



**SÉRGIO TEIXEIRA DA SILVA**

**ESPACIALIZAÇÃO DO VOLUME DE  
MADEIRA NO CERRADO *SENSU STRICTU* EM  
MINAS GERAIS**

**LAVRAS – MG**

**2014**

**SÉRGIO TEIXEIRA DA SILVA**

**ESPACIALIZAÇÃO DO VOLUME DE MADEIRA NO CERRADO  
*SENSU STRICTU* EM MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. José Márcio de Mello

**LAVRAS - MG**

**2014**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e  
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Silva, Sérgio Teixeira de.

Espacialização do volume de madeira no cerrado *sensu strictu* em  
Minas Gerais / Sérgio Teixeira de Silva. – Lavras : UFLA, 2014.  
99 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.  
Orientador: José Marcio de Mello.  
Bibliografia.

1. Cerrado *sensu strictu*. 2. Krigagem. 3. Inventário florestal. 4.  
Geoestatística. 5. Sensoriamento remoto. I. Universidade Federal de  
Lavras. II. Título.

CDD – 634.9285

**SÉRGIO TEIXEIRA DA SILVA**

**ESPACIALIZAÇÃO DO VOLUME DE MADEIRA NO CERRADO  
*SENSU STRICTU* EM MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 15 de agosto de 2014.

Dr. José Roberto Soares Scolforo	UFLA
Dr. Carlos Rogério de Mello	UFLA
Dra. Ivonise Silva Andrade	Inventar GMB Consultoria
Dr. Luis Marcelo Tavares de Carvalho	UFLA

Dr. José Márcio de Mello  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2014**

À minha esposa Sirley,  
pelo amor compartilhado e constante incentivo;

Aos meus filhos,  
Isabella e João Eduardo, pela alegria da convivência,  
e por me mostrar o sentido da vida;

Aos meus familiares,  
minha mãe Tereza, meu pai Oscar (*in memoriam*),  
meus irmãos Ismael e Luís Gustavo, pelo apoio  
ao longo da vida.

***Dedico***

## AGRADECIMENTOS

A Deus que tornou tudo possível.

Ao amigo Prof. Dr. José Márcio de Mello, a quem sou imensa e eternamente agradecido por ser uma pessoa fundamental na concretização desta empreitada, orientando, apoiando, incentivando e apresentando sempre bons conselhos, sobretudo de fé.

Ao Prof. Dr. José Roberto Scolforo, grande incentivador no desenvolvimento dos trabalhos, pelos constantes conselhos e orientações, e, sobretudo, pelo grande apoio nos momentos de maiores dificuldades encontradas durante esta jornada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal pela oportunidade de cursar o doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão de uma bolsa de estudos.

Ao Prof. Fausto Weimar, pela grande ajuda nas discussões técnicas e desenvolvimento dos trabalhos.

Ao colega de laboratório, Marcelo, pela constante ajuda no processamento de dados.

Aos amigos Aline, Henrique Ferraço e Marcel que altruístas demonstraram durante todo o período o verdadeiro sentido da amizade, do companheirismo, da união em torno de um objetivo: o engrandecimento. Pessoas fundamentais para minha superação e finalização desta realização profissional e pessoal.

À Glaucia e Elizabeth pela constante ajuda e orientação no dia a dia do LEMAF.

A toda equipe do LEMAF, pela amizade e suporte ao longo deste tempo.

Minha eterna gratidão a todos.

## RESUMO

O Bioma Cerrado vem sendo um dos principais fornecedores de insumos para a indústria em Minas Gerais, especialmente como fonte de energia. A quantificação dos volumes de madeira existentes nas áreas propensas à exploração é realizada por métodos tradicionais, muitas das vezes utilizando-se de parcelas piloto para estimativa da variabilidade da população e ajuste no planejamento do inventário final. Métodos que se apoiam em geotecnologias têm um grande potencial para se inferir sobre a homogeneidade, distribuição e biomassa dentre outras características existentes em determinada região, com promissor ganho na qualidade do inventário. O presente estudo visa avaliar diferentes índices de vegetação no intuito de encontrar correlação entre características biométricas (área basal, altura, volume) da vegetação com tais índices, avaliar o comportamento espacial da volumetria realizando um mapeamento da variável volume, empregando técnicas de krigagem ordinária e com regressão, comparando as distribuições espaciais encontradas e elaborando um mapa de distribuição do volume de madeira para o cerrado *sensu strictu* em Minas Gerais. Tais avaliações fazem uso de imagens LandSat 5 TM e da base de dados do Inventário da Flora Nativa de Minas Gerais, para ajuste de modelos que estimem a volumetria para o cerrado. Através das imagens orbitais obtiveram-se diferentes índices de vegetação, dentre os quais o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI, um dos mais utilizados, com o qual no presente trabalho se buscou estabelecer correlação com o diâmetro e altura das árvores do cerrado *sensu strictu*, permitindo assim o ajuste de uma equação de regressão para inferência sobre o potencial madeireiro e sua distribuição no estado de Minas Gerais. Dentre as características biométricas testadas e os diversos índices de vegetação obtidos, nenhum deles mostrou-se bem correlacionados com tais características. No entanto, o NDVI, um dos mais utilizados em sensoriamento remoto, mostrou-se com uma correlação de 0,46, podendo ser utilizado no método de krigagem por regressão. Os valores estimados pelo modelo ajustado, ao serem processados com técnicas de krigagem ordinária, encontraram um volume médio de 35,6 m<sup>3</sup>/ha, enquanto que na krigagem com regressão este volume médio foi elevado para 36,5 m<sup>3</sup>/ha. Ambos os resultados encontram-se condizentes com os valores publicados no Inventário Florestal de Minas Gerais, permanecendo dentro do intervalo de confiança estabelecido pelo método tradicional. Desta forma, o modelo geográfico ajustado para estimativa de volume mostrou que a característica biométrica volume se encontra estruturada espacialmente, permitindo realizar sua espacialização através da krigagem, com grande potencial para inferência de volumetria no planejamento de inventários florestais em áreas distantes, de grandes dimensões ou de difícil acesso.

Palavras-chave: Savana. Krigagem. Inventário florestal. Geoestatística. Sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

The savanna biome has been one of the major suppliers of inputs for the industry in the State of Minas Gerais, Brazil, especially as source of energy. The quantification of existing timber volumes on prone areas to lumbering has been by using traditional methods, mainly the pilot plots for estimating the population variability and adjust the final inventory planning. However, the geotechnology-based methods are potentials for inferring about the homogeneity, distribution, biomass, and many other parameters related to inventory quality. The purpose of this work was to assess the vegetation indices, seeking to find correlation among biometric features, such as basal area, height and volume. Was also assessed the spatial pattern of volumetry by means of ordinary kriging, and with regression. Were used LandSat 5 TM images and dataset from the native flora inventory of the State of Minas Gerais. By means of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), was established its correlation with diameter and height, and was adjusted a regression model seeking to infer about the timber potential and its distribution in the State. According to results, none of other vegetation indices was well correlated with the biometric features, beyond the NDVI, which showed a correlation of about 0.46. By means of ordinary kriging was found a mean volume of about 35.6 cubic meters per hectare, while by means of kriging with regression were found 36.5 cubic meters per hectare. All results were according to those recorded in the native flora inventory of the State of Minas Gerais, and ranged according to those established by using traditional methods. Therefore, the geographical model developed to estimate biometric features showed that the volume is spatially structured, allowing its spatialization by means of kriging, with great potential for volumetry inferences in the planning of a forest inventory in remote and broad areas, and/or of difficult access.

Key-words: Brazilian Savanna. Kriging. Forest inventory. Geostatistics. Remote sensing.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Distribuição do Bioma Cerrado no Brasil.....	16
Figura 2	Semivariograma típico para dados sem tendência e com ruído .....	30
Figura 3	Delimitação dos Biomas de Minas Gerais segundo o Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais – ZEE/MG.....	36
Figura 4	Distribuição dos fragmentos inventariados na região de Cerrado <i>sensu strictu</i> em Minas Gerais .....	38
Figura 5	Localização e distribuição dos fragmentos de cerrado <i>sensu strictu</i> em Minas Gerais avaliados no presente estudo .....	40
Figura 6	Cobertura das cenas do satélite LandSat 5 TM na área de abrangência do cerrado <i>sensu strictu</i> em Minas Gerais .....	41
Figura 7	Distribuição das imagens LandSat 5 TM utilizadas.....	44
Figura 8	Exemplo de limite de fragmento e polígonos de área efetiva avaliada .....	50
Figura 9	Exemplo de parcela e <i>buffer</i> para amostragem dos <i>pixels</i> .....	51
Figura 10	Gráficos exploratórios da variável biométrica volume: <i>boxplot</i> (a) e histograma de frequência (b) .....	67
Figura 11	Relação entre o volume total e as direções latitude (a) e longitude (b).....	68
Figura 12	Semivariograma exponencial ajustado para a variável volume total (m <sup>3</sup> /parcela).....	70
Figura 13	Distribuição espacial do volume (m <sup>3</sup> /ha) dentro do estado de Minas Gerais para a fitofisionomia cerrado <i>sensu strictu</i> .....	72
Figura 14	Mapa de classificação climática de Thortwaite para o estado de Minas Gerais, desenvolvido para o Zoneamento Ecológico Econômico .....	73

Figura 15	Dispersão dos valores estimados pela equação ajustada ao redor da reta 1:1 para o estoque volumétrico da parte aérea da vegetação arbórea do cerrado <i>sensu strictu</i> em Minas Gerais .....	80
Figura 16	Semivariograma unidirecional teórico e experimental para os resíduos da variável estoque volumétrico da parte aérea da vegetação arbórea (m <sup>3</sup> /ha) do cerrado <i>sensu strictu</i> de Minas Gerais .....	81
Figura 17	Mapa de krigagem dos resíduos do modelo ajustado .....	83
Figura 18	Mapa dos valores estimados pelo modelo ajustado .....	83
Figura 19	Mapa dos valores interpolados do estoque madeireiro da vegetação arbórea do cerrado <i>sensu strictu</i> de MG por meio da krigagem com regressão .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Órbita/Ponto das imagens LandSat 5 TM utilizadas e respectivas datas de imageamento .....	44
Tabela 2	Correlação de Pearson entre variáveis biométricas, área basal (G), diâmetro médio (DM), altura média (HM) e volume total (VT) e índices espectrais.....	59
Tabela 3	Correlação de Pearson entre variáveis biométricas, área basal (G), diâmetro médio (DM), altura média (HM) e volume total (VT) e índices espectrais, para as seis classes de antropização .....	63
Tabela 4	Estatísticas descritivas para volume (m <sup>3</sup> /parcela) para o cerrado <i>sensu strictu</i> em Minas Gerais .....	66
Tabela 5	Bacias hidrográfica com volume estimado de madeira de cerrado em Minas Gerais .....	75
Tabela 6	Coefficientes de correlação de Pearson entre estoque volumétrico (m <sup>3</sup> /ha) e as variáveis latitude, longitude, altitude e NDVI.....	76
Tabela 7	Ajuste do modelo geográfico com coeficientes estimados pela regressão e a significância estatística (Student “t” test) dos coeficientes estimados .....	78
Tabela 8	Erro Médio Absoluto (EMA %), coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> ) e o teste de Shapiro-Wilk (SW).....	78

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
2.1	Histórico do uso e ocupação do cerrado .....	16
2.2	Conceituação geral sobre Inventário Florestal .....	19
2.3	Sensoriamento remoto.....	23
2.3.1	Índices espectrais de vegetação .....	24
2.4	Geostatística .....	28
2.4.1	Krigagem ordinária.....	28
2.4.2	Krigagem com regressão.....	32
2.5	Ocorrências de continuidade espacial em características biométricas .....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	36
3.1	Caracterização geral da área de estudo.....	36
3.2	Obtenção da base de dados .....	37
3.3	Geração de diferentes índices espectrais para a vegetação do cerrado <i>sensu strictu</i> em Minas Gerais .....	45
3.4	Estudo da correlação linear entre características biométricas e índices espectrais da vegetação.....	52
3.5	Avaliação do comportamento espacial da variável volume .....	52
3.5.1	Análise exploratória dos dados.....	52
3.5.2	Estudo variográfico e modelagem do semivariograma .....	53
3.5.3	Validação do modelo .....	53
3.5.4	Krigagem ordinária.....	54
3.5.5	Krigagem com regressão.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1	Correlação entre as variáveis biométricas estudadas e os índices espectrais da vegetação .....	59
4.2	Estudo variográfico da variável volume .....	65
4.2.1	Análise exploratória de dados .....	65
4.2.2	Avaliação da continuidade espacial .....	69
4.2.3	Inferência espacial - Krigagem Ordinária .....	71
4.2.4	Inferência espacial - krigagem com regressão .....	76
4.2.4.1	Modelagem do estoque madeireiro da vegetação arbórea do cerrado <i>sensu strictu</i> de MG .....	76
4.2.4.2	Krigagem dos resíduos .....	81
4.2.4.3	Mapa do estoque madeireiro da vegetação arbórea do cerrado <i>sensu strictu</i> de MG utilizando krigagem com regressão .....	82
5	CONCLUSÕES.....	88
	REFERÊNCIAS .....	89

## 1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, a estimativa da produtividade de uma floresta é realizada através de inventários florestais, nos quais parcelas são alocadas no campo segundo um sistema de amostragem pré-definido. Variáveis como o diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) e a altura total (HT) das árvores são mensuradas em cada parcela e, posteriormente, empregadas como variáveis independentes em equações alométricas para a estimativa de características biométricas como área basal, biomassa, estoque de carbono, volume de madeira, dentre outras. Os valores médios encontrados nas parcelas são então extrapolados para o restante da área a partir de procedimentos de amostragem, os quais no contexto da estatística clássica assumem que as variações espaciais das características são aleatórias (MELLO et al., 2005).

Portanto, os sistemas de amostragem utilizados, quando não consideram a posição espacial das unidades amostrais na estimativa da variável dependente, não permitem a verificação da existência de correlação entre as unidades amostrais e a espacialização da variável de interesse em toda a área de estudo.

No caso da estimativa da produção dos fragmentos de vegetação nativa do Estado de Minas Gerais, a problemática é ainda mais complexa devido à grande extensão territorial do Estado e, conseqüente, à heterogeneidade de fisionomias florestais, solos, regime hídrico, clima, altitude, dentre outros.

Diversos estudos mostraram que as variáveis biométricas apresentam-se espacialmente estruturadas, observando que seus valores variam de forma gradual e constante em uma determinada vizinhança, sendo que essa relação de dependência espacial não pode ser desconsiderada nas análises estatísticas das variáveis florestais (ALVARENGA et al., 2012; GUEDES et al., 2012; KANAGAE JÚNIOR et al., 2006; MELLO et al., 2005, 2006).

Segundo Guedes et al. (2012), a utilização de um método estatístico que considere as relações espaciais existentes entre as características biométricas é de fundamental importância para a melhoria das estimativas geradas pelo inventário florestal.

Uma alternativa às técnicas clássicas de estatística seria a utilização de técnicas de análise geoestatística no processamento dos inventários florestais (ALVARENGA et al., 2012). A geoestatística consiste em um método estatístico que considera parte do erro aleatório associado à localização das parcelas em campo, ou seja, a localização das parcelas no espaço exerce influência no comportamento das variáveis de interesse.

A krigagem é um estimador capaz de efetuar a predição volumétrica com eficácia, destacando-se principalmente, devido à sua capacidade de considerar a autocorrelação entre as parcelas, podendo assim prever o volume obtido nas parcelas do inventário florestal em locais não amostrados (MELLO et al., 2006). Contudo, devido à grande extensão do estado de Minas Gerais, à alta heterogeneidade e ao fato de que a vegetação não se apresenta de forma contínua no espaço e sim fragmentada na paisagem, mesmo técnicas como a krigagem ainda apresentam limitações.

À medida que os problemas ficam mais complexos, técnicas mais robustas são necessárias para que casos específicos como a estimativa da produtividade dos fragmentos de cerrado em todo o estado de Minas Gerais sejam melhorados. Nesse sentido, destacam-se as técnicas de cokrigagem e krigagem com regressão (HENGL; HEUVELINK; ROSSITER, 2007; YAMAMOTO; LANDIM, 2013), ambas caracterizadas como versões multivariadas da krigagem.

Informações sobre grandes áreas estão cada vez mais disponíveis, oriundas de sensores remotos ou levantamentos digitais, de modo que essas informações podem ser de grande valia na predição espacial de variáveis de

difícil obtenção e/ou de alto custo de medição, melhorando assim as estimativas e reduzindo a variância do modelo de continuidade espacial (HALME; TOMPPO, 2001; TOMPPO et al., 2008).

Vários estudos utilizam índices espectrais, normalmente construídos a partir da razão das bandas do vermelho e do infravermelho próximo, para correlacionar os valores desses índices com a fração de cobertura do solo pela vegetação (ALMEIDA et al., 2014; BERRA et al., 2012; CARVALHO et al., 2008). O índice mais utilizado é o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) devido à conhecida correlação desse índice com certas propriedades do dossel da vegetação. Os índices SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) também têm sido utilizados em diversos estudos por reduzirem a influência do solo e da atmosfera na reflectância da vegetação (ANDERSON et al., 2005; JENSEN, 2009; LU et al., 2004).

Outro parâmetro decisivo na avaliação do desenvolvimento da vegetação é sua área foliar, que tanto pode ser mensurada como estimada, sendo esta intimamente ligada ao estágio fenológico de vegetação. Os valores referentes à área foliar são obtidos pelo IAF (Índice de Área Foliar), e representa quanto da superfície do solo está recoberta pelo dossel da vegetação. Este índice pode ser derivado de outros índices como o SAVI.

Estes fatos despertaram alguns questionamentos quanto à possível aplicabilidade rotineira destes índices, assim como combinações deles com variáveis ambientais, visando à geração de informações preliminares e auxiliares para o planejador florestal. É possível correlacionar índices espectrais com variáveis biométricas para inferir sobre produtividade lenhosa da vegetação? Os índices espectrais permitem realizar um mapeamento com expectativa de produtividade para uma determinada área?

Desta forma, o presente estudo tem como objetivo geral utilizar técnicas de geoprocessamento e estatística espacial, a fim de espacializar a

volumetria das áreas de cerrado *sensu strictu* no estado de Minas Gerais, além de correlacionar índices espectrais com as informações biométricas do inventário florestal. Especificamente, pretende-se:

- a) Gerar diferentes índices de vegetação através do processamento digital das imagens Landsat 5 TM para os fragmentos de cerrado avaliados no Estado de Minas Gerais.
- b) Avaliar a correlação entre os índices de vegetação com os valores das características biométricas de cada parcela, advindas dos inventários realizados nos fragmentos de cerrado.
- c) Analisar o comportamento espacial da volumetria resultante dos inventários de campo de diversos fragmentos de cerrado.
- d) Efetuar o mapeamento da variável volume para todo o estado, utilizando a Krigagem Ordinária e Krigagem com regressão.
- e) Comparar a distribuição espacial dos volumes efetuada pelos dois mapeamentos referente à variável volume de madeira para o cerrado em Minas Gerais.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Histórico do uso e ocupação do cerrado

O cerrado é uma formação florestal que ocupa uma grande área territorial no Brasil, estando presente na porção central do Brasil e engloba parte dos estados da Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Piauí, São Paulo e Tocantins, além do Distrito Federal, totalizando uma área aproximada superior a 204 milhões de ha (Figura 1).



Figura 1 Distribuição do Bioma Cerrado no Brasil

Fonte: Adaptado de Sano et al. (2008).

A exploração do cerrado brasileiro iniciou-se no século XVII com o deslocamento dos colonizadores portugueses para o interior do país a procura de ouro, pedras preciosas e de índios para trabalharem como escravos. Após a

Guerra do Paraguai (1864 - 1870), as autoridades brasileiras começaram a incentivar a ocupação do sul do Mato Grosso com as preocupações relativas à segurança nacional e à defesa das fronteiras nacionais (KLINK; MOREIRA, 2002). Segundo o mesmo autor, no governo de Getúlio Vargas durante a década de 40 do século passado, promoveu-se a ocupação da área central do cerrado brasileiro a partir da implantação de colônias agrícolas nos estados de Goiás e Mato Grosso, merecendo destaque as de Dourados, no Mato Grosso, e Ceres, em Goiás. Entretanto, a grande distância em relação aos grandes centros consumidores e a ausência de vias de acesso representaram grandes obstáculos à ocupação do Cerrado (SANTOS; MARTINS; FERREIRA, 2009).

A construção da nova capital em Brasília, na década de 1950, provocou um forte impacto demográfico, criando no interior do país um grande adensamento populacional, devido ao volumoso fluxo de imigrantes para o centro do país, além da criação de novas rodovias que interligavam a capital às principais cidades brasileiras (SANTOS; MARTINS; FERREIRA, 2009).

Nas décadas de 1980 e 1990, fortes investimentos em pesquisas foram realizados, buscando a adaptação de culturas às condições de clima e solos existentes nos domínios desta formação florestal, especialmente de grãos como a soja e o milho. Com o avanço tecnológico obtido e as condições de relevo favoráveis ao desenvolvimento da mecanização, uma nova fronteira agrícola tem sido implantada, caracterizada por uma agricultura de larga escala, em que grandes propriedades foram desmatadas para dar lugar a grandes lavouras de grãos, tanto para consumo interno no país como para ocupar um lugar de destaque no comércio internacional de *commodities* agrícolas (GRÜNDLING; BARCELLOS, 2011; MACHADO et al., 2004).

O constante crescimento populacional e a crescente demanda da indústria de base e alimentícia trouxeram uma maior pressão antrópica sobre o cerrado, cujo espaço territorial vem sendo ocupado rapidamente. Esta pressão

por ocupar os cerrados ainda tem como agravante a limitação de utilização de recursos naturais provenientes da Mata Atlântica, limitação esta impetrada pela promulgação de uma legislação que restringe a intervenção sobre esse bioma (ALBUQUERQUE; LINI, 2007). Assim, os consumidores de produtos e subprodutos de origem florestal, que atuavam nos limites desta formação florestal, passam a buscar no cerrado material lenhoso que possa suprir, mesmo que parcialmente, a demanda existente.

No caso específico de Minas Gerais, o contexto não é diferente. Representado em uma porção significativa do território mineiro, com área estimada em 3,11 milhões de hectares, o cerrado ocupa uma posição de destaque no cenário econômico atual, fornecendo matéria prima para as indústrias de base como siderurgia, setor fortemente arraigado em Minas Gerais, favorecido pelas grandes jazidas minerais presentes em seu subsolo.

Com uma vegetação composta por espécies arbóreas de porte relativamente pequeno, em sua maioria apresentando uma forma tortuosa de seu fuste, poucas espécies fornecedoras de madeira considerada nobre para uso em movelaria, caixilharia e outros setores da indústria como celulose, laminados e estrutural, a vegetação do cerrado é largamente utilizada para produção de carvão vegetal, um importante componente da siderurgia que o emprega como principal fonte de carbono na produção de ferro-gusa e aços especiais (KLINK; MACHADO, 2005).

Fatores intrínsecos a esta tipologia florestal como a produtividade relativamente baixa quando se obtém a proporção entre  $m^3$  de material lenhoso e área explorada em hectare e o baixo ritmo de crescimento das espécies lenhosas que compõem a flora desta formação vegetal levaram a indústria extrativa a optar pela substituição das espécies nativas por exóticas, especialmente o gênero *Eucalyptus*, conseguindo assim elevar a produtividade madeireira por unidade de área, com maior retorno econômico para o empreendimento implantado (SILVA

et al., 2004). Esta substituição traz como consequência lógica a perda da vegetação nativa e a alteração de todo o sistema ecológico ali existente, com reflexos sobre a fauna, regime hídrico, interação social, entre outros fatores. Estas consequências são pouco conhecidas e estudadas, pois os resultados financeiros/econômicos buscam justificar esta intervenção ao mesmo tempo em que ofusca e minimiza os seus reflexos ambientais.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos sobre a vegetação do cerrado, visando principalmente conhecer sua formação estrutural, com uma visão qualitativa, em que as espécies são identificadas, suas formas de propagação e cultivo, usos múltiplos e alternativos para as diversas espécies frutíferas, medicinais, energia, etc. (AGUIAR; MONTEIRO, 2005; KLINK; MACHADO, 2005).

Estudos quantitativos também vêm sendo desenvolvidos, buscando identificar parâmetros de crescimento e produtividade nas diversas regiões de ocorrência desta vegetação. Avaliações volumétricas do potencial madeireiro, de biomassa e de estoque de carbono estão sendo realizadas tanto por iniciativa dos órgãos ambientais quanto por instituições acadêmicas, ao passo que a iniciativa privada realiza levantamentos quantitativos destinados a embasar seus planos de manejo sustentável e planejamento de operações para exploração dos recursos madeireiros encontrados (ALVARENGA et al., 2012; MORAIS et al., 2014; RUFINI et al., 2010).

## **2.2 Conceituação geral sobre Inventário Florestal**

A dinâmica de vida das florestas sofre mudanças rápidas devido a fatores que se alteram constantemente no espaço e no tempo. Fatores inerentes ao solo, ao clima e à própria planta influenciam acentuadamente esta dinâmica, além das ações antrópicas (adubação, melhoramento genético, dentre outros).

Toda esta dinâmica deve ser acompanhada por meio de técnicas de amostragem, que sejam eficientes na representação do estado atual e temporal da floresta, a fim de gerar informações precisas e com menor custo possível para subsidiar as ações do manejo e planejamento florestal (MELLO, 2004).

As informações obtidas nos levantamentos florestais advêm de parcelas temporárias ou permanentes. O uso de uma ou de outra parcela depende diretamente do objetivo do levantamento. As parcelas temporárias são capazes de dar condições de inferências sobre a situação atual da floresta. As parcelas permanentes, além da informação atual, permite avaliar o crescimento da floresta, através do inventário florestal contínuo (IFC).

O inventário florestal contínuo (IFC) consiste de uma rede de parcelas monitoradas periodicamente com o objetivo de verificar as mudanças ocorridas na floresta em um determinado intervalo de tempo, isto é, quantificar e qualificar o estoque de madeira. Os inventários florestais contínuos possibilitam também a construção de modelos de predição do crescimento e da produção florestal em relação ao manejo adotado. Assim, esforços para obter informações confiáveis sobre o estoque e o crescimento da floresta são de fundamental importância, pois o inventário é um instrumento estratégico de planejamento nas empresas florestais (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997; SCOLFORO; MELLO, 2006; SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2006).

Contudo, a eficiência do inventário florestal pode ser facilmente melhorada por técnicas adequadas de amostragem e de processamento dos dados. Os métodos de amostragem utilizados nos inventários florestais buscam estimativas com melhor precisão para um mesmo número de parcelas medidas ou para um número reduzido de parcelas. Desse modo, para um grau de precisão desejado, buscam-se os métodos e procedimentos de amostragem que permitam reduzir o custo do inventário, o qual é diretamente influenciado pelo tempo de medição (CESARO; ENGEL; FINGER, 1994).

Uma alternativa para melhorar a estimativa da característica de interesse é a estratificação, que consiste na subdivisão da população total em subpopulações mais homogêneas na característica avaliada. Diversos trabalhos abordam a comparação da Amostragem Casual Simples (ACS) e da Amostragem Sistemática (AS) com a Amostragem Casual Estratificada (ACE), comprovando que a estratificação reduz o erro do inventário (ALVARENGA et al., 2012; GUEDES et al., 2012; KANEGAE JUNIOR et al., 2004; MELLO; SCOLFORO, 2000).

Mello e Scolforo (2000) compararam diversos procedimentos de amostragem e verificaram que os procedimentos que se basearam na estratificação foram mais precisos que os baseados na aleatorização.

Alvarenga et al. (2012), estudando a eficiência da estratificação em um fragmento de cerrado *sensu strictu*, encontraram uma redução do erro de amostragem do inventário de 11,38% quando utilizado AS para 6,47% quando utilizado a ACE, resultando em uma redução de 43,14% da ACE em relação à AS.

Guedes et al. (2012) estudaram a possibilidade do uso da estrutura de dependência espacial para a definição de estratos em povoamentos florestais e compararam, com base no erro de amostragem, a ACS e a ACE. Os autores encontraram uma redução do erro de amostragem variando de 47,0% a 68,4% da ACE em relação a ACS, sendo essa variação ocasionada pelo grau de dependência espacial ter variado de fraco a forte entre os projetos avaliados.

Os métodos tradicionais de estatística usados para análise desses procedimentos foram construídos com base na Teoria Clássica de Amostragem (COCHRAN, 1977). Por esta teoria, o valor médio de uma dada característica, em uma região amostrada, é igual ao valor da esperança desta característica em qualquer ponto dentro da região, com um erro de estimativa correspondente à variância dos dados amostrados.

Um dos princípios que a Teoria de Amostragem Clássica se baseia é a casualização que tem como princípio neutralizar os efeitos da correlação espacial. Assim, as posições das unidades amostrais no campo podem ser ignoradas nesta abordagem. A pressuposição desses métodos é que as variações numa dada característica, de um local para outro, são aleatórias (independentes). A Teoria de Amostragem Clássica consiste em dois componentes, conforme equação apresentada a seguir:

$$Z(x_i) = M(x) + \varepsilon_i \quad (1)$$

Em que  $Z(x_i)$  é a variável avaliada,  $M(x)$  é uma função determinística que descreve a componente estrutural de  $Z$  e  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório. A parte  $\varepsilon_i$  é tão importante quanto  $M(x)$ , e a análise destes resíduos é fundamental em todo trabalho estatístico.

O que se deseja é que a parte  $\varepsilon_i$  não contenha nenhuma “suavidade” ou comportamento estruturado. É fundamental que ela seja aleatória. É importante ressaltar que a Teoria de Amostragem Clássica desperdiça a estrutura de dependência espacial, quando ela está presente na característica avaliada. Deve-se observar que a formulação desta teoria discerne somente o tamanho da variabilidade, através do desvio padrão, e não discerne a estrutura da variabilidade.

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 (HOEF, 2002; THOMPSON; SEBER, 1996). Os procedimentos de amostragem mais utilizados nos inventários florestais são: casual simples, casual estratificado e sistemático. Segundo Cressie (1993) e Matérn (1960), estes procedimentos também são considerados na amostragem espacial. Os

estimadores dos procedimentos de amostragem casualizados foram construídos com base nas probabilidades geradas pela aleatorização dos mesmos sobre a população fixa (BRUS; GRUIJTER, 1997). A descrição detalhada de cada um destes procedimentos pode ser encontrada em Cochran (1977), Péllico Netto e Brena (1997), Scolforo e Mello (1997) e Thompson (1992), dentre outros.

### **2.3 Sensoriamento remoto**

O sensoriamento remoto é o conjunto de atividades que tem como objetivo a obtenção de informações dos alvos e fenômenos dinâmicos da superfície terrestre, por meio da captação, registro e análise da radiação eletromagnética refletida e emitida pelos alvos da superfície, sem que haja contato físico entre o sensor e o alvo (JENSEN, 2009).

Com o desenvolvimento tecnológico presenciado nas últimas décadas, a obtenção de imagens de sensores remotos se tornou mais acessível, possibilitando a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto em estudos que relacionam as características das tipologias florestais com os dados radiométricos existentes nas imagens (TOMPPPO et al., 2008).

Estudos envolvendo a reflectância espectral de dosséis têm sido motivados pela necessidade de relacionar os níveis de cinza que definem os padrões existentes em fotografias aéreas e imagens orbitais em diferentes regiões espectrais com as características das tipologias florestais, como estoque de biomassa, volumetria, condição fitossanitária, distinção de espécies nativas, entre outros (BERRA et al., 2012; CANAVESI et al., 2010; CHEN et al., 2008; TAYLOR; HILL; EDWARDS, 2013).

Diversos estudos vêm sendo realizados com sensores remotos como o TM/Landsat, IKONOS, CASI para a estimativa de variáveis biométricas via sensoriamento remoto (BERRA et al., 2012; CANAVESI et al., 2010; HALL et



al., 2006; LU et al., 2004; MÄKELÄ; PEKKARINEN, 2004; TOMPPO et al., 2002, 2009; WATZLAWICK; KIRCHNER; SANQUETTA, 2009).

### **2.3.1 Índices espectrais de vegetação**

Desde 1969, pesquisas sobre índices de vegetação vêm sendo feitas. O objetivo da criação de índices espectrais é auxiliar a interpretação de imagens do sensoriamento remoto. Os índices de vegetação podem ser definidos como uma combinação de dados de duas ou mais bandas espectrais, selecionadas com o objetivo de melhorar a relação desses dados com os parâmetros da vegetação (MOREIRA, 2000). Podem ser aplicados em altas, médias e baixas resoluções espaciais de imagens de satélites como, Rapideye, Landsat TM, SPOT, CBERS, Terra e Aqua (MODIS).

Um índice de vegetação pode ser calculado através de razão, diferenciação, relacionando diferenças e somas ou formando combinações entre bandas espectrais. O cálculo do índice pode ser feito por valores de radiância, reflectância ou números digitais contidos nas imagens de sensoriamento remoto (JACKSON; HUETE, 1991).

Inicialmente os índices espectrais foram desenvolvidos através de simples relações entre bandas para destacar as propriedades de reflectância de vegetação em diferentes estágios de crescimento. Em seguida, foram produzidos índices visando reduzir os efeitos do fundo, quando em áreas onde a resposta espectral do solo sobrepõe a da vegetação. Posteriormente, foram desenvolvidos índices com o objetivo de compensar os efeitos das distorções atmosféricas.

O uso dos índices espectrais serve para realçar determinadas coberturas de solo além de estimar parâmetros biofísicos de coberturas de interesse. De modo geral, os índices são usados para minimizar ou eliminar as limitações

apresentadas pelo sensoriamento remoto (semelhança espectral entre áreas queimadas e sombras de relevo, áreas degradadas e pastagens, etc.).

Segundo Lu et al. (2004), uma variedade de índices de vegetação têm sido desenvolvidos, sendo que os mais populares utilizam os comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo com o propósito de realçar a diferença entre a forte absorção da radiação eletromagnética na região do vermelho e a forte dispersão da radiação eletromagnética na região do infravermelho próximo.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada ou *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) é um dos mais frequentemente usados em muitas aplicações relevantes para a análise de parâmetros biofísicos da vegetação. Gurgel, Ferreira e Luiz (2003), em estudo que avaliou a variabilidade do NDVI sobre regiões do Brasil, afirmam que os tipos de vegetação localizados em regiões com períodos secos e chuvosos marcantes, como é o caso do cerrado e da caatinga, apresentam ciclo anual bem caracterizado e respondem de forma rápida à ocorrência de chuva, e que vegetações densas e verdes todo o ano, como a floresta amazônica, apresenta maior variabilidade apenas quando ocorrem anomalias climáticas.

Linli e Jun (2010), em trabalho realizado na China, evidenciam também essa relação, contudo ressaltam que a resposta da vegetação, através do NDVI, para a variação da temperatura foi mais pronunciada do que a precipitação em algumas regiões do país, diminuindo a defasagem no tempo de resposta do NDVI a essas variações.

Os valores do NDVI se estabilizam em um patamar, independente do aumento da densidade do dossel, o que a partir de certo estágio de crescimento das plantas, compromete a sua sensibilidade à detecção de variações no aumento de biomassa vegetal (RISSO et al., 2009; ROSENDO, 2005).

O NDVI tem sido utilizado para diversas funções como a estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação (índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura vegetal, acompanhamento de desenvolvimento fenológico, etc.) (ROSENDO, 2005), e também para avaliar a rebrota da vegetação após a queimada (LENTILE et al., 2006).

Outros índices foram criados através de variações do NDVI objetivando diminuir a influência do solo, da atmosfera e da geometria de iluminação (MOREIRA, 2000). McDonald, Gemmill e Lewis (1998) verificaram que os índices de vegetação foram significativamente afetados por efeitos exógenos, incluindo ângulo zenital solar, reflectância do fundo do dossel, estrutura do povoamento e índice de área foliar, entre outros.

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo ou *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) e o SAVI transformado (TSAVI) reduzem parcialmente os efeitos da reflectância do fundo do dossel nos dados (LU et al., 2004).

O *Enhanced Vegetation Index* ou Índice de Vegetação Otimizado (EVI), foi proposto pelo *MODIS Land Discipline Group* e foi desenvolvido visando aperfeiçoar o sinal da vegetação, reduzir influências da atmosfera e melhorar a sensibilidade em regiões de alta densidade de biomassa (ANDERSON et al., 2005).

Lu et al. (2004) exploraram a relação entre as variáveis biométricas e os dados do sensor TM/Landsat em três regiões da Amazônia. As seis bandas deste sensor referentes ao espectro óptico foram analisadas, assim como índices de vegetação, componentes principais e transformação *tasseled cap*. Foram feitas coletas de dados no campo onde foram medidas a altura das árvores e o DAP e a partir desses dados foram calculadas a biomassa e a área basal. Foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson para interpretar as relações entre os dados dendrométricos e os dados do sensor TM/Landsat. O estudo concluiu que a banda 5, a componente principal 1, a transformação *tasseled cap* e o albedo

(soma da reflectância das seis bandas) foram as variáveis mais correlacionadas com os dados dendrométricos. O Índice de Vegetação Atmosfericamente Resistente (ARVI), Índice de Vegetação da Atmosfera e do Solo (SAVI) e o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) não apresentaram boas correlações com os dados florestais, ao contrário do que ocorreu com os índices que incluíram em seus cálculos os dados da banda 5.

No estudo de desenvolvimento da vegetação, Pereira e Machado (1987), consideram sua área foliar de grande importância, sendo esta dependente do número, tamanho e estágio fenológico em que se encontra a comunidade. Expressando a relação entre a área foliar de todo dossel e a porção de solo que recobre, o Índice de Área Foliar (IAF) pode permitir fazer inferência sobre o desenvolvimento da vegetação, pois este poderá ser tanto maior quanto mais próximo do IAF máximo potencial existente.

Schlerf, Atzberger e Hill (2005) utilizaram dados das imagens do sensor aerotransportado HyMap e dados de campo para estimar o IAF. Foram calculados índices de vegetação a partir de bandas largas (simuladas) como Razão Simples (SR), Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), entre outros e índices de banda estreita como Índice de Vegetação da Razão (RVI) e Índice de Vegetação Perpendicular (PVI). Foram analisadas duas técnicas: a inversão do modelo Gaussiano e a interpolação Lagrange. O índice PVI, baseado nas bandas 1.088 e 1.148 nm, foi linearmente relacionado ao IAF, com  $R^2 = 0,67$ . Já o PVI calculado a partir das bandas 885 e 948 nm foi linearmente relacionado ao volume de madeira ( $R^2 = 0,79$ ). Esse estudo demonstrou que para imagens hiperespectrais, modelos de regressão linear podem ser aplicados para quantificar o IAF e volume de madeira com boa acurácia.

Almeida et al. (2014) ajustaram modelos para estimar características dendrométricas da Caatinga brasileira a partir de dados do sensor TM do

Landsat 5. Os autores relacionaram os valores das reflectâncias das bandas (B1, B2, B3, B4, B5 e B7) e os índices (NDVI, SAVI e SR) com os volumes de madeira, e encontraram as maiores correlações com o volume de madeira com os índices NDVI e SR. O coeficiente de determinação  $R^2$  foi igual a 0,6 para o melhor modelo ajustado.

## **2.4 Geoestatística**

A geoestatística é considerada como um grande ramo da estatística espacial que estuda a relação de uma variável regionalizada com ela mesma em outra posição (CRESSIE, 1993).

Segundo Vieira (2000) até o início dos anos 60, as análises de dados eram efetuadas com base na hipótese de independência estatística ou distribuição espacial aleatória. Porém, a hipótese de aleatoriedade dos dados não pode ser assumida antes que se avalie a inexistência de correlação entre os pontos amostrais.

Conforme Isaaks e Srivastava (1989), o semivariograma é o método geoestatístico para diagnosticar a presença da correlação espacial entre as unidades amostradas. Eles são preferidos para distinguir a estrutura de continuidade espacial da característica avaliada por exigirem hipótese de estacionaridade menos restritiva, ou seja, a hipótese intrínseca (RIBEIRO JÚNIOR, 1995) em relação, por exemplo, aos correlogramas que exigem hipótese mais restritiva como a estacionariedade de primeira ordem.

### **2.4.1 Krigagem ordinária**

A geoestatística utiliza o semivariograma representando uma função de semivariâncias em relação às respectivas distâncias. O estimador da

semivariância  $\hat{\gamma}(h)$  é igual à média aritmética das diferenças entre pares de valores experimentais ao quadrado em todos os pontos separados pela distância  $h$ .

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

Em que  $\hat{\gamma}(h)$  é o estimador da semivariância para cada distância  $h$ ;  $N(h)$  é o número de pares de pontos separados pela distância  $h$ ;  $Z(x)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $x$  e  $Z(x+h)$  é o valor no ponto  $x+h$ .

As estimativas das semivariâncias permitem gerar o gráfico da semivariância em função da distância  $h$ , denominado de semivariograma experimental.

Na Figura 2, encontra-se um semivariograma com e sem ruído. A linha tracejada refere-se a um semivariograma sem ruído e a linha cheia, com ruído. Nesse semivariograma, estão apresentados os parâmetros que caracterizam a estrutura de correlação: efeito pepita ou *nugget* ( $\tau^2$ ), contribuição ou *partial sill* ( $\sigma^2$ ) e alcance ou *range* ( $\phi$ ). Quando a linha é paralela ao eixo  $h$ , representa um caso típico de dados independentes (efeito pepita puro).

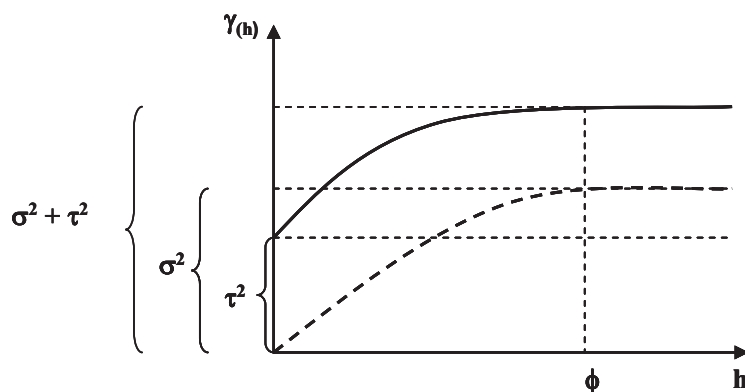


Figura 2 Semivariograma típico para dados sem tendência e com ruído

O efeito pepita ( $\tau^2$ ) é a variação aleatória ou não estruturada do fenômeno estudado. Quanto menor o efeito pepita, melhor será o processo de inferência. No entanto, de acordo com Aubry e Debouzie (2001), o efeito pepita é alto em estudos com variáveis ecológicas. A variação estruturada ( $\sigma^2$ ) ou contribuição ou *partial sill*, representa o quanto de variação total ( $\tau^2 + \sigma^2$ ) pode ser explicada pela componente espacial. O alcance ( $\phi$ ) mostra a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente. Este parâmetro reflete o grau de homogeneização entre unidades amostrais, isto é, quanto maior o alcance, maior será a homogeneidade entre os pontos amostrais (YAMAMOTO, 2001).

Os modelos aplicáveis a diferentes fenômenos com continuidade espacial são chamados de modelos teóricos. Segundo Journel e Huijbregts (1978), os principais modelos de semivariograma são: Gaussiano, Esférico e Exponencial. Por meio do comportamento do semivariograma experimental, o pesquisador é capaz de definir o modelo que melhor descreve o comportamento dos dados.

Após a definição do modelo, tem-se o ajuste da função matemática ao semivariograma experimental por diferentes métodos, entre eles os métodos dos Mínimos Quadrados Ponderados e Máxima Verossimilhança. Esses métodos são utilizados com o intuito de retirar ou atenuar o caráter de subjetividade na estimação dos parâmetros do semivariograma de forma visual (CRESSIE, 1993).

Para gerar os mapas da distribuição espacial para a variável em estudo, utiliza-se o interpolador geoestatístico denominado krigagem desenvolvido por Matheron (1963). A krigagem é um interpolador estatístico que estima valores em pontos não amostrados a partir de informações dos pontos amostrados considerando a estrutura de dependência espacial da característica em estudo.

Quando se utiliza a krigagem ordinária a identificação dos pesos de cada vizinho é obtida com base numa função matemática que associa a semivariância entre dois ou mais pontos que estão separados pela mesma distância  $h$ . O estimador da krigagem ordinária é dado por:

$$\hat{Z}_{x_0} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{x_i} \quad (3)$$

Em que  $\hat{Z}_{x_0}$  é o estimador do valor na posição  $x_0$ ;  $n$  o número de pontos amostrais vizinhos utilizados para a predição do valor não amostrado  $\hat{Z}_{x_0}$  (vizinhança da krigagem);  $\lambda_i$  é o  $i$ -ésimo peso atribuído a cada  $i$ -ésima observação da variável de interesse na posição  $x$ ,  $Z_{x_i}$ , definido pelo semivariograma.



### 2.4.2 Krigagem com regressão

A krigagem com regressão consiste de uma abordagem da geoestatística na qual se busca, primeiramente, estabelecer relações estatísticas, normalmente multivariadas, entre a variável de interesse e as variáveis geográficas, com destaque para latitude, longitude e altitude (MENEZES, 2011). A krigagem com regressão é uma combinação entre técnicas de ajuste de modelos multivariados e a krigagem dos resíduos fornecidos por estes modelos (HENGL; HEUVELINK; ROSSITER, 2007).

Após a etapa de ajuste do modelo estatístico multivariado, determinam-se os resíduos gerados pela aplicação do modelo, os quais serão modelados espacialmente com base na geoestatística. Um primeiro mapa da variável de interesse é gerado com base em um SIG e no modelo estatístico multivariado, cujas entradas são estabelecidas em função das coordenadas geográficas e do modelo digital de elevação - MDE (ou MDT). Este mapa, em formato *raster*, é então corrigido, somando-o ao mapa de krigagem do resíduo.

## 2.5 Ocorrências de continuidade espacial em características biométricas

Samra, Gill e Bhatia (1989) mapearam a altura dominante de um plantio de *Melia azederach* a partir da krigagem. Verificou-se que o erro de estimativa foi de aproximadamente 9% em relação à altura média aos três anos de medição. As técnicas geoestatísticas aliadas às técnicas de sensoriamento remoto foram trabalhadas por Cohen, Spies e Bradshaw (1990), para caracterizar a estrutura de copa de coníferas, a partir de imagens de satélite. Wulder, Lavigne e Franklin (1996), usando de imagens de satélite e técnicas geoestatísticas mapearam os parâmetros biofísicos, tais como índice de área foliar e área basal.

Höck, Payn e Shirley (1998) utilizaram o método geoestatístico para definição do índice de sítio numa área com *Pinus radiata*. A diferença média entre o valor conhecido do índice de sítio (determinado pela altura dominante) e o estimado pela krigagem foi de 0,005 metros. A teoria geoestatística foi aplicada também na estimativa do volume total de madeira num povoamento de *Pinus* sp. (GUNNARSON; HOLM; THURESONN, 1998) e na determinação do grau de dependência espacial para área basal de *Pinus ponderosa* (BIONDI; MYERS; AVERY, 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. A krigagem de bloco foi utilizada por Biondi, Myers e Avery (1994) para mapear o diâmetro e a área basal de *Pinus ponderosa* e por Mello et al. (2006) para predição do volume de madeira por talhão em plantio de *Eucalyptus grandis*.

Ortiz (2003) estudou a relação entre o potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e os atributos de solo e relevo. Constatou que a maioria das variáveis estudadas apresentou dependência espacial, sendo que os atributos físicos do solo (estrutura e textura) são os que mais influenciam o potencial produtivo. Trabalho semelhante foi realizado por Rufino (2005), que estudou a relação entre as variáveis dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e atributos de solo. Detectou que a maioria das variáveis estudadas apresentou dependência espacial.

Mello (2004), por meio de dois procedimentos de amostragem, constatou que as variáveis dendrométricas avaliadas no inventário florestal estão estruturadas espacialmente, não importando o procedimento adotado. Ushizima, Bernardi e Landim (2003) aplicaram a teoria geoestatística para a detecção e predição do padrão espacial de *Anadenanthera peregrina*, diferenciando áreas com maior agregação de indivíduos das áreas com menor agregação e áreas

desprovidas de indivíduos, com o intuito de fornecer subsídios para a exploração florestal, otimizando a relação entre volume de madeira obtida e tamanho da área.

Kanegae Júnior et al. (2004) utilizaram interpoladores espaciais para estratificação de povoamentos de *Eucalyptus* sp. Como consequência da estratificação realizada, o erro de amostragem foi reduzido em 48%.

Assis (2005) avaliou o potencial do método geoestatístico para definição de estratos com base em três características dendrométricas de *Eucalyptus* sp. em idade jovem. Os resultados mostraram que todas as características avaliadas se encontraram estruturadas espacialmente e o interpolador geoestatístico foi eficiente para complementar a estratificação cadastral. Mello et al. (2005) avaliaram o comportamento de quatro características dendrométricas obtidas por dois diferentes procedimentos de amostragem e constataram que todas as características avaliadas apresentaram-se estruturadas espacialmente independentemente do procedimento adotado, mostrando que essa estrutura não pode ser desconsiderada nas análises estatísticas.

Diniz (2007) avaliou a estrutura da dependência espacial das características número de fustes e volume em eucalipto, em três intensidades amostrais, uma parcela a cada 4 hectares de floresta, uma parcela a cada 7 ha e uma parcela a cada 10 ha. Foi observado que, com exceção da variável volume na intensidade de uma parcela a cada 10 hectares, todas as outras situações se encontraram estruturadas espacialmente.

Os estimadores da estatística clássica são largamente utilizados no processamento do inventário florestal. No entanto, diversos estudos foram realizados com o intuito de aprimorar o processamento dos mesmos, dentre eles, os que consideram estratificação e a correlação espacial existente entre as amostras se destacam. A finalidade destes estudos é buscar uma redução do erro

de amostragem e, conseqüentemente, o aumento da precisão das estimativas, sem acarretar em aumento dos custos para o levantamento.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização geral da área de estudo

A área de estudo corresponde aos limites da região recoberta por vegetação classificada como cerrado, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2013), para o Estado de Minas Gerais. As áreas de cerrado estão compreendidas entre as latitudes  $-14,25^{\circ}$  e  $-21,50^{\circ}$  Sul e entre as longitudes  $-41,80^{\circ}$  e  $-50,91^{\circ}$  Oeste.

Com uma área total aproximada de  $58.661.147 \text{ km}^2$ , Minas Gerais possui em torno de  $31.456.487 \text{ km}^2$  de sua extensão territorial recoberta por cerrado, ou seja, 53,62% (Figura 3).



Figura 3 Delimitação dos Biomas de Minas Gerais segundo o Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais – ZEE/MG

Fonte: (SCOLFORO; OLIVEIRA; CARVALHO, 2008).

O clima predominante é o Tropical sazonal apresentando um inverno seco e verão chuvoso (AW pela classificação de Koppen). A temperatura média anual está entre 22 – 23 °C. A precipitação média mensal apresenta uma clara estacionalidade, ocorrendo de forma mais concentrada entre os meses de outubro e março, com médias anuais entre 1.200 e 1.800 mm de chuva (SCOLFORO; OLIVEIRA; CARVALHO, 2008).

### **3.2 Obtenção da base de dados**

A cobertura florestal do cerrado encontra-se fortemente fragmentada, devido principalmente à ação antrópica, que ao longo do tempo vem promovendo alterações neste ambiente para construção de estradas, instalação de cidades e sua constante expansão urbana, implantação do setor agropecuário e de reflorestamento e muitas outras formas de exploração dos recursos naturais existentes.

Sobre os fragmentos florestais remanescentes desenvolveu-se um programa para mapeamento da flora nativa do Estado de Minas Gerais, objetivando subsidiar outros programas de avaliações ambientais, dentre eles um de inventário florestal, cujos objetivos foram quantificar e qualificar os fragmentos remanescentes da vegetação nativa em Minas Gerais.

O presente estudo utilizou-se dos dados gerados por esses dois programas, em que o mapeamento dos remanescentes forneceu a delimitação e localização dos fragmentos de cerrado, enquanto que do programa de inventário florestal foram importados os dados quantitativos dos fragmentos analisados.

O sistema de amostragem empregado no programa Inventário da Flora Nativa e dos Reflorestamentos de Minas Gerais também foi aplicado como modelo de obtenção de dados sobre as imagens orbitais no presente estudo. Neste caso, foi utilizado o conceito de amostragem em dois estágios (PÉLLICO

NETTO; BRENA, 1997): no primeiro, foram considerados os fragmentos de cerrado e no segundo, as unidades amostrais possíveis de serem alocadas em cada um destes fragmentos.

De um total de 169 fragmentos amostrados em todo Estado, 69 ocorreram sobre a formação dos cerrados (Figura 4), compondo uma área amostrada de aproximadamente 76.683 hectares, onde todas as fitofisionomias deste bioma foram representadas. Considerando que o presente estudo busca uma forma de obter inferências sobre o desenvolvimento madeireiro dessa formação vegetal, as fisionomias caracterizadas por ausência significativa do produto madeira, como campo cerrado, campo limpo, vereda e campo de altitude, foram excluídas, classificando assim 55 fragmentos como aptos aos objetivos do presente estudo, ou seja, de existir uma possível correlação entre suas características biométricas e as imagens orbitais.

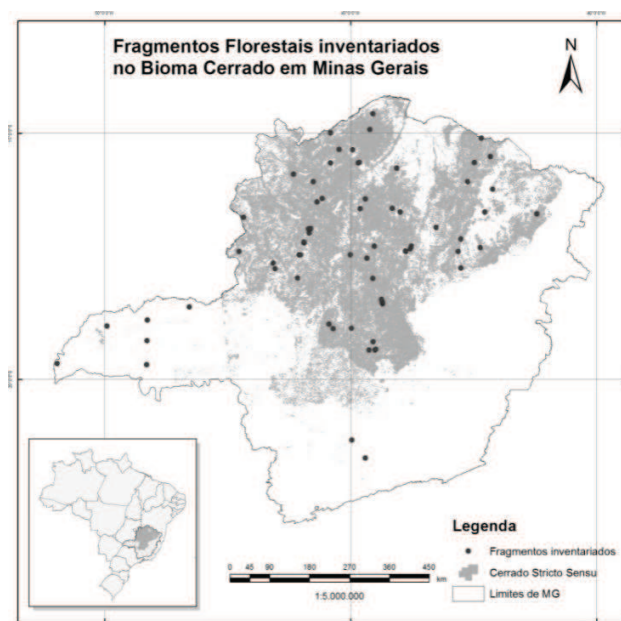


Figura 4 Distribuição dos fragmentos inventariados na região de Cerrado *sensu strictu* em Minas Gerais

Análises minuciosas destes fragmentos apontaram situações diferenciadas na ocorrência de alguns destes que poderiam comprometer a real representatividade do cerrado *sensu strictu*. Particularidades na localização de alguns fragmentos os diferenciam do cerrado passível de uma intervenção antrópica com finalidade econômica, tais como fragmentos localizados em faixas de reservas em meio a eucaliptais.

Os fragmentos caracterizados como cerradão também não puderam ser avaliados, uma vez que apenas cinco estariam disponíveis para representar esta fisionomia.

Assim, para a realização dos estudos foram utilizados 49 fragmentos, compondo um universo de 641 parcelas de 1.000 m<sup>2</sup> (10 x 100 m), cujas características possibilitam uma real representação do cerrado com possível utilização econômica, totalizando uma área amostrada superior a 30.000 hectares. A Figura 5 apresenta a localização destes fragmentos efetivamente utilizados no presente estudo.



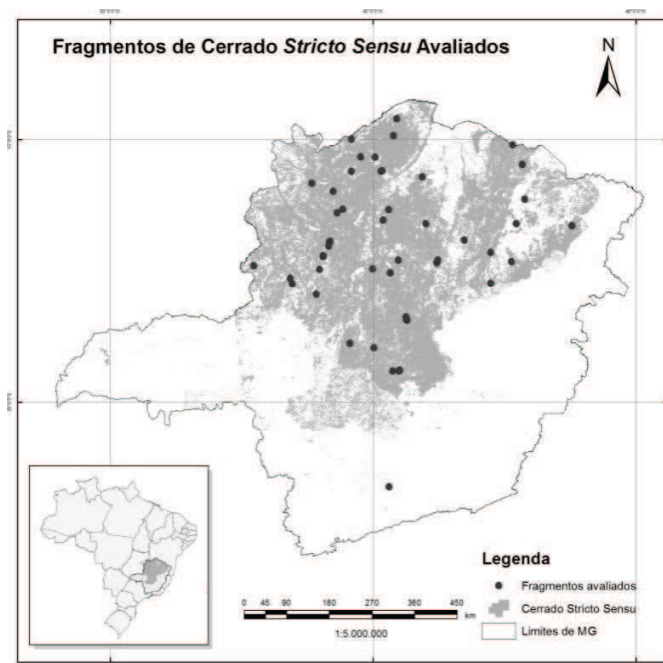


Figura 5 Localização e distribuição dos fragmentos de cerrado *sensu strictu* em Minas Gerais avaliados no presente estudo

No intuito de avaliar o quanto é viável o emprego de técnicas de interpretação de imagens na estimativa do potencial madeireiro dos remanescentes de cerrado, 21 cenas do satélite LandSat 5 TM foram selecionadas, cenas estas que correspondem à área delimitada pela região recoberta pelo Bioma Cerrado em Minas Gerais, conforme definição fornecida pelo IBGE. Na Figura 6, pode-se observar a sobreposição das cenas sobre os limites do cerrado em Minas Gerais.

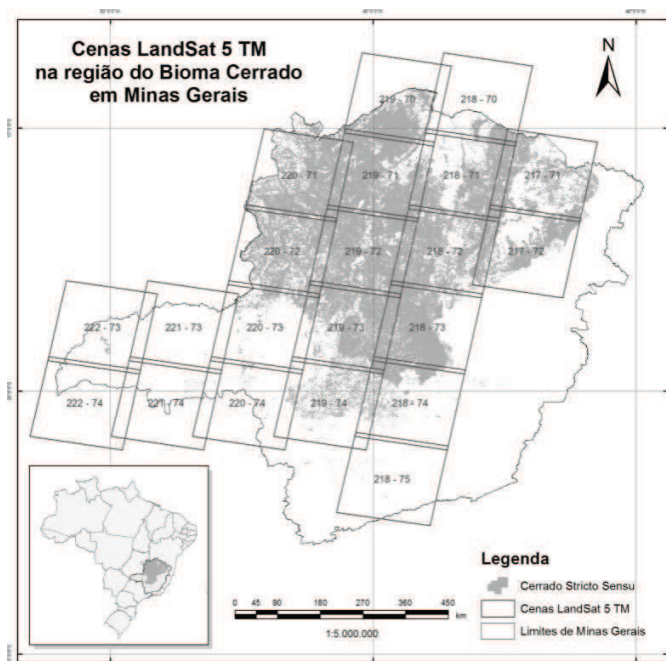


Figura 6 Cobertura das cenas do satélite LandSat 5 TM na área de abrangência do cerrado *sensu strictu* em Minas Gerais

Uma vez identificada a órbita e o ponto das cenas necessárias para sobreposição de todo o cerrado em Minas Gerais, procedeu-se à seleção de cenas cujas datas de imageamento fossem mais próximas possíveis da data de realização das campanhas de campo, nas quais foram coletados os dados alfanuméricos provenientes das parcelas alocadas nos fragmentos inventariados. A proximidade entre as datas se faz necessário para que os dados obtidos ao analisar as cenas sejam fidedignos quanto ao estado de desenvolvimento em que se encontra a vegetação no momento da coleta de dados para o inventário qualiquantitativo.

Um serviço para distribuição de imagens é oferecido pelo *United States Geological Survey* – USGS, mantido pelo governo dos Estados Unidos, como parte do programa GeoCover (Global Land Cover Facility – GLCF), em

conjunto com a Universidade de Maryland (UNIVERSITY OF MARYLAND, 2012).

O diferencial das imagens fornecidas por estes órgãos é que são disponibilizadas já devidamente tratadas. As cenas obtidas no *site* da GLCF (<http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>) compõem uma base precisa de imagens padronizadas e corrigidas geometricamente, em alguns casos sendo também ortorretificadas através de modelos digitais de elevação, e são empregadas como referência para o georeferenciamento de imagens com resolução espacial igual ou menor, obtendo-se boa precisão no ajuste final das cenas, conforme estudos desenvolvidos por Tavares Júnior et al. (2009). Já as cenas disponibilizadas pelo USGS no endereço eletrônico <http://earthexplorer.usgs.gov/>, acumulam outras características ainda mais interessantes no processamento das imagens disponibilizadas, dentre elas está o georeferenciamento e a correção radiométrica das imagens em diferentes datas, tornando-as prontas para utilização imediatamente após o *download*. Estas imagens então já se encontram aptas a fornecer dados que permitam inferir sobre o estágio e estado de desenvolvimento da vegetação existente, captados através da detecção da energia eletromagnética refletida por esta vegetação alvo, especialmente nas faixas do espectro eletromagnético equivalentes ao vermelho e infravermelho próximo. É nesta faixa de frequência que se percebe a maior interação dos processos fotossintéticos das plantas.

Devido à facilidade e boa confiabilidade oferecida por este último serviço, as imagens utilizadas neste estudo foram solicitadas e recebidas através deste órgão.

Mediante a grade composta pelas órbitas e pontos das 21 cenas, executou-se uma interseção baseada no posicionamento espacial entre esta grade e os 49 fragmentos de cerrado selecionados, determinando assim quais as cenas

e suas respectivas datas seriam necessárias para o desenvolvimento deste estudo, procedendo a busca de imagens disponíveis no catálogo.

Como resultado desta interação, 11 cenas foram selecionadas para a verificação de qualidade, buscando no catálogo de imagens pela órbita e ponto das cenas, utilizando-se ainda como critério adicional para a seleção, a data do imageamento e o limite máximo admissível de 30% para cobertura por nuvens.

As cenas solicitadas foram transferidas seguindo-se de uma auditoria quanto ao georeferenciamento das mesmas em relação aos fragmentos, buscando possíveis deslocamentos entre os vetores limites dos polígonos que representam os fragmentos e a mancha de vegetação representada pelo grupo de *pixels* da imagem. Observou-se também a existência de nuvens e/ou sombra de nuvens sobre o fragmento.

Havendo divergência entre os limites vetoriais e o observado nas imagens, uma correção dos vetores foi realizada, considerando a imagem como sendo a posição correta, visto que o levantamento dos limites dos fragmentos foi realizado com GPS de navegação autônoma e ajuste em programas computacionais tipo CAD, com generalizações dos vetores encontrados. Estes procedimentos estão mais propícios a deslocamentos de cada um dos polígonos visto que são objetos independentes, não coligados. Este tipo de erro não ocorre com a mesma facilidade em uma imagem por ser um objeto contínuo em que, havendo um deslocamento, este é sistemático, todos os elementos ali representados sofrem o mesmo deslocamento, portanto, considerou-se mais efetivo o ajuste posicional daqueles polígonos deslocados e respectivas parcelas, conforme identificado na imagem orbital.

Havendo sombreamento ou cobertura de nuvem sobre o fragmento, uma nova imagem foi pesquisada no catálogo, realizando a transferência e novamente auditada.

A Tabela 1 relaciona as imagens e respectivas datas consideradas aptas aos procedimentos deste estudo, com disposição representada na Figura 7.

Tabela 1 Órbita/Ponto das imagens LandSat 5 TM utilizadas e respectivas datas de imageamento

Órbita	Ponto	Data	Órbita	Ponto	Data
217	071	12/04/2007	219	071	18/02/2006
217	072	01/07/2007	219	072	18/02/2006
218	072	26/01/2006	219	073	09/03/2006
218	073	26/01/2006	220	071	24/01/2006
218	075	26/01/2006	220	072	24/01/2006
219	070	18/02/2006			

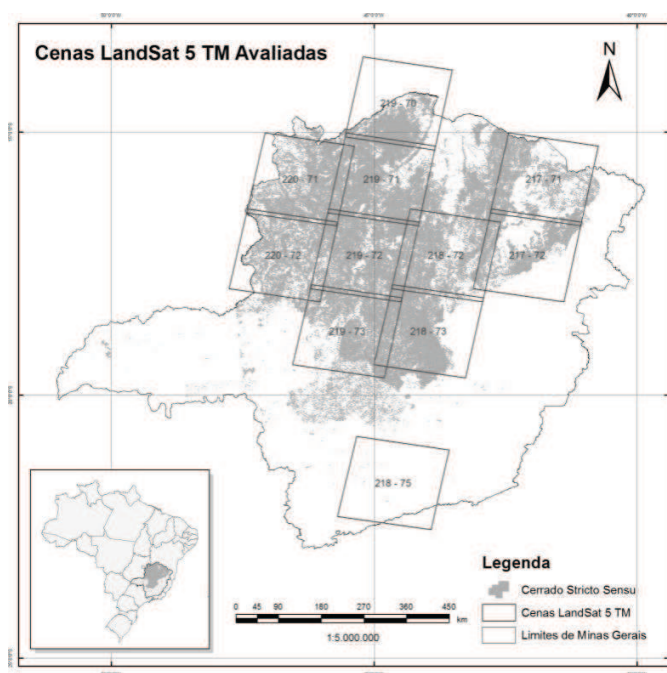


Figura 7 Distribuição das imagens LandSat 5 TM utilizadas

### 3.3 Geração de diferentes índices espectrais para a vegetação do cerrado *sensu strictu* em Minas Gerais

O índice NDVI foi desenvolvido por Rouse et al. (1973) e expressa a razão simples entre as bandas que captam ondas eletromagnéticas na frequência do vermelho e do infravermelho próximo, considerando uma combinação entre estas duas bandas de forma linear.

Operações matemáticas entre bandas espectrais foram realizadas em programas computacionais específicos para geoprocessamento, como ENVI e ArcGis/ArcMap, versões 4.7 e 10.1 respectivamente, executando a seguinte expressão para cálculo do NDVI:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (4)$$

Em que, NDVI é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, NIR representa os valores da reflectância para o comprimento de onda referente ao infravermelho próximo e R expressa a reflectância para os valores correspondentes ao vermelho.

Dentre os diversos índices de vegetação existentes, um dos mais utilizados é o NDVI – (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada), que segundo Carvalho et al. (2008) e Huete et al. (2002), é de grande simplicidade em sua composição e elevada sensibilidade quanto às variações na cobertura vegetal.

O resultado desta operação é um arquivo de pontos estruturados como dados matriciais em forma de uma imagem, também conhecidos como *raster*. Esta imagem herda das bandas geradoras suas características geométricas e representa a presença e/ou ausência de biomassa fotossinteticamente ativa, com

valores variando entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 maior o vigor da vegetação na área imageada, gerando um maior contraste com as áreas sob solo descoberto, representado por valores que tendem a -1.

Visando aperfeiçoar o sinal recebido da vegetação, foi proposto pelo *MODIS Land Discipline Group*, o Índice de Vegetação Otimizado ou *Enhanced Vegetation Index* (EVI) cujo propósito é reduzir influências da atmosfera e melhorar a sensibilidade em regiões de alta densidade de biomassa (ANDERSON et al., 2005). Seu cálculo também é uma operação entre bandas espectrais gerando uma imagem raster. Para tanto, em um procedimento semelhante ao do NDVI, empregou-se a seguinte expressão:

$$EVI = G \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(L + \rho_{NIR} + C_1 R - C_2 Blue)} \quad (5)$$

Em que G é o fator de ganho;  $\rho_{NIR}$  é a reflectância da banda espectral do infravermelho próximo,  $\rho_R$  é a reflectância da banda espectral do vermelho, L é o fator de ajuste para os componentes abaixo do dossel,  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes para ajuste dos efeitos aerossóis da atmosfera (poeira, fumaça, partículas de poluição do ar), e *Blue* refere-se à reflectância na banda azul, que mostra a influência dos aerossóis. De acordo com Smith et al. (2007), os coeficientes adotados pelo algoritmo do programa MODIS são:  $L = 1$ ,  $C_1 = 6$ ,  $C_2 = 7,5$  e  $G = 2,5$ .

Enquanto o NDVI responde especialmente melhor diante da presença de clorofila, o EVI é mais sensível às variações estruturais da copa, incluindo área foliar, arquitetura e tipo de copa, fisionomia das plantas (HUETE et al., 2002).

Considerando que o cerrado não é uma vegetação densa, de ampla cobertura do solo, espera-se que haja uma influência da reflectância do solo recoberto por gramíneas ou mesmo aparente, no cálculo dos já citados índices.

Assim, optou-se por incorporar nos estudos o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo, ou *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), que é uma variação do NDVI. Neste índice, foi adicionada uma constante de ajuste do solo (L), na equação do NDVI, procurando reduzir os efeitos do solo no sinal da vegetação. O SAVI foi proposto por Huete (1988), com o objetivo de aperfeiçoar a resposta da vegetação em relação às interferências do solo, especialmente em áreas de baixa cobertura vegetal (MOREIRA, 2000; ROSENDO, 2005). Para que os valores do SAVI fiquem ajustados entre os limites de -1 a 1, multiplica-se o numerador da equação do NDVI pela expressão “1+L”. Desta forma este índice é obtido através da seguinte expressão:

$$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R) * (1 + L)}{(\rho_{NIR} + \rho_R + 1)} \quad (6)$$

Em que  $\rho_{NIR}$  é a reflectância da banda espectral do infravermelho próximo,  $\rho_R$  é a reflectância da banda espectral do vermelho e L a constante de ajuste do solo.

O valor de L varia de acordo com a reflectância do solo e a densidade da vegetação. Em áreas com vegetação de baixa densidade, recomenda-se adotar  $L = 1$ , para densidade intermediária da vegetação, adota-se  $L = 0,5$  e para altas densidades de vegetação, adota-se  $L = 0,25$  (MOREIRA, 2000; ROSENDO, 2005).

Os valores do SAVI são representados em um arquivo de imagem *raster*.

Baseado nos valores obtidos para o SAVI, efetuou-se o cálculo do Índice de Área Foliar (IAF), expressando a proporcionalidade entre  $m^2$  de folha por  $m^2$  de solo, empregando-se a equação empírica proposta por Allen, Tasumi e Trezza (2002):



$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{(0,91)} \quad (7)$$

Em que IAF é o índice de área foliar,  $\ln$  é a função logarítmica natural da expressão associada, os valores numéricos 0,69 — 0,59 — 0,91 são constantes e SAVI é o Índice de vegetação ajustado ao solo. O processamento do *raster* referente ao SAVI resultará em um novo *raster* com os valores do IAF.

Efeitos da sazonalidade sobre a vegetação do cerrado podem ser acentuados em determinadas regiões, provocando alterações significativas na interpretação do NDVI. Baseando no mesmo princípio de razão entre diferenças de bandas, a substituição do infravermelho pela banda equivalente ao verde (em torno de 500 - 570 nm), traz como vantagem uma interpretação mais simples em certos estádios de desenvolvimento por este índice situar-se entre os comprimentos de onda do visível, possibilitando ao intérprete identificar variações na ocorrência de fenômenos de senescência da parte aérea da vegetação. Este índice gera uma nova imagem *raster* cujos valores dos *pixels* são obtidos pela expressão:

$$VIg = \frac{(\rho G - \rho R)}{(\rho G + \rho R)} \quad (8)$$

Em que *VIg* é o Índice de Vegetação verde,  $\rho G$  é a reflectância da banda espectral do verde,  $\rho R$  é a reflectância da banda espectral do vermelho.

Gramíneas e árvores decíduas tornam a percepção do comprimento de onda do verde maior que o do vermelho em determinadas ocasiões, podendo favorecer os estudos sobre o cerrado cuja formação vegetal típica é composta por esta estrutura.

Todo processamento das imagens teve como resultado outra imagem relativa aos diferentes índices. Para compor as tabelas de análise que propiciarão o ajuste das equações, interações entre as imagens índices e os polígonos formados pelos limites dos fragmentos e pelos limites das parcelas deverão ser feitas. Para tanto, adotou-se procedimentos e etapas de processos que geram tais tabelas de valores.

O conjunto de imagens de cada índice foi sobreposto pelos polígonos dos fragmentos e suas parcelas, aferindo seu posicionamento e observando se no entorno de cada polígono há solo descoberto ou vegetação, bem como o tipo de vegetação existente. Esse procedimento visa identificar vizinhança que possa interferir na reflectância da vegetação alvo interna aos fragmentos.

Para minimizar o efeito da borda, foram gerados polígonos internos, distanciados dos limites dos fragmentos e que contenham completamente as parcelas (Figura 8). A semelhança entre as características aparentes de brilho, textura, densidade, rugosidade, também foram analisados, para que os valores de *pixel* extraídos das imagens índice representassem com fidelidade, as características biométricas dos dados alfanuméricos coletados pelo inventário florestal.

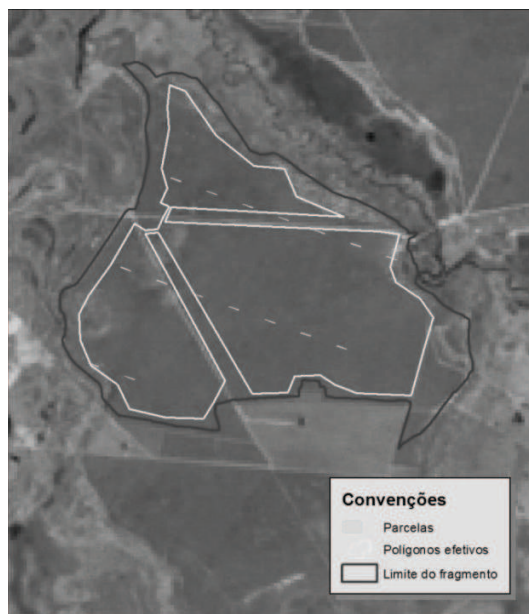


Figura 8 Exemplo de limite de fragmento e polígonos de área efetiva avaliada

Devido às pequenas dimensões das parcelas (10 x 100 m) em relação ao tamanho do *pixel* das imagens LandSat (30 x 30 m), foi processada uma rotina que cria uma área externa à parcela (*Buffer*), aumentando sua área de extração de dados, tornando-a mais compatível com o tamanho dos *pixels*, tanto do que contém a parcela quanto de seus vizinhos imediatos.

Em todas as parcelas analisadas procedeu-se a geração de um *buffer* de 30 metros ao redor de cada parcela. Este novo polígono formado será utilizado para amostragem de dados das imagens índices. A conformação da nova unidade amostral pode ser observada na figura 9.

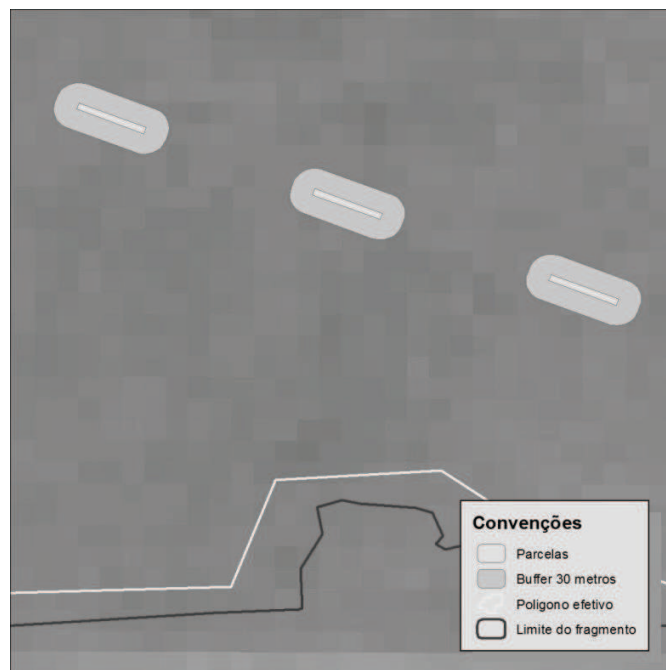


Figura 9 Exemplo de parcela e *buffer* para amostragem dos *pixels*

Os valores dos *pixels* serão extraídos por uma função que faça a leitura de todos os *pixels* contidos na porção do *raster* delimitada pelo polígono e os processe para determinar um valor médio. O ponto central de cada *pixel* é comparado ao limite do polígono para determinar se tal *pixel* será ou não processado. Este procedimento é aplicado em cada uma das imagens índices e o valor médio resultante para cada parcela comporá a tabela de análise.

Na estrutura de análise, cada parcela é representada por um ponto central, coincidente com seu centro geométrico (centroide), sua posição geográfica quanto à latitude, longitude e altitude é determinada e requerida para os testes de correlação com as variáveis biométricas.

### **3.4 Estudo da correlação linear entre características biométricas e índices espectrais da vegetação**

A partir dos índices espectrais gerados por parcela no item 3.3, foi possível avaliar a correlação linear de Pearson entre os mesmos com as variáveis biométricas: diâmetro médio, altura média, área basal e volume total. Os valores das variáveis biométricas foram obtidos a partir das informações do processamento do inventário de Minas Gerais (SCOLFORO; OLIVEIRA; CARVALHO, 2008). O estudo da correlação foi efetuado considerando todas as parcelas da fisionomia cerrado *sensu strictu*. Posteriormente, efetuou-se o mesmo estudo de correlação considerando os diferentes graus de antropização, conforme descrito por Scolforo, Oliveira e Carvalho (2008).

### **3.5 Avaliação do comportamento espacial da variável volume**

O volume de madeira pode ser considerado como resultante de uma interação de fatores bióticos e abióticos que, interagindo durante o desenvolvimento do indivíduo, fornecerá um maior ou menor volume. Estas interações têm uma distribuição variável ao longo do espaço territorial em que ocorre, havendo necessidade de avaliações de seu comportamento quando se deseja obter uma expectativa deste volume em determinado local.

#### **3.5.1 Análise exploratória dos dados**

A análise exploratória dos dados é primordial, embora não considere a estrutura de continuidade espacial, pois possibilita a identificação de dados discrepantes, por meio da avaliação de gráficos *box plot*. Estes podem exercer influência no semivariograma experimental, principalmente na sua porção inicial

(CRESSIE, 1993; RIBEIRO JÚNIOR, 1995). Essa análise permite também a comparação com os resultados observados em outros estudos.

### **3.5.2 Estudo variográfico e modelagem do semivariograma**

Inicialmente foi gerado para a variável volume em estudo, o semivariograma experimental. A partir deste, foram ajustados os modelos esférico, exponencial e gaussiano, descritos por Journel e Huijbregts (1978), para obtenção do conjunto de parâmetros a serem utilizados na estimação da krigagem ordinária e krigagem com regressão. Os ajustes foram feitos pelos Métodos dos Mínimos Quadrados Ponderados e da Máxima Verossimilhança, utilizando o programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012), por meio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGLLE, 2001).

### **3.5.3 Validação do modelo**

Para garantir que a escolha do melhor modelo seja realmente adequada, foram utilizados dois métodos de validação. Segundo Mello et al. (2005), quando a diferença na estatística da validação feita por um método for pequena, o ideal é que se faça o uso conjugado de métodos para a seleção de modelos espaciais.

O Critério de Informação de Akaike (AIC) foi obtido por meio da função de Máxima Verossimilhança, a partir dos parâmetros ajustados para os modelos. O AIC para o método dos quadrados mínimos foi obtido a partir dos respectivos parâmetros, utilizando a função `loglik.GRF` do `geoR`. Essa função retorna o valor do logaritmo da Máxima Verossimilhança. O AIC é dado pela seguinte expressão:

$$AIC = -2\log L + 2K \quad (9)$$

Em que  $L$  é a verossimilhança maximizada do modelo candidato e  $K$  representa o número de parâmetros do modelo.

O menor valor de AIC é o modelo com melhor desempenho (MCBRATNEY; WEBSTER, 1986; WEBSTER; MCBRATNEY, 1989). Outra análise que será realizada para auxiliar na escolha do melhor modelo será o erro médio reduzido ( $EMR$ ), que segundo Cressie (1993) e McBratney e Webster (1986) é definidor por:

$$EMR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z(x_{i0}) - \hat{Z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \quad (10)$$

Em que  $Z(x_{i0})$  é o valor observado no ponto  $i0$ ;  $\hat{Z}(x_{i0})$  é o valor estimado para o ponto  $i0$  e  $\sigma(x_{i0})$  é o desvio padrão da krigagem no ponto  $i0$ . Quanto mais próximo de zero for o erro médio reduzido melhor é o desempenho do modelo.

#### 3.5.4 Krigagem ordinária

Com o processamento dos dados existentes, foi gerado um mapa de produtividade para volume ( $m^3/ha$ ) na região de ocorrência do cerrado *sensu strictu*.

Nesta abordagem, a identificação dos pesos é obtida com os parâmetros do semivariograma ajustado.

O estimador da krigagem ordinária é dado por:

$$\hat{Z}_{x_0} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{x_i} \quad (11)$$

Em que  $\hat{Z}_{x_0}$  é a estimativa do valor na posição  $x_0$  (média ponderada dos dados);  $n$  o número de pontos amostrais vizinhos utilizados para a predição do valor não amostrado  $\hat{Z}_{x_0}$  (vizinhança da krigagem);  $\lambda_i$  é o  $i$ -ésimo peso atribuído a cada  $i$ -ésima observação da variável de interesse na posição  $x$ ,  $Z_{x_i}$ , definido pelo semivariograma.

O mapa de volume foi gerado utilizando-se o programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012), por meio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGLLE, 2001).

### 3.5.5 Krigagem com regressão

A krigagem com regressão resulta da combinação entre dois interpoladores espaciais, sendo um do tipo global e outro estocástico. O primeiro diz respeito à aplicação de um modelo de regressão linear múltipla (ou modelo geográfico), o qual capta de forma global o comportamento da variável principal, ou seja, aquela que se deseja mapear. Este interpolador produzirá um mapa global, sendo possível identificar o comportamento espacial geral da variável, contudo, sem um detalhamento de locais mais específicos (MELLO et al., 2013). Para que o mapa final apresente melhor detalhamento de áreas específicas, é necessário que haja uma correção do primeiro mapa, desenvolvido exclusivamente a partir do modelo geográfico. Assim, aplica-se a krigagem ordinária aos resíduos gerados pelo modelo de regressão com o objetivo principal de corrigir tendências e detalhar o comportamento espacial da variável principal, introduzindo o aspecto estocástico ao mapeamento (MELLO et al., 2013; MEUSBURGER et al., 2012).



Para ajuste dos modelos geográficos foram utilizados os dados de latitude, longitude, altitude a partir do modelo digital de elevação (DEM) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

O modelo inicialmente testado foi o seguinte:

$$\begin{aligned}
 V = & b_0 + b_1 \times A + b_2 \times LA + b_3 \times LO + b_4 \times NDVI + b_5 \times A^2 + b_6 \times LA^2 \\
 & + b_7 \times LO^2 + b_8 \times NDVI^2 + b_9 \times A \times LA + b_{10} \times A \times LO + b_{11} \times A \times NDVI \\
 & + b_{12} \times LA \times LO + b_{13} \times LA \times NDVI + b_{14} \times LO \times NDVI
 \end{aligned} \quad (12)$$

Em que  $V$  é o estoque volumétrico ( $m^3/ha$ );  $LA$ ,  $LO$  e  $A$  são a latitude, a longitude e a altitude, respectivamente, em metros (projeção Albers);  $NDVI$  é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada; e  $b_i$  são os parâmetros a serem estimados.

O volume foi aplicado ao ajuste do modelo devido ao seu caráter direto quanto ao comportamento do crescimento de florestas, tendo-se como referência o comportamento edafoclimático geral da área. Essa variável sofre direta influência da latitude, longitude e altitude, pois essas variáveis geográficas são correlacionadas quanto às variações de temperatura, precipitação e radiação solar, conforme mencionado por Mello e Silva (2009).

Para ajuste do modelo foi utilizada a técnica Stepwise através do *software* R 3.0.0, aplicando o comando “Step” e definindo a direção a ser seguida, “Back”, “For” ou “Both”. Este procedimento admite a avaliação estatística, individualmente, de todos os indicadores, que podem ter influência sobre a variável dependente, por meio do teste “t” de *Student* parcial. Assim, é possível avaliar a contribuição de cada variável independente do modelo, que tem o coeficiente de determinação parcial ( $R^2$  parcial) como uma ferramenta de análise estatística. O procedimento “Step” seleciona apenas as variáveis

significativas dadas por "t" de *Student*, rejeitando aquelas variáveis não significativas ou redundantes de acordo com uma tolerância específica (5% para este estudo) (FERREIRA, 2009). Portanto, do modelo inicialmente testado, apenas algumas variáveis serão selecionadas, enquanto outras descartadas devido ao fato de não serem significativas ou apresentam multicolinearidade.

Para testar a eficiência do modelo ajustado, foi aplicada e caracterizada a estatística de precisão Erro Médio Absoluto (EMA) nas 140 parcelas (20% da base de dados) separadas para validação.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \right)}{n} \times 100 \quad (13)$$

Em que  $O_i$  e  $P_i$  são os valores da variável estoque volumétrico observados e preditos, respectivamente; e  $n$  corresponde ao número de parcelas.

Gráfico de dispersão dos valores preditos ao redor da reta 1:1 também foi gerado com o objetivo de analisar o comportamento das predições realizadas pelo modelo na base de validação.

Verificada a eficiência do modelo ajustado, procedeu-se a determinação do comportamento dos resíduos, para que se procedesse à análise quanto ao comportamento da continuidade espacial dos mesmos, ou seja, estudando-se sua autocorrelação espacial, ajustando-se modelos teóricos de semivariograma ao semivariograma experimental por meio do programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012), com o uso do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGLLE, 2001). Sendo assim, o mapa de krigagem ordinária dos resíduos gerado pelo modelo geográfico foi desenvolvido.

Para aplicação da krigagem com regressão, células georreferenciadas contínuas com dimensões de 100 m x 100 m foram criadas em toda a extensão

da vegetação de cerrado *sensu strictu* existente no estado de Minas Gerais com o programa ArcMap (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI, 2011). De cada uma destas células foram extraídas a latitude, longitude, altitude e o NDVI. O modelo fitogeográfico foi aplicado às mesmas gerando-se um mapa global de estimativa do estoque volumétrico. Na sequência, com base no mapa de krigagem do resíduo gerado para a área, os valores destes foram extraídos para cada célula, possibilitando corrigir os valores gerados pelo modelo geográfico.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Correlação entre as variáveis biométricas estudadas e os índices espectrais da vegetação

A Tabela 2 contém os valores de correlação estatística entre as variáveis biométricas e os índices espectrais extraídas das imagens Landsat TM.

Tabela 2 Correlação de Pearson entre variáveis biométricas, área basal (G), diâmetro médio (DM), altura média (HM) e volume total (VT) e índices espectrais

Índices espectrais	Características biométricas			
	G	DM	HM	VT
NDVI	0,15	-0,19	0,33	0,24
SAVI	0,21	-0,18	0,42	0,32
EVI	0,24	-0,08	0,46	0,37
IAF	0,19	-0,19	0,38	0,29
VIG	0,21	-0,22	0,39	0,3

Observa-se que das quatro características biométricas avaliadas, a altura média foi a que apresentou os maiores valores de correlação com os índices espectrais avaliados, seguida pelo volume total de madeira. Tanto a área basal quanto o diâmetro médio apresentaram baixos valores de correlação com os índices espectrais avaliados.

Considerando os índices espectrais, o EVI se destaca apresentando os maiores valores de correlação para as variáveis: área basal, volume total por parcela e altura média. A exceção foi o diâmetro médio, em que o EVI apresentou o mais baixo valor de correlação. Por outro lado, o NDVI foi o índice de menor correlação com as variáveis biométricas área basal, volume total por

parcela e altura média, uma vez que o NDVI é, sem dúvida, o índice mais utilizado na estimativa de variáveis biométricas em florestas de todo o mundo.

Preocupação similar já havia sido levantada por Foody, Boy e Cutler (2003), estudando a correlação entre os valores de dezenas de índices espectrais e valores de biomassa em três florestas tropicais ao redor do mundo (Brasil, Malásia e Tailândia). Para os três países estudados, os valores da correlação entre NDVI e biomassa variaram, porém, nunca estiveram entre os dez índices com maiores valores de correlação testados.

Os índices espectrais são sensíveis a fatores internos, como a geometria do dossel, características do terreno e composição de espécies, e a fatores externos, como o ângulo de elevação do sol, ângulo de visada zenital e condições atmosféricas, que afetam diretamente a reflectância da vegetação (LU et al., 2004). Segundo os mesmos autores, a estrutura da vegetação é responsável pela quantidade de solo e sombra presente nas imagens, afetando fortemente a relação entre as características biométricas e as respostas espectrais. Desta forma, árvores emergentes com grandes valores de DAP e altura podem apresentar forte influência sobre a reflectância do dossel devido à sombra causada pelas suas copas.

Este é um ponto relevante que deve ser considerado na análise dos baixos valores de correlação entre os índices espectrais e as variáveis biométricas obtidos neste trabalho. Nas áreas de cerrado, é comum a ocorrência de árvores emergentes e clareiras, características desta fisionomia, e que podem estar exercendo influência sobre os valores de reflectância de cada *pixel* da imagem, uma vez que o valor do *pixel* é composto pelos valores de reflectância das frações de vegetação, solo e sombra presentes numa área equivalente a uma matriz de 3 x 3 *pixels*, representando 900 m<sup>2</sup>.

Outro fator de grande relevância que pode ter contribuído para os baixos valores de correlação obtidos neste trabalho é a sazonalidade das espécies do

cerrado. Como algumas cenas foram obtidas na época seca do ano, provavelmente muitas espécies apresentavam um elevado grau de deciduidade de suas folhas, comprometendo sobremaneira a correlação entre os valores dos índices espectrais e das variáveis biométricas estudadas.

A área basal e o diâmetro médio foram as que apresentaram as menores correlações com todos os índices avaliados. O diâmetro médio dos indivíduos arbóreos do cerrado apresentou correlação negativa com todos os índices avaliados. Isto quer dizer que ao se aumentar os valores dos índices (cobertura), há uma redução do diâmetro médio. Do ponto de vista de crescimento, as plantas tendem a ter um maior crescimento em copa, a fim de ser mais eficiente na sua capacidade fotossintética. Assim, estabelecida as copas, estas começam a se desenvolver em diâmetro e em altura. Como os índices refletem cobertura (dossel da floresta), quando os diâmetros estão menores, maiores serão as copas e as coberturas. Este é um aspecto fisiológico de crescimento das plantas que auxiliam na explicação da correlação negativa dos índices com o diâmetro médio mensurado a 1,30 metros do solo.

A altura é a característica de maior correlação ( $> 0,33$ ). As plantas crescem mais em altura inicialmente, com um desenvolvimento de copa menos acentuado. A morfometria de copa vai aumentando com o desenvolvimento das plantas em proporções diferenciadas. Considerando que a floresta entra num processo de equilíbrio no seu crescimento, as copas tendem a se estabilizar em termos de crescimento, contudo o crescimento em altura ocorre em proporções maiores a fim de buscar luz para a fotossíntese. Desta forma, pode-se explicar a correlação positiva entre a altura e os índices espectrais, numa magnitude de 0,33 a 0,46.

A variável volume total foi calculada a partir da área basal (G), da altura total (HM) e de um fator de forma para cerrado, conforme Rufini et al. (2010). Os valores de correlação da altura média e do volume permitiram buscar um

modelo matemático para estimar ambas as variáveis através de índices espectrais e coordenadas UTM. Tanto os índices quanto as coordenadas são variáveis fáceis de serem obtidas a partir da imagem Landsat TM para uma área alvo que se deseja conhecer o volume médio esperado. Este valor de volume médio esperado permite ao administrador florestal tomar decisões importantes quanto ao uso ou não de uma determinada área de cerrado para ser manejada ou explorada para os devidos fins na unidade fabril. O ajuste do modelo matemático se dá através de técnicas de krigagem por regressão (MELLO et al., 2013) para se obter o mapa de volume de madeira em áreas de cerrado no estado de Minas Gerais.

Diversos trabalhos buscaram relacionar índices espectrais advindos de imagens Landsat TM (EKLUNDH; HARRIE; KUUSK, 2001; FRANCO-LOPEZ; EK; BAUER, 2001; TROTTER; DYMOND; GOULDING, 1997; TURNER et al., 1999). Estes autores relacionaram índices espectrais com características biométricas tais como: área basal, altura das árvores, densidade (número de plantas) e índice de área foliar. Muitos destes trabalhos verificaram que houve muita variação da correlação entre os índices espectrais e as características biométricas. Esta variação está fortemente ligada às características da área de estudo, conforme menciona Lu et al. (2004). O cerrado é uma fisionomia de alta variabilidade nas características biométricas. Pelo presente estudo, também foi possível verificar que os índices espectrais variaram bastante entre parcelas. Esta variação teve impacto forte sobre a correlação avaliada. Segundo Lu et al. (2004), é difícil encontrar um comprimento de onda ou combinação das mesmas para obter informações quantitativas das características biométricas. Isto se agrava com a variabilidade da fisionomia avaliada.

O cerrado é uma fisionomia que, principalmente, no estado de Minas Gerais, sofreu e vem sofrendo forte ação antrópica. Além das ações antrópicas,

como se trata de um estado com grandes dimensões, a fisionomia cerrado cresce em locais com características climáticas e de solo diferenciadas. Estas duas fontes de variação dificultam ainda mais detectar um comprimento de onda que seja capaz de inferir sobre as características biométricas. Diante da situação de ações antrópicas, conforme descrito por Scolforo, Oliveira e Carvalho (2008), o presente estudo se propôs a verificar o quanto estas ações afetam as correlações entre os índices e as características biométricas. A fisionomia cerrado foi dividida em seis classes, conforme o grau de antropização verificada por Scolforo, Oliveira e Carvalho (2008). Com base nestas seis classes, procurou-se, no presente estudo, avaliar a correlação das características biométricas com os índices espectrais em cada classe, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 Correlação de Pearson entre variáveis biométricas, área basal (G), diâmetro médio (DM), altura média (HM) e volume total (VT) e índices espectrais, para as seis classes de antropização

Classes de cerrado	Características biométricas	Índices espectrais				
		NDVI	SAVI	EVI	IAF	VIG
Cerrado denso	DM	-0,27	-0,27	-0,24	-0,24	-0,28
	HM	-0,09	-0,09	-0,13	-0,08	-0,07
	G	0,61	0,61	0,66	0,62	0,58
	VT	0,46	0,46	0,48	0,46	0,45
Cerrado denso regeneração avançada	DM	-0,07	0,34	0,28	0,05	0,34
	HM	0,07	0,51	0,67	0,24	0,34
	G	0,03	0,37	0,37	0,16	0,2
	VT	0,06	0,49	0,58	0,22	0,29



“Tabela 3, conclusão”

Classes de cerrado	Características biométricas	Índices espectrais				
		NDVI	SAVI	EVI	IAF	VIG
Cerrado fortemente antropizado	DM	-0,15	-0,15	-0,13	-0,15	-0,21
	HM	0,4	0,41	0,62	0,41	0,3
	G	-0,05	-0,06	0,07	-0,05	-0,1
	VT	0,12	0,12	0,29	0,12	0,04
Cerrado moderadamente antropizado	DM	0,24	0,24	0,28	0,24	0,19
	HM	0,34	0,34	0,42	0,36	0,29
	G	-0,12	-0,12	-0,14	-0,12	-0,06
	VT	0,09	0,09	0,13	0,09	0,11
Cerrado regeneração média	DM	0,66	0,66	0,55	0,66	0,69
	HM	0,25	0,25	0,41	0,26	0,22
	G	0,2	0,2	0,34	0,2	0,16
	VT	0,22	0,22	0,4	0,22	0,19
Cerrado regeneração avançada	DM	-0,12	-0,12	-0,05	-0,1	-0,12
	HM	0,57	0,57	0,5	0,52	0,59
	G	0,29	0,29	0,31	0,29	0,32
	VT	0,39	0,39	0,38	0,37	0,43

Observando os valores de correlação entre os índices espectrais e as variáveis biométricas para cerrado com diferentes graus de antropização, a maior correlação foi de 0,69 e a menor de 0,03. Sem considerar o grau de antropização, a maior correlação foi de 0,46 (Tabela 3). Isto é um indicativo de que o grau de perturbação num bioma como o cerrado afeta a correlação entre os índices e as características biométricas.

De forma geral, a característica diâmetro médio foi a variável que apresentou a menor correlação com todos os índices avaliados, exceto para o cerrado com regeneração média, que chegou a 0,69 de correlação com o índice VIG. A correlação entre o NDVI e as características avaliadas foram baixas para

as áreas onde houve algum grau de antropização. Na condição de cerrado denso, ou seja, sem grau de antropização significativo, houve correlação entre área basal e volume total. Quando o cerrado está pouco antropizado, no estudo trata-se do cerrado denso, as variáveis cujas respostas são por unidade de área, têm mais correlação com os índices. Estas correlações se destacaram mais com SAVI e EVI. À medida que vai ocorrendo mais antropização, a correlação é mais expressiva com característica individual das árvores, principalmente a altura média. Esta variável apresentou boa correlação com os índices SAVI e EVI.

## **4.2 Estudo variográfico da variável volume**

Uma vez que a estrutura de ocupação espacial de uma determinada população tenha sido estabelecida, se torna um passo essencial no estudo geostatístico, a definição de um modelo variográfico que represente a variabilidade do fenômeno em que estamos interessados, o volume no caso do presente estudo. No entanto, nem todos os modelos são possíveis de ajuste adequado, portanto deve-se escolher entre os modelos básicos, aquele que ofereça o melhor retorno de predição e seja aplicável em todo o espaço requerido pela população em desenvolvimento.

### **4.2.1 Análise exploratória de dados**

A análise exploratória de dados consistiu numa avaliação geral dos dados a fim de observar o comportamento dos mesmos. Ela é útil para verificar as estatísticas descritivas, a distribuição dos dados, detectar dados discrepantes e compreender como os mesmos se distribuem em relação à longitude e latitude.

O resumo estatístico da análise exploratória de dados dos valores de volume em  $m^3$  por parcela de  $1.000 m^2$  se encontra na Tabela 4. Pôde-se

observar que a média e a mediana apresentaram valores bem diferenciados, indicando uma assimetria na distribuição dos dados. Pelo teste de Shapiro-Wilks (FERREIRA, 2009), a distribuição dos dados não apresentou uma distribuição aproximadamente normal. Esta situação também pôde ser verificada no histograma de frequência (Figura 10-b).

Com base no critério de Warrick e Nielsen (1980), o coeficiente de variação (61,7%) foi alto. Esta é uma situação comum para áreas de cerrado, onde o número de plantas e as dimensões das mesmas sofrem forte impacto da antropização. No presente estudo, o valor mínimo da variável volume ( $\text{m}^3/\text{parcela}$ ) foi de 2,93 e o valor máximo de 143,00. Esta amplitude também mostra o grau de variabilidade da variável volume em áreas de cerrado. Do ponto de vista prático, esta é uma situação ruim para a realização de amostragem para fins de estimativas volumétricas em áreas específicas. Este aspecto também tem influência sobre a hipótese de estacionaridade da média na área. Este fato pode afetar de alguma forma o desempenho do semivariograma. No entanto, não é fator limitante, uma vez que não se conhece o grau da magnitude desta interferência no estudo variográfico.

Tabela 4 Estatísticas descritivas para volume ( $\text{m}^3/\text{parcela}$ ) para o cerrado *sensu strictu* em Minas Gerais

<b>Estatística</b>	<b>Valores</b>
Valor mínimo	2,928
Valor máximo	143,000
Média	33,131
Mediana	28,178
Variância	417,23
CV(%)	61,700

O gráfico *boxplot* possibilita detectar dados discrepantes, os quais podem ser ou não considerados *outliers*. A decisão de considerar os dados

*outliers*, deve ser apoiada numa análise dos dados (base original) e se necessário, considerar uma visita nos locais onde os mesmos foram coletados a fim de perceber se há motivos para tais discrepâncias. Após a avaliação do *boxplot* associada a uma inspeção na base de dados conjuntamente com uma visita aos locais de coleta, se imprescindível for, pode-se então tomar a decisão quanto à remoção ou não destes dados da base.

Valores discrepantes são valores que possuem um padrão diferenciado em relação à maioria dos dados (HOAGLIN, 1992). Tais valores, dentro de um contexto de avaliação da continuidade espacial, podem provocar impacto na parte inicial do semivariograma (DIGGLE; RIBEIRO JÚNIOR, 2000), comprometendo a estimativa do efeito pepita. Assim, pode-se até mesmo concluir que a base de dados tem continuidade espacial, mas removendo os valores discrepantes, esta continuidade não mais se manifesta. Sendo assim, foi possível detectar, conforme Figura 10(a), que houve alguns dados discrepantes. Foi feita então uma avaliação nesta base e se verificou que os mesmos devem permanecer, dado que a discrepância apresentada é em função do número de plantas diferenciado em cada parcela avaliada, que é uma característica comum neste tipo de vegetação.

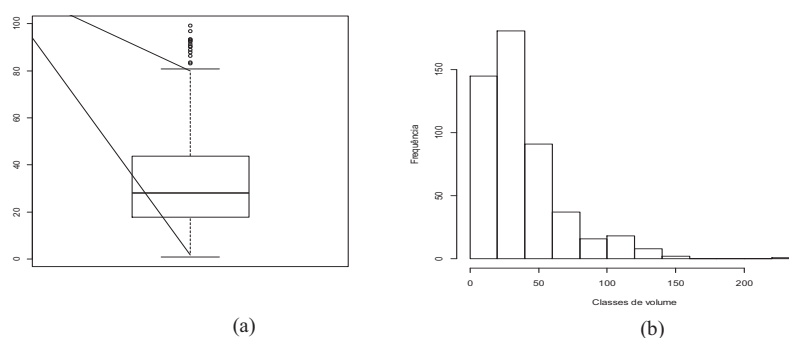


Figura 10 Gráficos exploratórios da variável biométrica volume: *boxplot* (a) e histograma de frequência (b)

Pela avaliação do histograma de frequência da variável volume total do cerrado *sensu strictu*, foi possível verificar que os dados observados não possuem distribuição normal (Figura 10b). Estes apresentaram assimetria à esquerda. Essa situação não se trata de fator impeditivo para uso de técnicas geoestatística para análise dos dados. Na ausência de normalidade, não é possível realizar inferências estatísticas com propriedades ótimas, como é o caso do uso da Máxima Verossimilhança para ajuste de modelos espaciais.

As Figuras 11 (a) e (b) revelam um aspecto importante com relação ao uso de métodos geoestatísticos. Trata-se do comportamento dos dados em função da latitude e da longitude. Pela Figura 11, foi possível verificar que não há tendência da variável volume em relação aos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste. Este comportamento é desejado no processo de modelagem espacial, uma vez que se pode assumir a hipótese intrínseca adjacente ao processo. Isto implica em algum grau de estacionariedade da variável ao longo de toda a área.

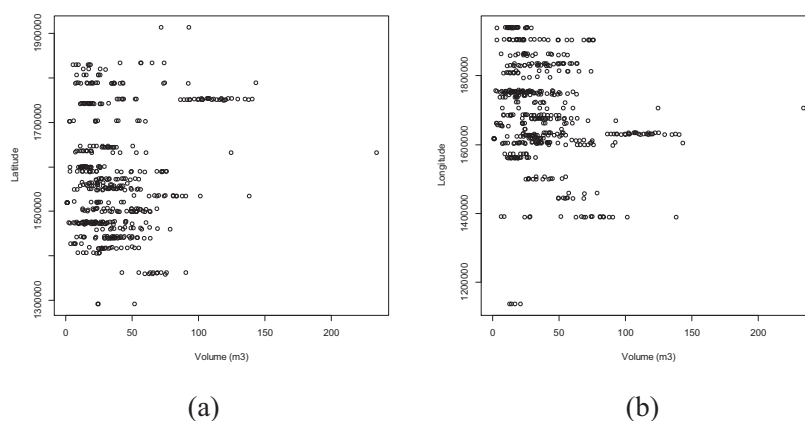


Figura 11 Relação entre o volume total e as direções latitude (a) e longitude (b)

#### 4.2.2 Avaliação da continuidade espacial

A primeira etapa do estudo variográfico se refere à construção do semivariograma empírico. Nele, são apresentados os pontos referentes à semivariância para cada distância. Posteriormente, ajusta-se um modelo espacial ao semivariograma empírico. No presente estudo, foi selecionada por meio da validação cruzada e o critério de Akaike, o modelo exponencial. Este modelo foi ajustado pelo método dos Quadrados Mínimos Ordinários (“OLS”).

A análise variográfica mostrou que a variável volume total se apresentou estruturada espacialmente. Os parâmetros estimados foram: efeito pepita (50,11); contribuição (398,83) e alcance teórico (6,5 km). Como o modelo selecionado foi o exponencial, durante o processo de inferência para pontos não amostrados utiliza-se o alcance prático (19,6 km).

Na Figura 12, encontra-se o semivariograma empírico (pontos discretos) e modelo exponencial (linha cheia) ajustada aos pontos. O efeito pepita verificado no semivariograma empírico foi de (50,110). Quanto mais próximo de zero este parâmetro, melhores serão as predições espaciais efetuadas pelo mesmo no processo de krigagem. As variações não explicadas pelo modelo espacial denominam-se de efeito pepita ou “nugget” e está associado ao efeito de pequena escala. A contribuição, também chamada de “Sill partial”, significa o quanto da variação total é explicada pela componente espacial. No presente estudo, este valor foi de (398,83), sendo a parte que a estatística clássica considera como erro aleatório. Com estes dois parâmetros do modelo espacial é possível calcular o grau de dependência espacial da variável volume (GDE%). Segundo Cambardella et al. (1994), se o GDE for maior do que 75%, há forte correlação espacial entre os pontos amostrados. Neste estudo, o GDE foi de 88,8%, ou seja, a dependência espacial da variável volume pode ser considerada

“forte”. Isto implica que as inferências estatísticas em pontos não amostrais no processo de krigagem serão de ótima qualidade.

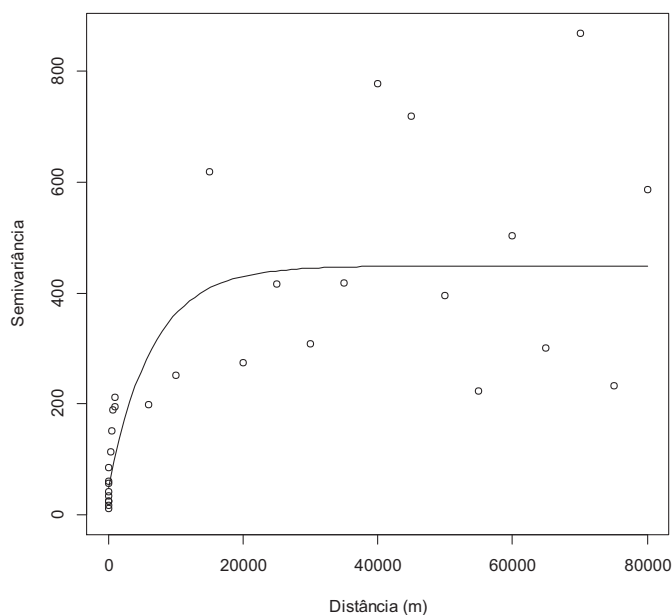


Figura 12 Semivariograma exponencial ajustado para a variável volume total ( $\text{m}^3/\text{parcela}$ )

A distância máxima em que os dados apresentam-se correlacionados espacialmente é denominada de alcance ou “range”. No presente estudo, o alcance foi de aproximadamente 19.570 metros. Pontos separados no máximo pelo valor do alcance apresentam elevada semelhança quanto ao volume médio por hectare. Este é o alcance prático, o qual deve ser utilizado dentro do processo de inferência (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978; MACBRATNEY; WEBSTER, 1986). Em levantamentos florestais em áreas de cerrado, numa grande escala, para considerar os dados dependentes, é necessário que a grade

amostral presente distância máxima entre parcelas de 19,6 km, como é o caso do presente estudo.

#### **4.2.3 Inferência espacial - Krigagem Ordinária**

Para estimativas de valores em locais não amostrados, foi gerado o mapa de krigagem ordinária para o volume de madeira para o cerrado *sensu strictu* no estado de Minas Gerais a partir dos parâmetros do modelo exponencial, ajustado pelo método dos Quadrados Mínimos Ordinários. O mapa de krigagem permite avaliar como os valores de volume de madeira do cerrado se distribuem espacialmente no estado de Minas Gerais. Este mapa pode ser interpretado como um “zoneamento” da volumetria do cerrado numa escala maior de observação (Figura 13). A sua grande utilização é para dar suporte às tomadas de decisão gerencial numa empresa que pretende adquirir áreas em regiões de cerrado no estado de Minas Gerais ou assessorar os órgãos ambientais com relação à liberação de determinados licenciamentos ambientais.



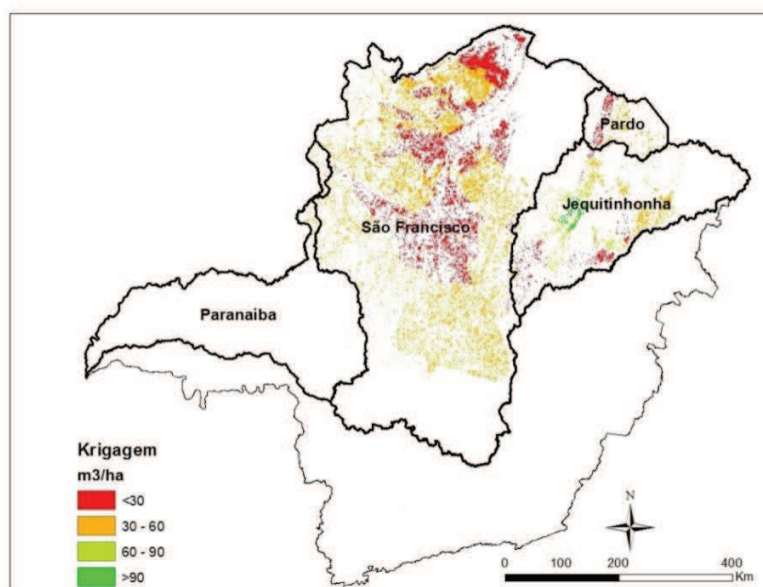


Figura 13 Distribuição espacial do volume (m<sup>3</sup>/ha) dentro do estado de Minas Gerais para a fitofisionomia cerrado *sensu strictu*

A Figura 14 se refere ao mapa do balanço hídrico, o qual considerou o índice de umidade e índice de aridez para o estado de Minas Gerais. Este mapa servirá de suporte para a discussão da distribuição espacial do volume de madeira do cerrado em MG.

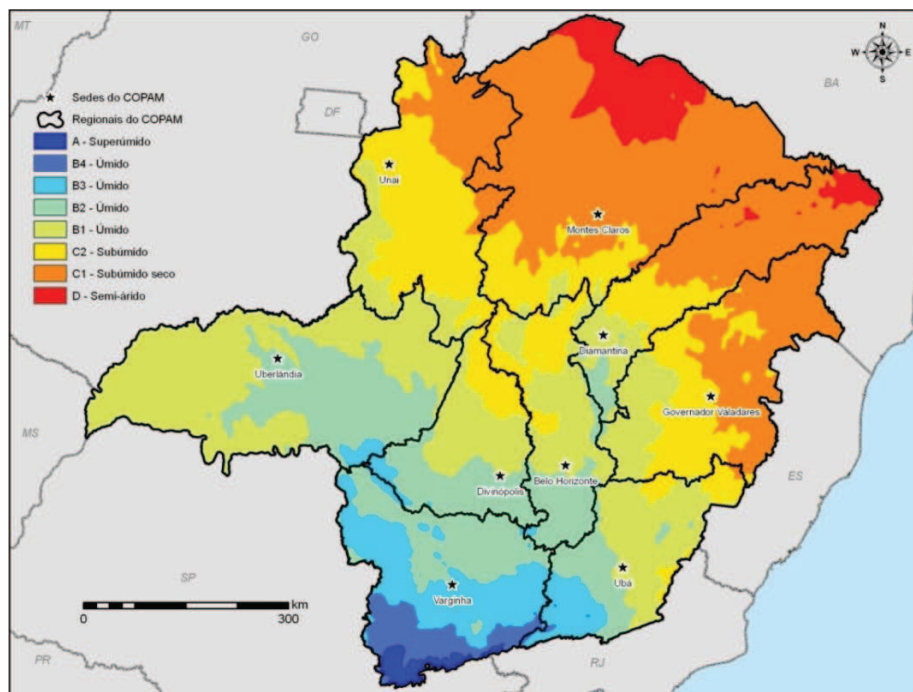


Figura 14 Mapa de classificação climática de Thortwaite para o estado de Minas Gerais, desenvolvido para o Zoneamento Ecológico Econômico  
 Fonte: (SCOLFORO; OLIVEIRA; CARVALHO, 2008).

A Figura 13 mostra a espacialização dos valores de volume de madeira do cerrado de Minas Gerais. Por esta figura é possível verificar um gradiente decrescente de volume do centro do estado para a região Norte. Este decréscimo de volumetria possui uma relação direta com o mapa da Figura 14, o qual consiste de um balanço hídrico médio para o estado. Na região Norte, o clima predominante é o subúmido seco (C1) e semiárido (D). Isto implica numa menor disponibilidade de água no solo, o que contribui para um crescimento reduzido das características biométricas e, conseqüentemente, menor volumetria.

Na região central do estado, estão concentrados os fragmentos com maior volumetria de madeira no cerrado de Minas Gerais. Nesta região, o clima varia de subúmido (C2) a úmido (B1). Ou seja, há uma maior disponibilidade de

água, o que proporciona condições favoráveis ao melhor crescimento das plantas. Esta mesma tendência se estende para o Oeste do estado.

A região que se estende ao longo da serra do Espinhaço e do rio Jequitinhonha no Nordeste do estado, também apresentou uma alta volumetria. É uma região que recebe uma influência típica da serra, que faz com que o clima fique menos árido, devido ao efeito orográfico. Pode-se dizer que se trata de uma pequena área, proporcionalmente falando, uma vez que no mapa climatológico, ela está classificada como úmido B2 a úmido B1. Nesta região, foi possível observar *in locu*, que a eucaliptocultura se desenvolve muito bem, em função deste microclima, que gera uma condição propícia ao crescimento das plantas. Os benefícios destes aspectos são também para a vegetação nativa da região. Assim, em alguns pontos, onde ainda existe o cerrado, o crescimento em volumetria destaca de forma pronunciada.

Da região central para o Norte do estado, há uma região que predomina uma volumetria inferior a 30 m<sup>3</sup>/ha de madeira (vermelho). Estas áreas sofreram muita ação antrópica (desmatamento). Logo, são áreas, na sua grande maioria, em que o cerrado encontra-se num estágio sucessional denominado de regeneração avançada. Isto implica num dossel relativamente bem formado, mas com plantas finas e baixas, propiciando uma menor volumetria.

No sentido Noroeste do estado, onde há uma grande área em que o clima é classificado como subúmido (C2), a volumetria média concentra entre os 28 e 38 m<sup>3</sup>/ha. Nesta região, existem manchas em amarelo, indicando uma volumetria de 38 a 50 m<sup>3</sup>/ha. São áreas que não sofreram nenhum nível de antropização. Boa parte delas pertence a parques ou unidades de conservação, que estão sempre protegidas. No extremo Norte do estado, a volumetria decresce de forma considerada em função do clima semiárido que predomina naquela região.

Após a realização da krigagem ordinária para a volumetria de cerrado *sensu strictu* para Minas Gerais, efetuou-se a soma dos valores dos volumes

estimados em cada ponto (fragmento) não amostrado. O volume médio por hectare estimado foi de 35,599 m<sup>3</sup>/ha. No Inventário Florestal de Minas Gerais, foram avaliados 44 fragmentos de cerrado *sensu strictu*. Após a coleta destes dados, efetuou-se o processamento das informações de volume utilizando os estimadores da amostragem em dois estágios. Este processamento proporcionou um intervalo de confiança do volume por hectare para esta fisionomia de 35,1714 a 44,5402 m<sup>3</sup> (SCOLFORO; MELLO; OLIVEIRA, 2008). Desta forma, o volume total estimado pela krigagem está dentro do intervalo de amostragem. Este fato mostrou a capacidade preditiva do estimador para gerar valores em pontos não amostrados.

A Tabela 5 contém dados sobre as quatro bacias hidrográficas com presença significativa de cerrado *sensu strictu* no estado de Minas Gerais.

Tabela 5 Bacias hidrográficas com volume estimado de madeira de cerrado em Minas Gerais

Bacia hidrográfica	Área (ha)	Média (m <sup>3</sup> /ha)	Vol. Total (m <sup>3</sup> )
Paranaíba	38.704	41,86	1.620.200
Jequitinhonha	622.433	48,37	30.107.639
Pardo	152.023	36,49	5.546.897
São Francisco	4.189.086	33,62	140.843.439

Pela Tabela 5, foi possível verificar que ainda há no estado de Minas Gerais, aproximadamente, 180.000.000 de m<sup>3</sup> de madeira proveniente do cerrado *sensu strictu*. Este número mostra a importância da fitofisionomia para o estado, uma vez que a volumetria de madeira tem relação direta com o estoque de carbono. A bacia do Rio Jequitinhonha apresentou maior produtividade em m<sup>3</sup>/ha do cerrado *sensu strictu* no estado de Minas Gerais (48,37 m<sup>3</sup>/ha), enquanto a bacia hidrográfica com maior área possui a menor volumetria.

Seguramente a bacia hidrográfica do Rio São Francisco também é aquela que mais sofreu com a antropização, especialmente com a prática do desmatamento.

#### 4.2.4 Inferência espacial - krigagem com regressão

A krigagem com regressão foi separada em três partes: geração do modelo geográfico do estoque volumétrico da parte aérea da vegetação arbórea do cerrado *sensu strictu* de MG em relação às variáveis geográficas, a krigagem dos resíduos gerados pelo modelo e a soma dos mapas, gerando o mapa final de estoque volumétrico.

##### 4.2.4.1 Modelagem do estoque madeireiro da vegetação arbórea do cerrado *sensu strictu* de MG

Os coeficientes de correlação de Pearson entre o estoque volumétrico e as variáveis geográficas latitude, longitude, altitude e NDVI estão apresentados na Tabela 6. Esse é um importante passo para a realização de uma modelagem consistente, pois o teste direciona quais variáveis têm impacto significativo na relação com a variável independente.

Tabela 6 Coeficientes de correlação de Pearson entre estoque volumétrico ( $m^3/ha$ ) e as variáveis latitude, longitude, altitude e NDVI

Variável	Latitude	Longitude	Altitude	NDVI
Estoque volumétrico	-0,2419 <sup>a</sup>	0,1774 <sup>a</sup>	0,1928 <sup>a</sup>	0,3106 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> = significativo a 5%

Pela Tabela 6, o NDVI associou-se mais fortemente quanto à explicação da distribuição do estoque volumétrico do cerrado *sensu strictu* no estado de MG. Interessante observar que latitude, longitude e altitude também

apresentaram correlação significativa com a variável. A latitude se correlacionou negativamente com os valores de volume, significando aumento nos estoques com a diminuição da latitude. De forma que, a redução da latitude é acompanhada pela redução da precipitação e aumento da temperatura no estado, ou seja, menor disponibilidade de água para as plantas e, portanto, menor crescimento das mesmas.

A correlação negativa aponta aumento nos estoques volumétricos com a diminuição da longitude. Segundo Carvalho et al. (2008), a redução da longitude é acompanhada pelo aumento da precipitação, ou seja, aumento da disponibilidade hídrica, aumentando o estoque volumétrico.

Para a altitude, seu aumento em regiões onde as temperaturas médias anuais são altas traz um melhor equilíbrio quanto ao fator radiação, porém para os demais pontos do estado de MG, esta variável não tem efeito positivo, apresentando por isso uma menor correlação.

A Tabela 7 apresenta o resultado do modelo geográfico ajustado, mostrando os coeficientes estimados e também o teste “t” de *Student* para cada variável.

Tabela 7 Ajuste do modelo geográfico com coeficientes estimados pela regressão e a significância estatística (Student “t” test) dos coeficientes estimados

<b>Coeficiente estimado para regressão</b>	<b>Variável</b>	<b>Valores</b>
b0	Intercepto	1,71e+02 <sup>a</sup>
b1	A	-3,31e-01 <sup>a</sup>
b2	LO	2,88e-04 <sup>a</sup>
b3	NDVI	-7,44e+02 <sup>a</sup>
b4	LA <sup>2</sup>	7,54e-11 <sup>a</sup>
b5	NDVI <sup>2</sup>	3,10e+02 <sup>a</sup>
b6	LA*A	1,98e-07 <sup>a</sup>
b7	LA*LO	-2,76e-10 <sup>a</sup>
b8	LO*NDVI	2,67e-04 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Significativo a 5%; A = altitude; LA = latitude; LO = longitude; A, LO e LA em metros.

As estatísticas de precisão quanto à eficiência do modelo ajustado estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 Erro Médio Absoluto (EMA %), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e o teste de Shapiro-Wilk (SW)

EMA (%)	R <sup>2</sup>	SW
144,59	0,20	0,952; 0,00008 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> = significativo a 5%

O modelo ajustado apresentou um valor de R<sup>2</sup> baixo, porém aceitável devido à ampla variação encontrada entre os dados do estudo. Essa ampla variação demonstra como as condições das parcelas distribuídas nos fragmentos pertencentes ao cerrado *sensu strictu* de MG são distintos. É importante considerar a complexidade da variável estoque volumétrica em questão, tais

como, as parcelas pertencem a fragmentos com diferentes graus de antropização, estágios sucessionais diferentes, sítios diferentes, árvores com portes em diâmetro e altura diferentes o que por si só já acarreta num aumento da variabilidade vegetal (SCOLFORO; OLIVEIRA; CARVALHO, 2008).

Com relação ao erro médio absoluto, o modelo apresentou um valor de 144,59%. Novamente, considerando-se a complexidade na modelagem dos estoques volumétricos em grandes áreas, com grande heterogeneidade e que o modelo foi aplicado a uma base desconhecida do mesmo, esse valor pode ser considerado aceitável.

Outro detalhe quanto à confiabilidade do modelo ajustado se dá na questão da normalidade dos resíduos. O pressuposto básico da regressão é que estes sejam normais, o que foi comprovado pelo teste de Shapiro-Wilk.

Complementando a análise deste modelo geográfico, pode-se verificar pela Figura 15 a distribuição dos valores observados em relação aos estimados. Quanto maior a proximidade dos valores observados em relação aos estimados, melhor o ajuste, ou seja, maior a precisão e menor a chance de ocorrer algum viés de estimativa, e conseqüentemente soma dos resíduos tendendo a zero.



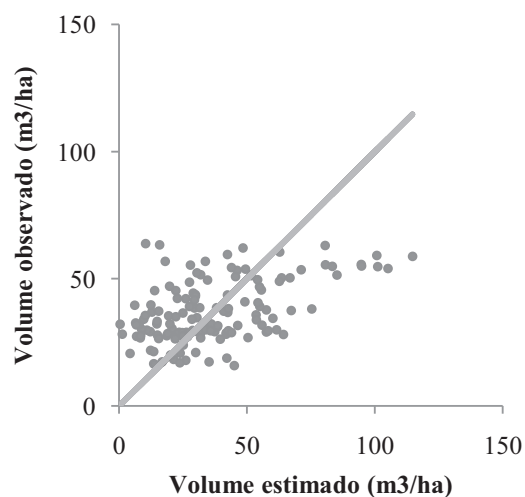


Figura 15 Dispersão dos valores estimados pela equação ajustada ao redor da reta 1:1 para o estoque volumétrico da parte aérea da vegetação arbórea do cerrado *sensu strictu* em Minas Gerais

Como pôde ser observado no item 4.1, o EVI foi o índice que apresentou maior correlação com as variáveis biométricas. Este índice é derivado do NDVI. Sua criação teve como objetivo reduzir a influência da reflectância do solo e alterações na estrutura inferior do dossel, ao avaliar o fragmento de vegetação (HUETE et al., 2002). Este índice é considerado um aperfeiçoamento do SAVI. No presente estudo, no modelo da krigagem por regressão, o NDVI entrou como variável independente. O fato de existirem vários fragmentos de cerrado com diferentes graus de degradação (antropizados), fez com que os valores de volume estimados apresentassem resultados negativos em algumas situações, utilizando o EVI. Por este motivo e também pelo fato da correlação do NDVI com o volume ter sido significativa, optou-se para trabalhar com o NDVI no modelo da krigagem por regressão.

#### 4.2.4.2 Krigagem dos resíduos

Avaliando-se a Figura 16, verifica-se que o modelo ajustado para o semivariograma dos resíduos apresentou-se estruturado espacialmente, demonstrando que a krigagem ordinária do mesmo apresentará um mapa de boa qualidade e inferência confiável sobre o comportamento dos resíduos nas células desenvolvidas para aplicação da krigagem com regressão, sendo o modelo exponencial ajustado de forma adequada.

O semivariograma dos resíduos derivados das estimativas do modelo ajustado está apresentado na Figura 16 e mostra uma estrutura de continuidade espacial com alcance de 400.000 metros.

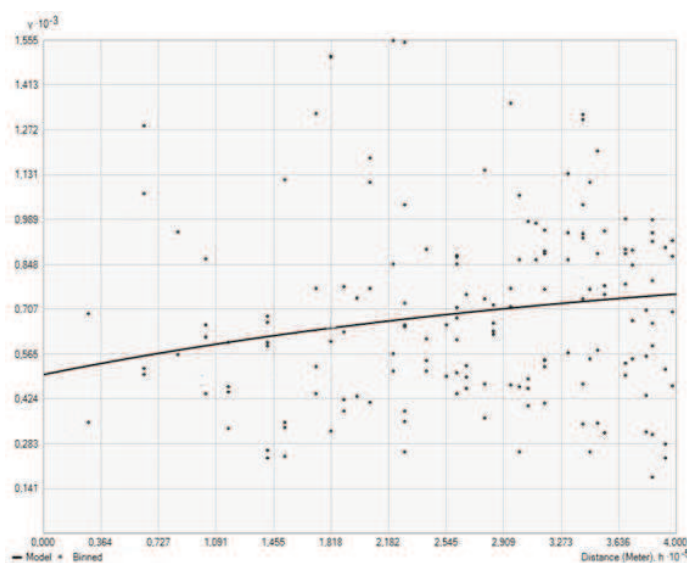


Figura 16 Semivariograma unidirecional teórico e experimental para os resíduos da variável estoque volumétrico da parte aérea da vegetação arbórea ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) do cerrado *sensu strictu* de Minas Gerais

O efeito pepita e a contribuição apresentaram valores relativamente medianos, porém, ainda permitindo verificar a continuidade espacial da variável.

Através destes valores de efeito pepita e contribuição, verificou-se que a característica avaliada apresenta-se moderadamente estruturada no espaço, conforme Cambardella et al. (1994), com grau de dependência acima de 44%.

#### **4.2.4.3 Mapa do estoque madeireiro da vegetação arbórea do cerrado *sensu strictu* de MG utilizando krigagem com regressão**

Os mapas de krigagem do resíduo e do estoque madeireiro desenvolvido a partir do modelo geográfico estão apresentados nas Figuras 17 e 18, e é possível observar alguns aspectos importantes, além de enfatizar que o somatório desses dois mapas resulta no mapa final da krigagem com regressão (Figura 19). Primeiramente, um equilíbrio entre as sub e superestimativas, significando que o modelo está adequado em suas estimativas na área de estudo, conforme apresentado e discutido anteriormente. Mello et al. (2013) e Meusburger et al. (2012), ambos aplicando krigagem com regressão para o mapeamento da erosividade da chuva, respectivamente, na Suíça e no Brasil, comentam sobre este aspecto, ou seja, de que os resíduos necessitam apresentar uma distribuição espacial equilibrada, sem tendência, para que os resultados da krigagem com regressão possam ser os mais expressivos possíveis.

Além desta característica, é importante destacar pela Figura 17, os valores consideravelmente baixos de estimativa, tanto de subestimativas (valores negativos) quanto de superestimativas (valores positivos), demonstrando não somente o bom desempenho do modelo estatístico, mas também da krigagem ordinária, para os resíduos do modelo.

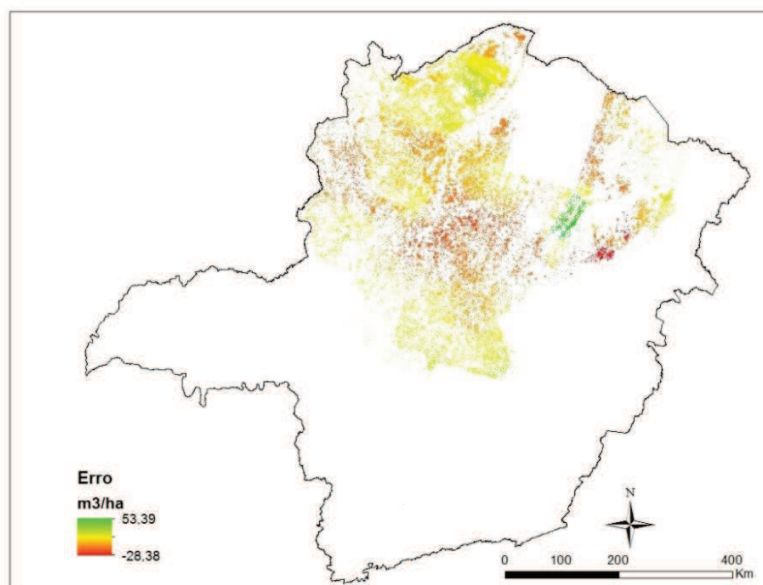


Figura 17 Mapa de krigagem dos resíduos do modelo ajustado

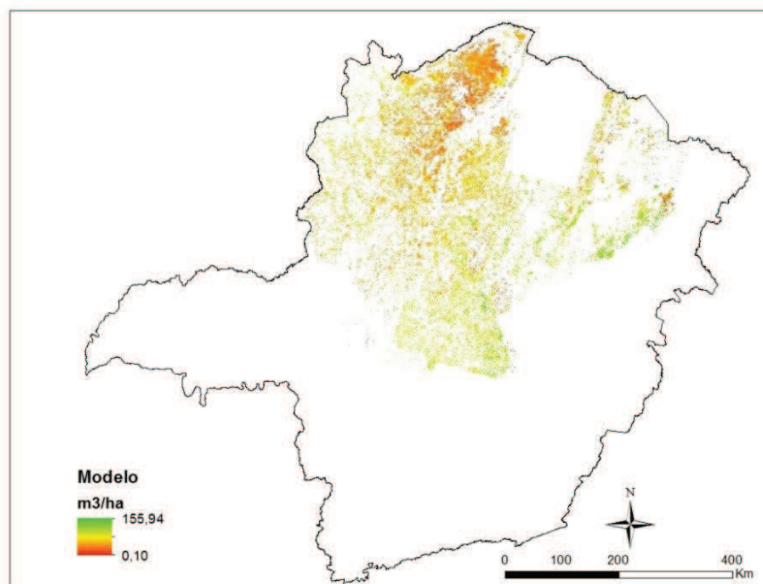


Figura 18 Mapa dos valores estimados pelo modelo ajustado

A Figura 19 apresenta o mapa resultante da distribuição do estoque volumétrico da parte aérea da vegetação arbórea do cerrado *sensu strictu* de MG, gerado a partir da técnica híbrida da krigagem com regressão.

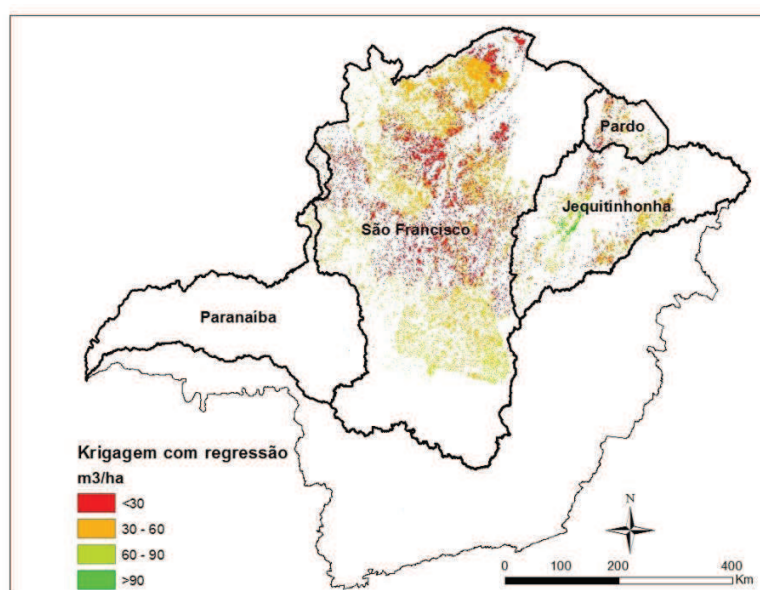


Figura 19 Mapa dos valores interpolados do estoque madeireiro da vegetação arbórea do cerrado *sensu strictu* de MG por meio da krigagem com regressão

Comparando os mapas de krigagem ordinária com krigagem com regressão, verifica-se que há 65% de coincidência entre os mesmos. Isto implica que 65% das células de um hectare estimadas pelos dois modelos foram iguais. A krigagem com regressão diferenciou consideravelmente no centro do estado em relação à krigagem ordinária (cor vermelha no mapa). Nesta região, a krigagem com regressão estimou uma maior quantidade de área com valores inferiores a 30 m<sup>3</sup>/ha. Por outro lado, houve um aumento de área com valores de volume entre 30 e 60 m<sup>3</sup>/ha ao Norte do estado. Observando a Figura 17, o

modelo superestimou os valores, proporcionando erros maiores nesta região, impactando no aumento do volume na mesma. O aumento do volume no Norte contribuiu para elevar o volume médio de cerrado no estado para 36,447 m<sup>3</sup>/ha quando comparado ao volume médio da krigagem ordinária. No entanto, vale destacar que ambos os valores estão dentro do intervalo de confiança gerado pelo processamento em dois estágios realizados no inventário de Minas Gerais (SCOLFORO; MELLO; OLIVEIRA, 2008). Certamente, estas duas discrepâncias, ao Norte para mais e no centro do estado para menos, fez com que se reduzisse a correlação entre os dois mapas (Figuras 13 e 19).

O efeito do modelo ajustado, em que a variável dependente é o volume e as independentes são latitude, longitude, altitude e NDVI, pôde ser percebido ao se observar a diferença entre os mapas das Figuras 17 e 18. Na porção central do Estado, onde a krigagem com regressão apresenta um aumento de área com baixa volumetria em relação à krigagem ordinária, percebe-se uma associação com áreas antropizadas. Este fato proporciona uma maior exposição dos solos e/ou raleamento da parte inferior do dossel, resultando em um impacto negativo na participação do NDVI sobre a estimativa do volume. Nas regiões mais ao Norte, o modelo apresentou um impacto mais positivo, com uma elevação dos volumes estimados, mostrando que as variáveis independentes propiciaram uma melhoria do volume médio estimado. Neste caso, o NDVI foi o ator principal desta melhoria, refletindo o melhor grau de conservação da vegetação do cerrado, em função das diversas unidades de conservação presentes nesta região.

Destaca-se, tanto no mapa de krigagem ordinária (Figura 13) quanto no mapa de krigagem com regressão (Figura 19), que há um efeito das condições climáticas muito provavelmente em função de uma barreira geográfica existente, que gera uma situação desfavorável ao crescimento da vegetação na região Norte e Oeste (cor vermelha nos mapas). Esta barreira geográfica se refere à serra do Espinhaço, que atua como uma barreira natural para os ventos das

correntes marítimas que se formam no oceano Atlântico próximas ao estado do Espírito Santo. Esta barreira natural torna-se um grande impedimento para a passagem de frentes frias que poderiam se deslocar em direção ao Norte e Oeste do estado, criando uma situação climática com maior umidade, propícia para o melhor desenvolvimento das plantas. No entanto, isto não acontece, gerando uma área com altas temperaturas, baixa umidade e conseqüentemente um déficit hídrico acentuado, induzindo assim a um menor crescimento das plantas. As frentes frias vindas do Leste do Estado encontram-se com a serra do Espinhaço e perdendo força e permanecendo nestas imediações. Esta situação melhora as condições climáticas no entorno da costa Leste da serra do Espinhaço, favorecendo o crescimento das plantas do cerrado na região Nordeste do estado (Figuras 13 e 19).

A relação da pressão atmosférica com a zona tropical é positiva, ou seja, à medida que se aproxima da região tropical, aumenta-se naturalmente a pressão atmosférica e a frequência de frentes frias são menores, situação comum no Norte e Oeste do estado de Minas Gerais. Em função desta característica natural, as frentes frias oriundas do Sul do país, na maioria das vezes, são desviadas para o oceano Atlântico ainda na região Sul do estado de Minas Gerais não atingindo as regiões Norte e Oeste. Esta situação também gera uma condição desfavorável ao crescimento das plantas nestas duas regiões do estado. As chuvas que ocorrem no Oeste e Norte do estado têm sua frequência, no verão, aumentada e têm como fonte principal de umidade a convergência de ventos da região amazônica, os quais formam um canal de umidade extenso que se prolonga até o Sudeste do Brasil, conhecido como Zona de Convergência do Atlântico Sul.

Com relação ao Norte de Minas Gerais, além das condições naturais (serra do Espinhaço e alta pressão atmosférica na região), ainda há o aspecto solo. Da região central para o Norte, há maior presença de solos arenosos, cambissolos e neossolos quartizocênicos. Estes três tipos de solos possuem

características gerais de baixa fertilidade que, associada às características físicas dos solos, falta de chuva e aumento da temperatura, cria-se uma condição desfavorável ao desenvolvimento das plantas em quase toda a bacia do Rio São Francisco. Esta bacia representa 35% da área do estado, além de ser a região com os maiores remanescentes de cerrado do estado de Minas Gerais. Na Figura 19, verifica-se que há maior volumetria nas áreas Centro-Norte e Leste do estado, uma vez que há condições climáticas mais favoráveis, associadas aos latossolos presentes naquela região. Este tipo de solo possui características químicas e físicas que propiciam melhores condições para o crescimento da vegetação.



## 5 CONCLUSÕES

Dentre as características biométricas avaliadas, a altura média foi a que apresentou melhor correlação com os índices espectrais, seguida pelo volume. Estas correlações, no entanto, não ultrapassaram o valor de 0,46. Dos cinco índices espectrais encontrados, o EVI foi o que melhor se correlacionou com estas duas variáveis, enquanto que o NDVI apresentou a menor correlação.

Realizando o tratamento das variáveis biométricas do cerrado *sensu strictu* distribuídas em classes de antropização, os valores obtidos ao estabelecer correlação chegaram a 0,69, indicando que a ação antrópica quando presente, afeta diretamente a correlação entre os índices espectrais da vegetação e as variáveis biométricas.

A característica volume, para o cerrado *sensu strictu*, mostrou-se estruturada espacialmente, condição que permitiu realizar a espacialização desta característica através da krigagem.

A distribuição volumétrica do cerrado *sensu strictu*, estimada através do modelo geográfico ajustado, apresenta uma tendência de redução progressiva nos estoques de madeira, delineada por um gradiente decrescente no sentido Sudeste-Noroeste, em consonância com a disponibilidade de recursos edafoclimáticos que também apresentam uma tendência de restrição à medida que se interioriza a localização da área avaliada.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, T. J. A.; MONTEIRO, M. S. L. Modelo agrícola e desenvolvimento sustentável: a ocupação do Cerrado Piauiense. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 8, n. 2, p. 161-178, 2005.
- ALBUQUERQUE, J. L. R.; LINI, C. F. **Lei da Mata Atlântica, lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006 [e] Resolução CONAMA nº 388, de 23 de fevereiro de 2007**. São Paulo: Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, 2007. 54 p. (Cadernos da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica. Série Políticas Públicas, 33).
- ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land: Idaho implementation: advanced training and users manual**. Version 1.0. Idaho: NASA, 2002. 98 p.
- ALMEIDA, A. Q. et al. Relações empíricas entre características dendrométricas da Caatinga brasileira e dados TM Landsat 5. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 306-315, abr. 2014.
- ALVARENGA, L. H. V. et al. Desempenho da estratificação em um fragmento de cerrado stricto sensu utilizando interpolador geostatístico. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 675-681, out./dez. 2012.
- ANDERSON, L. O. et al. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no Estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. **Acta Amazônia**, Manaus, v. 35, n. 4, p. 445-456, out./dez. 2005.
- ASSIS, A. L. de. **Definição da estratégia amostral em plantios jovens de *Eucalyptus* spp pelo uso de geostatística**. 2005. 118 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- AUBRY, P.; DEBOUZIE, D. Estimation of the mean from a two-dimensional sample: the geostatistical model-based approach. **Ecology**, Washington, v. 82, n. 5, p. 1484-1494, May 2001.
- BERRA, E. F. et al. Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 853-864, 2012.

BIONDI, F.; MYERS, D. E.; AVERY, C. C. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 24, n. 7, p. 1354-1368, July 1994.

BRUS, D. J.; GRUIJTER, J. J. Random sampling or geostatistical modelling?: choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil, with discussion. **Geoderma**, Amsterdam, v. 80, n. 1/2, p. 1-59, Oct. 1997.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CANAVESI, V. et al. Estimativa de volume de madeira em plantios de *Eucalyptus spp.* utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 3, p. 539-549, maio/jun. 2010.

CARVALHO, F. M. A. et al. Padrões de autocorrelação Espacial de Índices de Vegetação Modis no Bioma Cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 279-290, 2008.

CESARO, A. de; ENGEL, O. A.; FINGER, C. A. G. Comparação dos métodos de amostragem de área fixa, relascopia, e de seis árvores, quanto a eficiência, no inventário florestal de um povoamento de *Pinus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 97-108, jun. 1994.

CHEN, B. et al. Spectrum characteristics of cotton canopy infected with *Verticillium Wilt* and applications. **Agricultural Sciences in China**, Beijing, v. 7, n. 5, p. 561-569, May 2008.

CHLERF, M.; ATZBERGER, C.; HILL, J. Remote sensing of forest biophysical variable using Hy Map imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 9, n. 1, p. 177-194, 2005.

COCHRAN, W. G. **Sampling techniques**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: J. Wiley, 1977. 555 p.

COHEN, W. B.; SPIES, T. A.; BRADSHAW, G. A. Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 34, n. 3, p. 167-178, 1990.

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

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Model-based geostatistics. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 14., 2000, Caxambú. **Resumos...** Caxambú: Associação Brasileira de Estatística, 2000. p. 192.

DINIZ, F. S. **Métodos de amostragem e geoestatística aplicados ao inventário florestal**. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

EKLUNDH, L.; HARRIE, L.; KUUSK, A. Investigating relationships between Landsat ETM+ sensor data and leaf area index in a boreal conifer forest. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 78, n. 3, p. 239-251, Dec. 2001.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS desktop**: Release 10. Redlands, 2011. Software.

FERREIRA, D. F. **Estatística básica**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2009. 664 p.

FOODY, G. M.; BOY, D. S.; CUTLER, M. E. J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 85, n. 4, p. 463-474, June 2003.

FRANCO-LOPEZ, H.; EK, A. R.; BAUER, M. E. Estimation and mapping of forest stand density, volume and cover type using thek-nearest neighbours method. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 77, n. 3, p. 251-274, Sept. 2001.

GRÜNDLING, R. D. P.; BARCELLOS, J. O. J. Ocupação do espaço agropecuário no cerrado brasileiro. In: JORNADA NESPRO, 6., 2011, Itaquí. **Anais...** Itaquí: UFRGS, 2011. 1 CD-ROM.

GUEDES, I. C. de L. et al. Técnicas geoestatísticas e interpoladores espaciais na estratificação de povoamentos de Eucalyptus sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 541-550, 2012.

GUNNARSON, F.; HOLM, P. H.; THURESONN, T. On the potential of krigage for forest management planning. **Scandinavian Journal of Forest Research**, London, v. 13, n. 2, p. 237-245, May 1998.

GURGEL, H. D. C.; FERREIRA, N. J.; LUIZ, A. J. B. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 85-90, jan./abr. 2003.

HALL, R. J. et al. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 225, n. 1, p. 378-390, 2006.

HALME, M.; TOMPPA, E. Improving the accuracy of multisource forest inventory estimates by reducing plot location error: a multicriteria approach. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 78, n. 3, p. 321-327, Dec. 2001.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B. M.; ROSSITER, D. G. About regression-kriging: from equations to case studies. **Computers & Geosciences**, Oxford, v. 33, n. 10, p. 1301-1315, Oct. 2007.

HOAGLIN, D. C. Letras-resumo: um conjunto de estatísticas ordinais selecionadas. In: HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J. W. (Ed.). **Análise exploratória de dados: técnicas robustas: um guia**. Lisboa: Salamandra, 1992. p. 32-58.

HÖCK, B. K.; PAYN, T. W.; SHIRLEY, J. Using a geographic information system and geostatistics to estimate site index of *Pinus radiata* for Kaingaroa forest. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Canterbury, v. 23, n. 3, p. 264-277, Nov. 1998.

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

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

HUETE, A. R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, n. 1/2, p. 195-213, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.  
**Microrregiões do Brasil**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em:  
<<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 set. 2013.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 560 p.

JACKSON, R.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 185-200, 1991.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parênteses, 2009. 672 p.

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

KANEGAE JÚNIOR, H. et al. Avaliação da continuidade espacial de características dendrométricas em diferentes idades de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 859-866, set./out. 2004.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, São Paulo, v. 1, n. 1, 2005. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAe1U4AF/conservacao-cerrado-klink-machado>>. Acesso em: 10 ago. 2014.

KLINK, C. A.; MOREIRA, A. G. Past and current human occupation, and land use. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Ed.). **The Cerrados of Brazil**. New York: Columbia University, 2002. p. 69-88.

LENTILE, L. B. et al. Remote sensing techniques to assess activefire and post-fire effects. **International Journal of Wildland Fire**, Clayton South, v. 15, n. 3, p. 319-345, 2006.

LINLI, C.; JUN, S. Temporal and Spatial Response of Vegetation NDVI to temperature and precipitation in eastern China. **Journal of Geographical Sciences**, Berlin, v. 20, n. 2, p. 163-176, 2010.

LU, D. et al. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 25, n. 12, p. 2365-2407, 2004.

MACHADO, R. B. et al. **Estimativas de perda da área do Cerrado brasileiro**. Brasília: Conservação Internacional, 2004. 23 p.

MÄKELÄ, H.; PEKKARIEN, A. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 196, n. 2/3, p. 245-255, July 2004.

MATÉRN, B. **Spatial variation**: stochastic models and their application to some problems in forest surveys and other sampling investigations. 1960. 144 f. Thesis (Doctorat) - Meddelanden Statens Skogsforskningsinst, Stockholm, 1960.

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

MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, n. 4, p. 617-639, Dec. 1986.

MCDONALD, A. J.; GEMMELL, F. M.; LEWIS, P. E. Investigation of the utility of spectral vegetation indices for determining information on coniferous forests. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 66, n. 3, p. 250-272, Dec. 1998.

MELLO, C. R. de et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, n. 202/203, p. 88-102, 2013.

MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da. Modelagem estatística da precipitação mensal e anual e no período seco para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 68-74, jan./fev. 2009.

MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2004.

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

MELLO, J. M. de et al. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 113-126, abr./jun. 2005.

MELLO, J. M. de et al. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 251-260, maio/ago. 2006.

MENEZES, M. D. de. **Levantamento pedológico de hortos florestais e mapeamento digital de atributos físicos do solo para estudos hidrológicos**. 2011. 255 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

MEUSBURGER, K. et al. Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 16, n. 1, p. 167-177, 2012.

MORAIS, V. A. et al. Influence of diameter measuring height on the adjustment of volume and biomass equations of cerrado in Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 3, p. 230-239, maio./jun. 2014.

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

ORTIZ, J. L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**. 2003. 205 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2003.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba: IPEF, 1997. 316 p.

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1987. 33 p. (Boletim Técnico, 114).

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 ago. 2013.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1995.



RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: a package for geostatistical analysis. **R-News**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

RISSO, J. et al. Potencialidade dos índices de vegetação EVI e NDVI dos produtos MODIS na separabilidade espectral de áreas de soja. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 379-386.

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.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317. (NASA SP-351).

RUFINI, A. L. et al. Equações de volumétricas para cerrado stricto sensu em Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 1-11, jan./mar. 2010.

RUFINO, T. M. C. **Uso da geoestatística no estudo da relação entre variáveis dentrométricas de povoamentos de *Eucalyptus sp.* e atributos do solo**: relatório de estágio curricular supervisionado. Botucatu: UNESP, 2005. 46 p.

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

SANO, E. E. et al. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 153-156, jan. 2008.

SANTOS, E. V.; MARTINS, R. A.; FERREIRA, I. M. O processo de ocupação do Bioma cerrado e a degradação do subsistema vereda no sudeste de Goiás. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 8., 2009, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: UFV, 2009. 1 CD-ROM.

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de. **Inventário florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 344 p.

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de. **Inventário florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 561 p.

SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; CARVALHO, L. M. T. (Ed.). **Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais**. Lavras: UFLA, 2008. 195 p.

SILVA, K. R. et al. Custos e rendimentos operacionais de um plantio de eucalipto em região de cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 361-366, maio/jun. 2004.

SMITH, A. M. S. et al. Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African Savannahs: comparison of methods and application to MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 28, n. 12, p. 2753-2775, 2007.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F. de; SOUZA, A. L. de. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 276 p.

TAVARES JÚNIOR, J. B. et al. Avaliação dos dados GeoCover a partir de dados de campo coletados com receptores GPS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 1889-1896.

TAYLOR, S. L.; HILL, R. A.; EDWARDS, C. Characterising invasive non-native *Rhododendron ponticum* spectra signatures with spectroradiometry in the laboratory and field: Potential for remote mapping. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 81, p. 70-81, July 2013.

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

THOMPSON, S. K.; SEBER, G. A. F. **Adaptive sampling**. New York: J. Wiley, 1996. 350 p.

TOMPPO, E. et al. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 5, p. 1982-1999, May 2008.

TOMPPO, E. et al. Predicting categorical forest variables using an improved k-Nearest Neighbour estimator and Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 113, n. 3, p. 500-517, Mar. 2009.

TOMPPO, E. et al. Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1c WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 82, n. 1, p. 156-171, Sept. 2002.

TROTTER, C. M.; DYMOND, J. R.; GOULDING, C. J. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 18, n. 10, p. 2209-2223, 1997.

TURNER, D. P. et al Assessing alternative allometric algorithms for estimating leaf area index in Douglas-fir trees and stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 79, n. 4, p. 453-465, 1999.

UNIVERSITY OF MARYLAND. **GLCF - Global Land Cover Facility**. Disponível em: <<http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>>. Acesso em: 29 out. 2012.

USHIZIMA, T. M.; BERNARDI, J. V. E.; LANDIM, P. M. B. Estudo da distribuição espacial do angico (*Anadenanthera peregrina*) na Floresta Estadual “Edmundo Navarro de Andrade”, Rio Claro, SP, Brasil, empregando metodologia geoestatística. **Holos Environment**, Rio Claro, v. 3, n. 1, p. 59-73, 2003.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciências do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2000. p. 1-54.

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

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**, Santa Maria, v. 19, p. 169-181, abr./jun. 2009.

WEBSTER, R.; MCBRATNEY, A. B. On the Akaike Information Criterion for choosing models for variograms of soil properties. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, n. 3, p. 493-496, Sept. 1989.

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.

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

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.