sensor TM foram utilizados em pesquisas e definições de metodologias em amplas áreas do conhecimento científico e tiveram importância singular para a evolução das técnicas desenvolvidas e utilizadas no sensoriamento remoto mundial.

A Tabela 1.1 apresenta algumas características do satélite *Landsat 5*, bem como do sensor TM (*Thematic Mapper*).

TABELA 1.1 - Características do satélite *Landsat 5* e do sensor TM.

Bandas Espectrais	Banda 1 - Azul (0,45 - 0,52 μm)
	Banda 2 - Verde (0,52 - 0,60 μm)
	Banda 3 - Vermelho (0,63 - 0,69 μm)
	Banda 4 - Infravermelho próximo (0,76 - 0,90 μm)
	Banda 5 - Infravermelho médio (1,55 - 1,75 μm)
	Banda 6 - Infravermelho termal (10,4 - 12,5 μm)
	Banda 7 - Infravermelho médio (2,08 - 2,35 μm)
Resolução Espacial	Bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 – 30 metros
	Banda 6 (termal) – 120 metros
Largura da faixa imageada	185 km
Resolução Temporal	16 dias
Resolução Radiométrica	8 bits

O Satélite *Landsat 5* apresentou problema em um dos componentes responsáveis pela transmissão de dados para a Terra, o TWTA redundante e está suspenso desde novembro de 2011.

Com o objetivo de maximizar o tempo de duração da missão, foi lançado, no início de maio de 2012, um novo algoritmo de programação de funcionamento do instrumento TM (*Thematic Mapper*), semelhante ao empregado pelo *Landsat 7*.

Este algoritmo incorporou as previsões de cobertura de nuvens, não ligando o instrumento em caso de tempo coberto, aumentando assim a probabilidade de aquisição de imagens úteis.

1.13 - USOS E APLICAÇÕES DE IMAGENS *LANDSAT 5 TM*

Para Soares et al. (2005), o inventário florestal de áreas plantadas é uma atividade que exige o monitoramento contínuo, devido seu caráter dinâmico caracterizado pela variabilidade de estágios de desenvolvimento e de espécies de cada talhão, áreas afetadas por incêndios, pragas, controle de corte e plantio, entre outros fatores.

O mesmo autor diz que estas características, inerentes aos plantios de *Eucalyptus*, inviabilizam o gerenciamento de suas atividades apenas com um banco de dados descritivo, sendo de suma importância o componente espacial da informação, que, juntos, compõem um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Para Ribeiro et al. (2000), o SIG permite processar informações espaciais, devendo ser capaz de criar abstrações digitais do real, manejar e armazenar eficientemente dados, de forma a identificar o melhor relacionamento entre as variáveis espaciais, possibilitando a criação de relatórios e mapas que contribuem para a compreensão holística desses relacionamentos.

Uma metodologia usualmente empregada no mapeamento geodésico de áreas utiliza o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Embora esta técnica atenda aos requisitos geométricos de exatidão, ela pode ser onerosa, e principalmente, não conter a riqueza de detalhes e de informações presentes em uma imagem orbital de alta resolução, como por exemplo, uma imagem do satélite IKONOS - 1 metro no modo pancromático. Estas apresentam como inconvenientes, o custo elevado e a extensão relativamente pequena das áreas imageadas, contrastando com as extensas áreas cobertas pelos povoamentos. Isto implica numa relação benefício/custo inadequada para o setor.

Como alternativa, pode-se avaliar a utilização de imagens de menor resolução espacial (15 m a 30 m), que podem cobrir grandes extensões do terreno. Mesmo com esta resolução, as imagens ainda conterão informações importantes não apenas para o levantamento geodésico das áreas, mas também para suporte ao planejamento, auxiliando no processo de tomada de decisão (RIBEIRO et al., 2000).

Inúmeros trabalhos vêm sendo feitos com imagens Landsat nas últimas três décadas para o mapeamento e monitoramento da cobertura terrestre, sendo alguns citados a seguir: Soares et al. (1996), utilizaram imagens TM/Landsat para monitorar mudanças em plantações de *Eucalyptus*, através da diferença entre bandas, de imagens obtidas em épocas diferentes. Já Skidmore (1989) desenvolveu um sistema especialista para classificar tipos de florestas de *Eucalyptus*.

Como exemplo, também cita-se os trabalhos de Thenkabail et al. (2003) e Kayitakire et al. (2006), utilizando imagens do sensor IKONOS e Ponzoni e Shimabukuro (1998), Lu et al. (2004) e Mäkelä e Pekkarinen (2004) utilizando dados do sensor TM/Landsat 5.

Sartori Neto (2000) utilizou imagens TM/Landsat-5 para gerar o mapa de vegetação do Parque Nacional Grande Sertão Veredas (noroeste do estado de Minas Gerais), que compôs a base de dados necessária para elaboração do plano de manejo desse parque.

Medeiros et al. (1996), utilizaram imagens TM/Landsat-5 para estimar áreas de plantio de cana-de-açúcar, milho e soja, nos municípios de Aramina, Buritizal, Ituverava e Ipuã, todos pertencentes ao estado de São Paulo.

Berra et al. (2011), estudando a estimativa do volume florestal com imagem Landsat 5 procuraram estimar o volume arbóreo utilizando-se técnicas de sensoriamento remoto e imagem do satélite Landsat 5, aliados aos dados de campo obtidos por inventário florestal em povoamentos de *Eucalyptus* sp. Os autores concluíram que o método *stepwise* selecionou apenas o índice Razão entre bandas como variável explicativa do volume. Porém o modelo escolhido apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de apenas 0,29, onde foi atribuído tal valor a heterogeneidade no plantio, bem como as diferentes idades, densidades e preparo de solos no local de estudo.

Canavesi et al. (2010), disseram que alguns estudos, utilizando dados de sensores remotos multiespectrais, foram feitos com o objetivo de estimar o volume de madeira, os quais alcançaram diferentes graus de sucesso, na maioria das vezes com erros superiores àqueles alcançados pelo método tradicional.

Para Souza e Ponzoni (1998), o fundamento é associar o volume de madeira aos dados de reflectância provenientes de imagens de satélite para obter as estimativas.

Há pouco tempo têm surgido trabalhos fundamentados em dados hiperespectrais e estimativas de variáveis biofísicas, destacando os estudos de Gong et al. (1995), Fernandes

et al. (2002) e Hu et al. (2000), os quais trabalharam com estimativas do Índice de Área Foliar (IAF) utilizando o CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*).

Já Schlerf et al. (2005), empregaram o sensor aerotransportado *HyMap* e dados de campo para estimar o Índice de Área Foliar (IAF) e volume de madeira, concluindo que o emprego de dados hiperespectrais na quantificação do volume implicou resultados superiores aos dados multiespectrais.

Para Soares et al. (2005), outra aplicação importante das imagens orbitais é a atualização de mapas. Diversos órgãos públicos utilizam-se desse expediente para monitorar queimadas e desmatamentos.

1.14 - CORREÇÃO RADIOMÉTRICA EM IMAGENS LANDSAT 5 TM

Estudos realizados por Rosenqvist et al. (2003), indica o que sensoriamento remoto possibilita de forma efetiva, a estimativa de parâmetros biofísicos como volume, biomassa e carbono de áreas florestais, mas os autores recomendam que as estimativas de parâmetros biofísicos, como volume florestal, não sejam feitas diretamente na imagem orbital sem antes minimizar os efeitos da interferência atmosférica.

Um procedimento bastante comum entre os usuários de dados orbitais é a conversão dos números digitais (ND) das imagens em valores físicos como radiância e/ou reflectância (aparente ou de superfície).

A reflectância de alvos da superfície terrestre é um parâmetro intrínseco dos objetos sensorizados e, assim, em muitas situações, deve ser utilizada em lugar dos valores de “níveis de cinza” normalmente encontrados nas imagens de satélite.

De acordo com Gurtler et al. (2005), para obter a reflectância de alvos de imagens de satélite é necessário eliminar a interferência atmosférica e realizar uma série de cálculos que envolvem parâmetros do sensor e informações da própria imagem. Os autores criaram uma planilha eletrônica com ênfase no método DOS (*Dark Object Saturation*) para automatizar a transformação dos números digitais das imagens TM e ETM+ dos satélites Landsat 5 e 7 em valores de reflectância. A conversão de números digitais (ND) em radiância é dada por:

$$L_{\text{rad}} = L_{i,\text{min}} + \left(\frac{L_{i,\text{max}} - L_{i,\text{min}}}{255} \right) * NC_i \quad (1.7)$$

Onde: L_i é a radiância espectral na banda i em $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$; $L_{i,\text{max}}$ e $L_{i,\text{min}}$ são os valores de radiância máxima e mínima na banda i , respectivamente; NC_i é o nível de cinza na banda i .

A conversão de radiância para reflectância é dada por:

$$r_{0,i} = \frac{L_{rad} * \pi}{E_{0,i} * \cos \theta * d^2} \quad (1.8)$$

Onde: $r_{0,i}$ é a reflectância espectral na banda i ; d^2 é o inverso do quadrado da distancia Terra-Sol em unidade astronômica; $E_{0,i}$ é o valor médio da irradiância solar exo atmosférica na banda i em $W.m^{-2}.m^{-1}$ (constante solar); θ o ângulo zenital solar (calculado a partir da informação do ângulo de elevação solar); β , disponível no arquivo cabeçalho da imagem: $\theta = (90^\circ - \beta)$ e L_{rad} é a radiância espectral na banda i em $Wm^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$.

De acordo com Borba (2002), dentre os procedimentos de correção radiométrica realizados em dados de sensoriamento remoto, a correção devido aos efeitos da atmosfera é provavelmente aquela mais difícil de ser realizada, isto devido principalmente à falta de informações relativas à condição atmosférica durante a passagem do sistema de sensoriamento sobre as áreas a serem analisadas.

1.15 - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

De acordo com Huete et al. (1994), a vegetação é um indicador sensível das propriedades que influenciam o clima, a hidrologia, o ciclo biogeoquímico e o balanço de energia de muitos ecossistemas. Mudanças ambientais em larga escala podem ser monitoradas e quantificadas através da resposta da vegetação às ações humanas e ao clima, utilizando observações de sensoriamento remoto.

Conforme Jensen (2009), índices de vegetação (IV) são as combinações dos Fatores de Reflectância Bidirecional - FRB de superfície, determinados em dois ou mais comprimentos de onda, que estão associados a uma propriedade particular da vegetação. Eles têm sido concebidos levando em consideração as propriedades espectrais de folhas isoladas ou de dosséis vegetais.

Os índices de vegetação têm sido utilizados para o monitoramento da vegetação (GOWARD; HUENNRICH, 1992; HUETE et al., 1994; HUETE et al., 1997) por serem correlacionados com diversos parâmetros biofísicos como biomassa (HUETE, 1988), IAF (HUETE, 1988; WALTER-SHEA et al., 1997), $fAPAR$ (EPIPHANIO; HUETE, 1995; WALTER-SHEA et al., 1997) e outros.

Entre os índices de vegetação, o mais utilizado é o NDVI (TUCKER, 1979). Embora seja sensível aos parâmetros biofísicos, o NDVI também é afetado por propriedades atmosféricas e da superfície (KAUFMAN; REMER, 1994). Dessa forma,

diversas equações ou variantes desse índice foram desenvolvidas. O índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI - *Soil Adjusted Vegetation Index*) foi elaborado para minimizar a influência do brilho do solo (HUETE, 1988).

O índice de vegetação resistente à atmosfera, ARVI - *Atmospherically Resistant Vegetation Index*, (KAUFMAN; TANRÉ, 1992) foi proposto para reduzir a influência da atmosfera. Finalmente, o índice de vegetação ajustado ao solo e resistente à atmosfera, SARVI - *Soil Adjusted Atmospherically Resistant Vegetation index*, (KAUFMAN; TANRÉ, 1992) foi elaborado para reduzir simultaneamente os efeitos da atmosfera e do brilho do solo. Maiores detalhes sobre a origem e desenvolvimento dos IVs podem ser vistos em Moreira (2000).

Segundo Fernandes et al. (2011), os parâmetros biofísicos, advindos por meio de dados de sensores radar e/ou ópticos são importantes descritores de florestas nativas ou plantadas e sua predição tem sido realizada com sucesso utilizando dados de sensoriamento remoto.

Nos trabalhos de estimativa de parâmetros biofísicos a partir de dados ópticos, comumente utilizam-se dados de cada banda do sensor aliados a razões entre elas, além de índices de vegetação. Vários trabalhos têm sido conduzidos nessa área, a exemplo dos efetuados por Jakubauskas e Price (1997), Xavier (1998) e Watzlawick et al. (2009).

Para Souza e Ponzoni (1998), as técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas em aplicações e estudos na área florestal, destacando-se trabalhos que visam quantificar a biomassa florestal.

Para Watzlawick et al. (2009), a utilização de imagens de satélite constitui-se num método indireto e não destrutivo, podendo-se estimar parâmetros biofísicos (biomassa, carbono, volume de madeira), pelas propriedades espectrais da vegetação que a constitui (folhas, galhos, troncos, dentre outros).

A utilização de imagens para a quantificação de biomassa florestal ainda é pouco conhecida, principalmente em florestas heterogêneas, devido a grande diversidade florística, fisionômica e fenológica destas florestas, e a disponibilidade de levantamentos de dados em campo coincidirem com a mesma data da tomada da imagem (WATZLAWICK et al., 2009).

1.15.1 - Índices de vegetação considerados neste estudo

1.15.1.1 - *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI)

Dentre os índices de vegetação, o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) desenvolvido por Rouse et al. (1974), é o mais conhecido e utilizado para estudos de caracterização e monitoramento da vegetação. Para Huete (1988). Este é um dos *índices de razão* mais difundidos.

O NDVI se baseia na alta absorção da clorofila que é verificada na região espectral do vermelho e na alta reflectância explicada pela estrutura interna das folhas, na região do infravermelho próximo (NIR), podendo saturar em coberturas vegetais densas com valores de IAF (índice de área foliar) elevados. O valor de NDVI varia entre -1 e 1. Geralmente em vegetações saudáveis, o índice apresenta valores em torno de 0,2 e 0,8 (ROUSE et al., 1973). Sua obtenção é dada pela expressão:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad (1.9)$$

Onde: NIR = reflectância na banda do infravermelho próximo; Red: reflectância na banda do vermelho.

1.15.1.2 - *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI)

O *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) foi proposto por Huete (1988) e possui a propriedade de minimizar os efeitos do solo de fundo no sinal da vegetação ao incorporar uma constante de ajuste de solo, o fator L no denominador da equação NDVI. O fator L varia com a característica da reflectância do solo (calor e brilho) e vai variar dependendo da densidade da vegetação que se deseja analisar. A equação do SAVI é dada por:

$$\text{SAVI} = \frac{(1 + L) (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}})}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{NIR}} + L} \quad (1.10)$$

Onde: ρ_{NIR} = reflectância na banda do infravermelho próximo; ρ_{RED} = reflectância na banda do vermelho; L = constante de ajuste do solo.

Para vegetação muito baixa, é sugerido utilizar o fator $L = 1,0$, para vegetação intermediária $L = 0,5$, para altas densidades $L = 0,25$. Ao utilizar $L = 0$, os valores do

SAVI serão idênticos ao NDVI, e se utilizar $L = 100$, os valores do SAVI serão próximos aos valores do PVI (Índice de Vegetação Perpendicular), que não será tratado neste estudo.

1.15.1.3 - *Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI₂)*

O *Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI)* propõe duas modificações no SAVI, baseadas na modificação do fator L. Os dois índices buscam a melhor correção do brilho do solo de fundo em diferentes condições de cobertura vegetal.

A segunda modificação do SAVI o MSAVI utiliza um fator L indutivo para: a) Remover o “ruído” do solo que não foi cancelado pelo produto NDVI e WDVI; b) Valores maiores que um no MSAVI₁ podem ser devido ao valor negativo do NDVI e WDVI.

Dessa forma há limitação em sua utilização para áreas com alta densidade de vegetação. Sua obtenção é dada pela expressão.

$$\text{MSAVI}_2 = \frac{2 \rho_{\text{NIR}} + 1 - \sqrt{(2 \rho_{\text{NIR}} + 1)^2 - 8 (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}})}}{2} \quad (1.11)$$

Onde: ρ_{NIR} = reflectância na banda do infravermelho próximo; ρ_{RED} = reflectância na banda do vermelho.

1.15.1.4 - *Enhanced Vegetation Index (EVI)*

O *Enhanced Vegetation Index (EVI)* foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação em regiões de alta biomassa, além de apresentar melhor capacidade de monitoramento através de uma quebra do sinal do substrato do dossel vegetal e de redução das influências atmosféricas. Sua expressão é dada a seguir.

$$\text{EVI} = 2,5 * \frac{(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}})}{\rho_{\text{NIR}} + (6 * \rho_{\text{RED}} - 7,5 * \rho_{\text{BLUE}}) + L} \quad (1.12)$$

Onde: ρ são as refletâncias da superfície corrigidas ou parcialmente corrigidas para efeitos atmosféricos; 2,5 = fator de ganho; L é o fator de ajuste para o substrato; e C1 = 6,0 e C2 = 7,5 são os coeficientes para correção de aerossóis (fumaça, partículas de poluição do ar, poeira), os quais utilizam a banda azul para corrigir a influência dos aerossóis na banda do vermelho.

Apesar de o EVI ter sido proposto como um produto do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), de 250 metros de resolução espacial, seu

desenvolvimento foi inteiramente baseado em imagens Landsat TM 4 e 5 degradadas, gerando imagens “MODIS-Simuladas” (HUETE et al., 1997).

1.15.1.5 - *Enhanced Vegetation Index 2 (EVI₂)*

O *Enhanced Vegetation Index 2 (EVI₂)* foi modificado por Jiang et al. (2008). Tal índice foi desenvolvido para sensores que não possui a banda do azul como ASTER e AVHRR. A banda azul não fornece informações adicionais sobre as propriedades biofísicas da vegetação, tendo a finalidade de reduzir o ruído e as incertezas associadas à alta variabilidade de aerossóis atmosféricos (ALBUQUERQUE et al., 2010). Sua expressão é dada a seguir.

$$EVI_2 = 2,5 * \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{(\rho_{NIR} + 2,4 * \rho_{RED} + 1)} \quad (1.13)$$

Onde: ρ são as refletâncias da superfície corrigidas ou parcialmente corrigidas para efeitos atmosféricos; 2,5 = fator de ganho;

O EVI_2 pode ser usado para obter melhores observações da superfície, onde segundo Jiang et al. (2008), o desafio em desenvolver tal índice foi melhorar a sensibilidade e linearidade a regiões de alta biomassa.

CAPÍTULO II: MAPEAMENTO DE UNIDADES PRODUTIVAS UTILIZANDO A INTERPOLAÇÃO GEOESPACIAL KRIGAGEM A PARTIR DO INVENTÁRIO FLORESTAL EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus urophylla* S. T. BLAKE

2.1 - INTRODUÇÃO

A base para o planejamento e uso dos recursos florestais é o conhecimento quantitativo e qualitativo do maciço florestal. Esse conhecimento é adquirido por meio de inventários florestais, para os quais cada vez mais são exigidas atualizações de registros e mapas com informações espacializadas de interesse. Nesse sentido, o geoprocessamento constitui ferramenta com boas alternativas de técnicas e subsídios para sistematizar informações oriundas de várias fontes diferentes, integrando base de dados georreferenciados, monitoramento e atualizações com diferentes tipos de informações, espacializadas ou não, de um maciço florestal (SOUZA et al., 2007).

As estatísticas com métodos tradicionais aplicados em análise de inventários florestais baseiam-se numa medida central (média) e numa medida de dispersão (variância), com o intuito de descrever um determinado acontecimento ou fenômeno, não considerando as prováveis correlações entre observações vizinhas (MELLO, 2004).

Portanto, esses métodos estatísticos tradicionais aplicados aos inventários florestais não conseguem explorar profundamente a distribuição espacial e as relações que possam existir entre as unidades amostrais.

A Krigagem é um método geoestatístico de interpolação que envolve, com boa estimativa e predição de superfícies, um conjunto de técnicas baseadas numa estrutura de correlação espacial. Com isso, fornece estimativas não tendenciosas, ou seja, a diferença entre os valores que foram estimados em relação aos observados, no mesmo ponto, não deve ser nula; e com variâncias mínimas. Assim, estes estimadores possuem a menor variância dentre todos os estimadores não tendenciosos (DRUCK et al., 2004).

O objetivo deste capítulo foi verificar se o interpolador geoespacial Krigagem pode ser utilizado para estimar o volume de madeira em florestas plantadas e qual a precisão de tais estimativas em relação ao método tradicional de inventário florestal.

2.2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 - Caracterização e localização da área de estudo

Os dados para desenvolver este estudo foram obtidos em Rio Verde, Estado de Goiás, cidade localizada no sudoeste goiano, em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, com 6,5 anos de idade, plantado no espaçamento de 2,8 x 1,8 m, pertencente à Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano – COMIGO.

A área de estudo possui 116 hectares no total, dividida em sete (7) talhões, sendo as unidades administrativas os talhões: 46, 47, 48, 49, 50, 51 e 52. A Figura 2.1 apresenta a área onde foi realizado o inventário florestal, bem como a espacialização dos talhões.

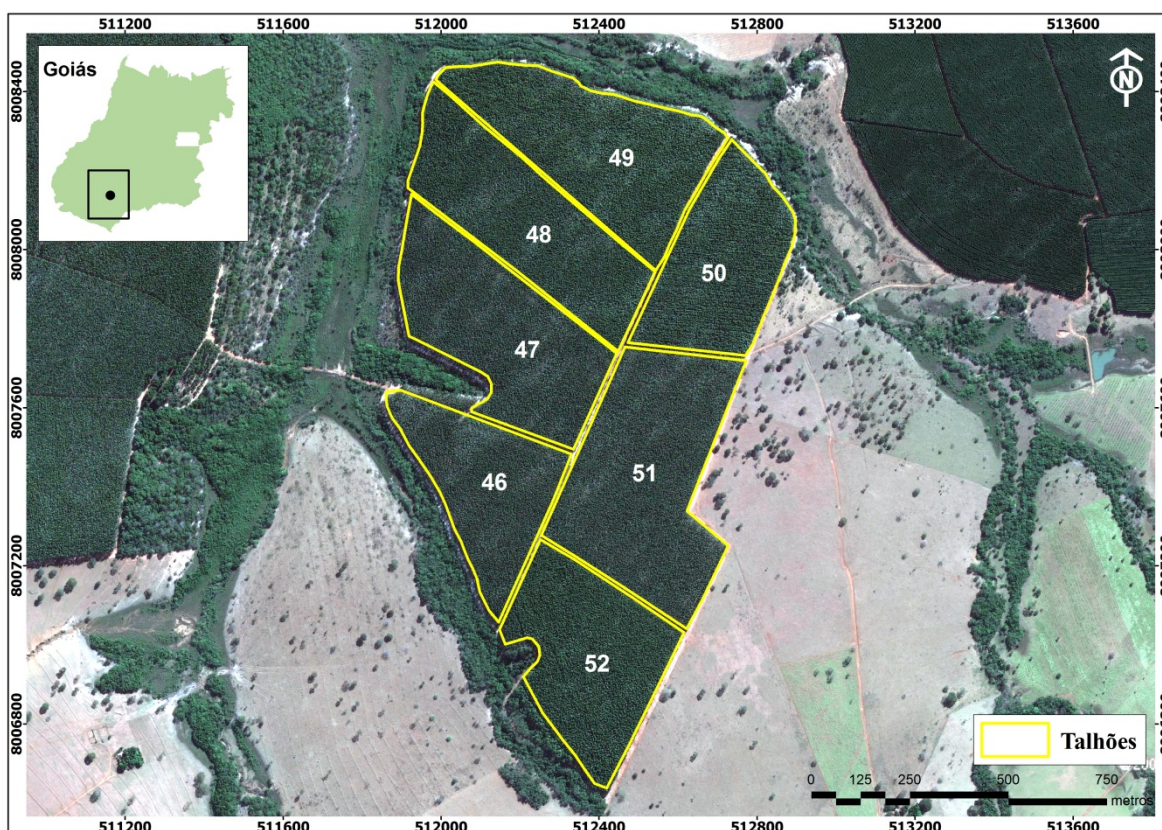


FIGURA 2.1: Localização da área de estudo e espacialização dos talhões do povoamento florestal estudado.

Imagem do *Google Earth*. Data: Setembro/2010.

A área apresenta altitude média de 685 metros, localizada entre os paralelos 18° 00' 45'' e 18° 01' 45'' de latitude Sul, e entre os meridianos 50° 52' 45'' e 50° 53' 15'' de longitude Oeste.

O clima, segundo a classificação de KÖPPEN, é do tipo Aw, tropical úmido, caracterizado por duas estações bem definidas: uma seca, que corresponde ao outono e inverno, indo do mês de maio ao mês de setembro e a outra úmida, com chuvas torrenciais, correspondendo ao período de primavera e verão.

A precipitação média anual varia de 1200 a 1500 mm, com média anual em torno de 1300 mm e temperaturas médias em torno de 20° a 25°C.

2.2.2 - Inventário florestal

O inventário florestal serviu de base para estimar o volume de madeira (m³/parcela) em todas as unidades amostrais. E para esse procedimento o erro máximo admissível foi de 10%.

A área foi subdividida em parcelas de 400 m² e as parcelas a serem inventariadas foram sorteadas aleatoriamente por meio do programa ArcGis 9.3, com auxílio da ferramenta *ArcToolbox* na opção *Data Management Tools/Feature Class/Create Random Points*. Foi aleatorizada inicialmente uma parcela a cada cinco hectares, ou seja, 23 parcelas piloto.

Nessas parcelas foi mensurado o DAP (diâmetro a altura do peito - 1,30 m) de todos os indivíduos vivos contidos nas parcelas por meio de suta. Para a variável altura total (HT) foram consideradas apenas as árvores cubadas rigorosamente. Portanto, não houve estimativa dessa variável.

Para a verificação do erro admissível no inventário florestal foram selecionadas, por processo aleatório, apenas 13 das 23 parcelas amostradas. Essas mesmas parcelas serviram para o procedimento de interpolação e também para o cálculo da quantidade de parcelas necessárias, conforme a seguinte fórmula:

$$n = \frac{t^2 * (CV\%)^2}{(E\%)^2} \quad (2.1)$$

Onde: t = amplitude t estudentizada (5%); CV% = coeficiente de variação (volume - m³/parcela); E% = Erro admitido no inventário (10%).

Para o conhecimento da estrutura horizontal das árvores mensuradas nas unidades amostrais e que, posteriormente, serviu de auxílio para a cubagem dos indivíduos, foi utilizada a distribuição diamétrica proposta por STURGES citada por Finger (1992). O número de classes é dado pela seguinte expressão:

$$nc = 1 + (3,3 * \text{Log}(n)) \quad (2.2)$$

Onde: nc é o número de classes e n é o número total de observações. E para o intervalo entre classes (IC) subtrai-se o maior valor observado do diâmetro pelo menor e divide o resultado pelo número de classes (nc).

2.2.2.1 - Cubagem rigorosa

A escolha das árvores a serem cubadas rigorosamente foi realizada em áreas próximas as parcelas amostradas, após caracterização quanto sua estrutura diamétrica. As árvores selecionadas para a cubagem pertenceram a diferentes classes de diâmetro. Cada árvore foi abatida ao nível do solo com o uso de motosserra e o diâmetro inicial tomado neste ponto.

A cubagem foi realizada pelo método de Hohenadl com 10 secções: 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 e 95% da altura total da árvore (MACHADO; FILHO, 2009). Nesses pontos foram obtidas as áreas seccionais para o cálculo do volume de cada árvore. A fórmula utilizada foi a seguinte:

$$\text{Vol} = \frac{\text{HT}}{10} * \left\{ \left(\frac{\pi * D_{\text{sessão } 5\%}^2}{40000} \right) + \left(\frac{\pi * D_{\text{sessão } 15\%}^2}{40000} \right) + \dots + \left(\frac{\pi * D_{\text{sessão } 95\%}^2}{40000} \right) \right\} + \text{Vol ponta} \quad (2.3)$$

A saber: Vol = Volume (m³); HT = Altura da árvore a 95% do total; D² = Diâmetro da sessão; 10 = Número de seções pelo método de Hohenadl. Vol ponta = $\frac{1}{3} * g(95\%) * L$, onde: g = área seccional a 95% da altura total da árvore; L = comprimento da ponta.

2.2.2.2 - Modelos hipsométricos e volumétricos

A partir dos dados da cubagem rigorosa foram geradas equações hipsométricas e volumétricas. Vários modelos lineares e não lineares foram testados para a estimativa da altura (Tabela 2.1) e do volume (Tabela 2.2).

TABELA 2.1 - Modelos hipsométricos testados para obtenção da variável altura total.

Autor	Modelo
Trorey	$HT = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \varepsilon$
Stoffels	$\text{LnHT} = \beta_0 + \beta_1 * \text{LnDAP} + \varepsilon$
Curtis	$\text{LnHT} = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{DAP} + \varepsilon$
Não referenciado	$HT = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \varepsilon$

TABELA 2.1 - Continuação...

Autor	Modelo
Prodan	$HT = \frac{DAP^2}{(\beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2)} + \varepsilon$
Petterson	$HT = \frac{1}{\left(\beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{DAP}\right)^3} + \varepsilon$

HT = Altura total (m); DAP = Diâmetro a altura do peito 1,30 m; Ln = Logaritmo natural; $\beta_0, \beta_1, \beta_n$ = Parâmetros a serem estimados; ε = Erro.

TABELA 2.2 - Modelos volumétricos testados para obtenção da variável volume (m³).

Autor	Modelo
Kopezky-Gehhardt	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \varepsilon$
Hohenadl-Krenm	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \varepsilon$
Dissescu-Meyer	$Vol = \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \varepsilon$
Husch	$LnVol = \beta_0 + \beta_1 * LnDAP + \varepsilon$
Brenac	$LnVol = \beta_0 + \beta_1 * LnDAP + \beta_2 * \frac{1}{DAP} + \varepsilon$
Spurr	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 HT + \varepsilon$
Stoate	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * DAP^2 HT + \beta_3 * HT + \varepsilon$
Naslund	$Vol = \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 * DAP^2 HT + \beta_3 * DAP HT^2 + \beta_4 * HT^2 + \varepsilon$
Spurr (Ln)	$LnVol = \beta_0 + \beta_1 * LnDAP^2 HT + \varepsilon$
Meyer	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_2 * DAP^2 + \beta_3 * DAP HT + \beta_4 * DAP^2 HT + \beta_5 * HT + \varepsilon$
Schumacher e Hall (Ln)	$LnVol = \beta_0 + \beta_1 * LnDAP + \beta_2 * LnHT + \varepsilon$
Ogaya	$Vol = DAP^2 * (\beta_0 + \beta_1 * HT) + \varepsilon$
Schumacher e Hall	$Vol = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * HT^{\beta_2} + \varepsilon$
Takata	$Vol = \frac{DAP^2 HT}{\beta_0 + \beta_1 * DAP} + \varepsilon$

HT = Altura total (m); DAP = Diâmetro a altura do peito 1,30 m; Ln = Logaritmo natural; $\beta_0, \beta_1, \beta_n$ = Parâmetros a serem estimados; ε = Erro.

Os critérios para seleção da melhor equação foram:

- Análise gráfica dos resíduos; Análise visual da distribuição dos resíduos;
- Erro padrão da estimativa (Syx): Erro na escala da variável dependente e em percentagem (Syx%). Indica o quão próximo os valores estimados estão dos valores observados;
- Coeficiente de Determinação (R²): Mostra o quanto das variáveis dependentes estão sendo explicadas pelas variáveis independentes;

Para diminuir a discrepância logarítmica nos modelos que se encontram na escala logarítmica e que geralmente subestimam a variável estimada, foi necessário a utilização do Fator de Correção de Meyer (PARRESOL, 1999). Embora essa correção possa muitas vezes ser insignificante (LEITE; REGAZZI, 1992), ela é facilmente obtida e deve ser considerada no modelo (SPRUGEL, 1983). A fórmula para o fator de correção de Meyer é a seguinte:

$$Fm = e^{0,05 * QM \text{ resíduo}} \quad (2.4)$$

Onde: e = base do logaritmo natural; QM resíduo = Quadro médio dos resíduos.

2.2.3 - Geoestatística - Krigagem

A partir da coleta de dados do inventário florestal, com base nas unidades amostrais, foi aplicado o método geoestatístico de interpolação de dados espaciais para criar uma superfície interpolada do volume (m³/parcela).

Para a interpolação da superfície utilizou-se, aleatoriamente, apenas 13 parcelas das 23 existentes no inventário florestal acessando a ferramenta de interpolação Geoestatística para Krigagem Ordinária, presente no ArcGIS 9.3TM.

As 13 parcelas foram submetidas a uma análise exploratória dos dados (AED) com a construção do gráfico *Box Plot*, que dá uma ideia de dispersão e distribuição das informações, e também a construção de gráficos de sentido Norte-Sul e Leste-Oeste, para verificar alguma tendência na variável estudada (SCOLFORO; MELLO, 2006).

Para quantificar e medir a dependência espacial e verificar o efeito anisotrópico entre os dados interpolados, nas unidades amostrais, utilizou-se o modelo semivariográfico Esférico.

Para validação do resultado da krigagem foram utilizadas as 10 parcelas restantes do inventário florestal. Após a validação, a superfície interpolada do volume (m³/parcela) foi então agrupada em três classes de produção para melhor entendimento das unidades produtivas na área de estudo, utilizando o mapa de álgebra do ArcGISTM 9.3.

2.2.4 - Comparação entre os resultados do inventário florestal e da geoestatística

Para comparação entre os dados estimados a partir do inventário florestal e os valores interpolados pela Krigagem foi aplicado o Teste “ t ” para comparação de duas

médias, sendo essas pareadas. Foi estabelecido um nível mínimo de segurança aceitável de 5% (VIEIRA, 1999).

2.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 - Modelos hipsométricos

A correlação entre os valores de altura e de DAP das árvores selecionadas para a cubagem foi elevada (0,85). De acordo com Bartoszeck (2002) e Barros (2000), fatores como idade, desbaste, sítio, material genético e sistema da condução do povoamento podem interferir na relação entre o diâmetro e a altura.

A Tabela 2.3 apresenta os resultados dos modelos hipsométricos ajustados. Já a Tabela 2.4 apresenta as estatísticas de precisão para esses modelos.

TABELA 2.3 - Modelos hipsométricos ajustados.

Autor	Modelo
Trorey	$HT = -1,102118603 + 2,454016411 * DAP - 0,05172651 * DAP^2$
Stoffels	$LnHT = 1,63238511 + 0,548688242 * LnDAP$
Curtis	$LnHT = 3,664189296 - 7,565547632 * \frac{1}{DAP}$
Não referenciado	$HT = 11,730867 + 0,716390 * DAP$
Prodan	$HT = \frac{DAP^2}{(2,86349 - 0,0972117 * DAP + 0,0349208 * DAP^2)}$
Petterson	$HT = \frac{1}{\left(0,29258 + 0,844245 * \frac{1}{DAP}\right)^3}$

HT = Altura total (m); Ln = Logaritmo natural; DAP = Diâmetro a altura do peito (cm).

TABELA 2.4 - Estatísticas de precisão para as equações hipsométricas.

Modelo	Syx (m)	Syx (%)	R ² ajust.
Trorey	2,04	8,57	0,832
Stoffels*	2,41	10,14	0,795
Curtis*	2,04	8,59	0,864
Não referenciado	2,58	10,85	0,728
Prodan*	1,97	8,30	0,841
Petterson*	2,08	8,76	0,823

Syx = Erro padrão da estimativa; Syx% = Erro padrão da estimativa em percentagem; R² = coeficiente de determinação ajustado; (*) Modelos com medidas de precisão corrigidas.

Conforme observado na Tabela 2.4, os modelos apresentaram estatísticas de ajustes e precisão semelhantes, mas o modelo que se apresentou ligeiramente superior aos demais pelo erro padrão da estimativa (Syx%) foi o modelo de PRODAN.

Os valores de R^2 obtidos para os modelos ajustados podem ser considerados satisfatórios. De acordo com vários pesquisadores (SCOLFORO, 1997; FINGER, 1992; CAMPOS; LEITE, 2006), os valores de R^2 raramente ultrapassam 0,80.

É sabido que a correlação entre o diâmetro e a altura não é tão forte quanto ao diâmetro e o volume e esta correlação tende a diminuir em função dos tratos culturais, silviculturais, espaçamento, idade e sítio.

Observa-se que todos os modelos apresentam erros (Syx) acima de 1,90 m. Acredita-se que este fato advém da ausência de tratos culturais e silviculturais no povoamento assim como prováveis sítios diferentes atuando na correlação entre estas variáveis. A análise gráfica dos resíduos é apresentada na Figura 2.2.

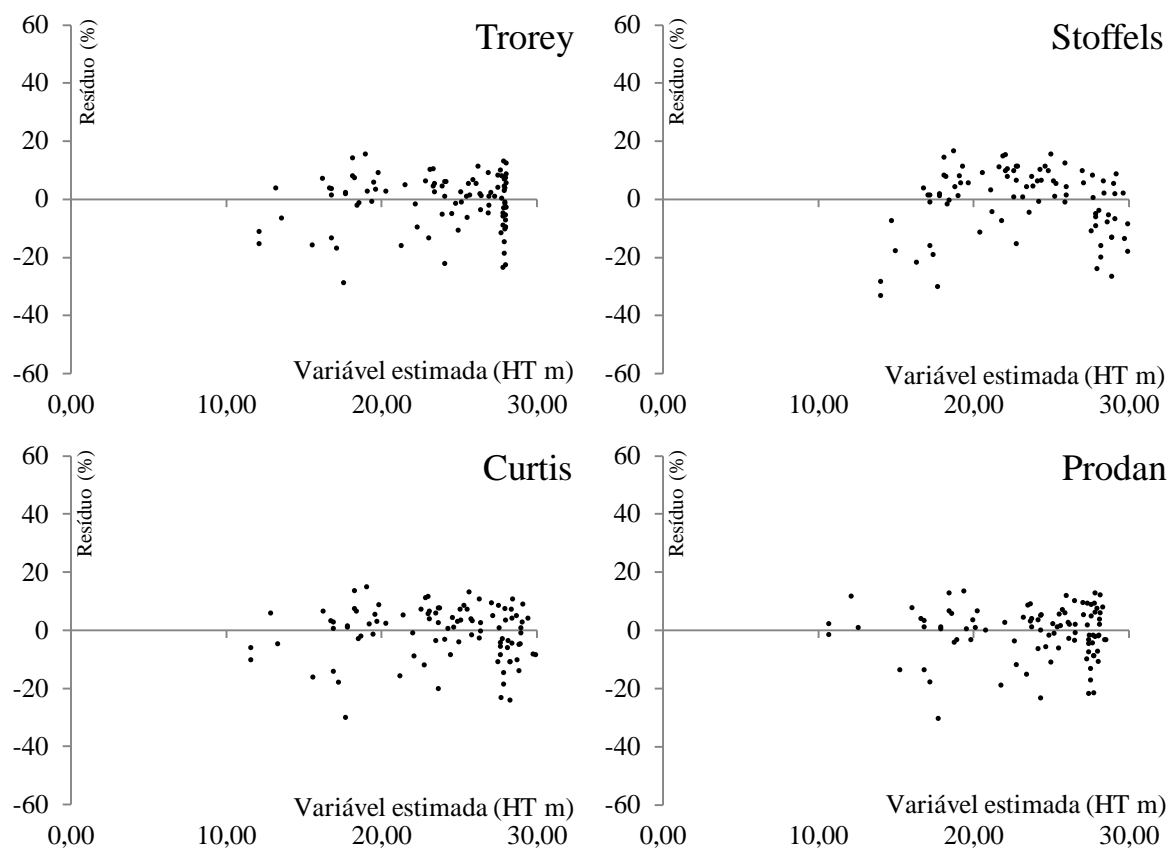


FIGURA 2.2: Distribuição residual dos modelos hipsométricos ajustados.

Continua...

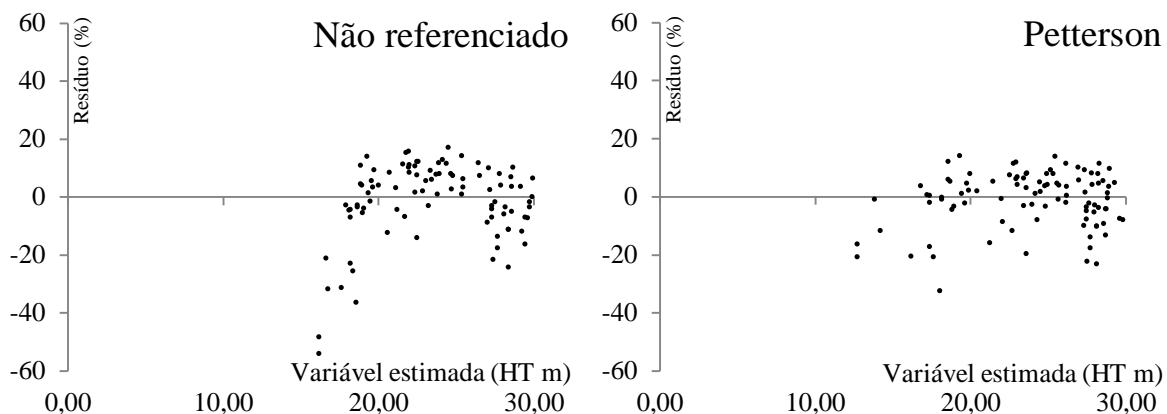


FIGURA 2.2: Distribuição residual dos modelos hipsométricos ajustados

Observa-se que a distribuição dos resíduos nos modelos ajustados é bem similar, com exceção do modelo Não Referenciado. No entanto o modelo de PRODAN apresentou melhor distribuição.

Com base na distribuição dos resíduos e no erro padrão da estimativa (S_{yx}), o modelo de PRODAN se mostrou o mais apropriado para a estimativa da altura total do povoamento, sendo selecionado. Dimitrov e Vichev (1980) testaram modelos hipsométricos em povoamento de *Pinus sylvestris* e consideraram o modelo de PRODAN como o mais adequado.

Da mesma forma, Barros (2000), estudando o comportamento de modelos hipsométricos para plantação de *Pinus oocarpa*, considerou também este modelo o mais adequado para estimativa de altura. Miguel et al. (2010) chegou a mesma conclusão ao ajustar modelos hipsométricos para povoamentos de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

2.3.2 - Modelos volumétricos

A Tabela 2.5 apresenta os resultados dos ajustes dos modelos volumétricos e a Tabela 2.6 apresenta as medidas de precisão de cada equação.

TABELA 2.5 - Equações volumétricas ajustadas para obtenção da variável volume (m^3).

Autor	Modelo
Kopezky-Gehhardt	$Vol = -0,01896637 + 0,00094614 * DAP^2$
Hohenadl-Krenm	$Vol = -0,07466213 + 0,00731929 * DAP + 0,00073342 * DAP^2$
Dissescu-Meyer	$Vol = -0,002028736 * DAP + 0,000997093 * DAP^2$
Husch	$LnVol = -8,262821315 + 2,415862072 * LnDAP$

TABELA 2.5 - Continuação...

Autor	Modelo
Brenac	$\text{LnVol} = -4,706901393 + 1,450462058 * \text{LnDAP} - 13,03552934 * \frac{1}{\text{DAP}}$
Spurr	$\text{Vol} = 0,0165000359 + 0,0000318267 * \text{DAP}^2 \text{HT}$
Stoate	$\text{Vol} = -0,0441553113 - 0,0000564637 * \text{DAP}^2 + 0,0000313271 * \text{DAP}^2 \text{HT} + 0,0034776389 * \text{HT}$
Spurr (Ln)	$\text{LnVol} = -9,83054837 + 0,95024391 * \text{LnDAP}^2 \text{HT}$
Schumacher e Hall (Ln)	$\text{LnVol} = -10,13705623 + 1,785881651 * \text{LnDAP} + 1,148157319 * \text{LnHT}$
Ogaya	$\text{Vol} = \text{DAP}^2 * (0,0000848668 + 0,0000300504 * \text{HT})$
Schumacher e Hall	$\text{Vol} = 0,00004153 * \text{DAP}^{1,69978} * \text{HT}^{1,21340}$
Takata	$\text{Vol} = \frac{\text{DAP}^2 \text{HT}}{22057,5 + 358,001 * \text{DAP}}$

Vol = Volume (m³); HT = Altura total (m); DAP = Diâmetro a altura do peito; Ln = Logaritmo natural.

TABELA 2.6 - Estatísticas de precisão e ajuste para as equações volumétricas.

Modelos	Syx (m ³)	Syx (%)	R ² ajust.
Kopezky-Gehhardt	0,03860	13,74	0,960
Hohenadl-Krenm	0,03822	13,60	0,961
Dissescu-Meyer	0,03900	13,88	0,987
Husch	0,04666	16,61	0,977
Brenac	0,03828	13,62	0,983
Spurr	0,02331	8,30	0,985
Stoate	0,02114	7,52	0,988
Spurr (Ln)	0,02286	8,14	0,994
Schumacher e Hall (Ln)	0,02065	7,35	0,994
Ogaya*	0,02506	8,92	0,983
Schumacher e Hall*	0,02007	7,14	0,989
Takata*	0,02040	7,26	0,989

Syx = Erro padrão da estimativa; Syx% = Erro padrão da estimativa em percentagem; R² = Coeficiente de determinação ajustado; (*) Modelos com medidas de precisão corrigidas.

Segundo Schneider et al. (1988), a escolha da melhor equação de volume deve ser isenta de critérios pessoais, devendo ser baseada nos valores calculados de coeficiente de determinação, erro padrão residual, distribuição uniforme dos valores residuais, alertando que a distribuição residual é a mais importante e criteriosa estatística a ser avaliada.

Mediante a afirmação de Schneider et al. (1988), todos os modelos foram submetidos a uma análise criteriosa da distribuição residual, e na Figura 2.3 encontram-se os gráficos de dispersão dos resíduos, de todos os modelos volumétricos ajustados.

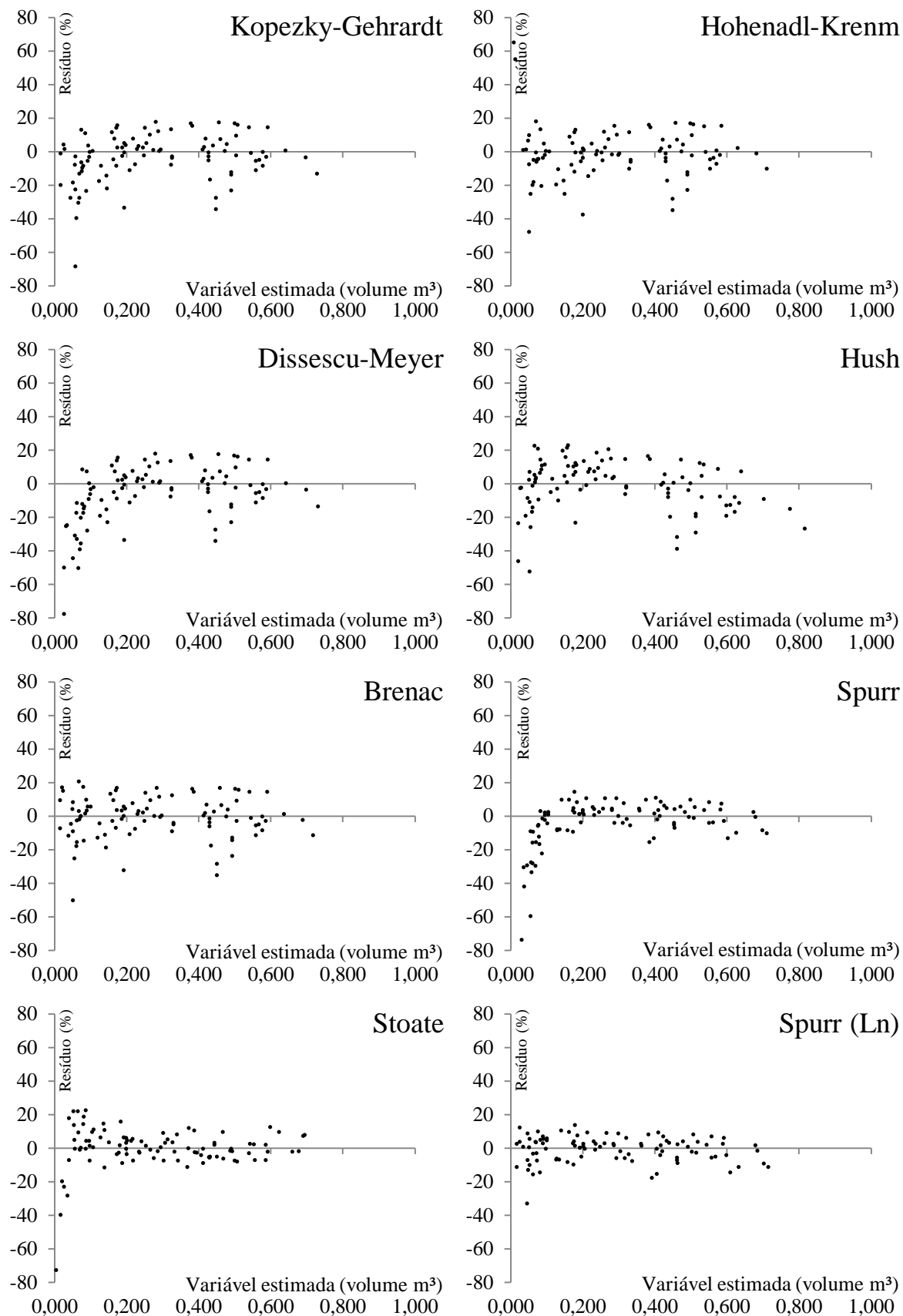


FIGURA 2.3: Distribuição residual dos modelos ajustados para obtenção do volume.

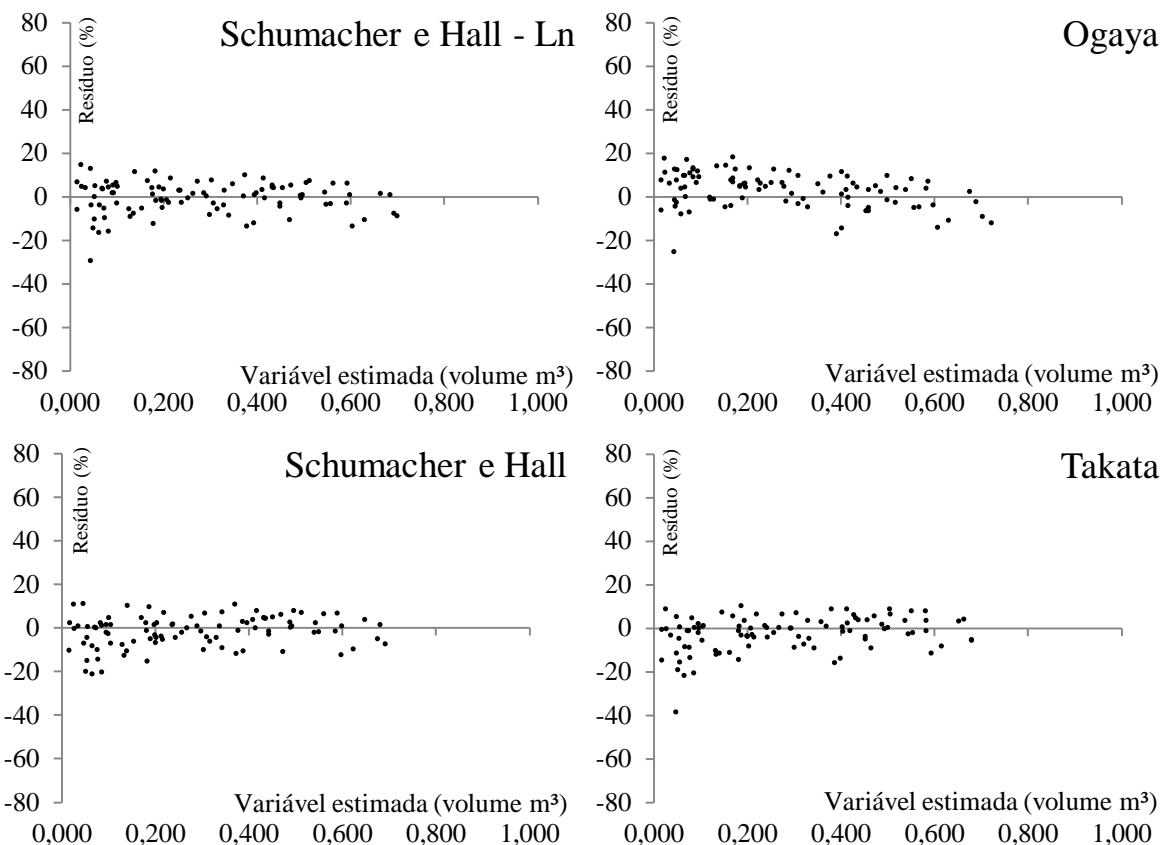


FIGURA 2.3: Distribuição residual dos modelos ajustados para obtenção do volume.

Após realização da análise de dispersão dos resíduos, o modelo de SCHUMACHER e HALL foi o mais estável para estimativa do volume, sempre com o erro variando de -20% a 20%. A pior dispersão residual foi apresentada pelo modelo de OGAYA.

A análise gráfica foi decisiva na escolha do modelo, ressaltando assim a importância da mesma pelo fato que essa estatística leva em consideração valores individuais, podendo assim verificar ao longo de toda linha de regressão a existência de superestimativa ou subestimativa da variável estudada. Assim, o modelo de SCHUMACHER e HALL, foi o selecionado.

Os resultados estão em consonância com a literatura, a qual considera o modelo de Schumacher e Hall e o da variável combinada Spurr como modelos superiores dentre os vários modelos volumétricos (SCOLFORO, 1997).

2.3.3 - Análise do inventário florestal

Com a escolha da melhor equação hipsométrica e volumétrica ajustada foram estimadas as variáveis volume (m³) e altura (m), para todos os indivíduos mensurados nas parcelas. A Tabela 2.7 apresenta o volume para cada parcela amostrada em campo.

TABELA 2.7 - Volume (m³) para todas as parcelas (23) lançadas na área de estudo.

Parcela	Volume	Parcela	Volume	Parcela	Volume	Parcela	Volume
46-1	12,4046	48-1	9,8879	50-1	9,6791	51-4	7,9867
46-2	11,7842	48-2	9,6880	50-2	8,6597	51-5	9,1372
46-3	8,8002	48-3	8,8266	50-3	11,4998	52-1	7,9530
47-1	11,5512	49-1	10,2612	51-1	8,5599	52-2	10,1026
47-2	10,3860	49-2	10,7197	51-2	8,6483	52-3	9,2956
47-3	11,1312	49-3	11,1831	51-3	8,5444	-	-

A Tabela 2.8 apresenta as parcelas sorteadas aleatoriamente para o processamento do inventário florestal e obtenção das estatísticas de precisão do mesmo, bem como para a interpolação pelo procedimento da krigagem ordinária.

TABELA 2.8 - Parcelas (13) sorteadas aleatoriamente para o processamento do inventário florestal e para a interpolação pelo procedimento da krigagem ordinária.

Parcela	Volume	Parcela	Volume	Parcela	Volume
46-1	12,4046	49-2	10,7197	51-4	7,9867
47-1	11,5512	49-3	11,1831	51-5	9,1372
47-2	10,3860	50-2	8,6597	52-2	10,1026
47-3	11,1312	50-3	11,4998	-	-
48-2	9,6880	51-2	8,6483	-	-

Com os dados acima, o erro amostral relativo do inventário florestal foi de 7,88%, ficando abaixo do erro máximo admissível no inventário florestal de 10%, e o erro amostral absoluto foi de 0,80665 m³/parcela. Portanto, pode-se proceder a interpolação.

2.3.4 - Geoestatística - Krigagem Ordinária

2.3.4.1 - Análise exploratória dos dados (AED)

Para se justificar a aleatorização dos pontos no processo de validação pela krigagem foi elaborada uma matriz de erros padronizados, com base apenas nas 13 parcelas que serviram para a interpolação. A Figura 2.4 apresenta o mapa de erros padronizados com base nas 13 parcelas sorteadas aleatoriamente, bem como as parcelas utilizadas para validação do processo da krigagem.

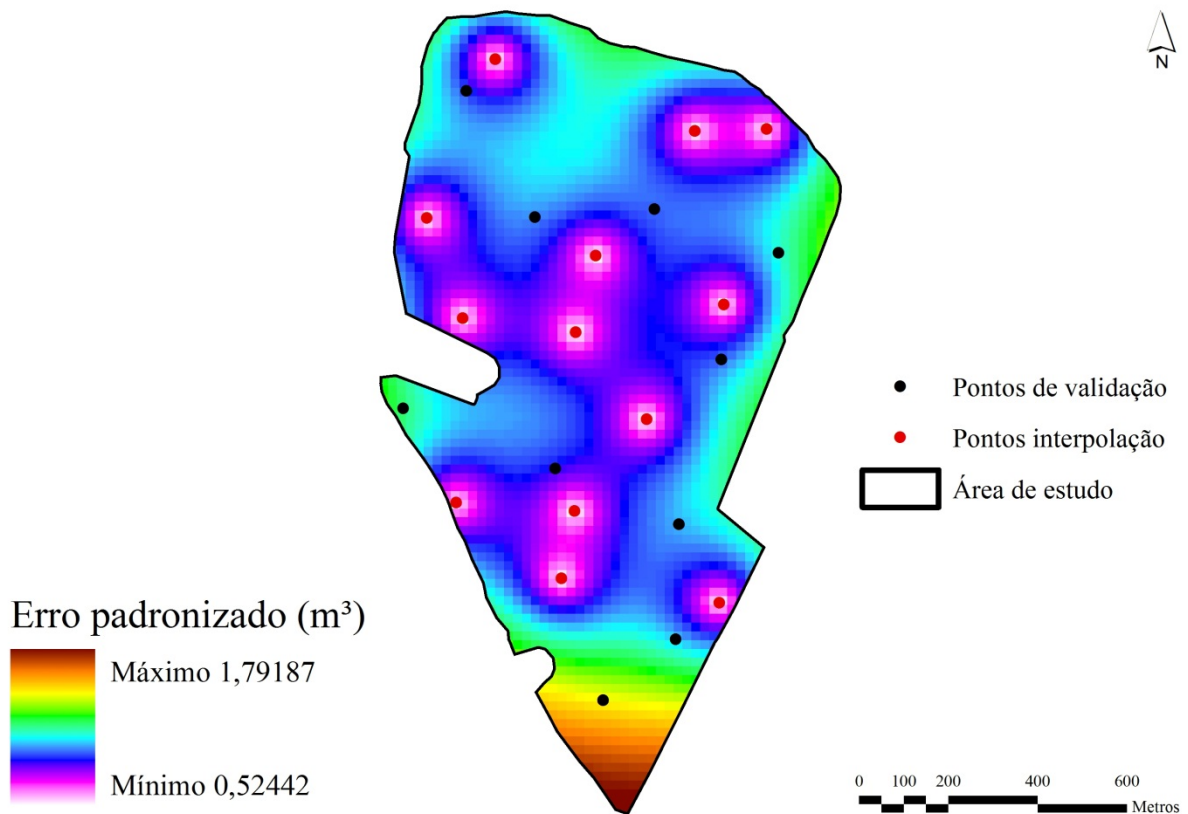


FIGURA 2.4: Mapa com a espacialização do erro padronizado na área de estudo.

É possível observar na Figura 2.4 que as áreas próximas aos pontos interpolados (vermelho) tendem variar menos nos valores interpolados devido à própria natureza do método de interpolação krigagem. Diante disso, para não utilizar os valores interpolados, nos mesmos pontos, utilizaram-se 10 parcelas (preto) para validação. A Figura 2.5

apresenta o gráfico *Box Plot* para os dados de volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$), considerando as 13 parcelas utilizadas no procedimento de krigagem.

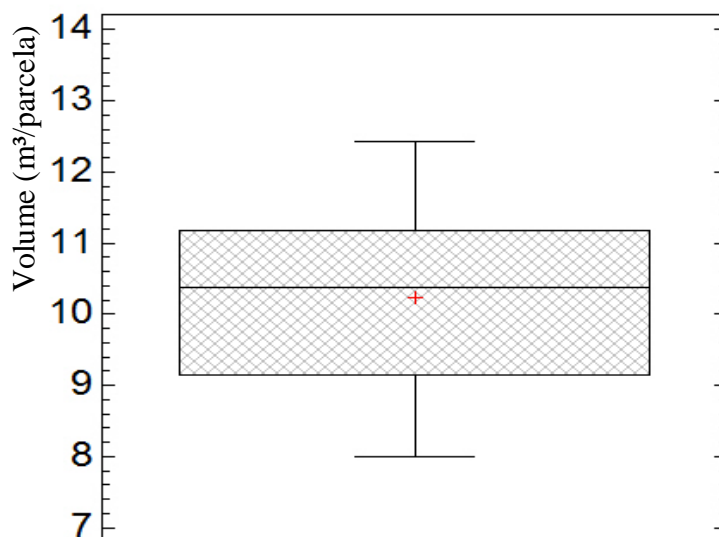


FIGURA 2.5: Gráfico *Box Plot* para os dados de volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$), considerando as 13 parcelas utilizadas para o procedimento de krigagem.

Observa-se na Figura 2.5 que não houve nenhuma parcela com volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$) considerada um *outlier*. Esse gráfico foi determinante para seguir o processo de interpolação.

Os gráficos que analisam o comportamento da variável estudada em relação aos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste são outra importante ferramenta para a AED, segundo Scolforo e Mello (2006).

Esses gráficos são importantes em estudos geoestatísticos, pois apresentam a plausibilidade de se aplicar às condições da hipótese intrínseca, ou seja, média não constante em toda a área (SCOLFORO; MELLO, 2006).

Sendo assim, as Figuras 2.6 e 2.7 apresentam os gráficos que analisam o comportamento da variável volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$), em relação aos sentidos Leste-Oeste (A) e Norte-Sul (B).

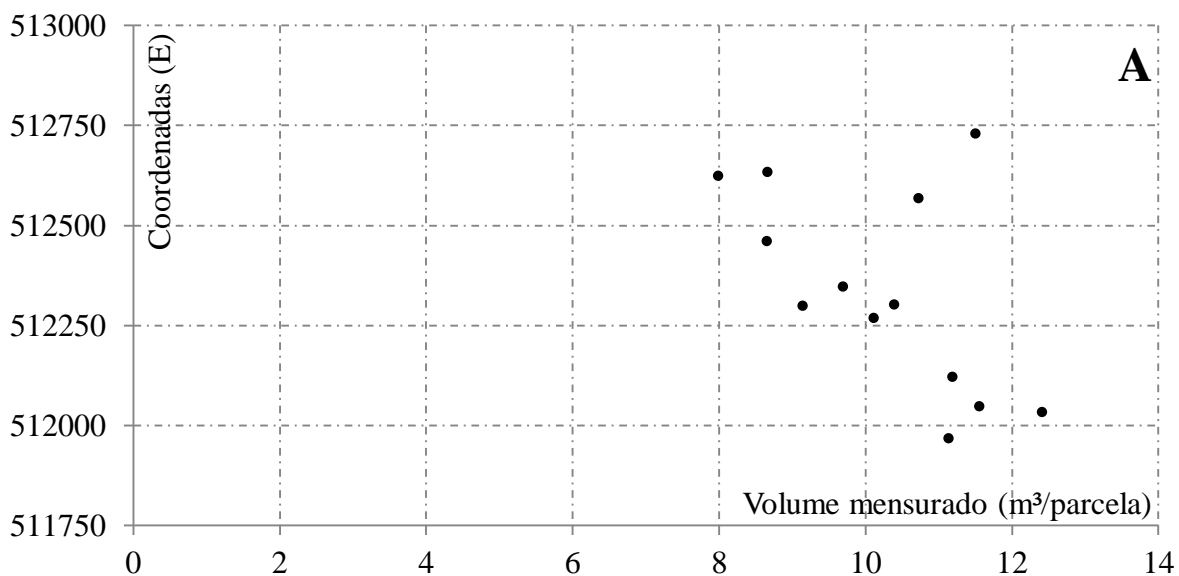


FIGURA 2.6: Comportamento da variável volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$) em relação ao sentido Leste-Oeste (A).

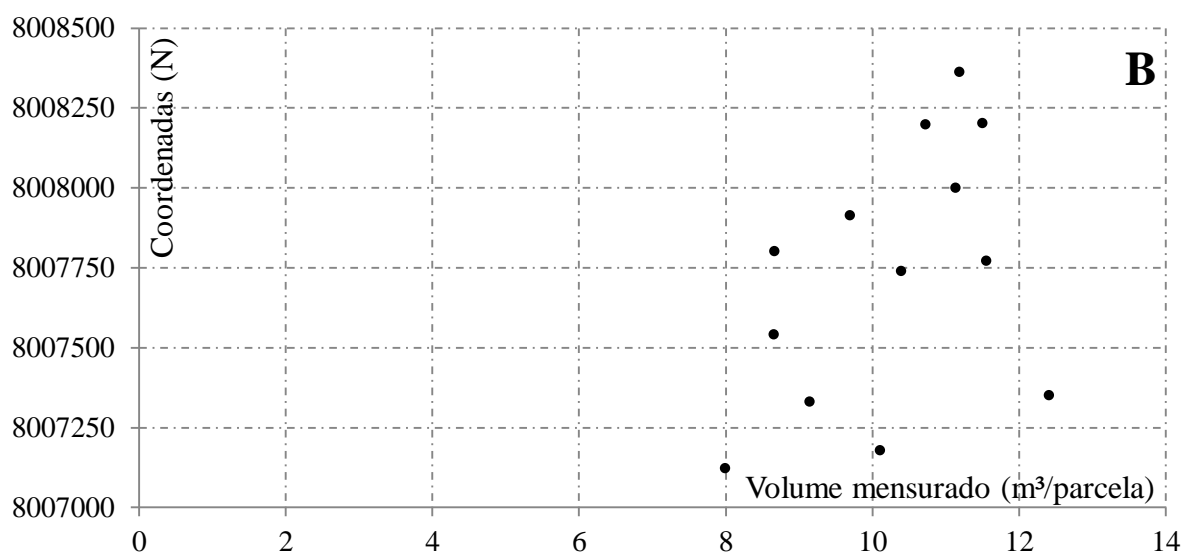


FIGURA 2.7: Comportamento da variável volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$) em relação ao sentido Norte-Sul (B).

Verifica-se nas Figuras 2.6 e 2.7 uma aleatorização em relação ao volume nos dois sentidos analisados. No eixo das coordenadas (ordenadas, y), não foi possível verificar sobre a linha tracejada, alguma tendência de ocorrência.

Para Scolforo e Mello (2006), essa tendência poderia afetar positiva ou negativamente a estrutura de dependência espacial. Neste caso, não muito definido, coube ao semivariograma à detecção da dependência espacial e o sentido de interpolação.

2.3.4.2 - Semivariograma $\gamma(h)$

A Figura 2.8 apresenta o semivariograma para o volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$) na direção de 0° , sem considerar a anisotropia, ou seja, a interpolação foi realizada considerando apenas a distância entre as amostras.

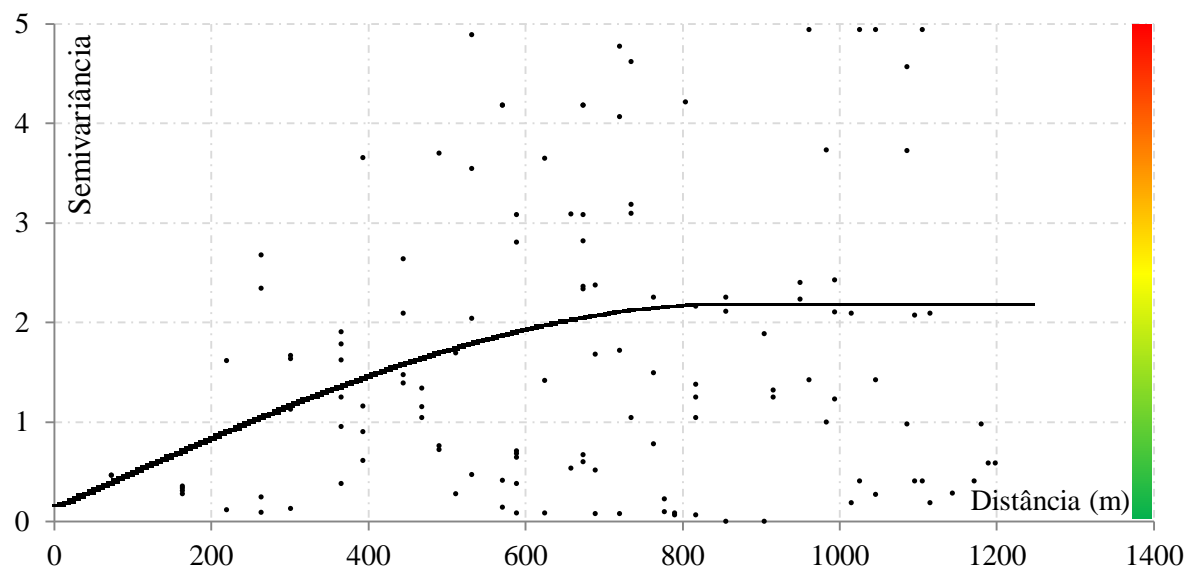


FIGURA 2.8: Modelo esférico ajustado ao semivariograma para dados de volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$), na direção de 0° , isotrópico.

O efeito pepita ou *nugget* (τ^2) foi de $0,1321 \text{ m}^6$. Esse valor representa a variação aleatória ou não estruturada do processo. Para Scolforo e Mello (2006), quanto menor o efeito pepita melhor é a estimativa no processo de Krigagem.

A variação estruturada (σ^2) mostrou o quanto da variação total, *sill* ou patamar ($2,0536 \text{ m}^6$), pôde ser explicada por uma componente espacial, caracterizando o comportamento espacial do volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$), ao longo da área.

Com a análise do semivariograma percebe-se que o alcance prático para o volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$) foi de 800 metros de distância, onde o semivariograma se estabilizou. Isso significou dizer que as parcelas do inventário florestal, lançadas a distância inferior a 800 metros, não devem ser tratadas como independentes.

Porém, como análise exploratória, não foi considerada a direção de interpolação no processo (anisotropia). Quando os dados apresentam tendência regionalizada, a anisotropia deve ser incorporada ao processo de interpolação (LANDIM et al., 2002).

Para considerar o efeito anisotrópico na interpolação elaborou-se um estudo semivariográfico para a constatação visual. A Figura 2.9 apresenta o resultado que indica a

presença de anisotropia (A), ou seja, a variabilidade não é a mesma em todas as direções, apresentado pelo sentido da elipse, bem como apresenta o sentido da interpolação (B).

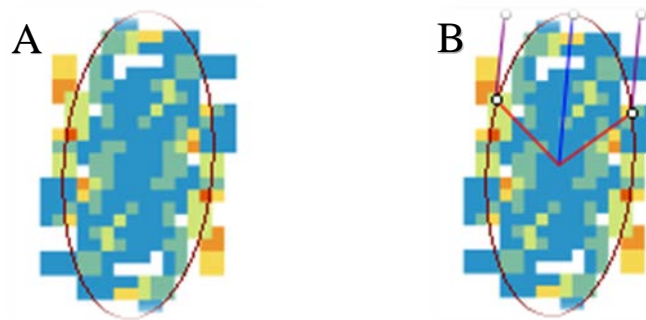


FIGURA 2.9: Modelagem semivariográfica para a variável volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$) e a constatação de anisotropia (A) e o sentido de interpolação (B) a 5° .

A partir da Figura 2.9 é possível observar que a variabilidade não é a mesma em todas as direções, sendo menor na direção N-S e maior na direção L-O. Com esse resultado foi obtido o semivariograma com anisotropia na direção de 5° e abertura angular de 49° . A Figura 2.10 apresenta o semivariograma para o volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$) na direção de 5° e abertura angular de 49° .

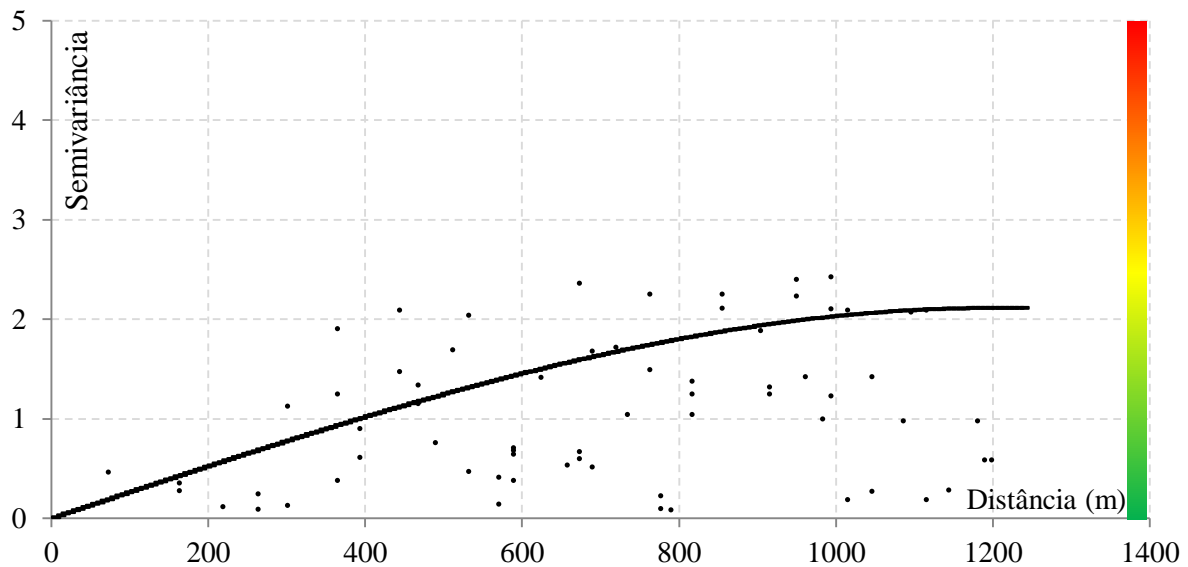


FIGURA 2.10: Modelo esférico ajustado ao semivariograma para dados de volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$), na direção de 5° , e abertura angular de 49° .

Analisando o semivariograma apresentado na Figura 2.10 é possível observar que a variação estruturada ($\sigma^2 = 2,1161$), não variou em relação ao semivariograma na direção 0° ou sem anisotropia (Figura 2.8), porém o efeito pepita ou *nugget* (τ^2) foi muito menor

(0,0834) no modelo em que se considerou a direção de tendência da variável para a interpolação.

O baixo valor do efeito pepita e a importância da direção da interpolação no processo (anisotropia) foram refletidos no aumento do alcance do semivariograma (Figura 2.10). Observa-se que o alcance prático foi de 1.000 metros, enquanto que o alcance do semivariograma sem a adoção da direção da tendência foi de 800 metros. Quanto maior for essa distância, mais homogênea será a área e, com isso, melhores serão as estimativas utilizando a krigagem (MELLO, 2004). Portanto, as parcelas amostradas em distâncias inferiores a 1000 metros, não devem ser consideradas independentes entre si.

Mello et al. (2005), no estudo da dependência espacial de características dendrométricas, para *Eucalyptus grandis*, descobriram que independente do procedimento de amostragem, as características volume e altura dominante apresentaram forte dependência espacial. E para essa característica o alcance prático foi de 700 metros.

Trabalhando com uso da krigagem na definição de estratos para o inventário florestal, Ré et al. (2009), observaram que o volume total com casca (m^3/ha) apresentou dependência espacial, ou seja, existe uma função estrutural, com semivariância de comportamento modelável.

Como resultado da interpolação da variável volume ($m^3/parcela$) foi obtido um mapa de predição com valores máximos e mínimos interpolados. A Figura 2.11 apresenta o mapa de predição do volume ($m^3/parcela$), para o povoamento em estudo.

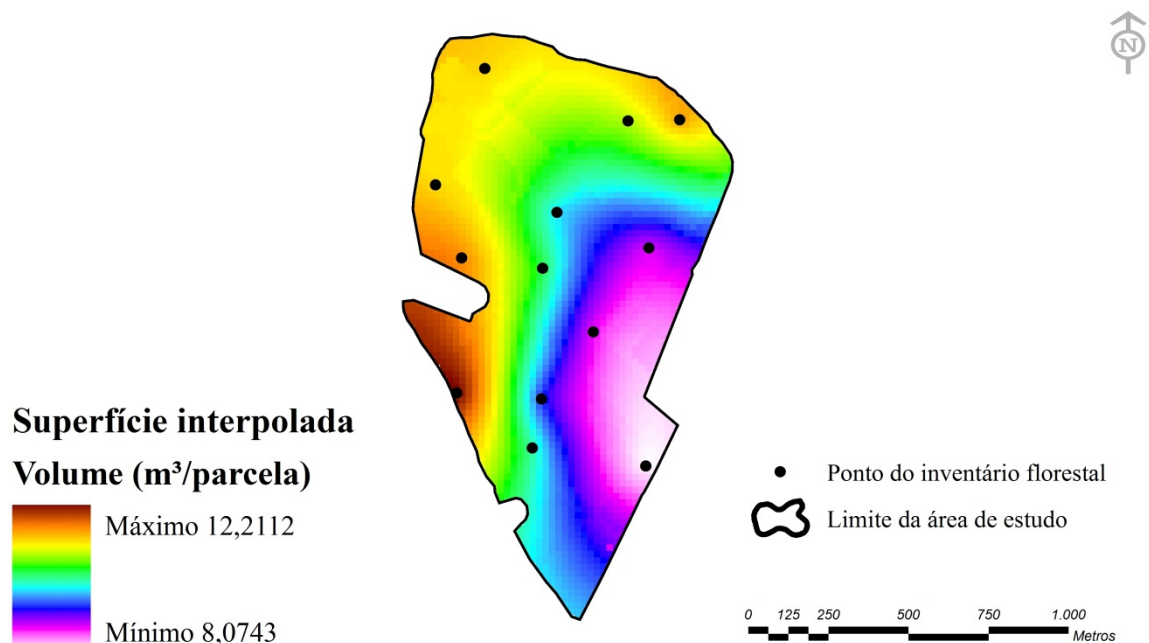


FIGURA 2.11: Mapa de predição do volume (m^3) para o povoamento estudado.

2.3.5 - Comparação entre as estimativas do inventário florestal e a Krigagem

A Tabela 2.9 apresenta o volume advindo do inventário florestal, nas 10 parcelas utilizadas para validação, bem como os valores preditos na superfície interpolada (Figura 2.11).

TABELA 2.9 - Volume (m³/parcela) do inventário florestal e predito na Krigagem para as 10 parcelas de validação.

Parcela	Inventário	Krigagem	Parcela	Inventário	Krigagem
46-2	11,7842	11,9385	50-1	9,6791	9,6653
46-3	8,8002	9,9908	51-1	8,5599	8,3312
48-1	9,8878	11,0915	51-3	8,5444	8,6134
48-3	8,8266	10,5385	52-1	7,9529	8,6290
49-1	10,2612	10,0078	52-3	9,2955	9,4971

Em geral a interpolação apresentou ligeira tendência em superestimar os valores interpolados. A média dos erros foi de -0,5 m³/parcela. Este resultado parcial corrobora Camargo et al. (2002), onde os estimadores da Krigagem apresentam propriedades importantes de não serem tendenciosos e ótimos no sentido de minimizar os erros inferenciais. Esse fato constatado pela pequena diferença entre as médias, nas parcelas de validação, do inventário florestal de 9,4 (m³/parcela) e na Krigagem de 9,8 (m³/parcela).

O erro amostral para o inventário florestal foi de 8,40% ou 0,79 m³/parcela. E para a Krigagem o erro amostral foi de 8,34% ou 0,82 m³/parcela. Como o erro admitido no inventário florestal foi de 10%, não há nenhum impedimento para a geração dos intervalos de confiança (SCOLFORO; MELLO, 2006). A Tabela 2.10 apresenta os intervalos de confiança para cada procedimento avaliado.

TABELA 2.10 - Intervalos de confiança para o volume (m³).

Procedimento	Volume/parcela (400 m ²)		Volume/hectare (ha)		Volume/população (116 ha)	
	LI	LS	LI	LS	LI	LS
Inventário	8,6	a 10,1	214,3	a 253,6	24.860,7	a 29.422,8
Krigagem	9,0	a 10,7	225,3	a 266,3	26.130,4	a 30.885,6

LI = Limite inferior do intervalo; LS = Limite superior do intervalo; Volume = m³.

Verifica-se, numa abordagem exploratória, que os valores apresentados pelos intervalos de confiança foram semelhantes entre os procedimentos. Tal fato evidencia a

mínima diferença encontrada para o erro amostral e medida de precisão do inventário florestal.

2.3.5.1 - Teste t para dados pareados e outras comparações

As médias para os dois procedimentos (inventário x krigagem) foram muito semelhantes. O inventário florestal, entre as unidades amostrais, apresentou média de 9,4 m³/parcela e a média pela interpolação foi de 9,8 m³/parcela.

Pelo Teste t foi possível notar que não houve diferença significativa entre as duas médias, inventário florestal e krigagem, em que o t calculado foi de 2,16 e o t tabelado foi de 2,26, considerando um nível de 5% de significância.

Mello et al. (2006), usando estimadores geoestatísticos para predição volumétrica por talhão, perceberam que todas as observações constatadas permitiram avaliar que o estimador geoestatístico gerou estimativa de volume semelhante à do inventário florestal, conjecturando-se sobre uma possível substituição desse último pela estimativa geoestatística, o que proporcionou redução considerável no custo de medição da floresta.

O método de interpolação Krigagem mostrou-se eficiente para estimar o volume (m³) no povoamento florestal em estudo, indicando que esta ferramenta pode ser utilizada com bastante confiança nos dados da predição dessa variável.

2.3.6 - Mapeamento de unidades produtivas utilizando a krigagem

As unidades produtivas são apresentadas na Figura 2.12. O povoamento ficou estratificado em três (3) classes. O resultado da estratificação se mostrou muito coerente com os resultados da Figura 2.11. A Figura 2.12 apresenta o resultado do mapeamento das unidades produtivas, após a união das áreas interpoladas utilizando o mapa de álgebra.



FIGURA 2.12: Resultado do mapeamento das unidades produtivas no povoamento em estudo.

A krigagem se apresentou como uma importante ferramenta para descrição de unidades produtivas. Porém, essa técnica deve ser aplicada com algumas ressalvas, pois vários cuidados devem ser tomados, principalmente a escolha do método de interpolação.

Para Stall (2012), a classificação de unidades produtivas, a partir da altura dominante, tem sido considerada a forma mais prática e usual, especialmente pelo fato desta variável ser menos influenciada por desbastes e pela densidade do povoamento.

Com base na distribuição espacial do volume, identificam-se diferentes sítios no tocante à produtividade, possibilitando assim adotar técnicas de silvicultura e de manejo de forma apropriada para cada unidade produtiva.

Os resultados obtidos pela Krigagem permitem realizar a tipificação da classificação em unidades produtivas, que se constitui numa forma de estratificação do povoamento em áreas com a espacialização da variável volume. E para melhorar esse entendimento, a Figura 2.13 apresenta as percentagens das áreas mapeadas em cada unidade produtiva assim como suas áreas em hectares (ha), onde a menor classe indica a área mais produtiva e assim sucessivamente. Analisando a classificação percebe-se que a maior quantidade de área do povoamento (43,2%) está dentro da classe de sítio II, intermediária (236,3 a 270,8 m³/hectare).

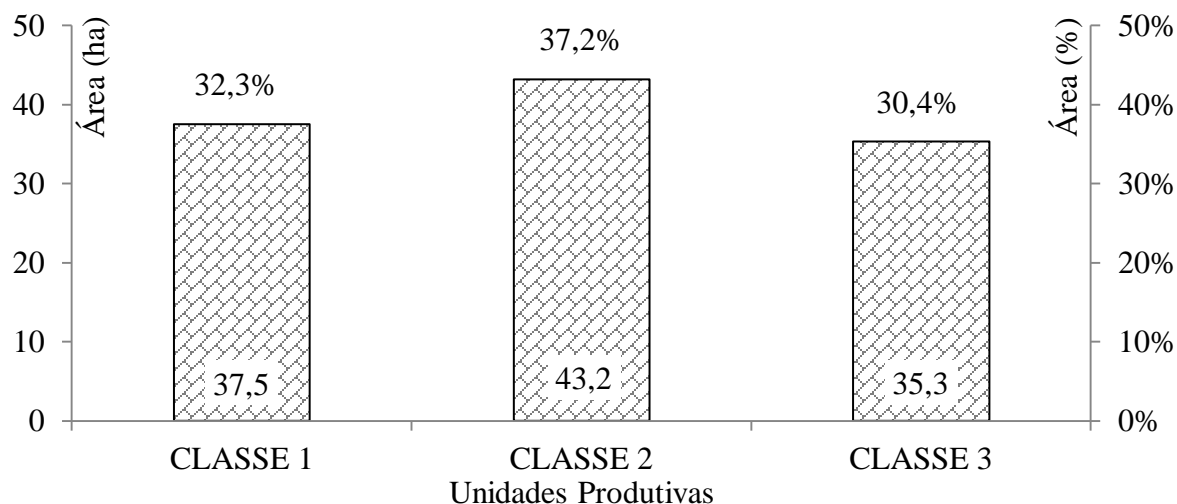


FIGURA 2.13: Áreas das unidades produtivas após mapeamento e inferência pelo interpolador Krigagem.

Tal resultado mostra mais uma vez consistência nos resultados obtidos pela Krigagem, haja vista que a maior área realmente deve estar compreendida na parte intermediária das classes, corroborando os resultados de Miguel et al. (2011) e a afirmação de Scolforo (1997) de que na realização da classificação dos sítios florestais (mapeamento das unidades produtivas), as maiores áreas encontram-se nas classes intermediárias da estratificação.

Quando se analisa as classes: I, mais produtiva (270,8 a 305,3 m³/hectare) e III, menos produtiva (201,9 a 236,3 m³/hectare), esperava-se quantidades de áreas próximas uma das outras, e tal fato foi confirmado (37,5 ha e 35,3 ha respectivamente), e pelos valores advindos da Krigagem estarem coerentes com os valores advindos do inventário florestal, uma explicação para a semelhança de áreas pode estar relacionada aos tratamentos culturais e silviculturais aplicado na área ou mesmo à ausência dos referidos.

2.3.7 - Interpolação utilizando todas as parcelas (23) do inventário florestal

Com o objetivo de verificar o efeito da interpolação sobre os valores de volume (m³) foram utilizadas todas as parcelas (23) amostrais do inventário florestal. A Figura 2.14 apresenta a superfície interpolada com valores de volume (m³/parcela), utilizando as vinte e três (23) parcelas amostradas no inventário florestal.

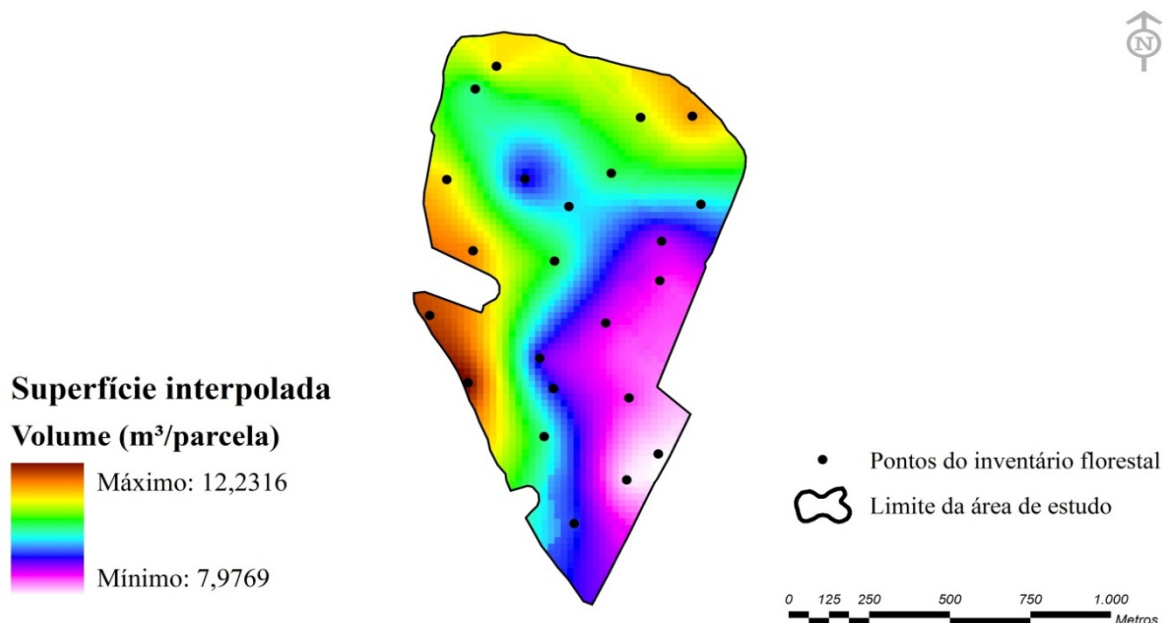


FIGURA 2.14: Valores interpolados de volume ($\text{m}^3/\text{parcela}$) para o povoamento, utilizando as 23 parcelas do inventário florestal.

A interpolação com 23 parcelas apresentou melhores características sobre o mapeamento do volume (m^3) em detrimento da interpolação baseada em 13 parcelas. Visualmente pode-se notar que com 23 parcelas a superfície interpolada apresentou mais detalhes sobre o mapeamento do volume de madeira (m^3), do que a interpolação com 13 parcelas, embora a amplitude dos valores interpolados tenha ficado muito próxima uma da outra, 7,97 a 12,23 m^3 (23 parcelas) e 8,07 a 12,21 m^3 (13 parcelas).

2.4 - CONCLUSÕES

Nas condições em que o presente trabalho foi desenvolvido, pôde-se verificar que o volume apresentou estruturação espacial. Assim, as parcelas não puderam ser consideradas independentes entre si.

Ao considerar o fator anisotrópico na interpolação, o alcance prático do semivariograma aumentou. Esse maior alcance refletiu na precisão do processo de interpolação e conseqüentemente melhorou as estimativas do volume (m^3) realizadas pela geoestatística.

Quando a avaliação foi realizada sobre o erro amostral relativo, medida de precisão do inventário, nota-se que o valor advindo do estimador clássico (inventário) foi de 8,4% e do estimador geoestatístico de 8,34%, ambos abaixo do erro máximo admitido nesse

inventário (10%). Apesar de não diferirem um do outro, o estimador geoestatístico promoveu a vantagem de especializar o volume (m^3) na área estudada, o que permitiu inferência sobre os locais que possuem os maiores e os menores valores de volume de madeira, fato esse limitado pelo processo tradicional de inventário florestal.

O estimador geoestatístico gerou, com bastante coerência, o mapeamento de unidades produtivas. Assim, essa ferramenta se mostra com grande potencial e viabilidade de utilização, abordando métodos geoestatísticos na espacialização do volume (m^3), variável essa bastante importante no manejo e planejamento florestal.

Apesar do importante cenário ressaltado acima, os estimadores geoestatísticos ainda dependem de dados levantados em campo, utilizando os métodos tradicionais de obtenção do volume. Esses últimos seguem subsidiando novas alternativas e possibilidades para obtenção do volume, até que possam ser substituídos por métodos menos onerosos e morosos.

O *software* ArcGis™ 9.3, em sua ferramenta *Geostatistical Wizard*, apresentou muitas vantagens no processo de interpolação. Embora existam muitos pacotes estatísticos que abordam também a análise geoestatística, no ArcGis, diferentemente dos outros, há possibilidade de uma intervenção maior do usuário no processo de interpolação e com isso é possível modelar melhor os dados e compreender realmente o que está acontecendo.

CAPÍTULO III: ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E FATOR DE CORREÇÃO NA ESTIMATIVA DO VOLUME (m³) EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus urophylla* S. T. BLAKE

3.1 - INTRODUÇÃO

Nas atividades florestais e nas avaliações ambientais dos recursos florestais, o inventário florestal é sempre uma técnica muito importante, e talvez até mesmo imprescindível ao bom conhecimento do potencial dos recursos existentes em uma determinada área (SANQUETA et al., 2009).

A partir do inventário florestal é possível estimar diversas variáveis de uma floresta ou de um povoamento, como por exemplo, o volume de madeira. A precisão nas estimativas do volume de um povoamento depende tanto da amostragem do inventário quanto dos métodos utilizados na obtenção do volume das árvores do povoamento, os quais podem ser classificados em métodos diretos (cubagem rigorosa ou peso da árvore) e indiretos (equações de volume, fator de forma, índices de vegetação, etc.).

Os procedimentos tradicionais de obtenção de volume devem ser, sempre que possível, aliados ou implementados com novas técnicas e ferramentas, como por exemplo, o sensoriamento remoto. Essa junção promove rapidez e facilidade na obtenção do volume como ferramenta viável e com nível aceitável de precisão (WATZLAWICK, 2009).

Para Karnieli et al. (2002), imagens multitemporais de sensoriamento remoto, transformadas em índices de vegetação (IVs), são ferramentas poderosas usadas para monitorar mudanças ocorridas na cobertura vegetal e na produção de biomassa.

As técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas e aplicadas na área florestal (SOUSA; PONZONI, 1998). Entre os focos para a aplicação dessas técnicas estão a quantificação de biomassa florestal, parâmetros biofísicos e as relações existentes com o povoamento e os tradicionais mapeamentos que caracterizam a vegetação em classes fisionômicas.

Como o volume é a variável de maior importância a ser conhecida num povoamento florestal, cada vez mais os esforços são voltados para sua obtenção a partir de dados advindos do sensoriamento remoto.

Diante dos avanços tecnológicos provenientes de imagens de sensores remotos, bem como do desenvolvimento relacionado ao processamento das imagens, nas estimativas, principalmente, de biomassa, têm-se conseguido bons resultados, onde o fundamento é associar o conteúdo de biomassa e carbono aos dados de radiância/reflectância provenientes de imagens de satélite para obter melhores estimativas (WATZLAWICK, 2009).

Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar índices de vegetação (EVI, EVI₂, MSAVI₂, NDVI e SAVI) como fator de correção do volume e como variável independente no modelo matemático para estimativa do volume madeireiro em um povoamento florestal de eucalipto.

3.2 - MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 - Caracterização e localização da área de estudo

Os dados para desenvolver este estudo foram obtidos em Rio Verde/GO, cidade no sudoeste goiano, em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, com 6,5 anos de idade, de propriedade da Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano – COMIGO. Mais detalhes e características da área de estudo foram apresentados no capítulo anterior.

3.2.2 - Coleta de dados

3.2.2.1 - Imagem de satélite *Landsat 5 TM*

Para atender este estudo foi utilizada uma imagem multiespectral do satélite *Landsat 5 TM (Thematic Mapper)*, cena 223/72, de 22 de julho de 2011, data essa próxima ao inventário florestal realizado (diferença de 5 dias).

Após a obtenção das bandas individualizadas na cena 223/72, foi realizado o empilhamento das mesmas no *Layer Stack* no Envi 4.5, e a partir dessa foi gerado um arquivo único com todas as bandas multiespectrais agrupadas.

Para gerar os índices de vegetação foi necessário fazer uma correção radiométrica e uma conversão de números digitais (ND) para valores de reflectância. Essa correção foi

TABELA 3.1 - Índices de vegetação ajustados para o trabalho.

Índices de Vegetação	Equação
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
SAVI	$SAVI = \frac{(1 + L) (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L}$
MSAVI ₂	$MSAVI_2 = \frac{2 NIR + 1 - \sqrt{(2 NIR + 1)^2 - 8 (NIR - RED)}}{2}$
EVI	$EVI = 2,5 \frac{(NIR - RED)}{NIR + (6 * RED - 7,5 * BLUE) + 1}$
EVI ₂	$EVI_2 = 2,5 \frac{NIR - RED}{(NIR + 2,4 * RED + 1)}$

NIR = Banda no infravermelho próximo; RED = Banda no vermelho; BLUE = Banda no azul; L = Fator de ajuste para o substrato (0,5); ρ = Reflectância.

Para a obtenção dos valores médios dos índices de vegetação, em cada parcela, foi elaborado um *buffer* de 45 metros de raio a partir do ponto central da parcela. Posteriormente, utilizou-se a ferramenta *Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics as Table*, presente no ArcGis™ 9.3, para obtenção do valor médio de cada índice, por parcela. A Figura 3.2 apresenta o esquema utilizado para a obtenção dos valores médios para cada índice de vegetação utilizado no trabalho, em cada parcela amostrada.

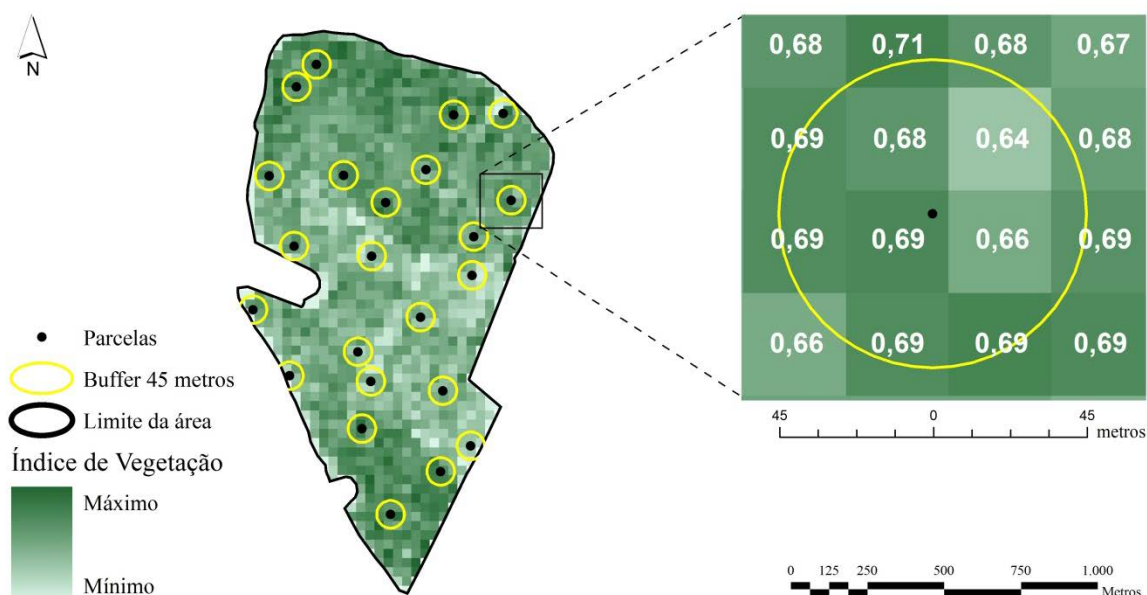


FIGURA 3.2: *Buffer* utilizado para a obtenção dos valores médios de cada índice de vegetação, nas parcelas amostradas.

3.2.3 - Análise de regressão e correlação entre os índices de vegetação e o volume (m³) por parcela

Para verificar a possibilidade de predição do volume estimado pela equação selecionada no Capítulo II, foi realizada primeiramente análise de correlação entre o volume (m³/parcela) e os índices de vegetação considerados no estudo.

Assim, a partir dos resultados na análise de correlação foram selecionados os índices que seriam utilizados no ajuste de modelos de regressão, visando estimar o volume total de cada parcela a partir de valores médios de índices de vegetação por parcela. A Tabela 3.2 apresenta os modelos ajustados para a obtenção da variável volume (m³/parcela), em função do índice de vegetação.

TABELA 3.2 - Modelos que foram ajustados para a estimativa do volume por parcela em função dos índices de vegetação.

Autor	Modelo
Berkhout	$Vol = \beta_0 * IV^{\beta_1} + \varepsilon$
Curtis	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{IV} + \varepsilon$
Dissescu-Meyer	$Vol = \beta_1 * IV + \beta_2 * IV^2 + \varepsilon$
Hohenadl-Krenm	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * IV + \beta_2 * IV^2 + \varepsilon$
Kopezky-Gehhardt	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * IV^2 + \varepsilon$

Vol = Volume por parcela; β_i = Coeficientes a serem estimados; IV = Índice de vegetação; ε = Erro associado ao modelo.

Os critérios adotados para a escolha da melhor equação estão descritos no Capítulo II, item 2.2.2.2.

3.2.4 - Estimativa do volume (m³) utilizando a média do índice de vegetação como fator de correção

Para estimar o volume de madeira do povoamento, os diferentes índices de vegetação considerados neste estudo foram utilizados como um fator de correção, o qual transforma o volume cilíndrico da parcela em volume real.

Desta forma, para cada uma das 23 parcelas amostradas no inventário florestal foi obtido o volume cilíndrico total das árvores e os índices médios de vegetação (EVI, EVI₂, MSAVI₂, NDVI, SAVI).

O volume real estimado por parcelas foi obtido pelo produto entre o seu volume cilíndrico total e um dos índices médios de vegetação (EVI, EVI₂, MSAVI₂, NDVI, SAVI).

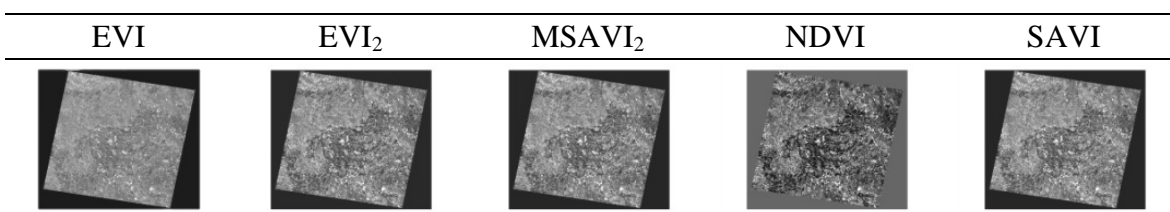
O volume estimado de cada parcela usando o fator de correção, que neste caso é representado por um dos índices médios de vegetação, foi comparado com o volume estimado pela equação de volume selecionado no Capítulo II. Para essa comparação foi aplicado um Teste *t* para dados pareados, ao nível de 5% de significância.

3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 - Análise de regressão e correlação entre os índices de vegetação com o volume (m³) por parcela

A Tabela 3.3 apresenta as imagens dos diferentes índices de vegetação considerados no estudo.

TABELA 3.3 - Imagens dos diferentes índices de vegetação ajustados.



A partir das imagens dos índices de vegetação foram obtidos os valores médios de cada índice por parcela. A Tabela 3.4 apresenta os valores médios dos índices de vegetação, por parcela, e o volume (m³/parcela) advindo do inventário florestal de um povoamento de *Eucalyptus urophylla*, em Rio Verde/GO.

TABELA 3.4 - Valores médios dos índices de vegetação e volume (m³/parcela) correspondente para as 23 parcelas amostradas.

Parcela	Volume (m ³ /parcela)	ÍNDICE EVI	ÍNDICE EVI ₂	ÍNDICE MSAVI ₂	ÍNDICE NDVI	ÍNDICE SAVI
46-1	12,4046	0,41	0,27	0,56	0,64	0,29
46-2	11,7842	0,45	0,31	0,64	0,66	0,32
46-3	8,8002	0,46	0,32	0,67	0,65	0,33
47-1	11,5512	0,45	0,31	0,65	0,67	0,33
47-2	10,3859	0,46	0,31	0,66	0,65	0,33

Continua...

Tabela 3.4: Continuação...

Parcela	Volume (m ³ /parcela)	ÍNDICE EVI	ÍNDICE EVI ₂	ÍNDICE MSAVI ₂	ÍNDICE NDVI	ÍNDICE SAVI
47-3	11,1311	0,47	0,33	0,69	0,67	0,34
48-1	9,8878	0,51	0,36	0,77	0,69	0,37
48-2	9,6879	0,50	0,35	0,75	0,68	0,36
48-3	8,8266	0,51	0,35	0,75	0,69	0,37
49-1	10,2612	0,49	0,35	0,75	0,68	0,36
49-2	10,7197	0,52	0,37	0,80	0,69	0,38
49-3	11,1831	0,53	0,38	0,82	0,70	0,39
50-1	9,6791	0,50	0,36	0,77	0,68	0,37
50-2	8,6596	0,50	0,35	0,74	0,67	0,36
50-3	11,4998	0,53	0,37	0,81	0,63	0,38
51-1	8,5599	0,47	0,33	0,71	0,65	0,35
51-2	8,6482	0,46	0,32	0,68	0,65	0,33
51-3	8,5444	0,45	0,31	0,67	0,64	0,33
51-4	7,9867	0,39	0,26	0,56	0,56	0,27
51-5	9,1372	0,47	0,33	0,69	0,65	0,34
52-1	7,9529	0,52	0,36	0,77	0,67	0,37
52-2	10,1025	0,51	0,36	0,78	0,69	0,37
52-3	9,2955	0,51	0,36	0,76	0,69	0,37
Média	9,8561	0,482	0,335	0,716	0,662	0,348

A análise de correlação entre os valores médios de índices de vegetação por parcela e o volume de madeira de cada parcela mostrou correlação muito baixa entre os índices de vegetação e o volume. A Tabela 3.5 apresenta a matriz de correlação entre as variáveis analisadas no estudo.

TABELA 3.5 - Matriz de correlação entre variáveis para identificação da variável mais correlacionada com o volume.

	Volume	NDVI	EVI	EVI ₂	SAVI	MSAVI ₂
Volume	1					
NDVI	0,20	1				
EVI	0,00	0,75	1			
EVI ₂	0,01	0,76	0,99	1		
SAVI	0,02	0,78	0,99	1,00	1	
MSAVI ₂	-0,04	0,69	0,99	0,99	0,99	1

A maior correlação observada foi com o índice NDVI, cujo valor foi de 0,20. Desta forma, a partir dos dados de volume e índice de vegetação NDVI por parcela, foram ajustados os cinco modelos de regressão visando estimar o volume (m³/parcela).

Os resultados dos ajustes dos modelos e suas respectivas medidas de precisão são apresentados na Tabela 3.6 e 3.7, respectivamente.

TABELA 3.6 - Equações ajustadas para estimativa do volume (m³/parcela), utilizando apenas o índice de vegetação NDVI como variável independente.

Modelo	Equação ajustada
Berkhout	$\text{Vol} = 12,78970 * \text{NDVI}^{0,633466}$
Curtis	$\text{Vol} = 15,4037975 - 3,666154738 * \frac{1}{\text{NDVI}}$
Dissescu-Meyer	$\text{Vol} = 22,2716985 * \text{NDVI} - 11,1340421 * \text{NDVI}^2$
Hohenadl-Krenm	$\text{Vol} = -50,969 + 181,950 * \text{NDVI} - 135,786 * \text{NDVI}^2$
Kopezky-Gehhardt	$\text{Vol} = 7,00580 + 6,485735 * \text{NDVI}^2$

TABELA 3.7 - Estatísticas de precisão para as equações ajustadas.

Modelo	Syx (m ³)	Syx (%)	R ² ajustado
Berkhout	1,2915	13,10%	0,54
Curtis	1,2953	13,14%	0,18
Dissescu-Meyer	1,2963	13,15%	0,94
Hohenadl-Krenm	1,3136	13,33%	0,21
Kopezky-Gehhardt	1,3006	13,20%	0,15

Observa-se na Tabela 3.7 que todos os modelos ajustados apresentaram baixas medidas de precisão, com erro padrão da média em torno de 13% e coeficiente de determinação, na maioria dos casos, inferior a 50%.

Para Gujarati (2006), o R² tem um papel muito modesto na análise de regressão, sendo uma medida da qualidade do ajuste. Nada no modelo clássico de regressão exige que o R² seja alto. Assim, um valor de R² elevado não é uma evidência favorável ao modelo e um valor de R² baixo também não constitui uma prova desfavorável.

O modelo Dissescu-Meyer apresentou R² bem alto, sendo de 0,94 (94%). Porém, conforme o preconizado por Gujarati (2006), essa estatística de ajuste deve ser avaliada com bastante cautela e sempre que possível avaliada juntamente com outros critérios.

O fato do modelo de Dissescu-Meyer não apresentar a constante β_0 pode ter influenciado no alto valor de R². Esse fato foi evidenciado nas estatísticas de R² na Tabela 3.7, onde o único modelo que não apresentou a constante β_0 foi o que teve o maior R². Com isso a linha da regressão que passa pela origem pode mascarar a estimativa do coeficiente de determinação (MATOS, 2000).

Todos os modelos foram também analisados quanto à distribuição dos resíduos (Figura 3.3).

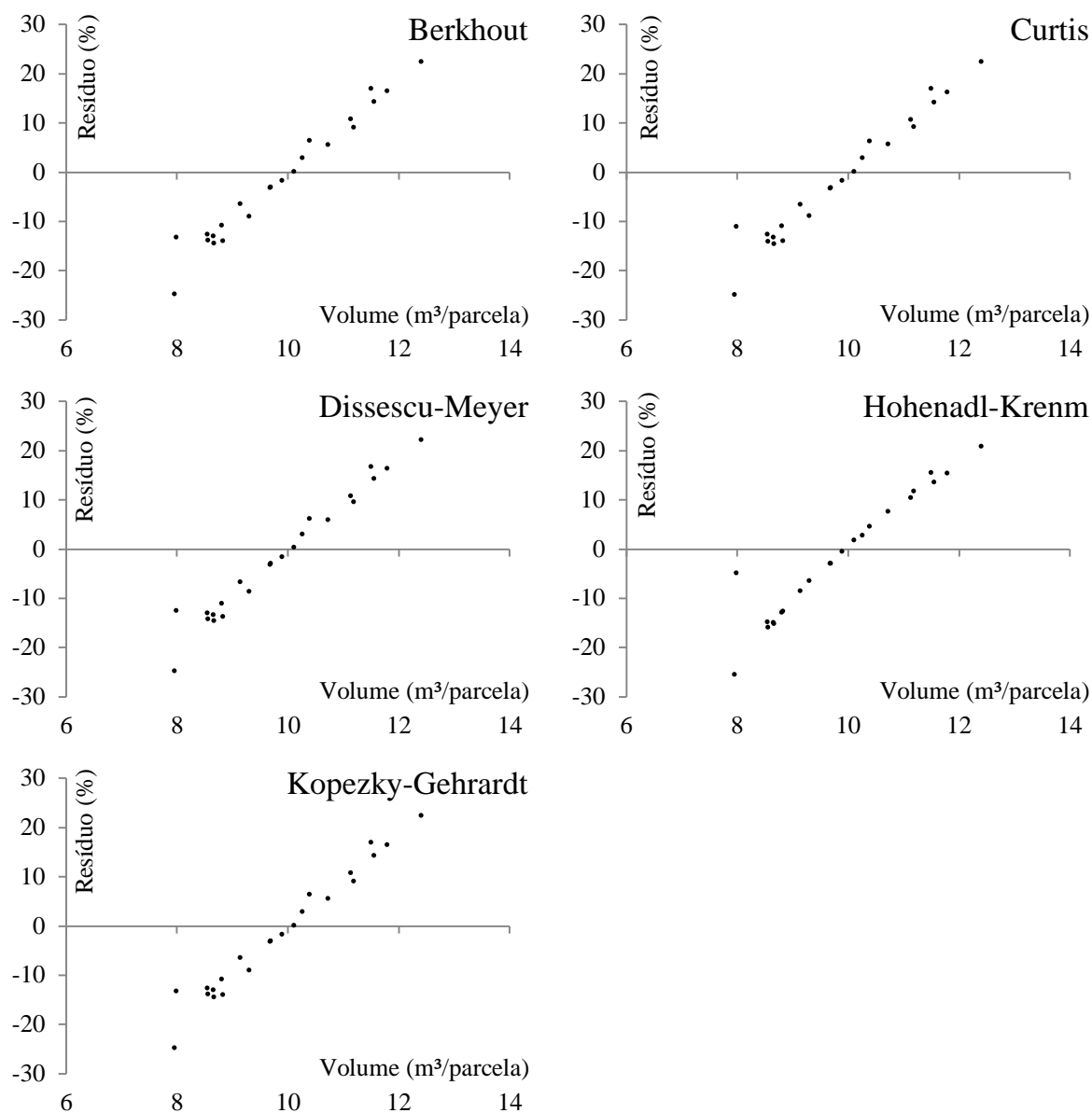


FIGURA 3.3: Dispersão dos resíduos para as equações ajustadas.

Observa-se na Figura 3.3 um padrão semelhante de distribuição residual para todos os modelos analisados. Todos eles superestimaram o volume das parcelas com até 10 m³ de volume de madeira e subestimaram o volume das parcelas com volume superior a 10 m³.

Portanto, verifica-se que todos os modelos apresentaram falta de independência dos erros, não atendendo um dos pressupostos da análise de regressão, que é a independência dos erros.

Desta forma, com base no valor do coeficiente de determinação e no erro padrão da estimativa, o modelo que apresentou maior precisão em relação aos demais modelos foi o modelo de Berkhout, no entanto, é necessário que novas tentativas sejam feitas buscando encontrar um modelo que apresente maior precisão.

Berra et al. (2011), trabalhando com estimativa de volume florestal em *Eucalyptus* sp. com imagens Landsat 5, ajustou um modelo de regressão múltiplo (*stepwise*) e seu R² foi de 0,29 e o erro padrão da estimativa de 39,04%. Tal fato foi justificado pelo povoamento apresentar várias espécies com diferentes idades e espaçamentos.

Mesmo diante do cenário acima, com a equação ajustada de Berkhout foi estimado o volume para todo o povoamento utilizando todos os *pixels* (1.288) presentes na área de estudo. O valor somado do volume de madeira, após estimativa com a equação para a área de estudo foi de 28.555 m³. Em comparação, esse valor ficou compreendido exatamente entre o intervalo de confiança gerado pelo inventário florestal utilizando as 23 parcelas amostradas. Assim, o intervalo de confiança ficou entre os volumes de 26.971 m³ a 30.193 m³, com valor médio de 28.628 m³. Apenas 73 m³ (em 116 ha) a mais do que aquele estimado pela equação do NDVI.

Apesar do ajuste do modelo matemático não ter sido muito favorável sobre a precisão, à equação estimou muito bem o volume (m³) para todo o povoamento em relação ao método tradicional de inventário florestal.

3.3.2 - Estimativa do volume (m³) por parcela utilizando a média do índice de vegetação como fator de correção

A Tabela 3.8 apresenta os valores médios dos índices de vegetação encontrados nas 23 parcelas e que foram utilizados como fatores de correção do volume cilíndrico para o volume (m³) por parcela.

TABELA 3.8 - Valores médios dos índices de vegetação utilizados para estimativa do volume (m³), encontrados para as 23 parcelas.

	EVI	EVI ₂	MSAVI ₂	NDVI	SAVI
Fator de Correção	0,482	0,335	0,716	0,662	0,348

Com os fatores de correção definidos, transformando o volume cilíndrico para o volume por parcela, foram então calculados os volumes (m³) nas 23 parcelas amostradas no inventário florestal. A Tabela 3.9 apresenta os volumes (m³/parcela) agrupados após estimativa com os fatores de correção, com exceção do volume do inventário florestal, oriundo da equação ajustada selecionada no Capítulo II.

TABELA 3.9 - Volumes (m³/parcela) agrupados, após estimativa com os fatores de forma e correção, para cada procedimento.

Parcelas	Inventário Florestal	Fator EVI	Fator EVI ₂	Fator MSAVI ₂	Fator NDVI	Fator SAVI
46-1	12,4046	13,3718	9,2937	19,8635	18,3654	9,6543
46-2	11,7842	12,7230	8,8428	18,8998	17,4744	9,1859
46-3	8,8002	9,3494	6,4980	13,8883	12,8408	6,7501
47-1	11,5512	12,5063	8,6921	18,5779	17,1768	9,0295
47-2	10,3859	11,2982	7,8525	16,7833	15,5175	8,1572
47-3	11,1311	11,9538	8,3082	17,7572	16,4179	8,6306
48-1	9,8878	10,5511	7,3332	15,6734	14,4914	7,6178
48-2	9,6879	10,1695	7,0680	15,1065	13,9672	7,3423
48-3	8,8266	9,2576	6,4342	13,7520	12,7148	6,6839
49-1	10,2612	10,7717	7,4866	16,0012	14,7944	7,7771
49-2	10,7197	11,3514	7,8895	16,8623	15,5906	8,1956
49-3	11,1831	11,9554	8,3093	17,7596	16,4201	8,6317
50-1	9,6791	10,3336	7,1821	15,3504	14,1927	7,4608
50-2	8,6596	9,1487	6,3585	13,5903	12,5653	6,6053
50-3	11,4998	12,4906	8,6812	18,5546	17,1552	9,0181
51-1	8,5599	9,1807	6,3808	13,6378	12,6093	6,6284
51-2	8,6482	9,1704	6,3736	13,6225	12,5951	6,6210
51-3	8,5444	9,3102	6,4707	13,8301	12,7870	6,7218
51-4	7,9867	8,5580	5,9480	12,7128	11,7540	6,1788
51-5	9,1372	9,7074	6,7468	14,4201	13,3325	7,0086
52-1	7,9529	8,3358	5,7935	12,3827	11,4488	6,0184
52-2	10,1025	10,7737	7,4879	16,0041	14,7971	7,7785
52-3	9,2955	9,9010	6,8814	14,7078	13,5985	7,1484
Média	9,8561	10,5291	7,3179	14,4612	15,6408	7,6019

Com a informação da Tabela 3.9 procedeu-se à comparação entre os procedimentos avaliados.

3.3.2.1 - Comparação entre os fatores de correção e o inventário florestal

A Tabela 3.10 apresenta o resultado do Teste *t*, ao nível de 5% de significância, realizado entre os fatores de correção e o volume do inventario (m³/parcela) nas 23 parcelas amostradas.

TABELA 3.10 - Valores significativos para o Teste *t* entre os fatores de correção e o volume (m³/parcela) do inventário florestal.

Pares avaliados	Valor de <i>t</i> calculado	Probabilidade
VOL INV / EVI	-17,55	<0,001
VOL INV / EVI ₂	40,38	<0,001
VOL INV / MSAVI ₂	-31,39	<0,001
VOL INV / NDVI	-32,09	<0,001
VOL INV / SAVI	40,82	<0,001

VOL INV = Volume do inventário florestal.

Como verificado na Tabela 3.10, os procedimentos adotados não estimaram com precisão, o volume por parcela, diferindo do inventário florestal tradicional.

Tal fato pode ser explicado devido à “aparência” da cobertura vegetal, em um determinado produto de Sensoriamento Remoto, ser fruto de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais. Assim, o que é efetivamente medido por um sensor remotamente situado, oriundo de determinada vegetação, não pode ser explicado somente pelas características intrínsecas dessa vegetação, pois inclui também a interferência de vários outros parâmetros e fatores (PONZONI, 2001), como por exemplo:

- a) Fontes de radiação, que inclui a irradiância espectral, a localização do ângulo zenital e azimutal solar;
- b) Efeitos da atmosfera;
- c) Características do dossel;
- d) Solos, devido uma série de propriedades e parâmetros.

Como a vegetação é um alvo muito complexo do sensoriamento remoto, pois pode apresentar variadas propriedades de reflexão foliar em uma mesma planta, além de assentar-se sobre um plano constituído de solo e substrato que, por sua vez, apresentam propriedades de reflexão própria (EPIPHANIO et al., 1996), essas interferências limitaram as estimativas efetuadas utilizando os índices de vegetação como fator de correção do volume.

3.4 - CONCLUSÕES

Apesar da baixa correlação entre os índices de vegetação e o volume advindo do inventário florestal, a utilização do índice NDVI como variável independente no modelo

matemático não foi inviabilizada. Porém, as estatísticas de precisão do modelo foram apenas razoáveis.

Apesar do cenário anteriormente mencionado, quando o volume foi estimado para toda área de estudo verificou-se que o volume total (m^3) ficou compreendido exatamente dentro do intervalo de confiança gerado pelo inventário florestal nas 23 parcelas amostradas em campo, apontando diferença de apenas $73 m^3$ ($0,62 m^3/hectare$) em 116 hectares.

Como vantagem do procedimento, pode-se citar a necessidade apenas do valor do índice de vegetação para estimativa direta do volume por parcela ($400 m^2$). Porém, aplicado em povoamentos da empresa com as mesmas características e época do ano. Entretanto, nesse procedimento ainda é necessário à obtenção do volume das parcelas, advindos da cubagem rigorosa, para os ajustes dos modelos matemáticos.

Nenhum índice de vegetação estimou com precisão essa variável, fato constatado pela diferença significativa entre os procedimentos.

Embora os índices não meçam apenas as relações diretas com a vegetação, a possibilidade de obtenção do volume utilizando apenas o fator de correção diminuiria os custos do inventário florestal nos povoamentos florestais de eucalipto, bastando apenas a mensuração do diâmetro e da altura.

Por fim, esta pesquisa buscou fortalecer a utilização das técnicas de sensoriamento remoto em levantamentos florestais, considerando-se, sobretudo, que o estudo foi realizado com imagens gratuitas provenientes de um sensor de média resolução espacial.

CAPÍTULO IV: OBSERVAÇÕES FINAIS

4.1 - PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA ABORDADO

É de extrema importância o conhecimento do volume de madeira em um determinado povoamento, pois a preocupação com o planejamento, ordenamento e o estoque de madeira exigem, cada vez mais, maior precisão na quantificação dessa variável, bem como na otimização dos recursos técnicos disponíveis com o objetivo de desonerar as atividades de mensuração.

O volume, sem dúvida, constitui uma das informações de maior importância para o conhecimento do potencial florestal de um povoamento e é com base no inventário florestal que essa informação é obtida.

Como o inventário florestal utiliza métodos tradicionais de estatística com uma medida central (média), descrevendo um determinado fenômeno (MELLO, 2004), e/ou utiliza medida central (média) para extrapolar valores para a área em estudo, torna-se necessário o uso de um interpolador geoespacial que considere e explore as relações espaciais existentes entre as unidades amostrais.

Portanto, é de fundamental importância que novas tecnologias se juntem com as técnicas tradicionais de inventário florestal, com o objetivo de tornar menos morosa e onerosa a obtenção dessa variável, sem perder a confiabilidade das informações, já que a redução do custo no inventário florestal está alicerçada basicamente na redução da intensidade amostral (MELLO, 2004).

Aparentemente, as áreas reflorestadas apresentam uma característica marcante que é a homogeneidade. Contudo, são frequentes as variações encontradas ao longo do plantio. Para Mello et al. (2006), essa variabilidade espacial pode, muitas vezes, afetar de forma marcante a qualidade das estimativas realizadas pelo inventariador.

Para Menezes et al. (2009), a silvicultura de precisão representa um novo modelo de gerenciamento preciso, alicerçado no conhecimento, *a priori*, e na inclusão da variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção e da própria produtividade, possibilitando intervenções localizadas na floresta.

Com isso, o uso do sensoriamento remoto possibilita a obtenção e disponibilidade de uma base de dados confiável e atualizada para uso no meio florestal com importantes

resultados. Dessa forma, diversos trabalhos estão sendo realizados com dados advindos de satélites, incorporando tendências e novas possibilidades de integração de dados, com os métodos tradicionais de mensuração florestal e análises espaciais de uma determinada variável de interesse. Assim, os objetivos se convergem para que o volume possa ser obtido sem morosidade e onerosidade, sem perda de precisão nos processos de estimativas.

4.2 - QUESTÕES DE PESQUISA REVISITADAS

O INTERPOLADOR GEOESPACIAL KRIGAGEM PODE SER UTILIZADO PARA ESTIMAR O VOLUME DE MADEIRA EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus urophylla* S. T. BLAKE? QUAL A PRECISÃO DE TAIS ESTIMATIVAS EM RELAÇÃO AO MÉTODO TRADICIONAL DE INVENTÁRIO FLORESTAL?

A interpolação a partir do uso da Krigagem Ordinária mostrou-se efetiva para estimar o volume comparado com dados de inventário do povoamento florestal estudado. Os resultados da presente pesquisa mostram que as médias para o inventário (9,4 m³/parcela) e a krigagem (9,8), nos pontos de validação, foram muito semelhantes.

Quando compara-se às médias, derivadas das 10 parcelas de validação, tanto para o inventário florestal quanto para a krigagem foi possível notar que não houve diferença significativa entre as duas médias, em que o t calculado foi de 2,16 e o t tabelado foi de 2,26.

Com o cálculo do erro amostral relativo do inventário florestal e para a Krigagem, nas parcelas de validação, foi notado que o erro advindo dos valores interpolados foi menor do que o erro do inventário florestal tradicional, respectivamente, 8,34% e 8,40%, influenciando diretamente sobre o cálculo da intensidade amostral. Esse menor erro amostral relativo, advindo do interpolador, se justifica pelo uso de médias móveis, não usuais em procedimentos de inventário florestal.

A interpolação, além de apresentar importantes informações quanto à espacialização da produção do povoamento, propiciou também resultados favoráveis ao uso dessa ferramenta para inferências positivas e rápidas sobre o volume (m³) de madeira.

É POSSÍVEL UTILIZAR ÍNDICES DE VEGETAÇÃO, GERADOS A PARTIR DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS, COMO VARIÁVEIS INDEPENDENTES EM MODELOS MATEMÁTICOS E COMO FATORES DE CORREÇÃO PARA ESTIMAR O VOLUME DE MADEIRA EM UM POVOAMENTO DE *Eucalyptus urophylla* S. T. BLAKE?

Com a utilização de técnicas não convencionais para estimativa do volume (m³), observou-se algumas possibilidades para aplicação em inventários quantitativos. Neste caso destaca-se o NDVI, que mesmo não apresentando uma boa correlação com o volume (m³/parcela), foi possível estimá-lo e o volume (m³) foi bem aproximado daquele gerado pelo inventário florestal tradicional, utilizando o intervalo de confiança.

Em relação ao fator de correção utilizando os índices de vegetação, nenhum deles foi capaz de estimar com precisão o volume por parcela.

4.3 - HIPÓTESES REVISITADAS

HIPÓTESE I - O VOLUME (m³) DE MADEIRA DO POVOAMENTO FLORESTAL EM ESTUDO PODE SER ESTIMADO PARA TODA A SUA SUPERFÍCIE A PARTIR DE VOLUMES AMOSTRAIS E TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO GEOESTATÍSTICAS.

A superfície interpolada apresentou resultado aceitável na estimativa do volume, pois ao compará-lo com o método tradicional de mensuração, não foi significativa a diferença. Assim, os resultados obtidos corroboraram a hipótese.

Outro recurso importante obtido com a interpolação foi à espacialização do volume de madeira. Em que, não só foi possível estimar o volume (m³) para toda área em estudo, mas também agrupa-lo em classes volumétricas e regiões com diferentes produtividades. Recurso esse limitado quando se utiliza o método tradicional de mensuração aqui abordado. Assim sendo, torna-se possível a intervenção localizada no plantio utilizando práticas de manejo e de exploração florestal.

HIPÓTESE II - O VOLUME (m³) DE MADEIRA, OBTIDO A PARTIR DO INVENTÁRIO FLORESTAL, APRESENTA CORRELAÇÃO COM OS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO E A ESTIMATIVA DESSA VARIÁVEL PODE SER FEITA A PARTIR DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO.

Todos os índices de vegetação apresentaram baixa correlação com o volume, com ligeira vantagem para o NDVI ($r = 0,20$). Todavia, as estimativas de volume de madeira a partir do índice de vegetação, como variável independente, ficaram exatamente entre as

estimativas geradas pelos intervalos de confiança do inventário florestal. Ressalta-se apenas a condição de uso da equação ajustada para as características do plantio e também para a época do ano.

Os índices de vegetação como fator de correção não foram precisos nas estimativas do volume de madeira, em relação ao inventário florestal, e diferiram estatisticamente entre os procedimentos avaliados. Neste caso, a baixa correlação do volume (m^3) com os índices de vegetação teve maior influência sobre as estimativas do que o procedimento anterior e não apresentou aplicabilidade do método no plantio estudado.

4.4 - OPORTUNIDADES PARA NOVOS ESTUDOS

É evidente que o tema abordado não se esgota aqui e que novos estudos devem ser realizados para atestar as possibilidades aqui levantadas. De fato, algo que pode contribuir futuramente é o estudo em povoamentos com idades diferentes e também testando outros sensores e satélites disponíveis, bem como outros índices de vegetação correlacionados com o objetivo proposto.

Verifica-se também a necessidade de adicionar uma abordagem sobre o estudo do solo e sua interação com o volume, explicando, possivelmente, a natureza da superfície interpolada e sua interação com essa variável tão importante no meio florestal.

Ressalta-se também a necessidade de realização de uma abordagem econômica sobre os processos metodológicos aqui apresentados no intuito de mitigar os efeitos sobre a onerosidade dos métodos tradicionais de mensuração florestal, tornando-os menos morosos, inclusive.

É preciso verificar a possibilidade de modelar o crescimento em povoamentos florestais com parcelas permanentes utilizando dados de sensoriamento remoto temporal, com o intuito de prognosticar o estoque futuro, sem onerar muito a atividade de mensuração florestal, sobretudo com confiabilidade e presteza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. Editora da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos). Coleção Manual Universitário. São Leopoldo/RS. 1ª reimpressão. 2005. 165p.

ALBUQUERQUE, C.K.; CRUZ, C.B.M.; BARROS, R.S. **Comparação do comportamento do NDVI e do EVI₂ - Um novo índice de vegetação**. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, 27-30 de Julho de 2010, p. 001 – 004.

BARROS, D.A. **Comportamentos de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantação de *Pinus oocarpa* na região de Agudos-SP em diferentes idades e números de desbastes**. Lavras: UFV. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, 2000. 115p.

BARTOSZECK, A.C.P.S.; MACHADO, S.A.; FILHO, A.F.; OLIVEIRA, E.B. de. **Modelagem da relação hipsométrica para bracingais da região metropolitana de Curitiba/PR**. Revista Floresta n° 32. Pág. 189-204. 2002.

BERRA, E.F.; PEREIRA, R.S.; BRANDELERO, C. **Estimativa de volume florestal com imagem Landsat 5**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais..., 2011.

BIONDI, F.; MYERS, D.E.; AVERY, C.C. **Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest**. *Canadian Journal Forest Research*, Ottawa, v. 24, p. 1354- 1368, 1994.

BORBA, A.C. **Avaliação de dados do Landsat 5 TM, componentes de mistura obtidos de mínimos quadrados e um método de conjuntos contínuos na estimativa de variáveis dendrométricas de florestas de *Eucalyptus ssp*, município de Barra do Ribeiro-RS**. Dissertação de mestrado. UFRGS. 2002.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 7ª edição especial. São Paulo: Editora Saraiva, 2011, 540p.

CÂMARA, C.; MONTEIRO, A.M.; FUCKS, S.D.; CARVALHO, M.S. **Análise espacial de dados espaciais**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, SP. 2002.

CAMARGO, E.C.G.; FUCKS, S.D.; CÂMARA, G. **Análise espacial de superfícies**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, SP. 2002.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G.; **Mensuração Florestal: Perguntas e respostas** / João Carlos Chagas Campos e Hélio Garcia Leite. 2.ed. ver. e ampl. – Viçosa: ed. UFV, 2006. 470p.

CANAVESI, V.; PONZONI, F.J.; VALERIANO, M.M. **Estimativa de volume de madeira em plantios de *Eucalyptus* spp. utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos.** Revista *Árvore*. 2010, vol. 34, n. 3, pp. 539-549.

COCHEN, W.B.; SPIES, T.A.; BRADSHAW, G.A. **Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure.** *Remote Sens. Environmental*, [S.l.], v. 34, p. 167-178, 1990.

COCHRAN, W.G. **Sampling techniques.** 3.ed. New York: Wiley, 1977. 555p.

COUTO, H.T.Z. do; BASTOS, N.L.M. **Modelos de equações de volume e relações hipsométricas para plantações de *Eucalyptus* no estado de São Paulo.** IPEF, n.37, p.33-44, dez.1987.

COUTO, H.T.Z. do. **Sistemas integrados de levantamentos florestais.** In: Simpósio sobre inventário florestal, 2, Piracicaba, 1984. Anais. Piracicaba, IPEF, 1984. p.121-7.

CRESSIE, N.A.C. **Statistics for spatial data.** New York: Wiley, 1993. 900p.

DIMITROV, E.T.; VICHEV, I. **Analytical construction and expressions of height curves for Scots Pine.** *F.A.*, v.41, n.10, p.491, 1980. (Resumo).

DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied Regression Analysis.** 2º ed. New York, John Wiley & Sons, Inc. 709 p. 1980.

DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. **Análise Espacial de Dados Geográficos.** Brasília, EMBRAPA, (ISBN 85-7383-260-6), 2004.

DUARTE, J.B. **Sobre o emprego e a análise estatística do delineamento em blocos aumentados no melhoramento genético vegetal.** Piracicaba, 2000. 292p. Tese de doutorado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

EPIPHANIO, J.C.N.; GLERIANI, J.M.; FORMAGGIO, A.R.; RUDORFF, B.F.T. **Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

EPIPHANIO, J.C.N.; HUETE, A.R. **Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa.** *Remote Sensing of Environment*, v. 51, n. 3, p. 351-360, 1995.

FARIA JUNIOR, A. de. **Aprimoramento do controle de qualidade do minério no planejamento de lavra de curto prazo: Estudo de caso.** Dissertação de mestrado: Universidade de São Paulo, 140p, 2010.

FERNANDES, D.H.F.; SOARES, P.S.; OLIVEIRA, F.S. de.; RIBEIRO, C.A.A.S.; GLERIANI, J.M. **Uso de imagens ALOS para estimar parâmetros biofísicos em plantações de eucaliptos.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, INPE. p.1674-1681, 2011.

FERNANDES, R. et al. **A multiscale approach to mapping effective leaf area index in boreal *Picea mariana* stands using high spatial resolution CASI imagery.** International Journal of Remote Sensing, v.23, p.3547-3568, 2002.

FINGER, C.A.G. **Fundamentos de Biometria Florestal.** Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC. 1992. 269p.

FREITAS, V.A. **Análise de dados espaciais por meio de semivariogramas.** Universidade Federal de Uberlândia, 2000. 34p.

GIL, J.Q.C. **Elementos de geoestadística.** Departamento de Informática Universidad de Pinar del Río. Cuba. Acessado em 26 de agosto de 2012. Disponível em: <http://www.monografias.com/trabajos14/geoestadistica/geoestadistica.shtml>.

GONG, P.; PU, R.; MILLER, J.R. **Coniferous forest leaf area index estimation along the Oregon transect using compact airborne spectrographic imager data.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v.61, p.1107-1117, 1995.

GOWARD, S.N.; HUENNRICH, K.F. **Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: an assessment using the SAIL model.** Remote Sensing of Environment, v. 39, n. 2, p. 119-140, 1992.

GUJARATI, D.N. **Econometria Básica /** Damodar Gujarati; tradução de Maria José Cyhlar Monteiro. - Rio de Janeiro: Elsevier, 2006 – 5ª tiragem.

GUNNARSON, F.; HOLM, P.H.; THURESONN, T. **On the potential of krigagem for forest manegement planning.** Scandinaviam Journal of Forest Research, [S.l.], v. 13, n. 2, p. 237-245, 1998.

GURTLER, S.; EIPHANIO, J.C.N.; BARRETO LUIZ, A.J.; FORMAGGIO, A.R. **Planilha eletrônica para o cálculo da reflectância em imagens TM e ETM+ LANDSAT.** Revista Brasileira de Cartografia, v.57, p.162-167, 2005.

HIGUCHI, N. **Amostragem sistemática versus amostragem aleatória em floresta tropical úmida de terra firme na região de Manaus.** Acta Amazônica, v.16/17, p.393-400, 1986/1987.

HÖCK, B.K.; PAYN, T.W.; SHIRLEY, J. **Using a geographic information system and geostatistics to estimate site index of *Pinus radiata* for Kaingaroo forest.** New Zealand Journal of Forestry Science, Wellington, v. 23, p. 264-277, 1998.

HOEF, J.V. **Sampling and geostatistics for spatial.** Ecoscience, v.9, n.2, p.152-161, 2002.

HU, B.; INANNEN, K.; MILLER, J.R. **Retrieval of leaf area index and canopy closure from CASI data over the BOREAS flux tower sites.** Remote Sensing of Environment, v. 74, p.255-274, 2000.

HUETE, A.R.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. **A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS**. Remote Sensing of Environment, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.

HUETE, A.R.; JUSTICE, C.O.; LIU, H.Q. **Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS**. Remote Sensing of Environment, v. 49, n. 3, p. 224-234, 1994.

HUETE, A.R. **A soil-adjusted vegetation index (SAVI)**. Remote Sensing of Environment, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

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

JAKUBAUSKAS, M.E.; PRICE, K.P. **Empirical relationship between structural and spectral factors of Yellowstone lodgepole pine forests**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Bethesda, v.63, n.12, p.1375-1381, 1997.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres** / John R. Jensen ; tradução José Carlos Neves Epiphânio (coordenador)... [et al.]. – São José dos Campos, SP : Parêntese, 2009.

JIANG, Z.; HUETE, A.R.; DIDAN, K.; MIURA, T. **Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band**. Remote Sensing of Environment v.112, p. 3833–3845, 2008.

KANEGAE JUNIOR, H.; MELLO, J.M. de; SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, A.D. de. **Avaliação da continuidade espacial de características dendrométricas em diferentes idades de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp.** Revista Árvore, Viçosa-MG, v.31, n.5, 2007.

KARNIELI, A. et al. **Temporal dynamics of soil and vegetation responses in a semi-arid environment**. International Journal of Remote Sensing, v.23, n.19, p.4073-4087, 2002.

KAUFMAN, Y.J.; REMER, L.A. **Detection of forests using mid-IR reflectance: An application for aerosol studies**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 32, n. 3, p.672-683, 1994.

KAUFMAN, Y.J.; TANRÉ, D. **Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 30, n. 2, p.261-270, 1992.

KAYITAKIRE, F.; HAMEL, C.; DEFOURNY, P. **Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery**. Remote Sensing of Environment, v.102, p.390-401, 2006.

KORNING, J.; THOMSEN, K.; OLLGAARD, B. **Composition and structure of a species rich Amazonian rain forest obtained by two different sample methods**. Nordic Journal of Botany, v.11, n.1, p.103-110, 1991.

LANDIM, P.M.B.; STURARO, J.R.; MONTEIRO, R.C. **Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada**. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Laboratório de Geo Matemática, Texto Didático 06, 12 pp. 2002.

LEAL, F.A.; MIGUEL, E.P.; MATRICARDI, E.A.T. **Mapeamento de unidades produtivas utilizando a interpolação geoespacial krigagem a partir do inventário florestal em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, N.13; Pág. 727 a 745, 2011.

LEITE, H.G.; REGAZZI, A.J. **Métodos estatísticos para avaliar a igualdade de equações**. *Revista Árvore*, 16(1): 59-71. 1992.

LU, D. et al. **Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin**. *Forest Ecology and Management*, v.198,p.149-167, 2004.

MACHADO, S.A.; FILHO, A.F. **Dendrometria**. / Sebastião do Amaral Machado, Afonso Figueiredo Filho. – 2ª.ed. – 1ª reimpressão – Guarapuava : UNICENTRO, 2009. 309p.

MACHADO, S.A. **Complete enumeration forest inventory versus Cluster sampling methods applied in the Amazonian Rain forest**. *Revista Floresta*, v.18, n.1/2, p.122-130, 1988.

MÄKELÄ, H.; PEKKARIEN, A. **Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data**. *Forest Ecology and Management*, v.196, p.245-255, 2004.

MATÉRN, B. **Spatial variation: stochastic models and their application to some problems in forest surveys and other sampling investigations**. Stockholm: Skogsforsknings Institut, 1960. 144p. (Skogsforsknings Institut. Meddelanden fran Statens Skogsforsknings Institut, v.49, n.5).

MATHERON, G. **Principles of geostatistics**. *Economic Geology*, v.58, p.1246-1266, 1963.

MATOS, O.C. de. **Econometria básica: Teoria e aplicações** / Orlando Carneiro de Matos. -3ª Edição revisada e ampliada. São Paulo : Editora Atlas, 2000.

MEDEIROS, A.M.P.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E. **Imagens Landsat na estimativa de áreas de cana-de-açúcar, cana e soja**. In: XIII Simpósio brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996, Salvador. Anais... Salvador: INPE, 1996.

MELLO, J.M. de; OLIVEIRA, M.S.D.; BATISTA, J.L.F.; JÚNIOR, P.R.J.; JÚNIOR, H. K. **Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão**. *Revista Floresta*, v. 36, n. 2, p. 251-260, 2006.

MELLO, J.M. de; BATISTA, J.L.F.; OLIVEIRA, M.S.D.; JÚNIOR, P.J.R. **Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis***. Revista Cerne, v. 11, n. 2, p. 113-126, 2005.

MELLO, J.M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal** / José Marcio de Mello. - - Piracicaba, Tese de doutorado, 2004. 111p.

MELLO, J.M.; SCOLFORO, J.R.S. **Análise comparativa de procedimentos de amostragem em um remanescente de floresta estacional semidecídua montana**. Revista Árvore, v.24, n.1, p.55-62, 2000.

MENEZES, S.J.M. da C. de, et al. Floresta de precisão: **Determinação da evapotranspiração regional em plantio de eucalipto utilizando o algoritmo Sebal e o sensor orbital TM-Landsat 5**. 7º Congresso Brasileiro de Agroinformática. SBIAgro, 2009.

MIGUEL, E.P.; LEAL, F.A. **Seleção de equações volumétricas para a predição do volume total de *Eucalyptus urophylla* S. T. BLAKE na região norte do estado de Goiás**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.8, N.14; p. 1372-1386, 2012.

MIGUEL, E.P.; ENCINAS, J.I.; REZENDE, A.V.; FERREIRA, J.C.S.; AGUIAR, G.P. **Classificação de sítio para plantios de *Eucalyptus urophylla* em Niquelândia, Estado de Goiás**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, N.12; pg 1-11. 2011.

MIGUEL E.P.; CANZI, L.F.; RUFINO, R.F.; SANTOS, G.A. dos. **Ajuste de modelo volumétrico e desenvolvimento de fator de forma para plantios de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Rio Verde – GO**. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.6, N.11; 2010.

MOREIRA, R.C. **Influência do posicionamento e da largura de canais de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. São José dos Campos. 179 p. (INPE-7528-TDI/735). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.

OSBORNE, J.G. **Sampling errors of systematic and random surveys of cover-type areas**. Journal Statistics Association, v.37, p.256-264, 1942.

PARRESOL, B.R. **Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons**. Forest Science, 45: 573–593. 1999.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D.A. **Inventário Florestal**. Curitiba: Os autores, 1997. 316p.

PLONER, A.; DUTTER, R. New directions in geostatistics. **Journal of Statistical Planning and Inference**, Amsterdam, v. 91, p. 499-509, 2000.

PONZONI, F.J. **Comportamento Espectral da Vegetação**. In: MENESES, P. R., NETTO, J. S. M. (org) Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília - UNB, Embrapa Cerrados, p 157-199, 2001.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Relações entre índices de vegetação (NDVI e SAVI) e parâmetros biométricos de plantios de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus camaldulensis* em Cachoeira do Manteiga (MG)**. Revista Árvore, v.22, n.3, p.357-366, 1998.

RÉ, D.S.; THIERSCH, C.R.; ANDRADE, C.M. **Avaliação do uso da krigagem na definição de estratos para o inventário florestal**. Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias. Anais..., 2009.

RIBEIRO, C.A.A.S.; VARELLA, C.A.A.; SENA Jr, D.G.; SOARES, V.P. **Sistemas de Informações Geográficas**. Agricultura de precisão. Editado por Aluizio Borém e outros. Viçosa, MG – Brasil 2000. 467 p.: il. p-380-407.

ROBERTSON, G.P. **GS⁺: Geostatistics for the Environmental Sciences**. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA. 2008. p.169.

ROSENDO, J.S.R. **Índices de vegetação e monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na bacia do Rio Araguari – MG – utilizando dados do sensor MODIS**. 2005. 130 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - 2005.

ROSENQVIST, A.; MILNE, A.; LUCAS, R.; IMHOFF, M.; DOBSON, C. **A review of remote sensing technology in support of the Kyoto protocol**. Environmental Science and Policy, v.6, p.441–455, 2003.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J.C. **Monitoring the vernal advancement retrogradation of natural vegetation**. Final Report Type III - NASA/GSFC, 1974.

ROUSE, J.W. et al. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. Proceedings...Washington: NASA, 1973. p.309-317.

SAMRA, J.S.; GILL, H.S.; BHATIA, V.K. **Spatial stochastic modelling of growth and forest resource evaluation**. Forest Science, Amsterdam, v. 35, n. 3, p. 663-676, 1989.

SANQUETA. C.R.; WATZLAWICK, L.F.; DALLA CÔRTE, A.P.; FERNANDES, L. de A.V.; SIQUEIRA, J.D.P. **Inventários florestais: Planejamento e Execução**. Carlos Roberto Sanqueta... [et al.] – 2.ed.- Curitiba : Multi-Graphic Gráfica e Editora, 2009. 316p. : il.

SARTORI NETO, A. **Subsídios para elaboração do plano de manejo do Parque Nacional Grande Sertão Veredas por meio de um Sistema de Informações Geográficas**. Viçosa, 2000. 98 f.. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa.

SCHLERF, M.; ATZBERGER, C.; HILL, J. **Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data.** *Remote Sensing of Environment*, v.95, n.1, p.177-194, 2005.

SCHNEIDER, P.R.; FINGER C.A.G.; KLEIN, J.E.; et al. **Fundamentos de planejamento da produção para o manejo florestal de *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden e *Eucalyptus saligna* Smith.** Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1988. 179p.

SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M. de. **Inventário Florestal** / José Roberto Soares Scolforo, José Márcio de Mello. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006.

SCOLFORO, J.R.S. **Técnica de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos da madeira.** Lavras: UFLA/FAEP, 1997. 292p.

SKIDMORE, A.K. **An expert system classifies eucalypt forest types using thematic mapper data and a digital terrain model.** *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, n. 10. 1989. p. 1449-1464.

SOARES, C.P.B.; PAULA NETO, F. de; SOUZA, A.L. **Dendrometria e inventário florestal** / Carlos Pedro Boechat Soares, Francisco de Paula Neto, Agostinho Lopes de Souza. – Viçosa : Ed. UFV, 2006.

SOARES, V.P.; GUIMARÃES, W.D.; RIBEIRO, C.A.A.S.; SILVA, A.S. **Uso de imagens Landsat-7 ETM+ para o mapeamento de plantações de *Eucalyptus* na região norte de Minas Gerais.** *Revista Floresta*, V.35, N.1, p137-149, 2005.

SOARES, V.P.; HOFFER, R.M.; BRITES, R.S.; RIBEIRO, C.A.Á.S. **Monitoramento de plantações de *Eucalyptus* spp no Vale do Rio Doce através de imagens TM/Landsat.** VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais... Salvador/BA: 1996.

SOUZA, C.C. de; MOREIRA, A. de A.; SCHIMITH, R.S.; BRANDÃO, P.C.; SILVA, E. **Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil – Uma revisão bibliográfica.** *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 17. n. 4. p. 409-417. Out-Dez, 2007.

SOUZA, C.L.; PONZONI, F.J. **Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/Landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de *Pinus* spp.** IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1998.

SPRUGEL, D.G. 1983. **Correcting for bias in log-transformed allometric equations.** *Ecology*, 64, 209–210.

STALL, D. **Avaliação econômica e análise de sensibilidade de regimes de manejo em florestas de *Pinus taeda* L. no planalto serrano de Santa Catarina.** Dissertação de Mestrado. UFPR. Curitiba/PR. 2012.

THENKABAIL, P.S. et al. **Detecting floristic structure and pattern across topographic and moisture gradients in a mixed species Central African forest using IKONOS and Landsat-7 ETM+ images.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 4, p.255-270, 2003.

THOMPSON, S.K. **Sampling.** New York: Wiley, 1992. 343 p.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. **Application of geostatistics to special studies of soil properties.** Advances in Agronomy, v.38, p.45-94, 1985.

TUCKER, C.J. **Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation.** Remote Sensing of Environment, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.

VEIGA, R.A.A. **Uso de equações de volume em levantamentos florestais.** In: Simpósio sobre inventário florestal, 2, Piracicaba, 1984. Anais. Piracicaba, IPEF, 1984. p.93-102.

VIEIRA, S.; **Estatística Experimental.** São Paulo: Atlas, 1999. (Vol. 2).

WALTER-SHEA, E.A.; PRIVETTE, J.; CORNELL, D.; MESARCH, M.A.; HAYS, C.J. **Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfafa.** Remote Sensing of Environment, v. 61, n. 1, p. 162-177, 1997.

WATZLAWICK, L.F.; KIRCHNER, F.F.; SANQUETTA, C.R. **Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite IKONOS II.** Ciência Florestal, v. 19, p.169-181, 2009.

WULDER, M.; LAVIGNE, M.; FRANKLIN, S. **High spatial resolution optical image texture for improved estimation of forest stand leaf area index.** Canadian Journal of Remote Sensing, Ottawa, v. 22, n. 4, p. 441-449, 1996.

XAVIER, A.C. **Estimativa de propriedades biofísicas de plantações de eucaliptos a partir de dados Landsat-TM.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos. 1998.

YAMAMOTO, J.K. **Avaliação e classificação de reservas minerais.** São Paulo: Edusp, 2001. 226p.

ZONETE, M.C.C. **Avaliação do uso de técnicas de interpolação para estimativa de volume em florestas clonais de *Eucalyptus* sp.** Universidade de São Paulo- ESALQ. Dissertação de mestrado, 2009.