



ALINY APARECIDA DOS REIS

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO
INVENTÁRIO DE FLORESTAS PLANTADAS**

LAVRAS – MG

2015

ALINY APARECIDA DOS REIS

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO INVENTÁRIO DE FLORESTAS
PLANTADAS**

Dissertação 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 Mestre.

Orientador

Dr. José Marcio de Mello

Coorientador

M.Sc. Fausto Weimar Acerbi Junior

LAVRAS - MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Reis, Aliny Aparecida dos.
Geotecnologias aplicadas ao inventário de florestas
plantadas / Aliny Aparecida dos Reis. – Lavras : UFLA, 2015.
67 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal
de Lavras, 2015.

Orientador: José Marcio de Mello.

Bibliografia.

1. Inventário Florestal. 2. Sensoriamento Remoto. 3.
Cokrigagem. 4. Krigagem. 5. Estratificação. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.

ALINY APARECIDA DOS REIS

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO INVENTÁRIO DE FLORESTAS
PLANTADAS**

Dissertação 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 Mestre.

APROVADA em 24 de fevereiro de 2015.

Dr. Luis Marcelo Tavares de Carvalho	UFLA
Dr. Marcelo Silva de Oliveira	UFLA
Dra. Ivonize Silva Andrade	Inventar GMB Consultoria Ltda.

Dr. José Marcio de Mello
Orientador

M.Sc. Fausto Weimar Acerbi Junior
Coorientador

LAVRAS - MG

2015

*Aos meus pais, Antônio e Maria Santa, por todo esforço empregado em minha
formação e pelo amor dedicado.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a DEUS, pelo dom da vida e por me iluminar e proteger sempre.

Agradeço aos meus pais, Antônio e Maria Santa, pelo amor incondicional e por todos os sacrifícios para que o meu sonho fosse possível.

Às minhas irmãs, Waldenice e Joyce, pelos preciosos momentos compartilhados e à minha sobrinha Lala, por compreender que minha ausência se fazia necessária.

Ao meu orientador José Marcio de Mello, pelo apoio, amizade, confiança, empenho e disponibilidade em todos os momentos.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade concedida para a realização desse trabalho.

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

À Empresa Vaullorec Florestal, em especial à Thais Rosa, por todo o apoio em relação à obtenção da base de dados.

Ao professor Fausto Weimar Acerbi Júnior, pela amizade, companheirismo e ensinamentos, que foram de grande valia para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, que gentilmente aceitaram o meu convite e pelas valiosas contribuições.

Aos companheiros do Laboratório de Inventário Florestal e Estatística Espacial Marcel, Henrique, Fernando, Pedro, Iasmim e Flávio com quem compartilhei ideias e momentos de companheirismo e alegria.

Ao meu namorado Wesley, pelo companheirismo, amor e cumplicidade.

Aos amigos da minha turma de Engenharia Florestal 2008/01, pela amizade sincera e às amigas da República Doce Deleite, pela convivência diária, amizade e paciência.

A todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO GERAL

O Inventário Florestal Contínuo (IFC) constitui-se de uma rede de parcelas permanentes estabelecidas entre dois e três anos de idade nos povoamentos de *Eucalyptus* spp. e monitoradas anualmente até a idade de corte. Porém, as informações obtidas com o processamento destas parcelas não são suficientes para gerar estimativas precisas sobre o volume por talhão na idade de corte, havendo a necessidade de se efetuar o inventário pré-corte (IPC). No inventário pré-corte novas parcelas são lançadas agregando-se um novo componente nos custos da produção florestal. Uma alternativa sem agregação de custos para a obtenção de maior precisão do IFC seria a utilização de imagens de sensoriamento remoto aliadas a interpoladores geoestatísticos na estratificação dos povoamentos florestais. Nesse sentido, os objetivos desta dissertação foram: (i) identificar as bandas espectrais e os índices de vegetação derivados das imagens Landsat 5 TM que melhor se correlacionam com as variáveis dendrométricas área basal, altura dominante e volume nas diferentes idades de medição do IFC e na medição do IPC dos plantios de *Eucalyptus* spp.; (ii) selecionar a variável espectral que melhor se correlacionou com a variável dendrométrica área basal na idade de corte e avaliar a estrutura de dependência espacial dessas variáveis; (iii) comparar as estimativas da Amostragem Sistemática (AS) com as estimativas da Amostragem Casual Estratificada (ACE) para a variável de interesse volume (m^3/ha), sendo a estratificação realizada por meio da krigagem ordinária e da cokrigagem em diferentes intensidades amostrais na idade de corte. As bandas TM4 e TM5 das imagens Landsat 5 TM foram as que apresentaram os maiores valores de correlação com as variáveis área basal e volume, enquanto que a banda TM2 apresentou os melhores valores de correlação com a altura dominante. Os índices de vegetação que incluem em sua composição as bandas TM4 e TM5, como o ND54 e TM5/4, foram os que apresentaram os melhores valores de correlação com as variáveis dendrométricas. Selecionou-se como variável auxiliar a reflectância na região espectral do infravermelho médio, correspondente à banda TM5. Os interpoladores geoestatísticos krigagem ordinária e cokrigagem ordinária apresentaram-se eficientes na definição de estratos em povoamentos de *Eucalyptus* spp.. Os estimadores da ACE foram mais precisos que da AS, indicando que a estratificação com base na área basal e na reflectância da banda TM5 produz resultados satisfatórios na redução do erro de amostragem do inventário, podendo ser utilizadas individualmente (através da krigagem ordinária) ou em conjunto (através da cokrigagem ordinária) como ferramentas de estratificação pelas empresas florestais.

Palavras-chave: *Eucalyptus* spp.. Krigagem. Cokrigagem. Sensoriamento Remoto. Estratificação.

GENERAL ABSTRACT

The Continuous Forest Inventory (CFI) consists of a network of permanent plots established between two and three years in *Eucalyptus* plantations and monitored annually until the cutting age. However, the information obtained from the processing of these plots are not enough to generate accurate estimates of the volume per stand at the cutting age. Thus, there is a need to perform a pre-harvest inventory. In the pre-harvest inventory, new plots are located aggregating a new component in the cost of the forest production. An alternative without adding costs to obtain greater accuracy from the CFI would be the use of remote sensing imagery combined with geostatistical interpolation in the stratification of the forest plantations. In this sense, this dissertation was conducted with the following objectives: (i) to identify spectral bands and vegetation indices derived from Landsat 5 TM images that best correlated with the dendrometric variables basal area, dominant height and volume for all measured years in the CFI as well as in the age of the pre-harvest inventory; (ii) to select the spectral variable that best correlated with the dendrometric variable basal area in the cutting age and evaluate the spatial structure dependence of these variables; (iii) to compare the estimates of Systematic Sampling (SS) to the estimates of Random Stratified Sampling (RSS) for the variable of interest volume (m³/ha). The stratification was performed by ordinary kriging and cokriging in different sampling intensities at the cutting age. The results showed that TM4 and TM5 spectral bands were better correlated with basal area and volume, while TM2 spectral band was better correlated with dominant height. Vegetation indices that include in their composition the TM4 and TM5 spectral bands, as the ND54 and TM5/4, were better correlated with the dendrometric variables. The TM5 spectral band was selected as auxiliary variable in the ordinary cokriging procedure. The geostatistical interpolation ordinary kriging and ordinary cokriging showed to be efficient in the definition of strata in *Eucalyptus* spp. plantation. The ordinary kriging and ordinary cokriging showed to be efficient in defining the strata because the estimators of RSS were more accurate than the estimators of SS. The basal area and the reflectance in TM5 band can be used individually (ordinary kriging) or together (ordinary cokriging) as stratification tools by forestry companies.

Keywords: *Eucalyptus* spp.. Kriging. Cokriging. Remote sensing. Stratification.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	
1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Inventário Florestal	13
2.2	Sensoriamento Remoto aplicado ao Inventário Florestal	15
2.3	Geoestatística	18
2.3.1	Krigagem	19
2.3.2	Cokrigagem	20
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
	REFERÊNCIAS	23
	SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	28
	ARTIGO 1 Relação entre dados espectrais e variáveis dendrométricas em povoamentos de <i>Eucalyptus spp.</i>	28
	ARTIGO 2 Estratificação de povoamentos de eucaliptos por meio de krigagem e cokrigagem.....	44

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Os inventários florestais sucessivos constituem um instrumento estratégico de planejamento para as empresas do setor florestal brasileiro que possuem extensas áreas de florestas plantadas, em sua grande maioria, com plantios de espécies pertencentes ao gênero *Eucalyptus* (GUEDES et al., 2012).

O gênero *Eucalyptus* tem sido amplamente utilizado pelo setor florestal brasileiro como substituto imediato de madeiras oriundas de florestas nativas. Os plantios de *Eucalyptus* ocuparam uma área de 5.102.030 ha em 2012, sendo que destes, 53 % localizam-se na região sudeste do Brasil (ANUÁRIO..., 2013).

No Brasil, o sistema de amostragem mais utilizado é o Inventário Florestal Contínuo (IFC), o qual pode ser definido como uma rede de parcelas permanentes estabelecidas entre dois e três anos de idade nos povoamentos de *Eucalyptus* spp. e monitoradas periodicamente até a idade de corte (KANEGAE JUNIOR et al., 2006; PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997).

Durante o ciclo da floresta, a manutenção e o processamento das parcelas do IFC têm um custo significativo no processo de produção florestal e, no entanto, as informações obtidas com o processamento dessas parcelas não são suficientes para gerar estimativas precisas sobre a produtividade por talhão do povoamento florestal na idade de corte (MELLO et al., 2006).

Uma alternativa sem agregação de custos seria a utilização de imagens de sensoriamento remoto, aliadas a interpoladores geoestatísticos para a estratificação dos povoamentos florestais, juntamente com as informações das parcelas permanentes para a obtenção de maior precisão do IFC, sem a necessidade da realização do inventário pré-corte.

A estratificação nos inventários florestais tem forte influência sobre a precisão, intensidade amostral e custos, em decorrência do controle da variabilidade existente nos empreendimentos florestais, obtidos ao subdividir a população total em subpopulações de maior homogeneidade na característica de interesse (GUEDES et al., 2012; KANEGAE JUNIOR et al., 2007).

A utilização de imagens de sensores remotos vem sendo implementada aos inventários florestais tanto de áreas pequenas quanto de grandes áreas, pois proporcionam observações rápidas, aumentam a precisão das estimativas de áreas, fornecem estimativas do estoque da floresta sem viés e com precisão aceitável, permitem a produção de mapas das áreas a serem inventariadas, além de serem obtidas a um custo relativamente baixo (GÓMEZ et al., 2012).

Nas imagens, os povoamentos florestais podem ser caracterizados pelas suas reflectâncias em cada uma das bandas espectrais ou por meio de índices de vegetação (BERRA et al., 2012). As características de reflectância dos dosséis florestais podem ser associadas a outras características dendrométricas para identificar produtividade, estoque de biomassa e outras variáveis de interesse relacionadas à vegetação (TOMPPO et al., 2008).

A existência de uma correlação linear entre a reflectância dos dosséis florestais e/ou índices de vegetação e características dendrométricas foi corroborada por Almeida et al. (2014), Berra et al. (2012), Canavesi et al. (2009), Foody, Boy e Cutler (2003), Lu et al. (2004), Mäkelä e Pekkarien (2004), Thenkabail et al. (2003) e Watzlawick, Kirchner e Sanquetta (2009).

A utilização de dados espectrais dos dosséis florestais na espacialização da variável dendrométrica de interesse por meio de interpoladores geoestatísticos permite a pós-estratificação dos povoamentos florestais em subpopulações de maior homogeneidade na característica dendrométrica de interesse, em função da correlação existente entre a reflectância dos dosséis florestais e as variáveis dendrométricas dos povoamentos florestais.

Diante do exposto, esta dissertação foi realizada com os objetivos de: (i) identificar as bandas espectrais e os índices de vegetação derivados das imagens Landsat que são mais correlacionados com as variáveis dendrométricas área basal, altura dominante e volume nas diferentes idades de medição do IFC e na medição do IPC dos plantios de *Eucalyptus* spp.; (ii) selecionar a variável espectral que melhor se correlacionou com a variável dendrométrica área basal na idade de corte e avaliar a estrutura de dependência espacial dessas variáveis; (iii) comparar a Amostragem Sistemática e a Amostragem Casual Estratificada, sendo a estratificação realizada por meio da krigagem ordinária e da cokrigagem em diferentes intensidades amostrais na idade de corte.

Na primeira parte, apresenta-se uma introdução geral e uma revisão de literatura sobre os principais tópicos que se referem ao estudo. Na segunda parte, artigo 1, descrevem-se as correlações entre as bandas espectrais e os índices de vegetação derivados das imagens Landsat e as variáveis dendrométricas área basal, altura dominante e volume nas diferentes idades de medição do IFC dos plantios de *Eucalyptus* spp.. No artigo 2, apresenta-se a análise da estrutura de dependência espacial da área basal e da reflectância na banda TM5, e a utilização dos interpoladores geoestatísticos krigagem ordinária e cokrigagem ordinária na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus* spp., bem como a comparação das estimativas da amostragem casual estratificada (ACE) com as estimativas da amostragem sistemática (AS), para a variável de interesse volume (m^3/ha) em diferentes intensidades amostrais na idade de corte.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Inventário Florestal

Os inventários florestais consistem no uso de fundamentos da teoria de amostragem para a determinação ou estimativa de características quantitativas ou qualitativas da floresta (SCOLFORO; MELLO, 2006). Segundo os mesmos autores, o conhecimento da floresta e as informações obtidas sobre os povoamentos florestais, a partir dos inventários, constituem a base do planejamento adequado da exploração dos recursos florestais, pois permitem a estimativa das variáveis dendrométricas necessárias para se conhecer o estoque presente e futuro da floresta, com precisão desejável e um custo viável.

O Inventário Florestal Contínuo (IFC) é o método de amostragem mais utilizado no Brasil pelas empresas reflorestadoras, para acompanhar o crescimento da floresta. O IFC consiste de uma rede de parcelas permanentes monitoradas periodicamente com o objetivo de verificar as mudanças ocorridas nas florestas, instaladas quando os povoamentos atingem dois ou três anos de idade, no caso de povoamentos de *Eucalyptus* (KANEGAE JÚNIOR et al., 2006), mas podendo ser instaladas em idades diferentes, de acordo com a espécie em questão.

Entretanto, as informações obtidas com o processamento do IFC não são suficientes para gerar estimativas seguras sobre o volume e sobre o erro do inventário por talhão na idade de corte (MELLO et al., 2006). Assim, há necessidade de se efetuar o inventário pré-corte.

O inventário pré-corte é realizado a partir de parcelas temporárias lançadas com uma maior intensidade amostral em comparação com o IFC, naqueles talhões definidos pelo plano de suprimento para serem cortados,

obtendo-se, assim, estimativas mais precisas, porém a um custo mais elevado (SCOLFORO; MELLO, 2006).

Durante a realização dos inventários florestais, os procedimentos de amostragem empregados com maior frequência correspondem à Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Casual Estratificada (ACE) e Amostragem Sistemática (AS) (CRESSIE, 1993).

A ACS é o procedimento básico de seleção probabilística em que, na seleção de uma amostra composta de n unidades amostrais, todas as possíveis combinações das n unidades amostrais possuem as mesmas chances de serem selecionadas (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2011).

A ACE consiste no procedimento de amostragem onde uma população heterogênea é dividida em subpopulações ou estratos homogêneos, de modo que a variabilidade dentro dos estratos deve ser menor que a variabilidade da floresta como um todo, de tal modo que ocorrerá uma redução na variância da ACE em relação a ACS (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997).

A AS consiste na seleção das unidades amostrais, a partir de um esquema rígido e preestabelecido de sistematização, com os propósitos de cobrir a população, em toda a sua extensão, e obter um modelo sistemático simples e uniforme de distribuição das unidades amostrais (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2011).

Diversos trabalhos abordaram 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., 2006; 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 dos que os baseados na aleatorização,

observando uma redução no erro de amostragem na ordem de 29,42% da ACE em relação a AS.

Alvarenga et al. (2012), estudando a eficiência da estratificação em um fragmento de cerrado *stricto sensu*, 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% no erro da ACE em relação a 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.

2.2 Sensoriamento Remoto aplicado ao Inventário Florestal

Com os avanços tecnológicos das 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 variáveis dendrométricas com os dados radiométricos existentes nas imagens (TOMPPPO et al., 2008).

As imagens de sensoriamento remoto são utilizadas, atualmente, como uma fonte de dados auxiliares nos inventários florestais e em diversos ramos da Engenharia Florestal. Como dados auxiliares, as informações obtidas nas imagens de sensoriamento remoto sobre as florestas podem não ser adequadas ou suficientemente precisas para uma tarefa específica do inventário florestal (TUOMINEN; FISH; POSO, 2003).

No entanto, a existência de uma correlação linear entre a reflectância das florestas e características dendrométricas foi corroborada por diversos autores, entre eles Almeida et al. (2014), Berra et al. (2012), Foody, Boy e Cutler (2003), Lu et al. (2004), Mäkelä e Pekkarién (2004), Thenkabail et al. (2003) e Watzlawick, Kirchner e Sanquetta (2009), fato esse que permite que os dados auxiliares oriundos das imagens de sensoriamento sejam utilizados para complementar as informações do inventário florestal tradicional realizado em campo.

Diversos estudos vêm sendo realizados com sensores remotos que operam tanto em bandas de faixas largas, como o TM/Landsat e IKONOS, quanto os sensores que operam em bandas de faixas estreitas, como o CASI e o Hyperion EO-1, para a estimativa de variáveis dendrométricas via sensoriamento remoto (ALMEIDA et al., 2014; 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).

Nestes estudos, a estimativa de variáveis dendrométricas é feita, geralmente, por modelos empíricos e semiempíricos, onde parâmetros como fechamento de copa, área basal ou volume de madeira são introduzidos como variáveis dependentes e podem ser preditos ou estimados, utilizando dados contidos em uma imagem gerada por um sensor remotamente situado (TOMPPO et al., 2008).

As imagens de sensoriamento remoto são utilizadas, também, como uma ferramenta para a estratificação de florestas nativas e plantadas. Tradicionalmente, a estratificação de florestas plantadas é realizada com base em informações cadastrais, tais como: a idade, a espécie e o espaçamento (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997). Contudo, essas informações não levam em consideração a distribuição espacial dos diferentes estratos formados e possíveis

relações entre estratos vizinhos. Assim, a utilização de imagens de sensoriamento remoto oferece uma alternativa eficiente na busca de informações complementares que melhor caracterizem os povoamentos florestais, auxiliando, assim, o processo de estratificação.

Espírito Santo et al. (2005) utilizaram de imagens Landsat para a determinação das áreas a serem inventariadas na Floresta Nacional dos Tapajós, bem como para a distribuição dos transectos amostrais em diferentes porções da área de estudo. Esses autores utilizaram a composição 453/RGB para observar diferenças sutis das tipologias vegetais, relacionadas aos aspectos da interação da radiação no dossel da vegetação, para facilitar o delineamento amostral na área de estudo.

Vibrans et al. (2010), durante a execução do Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina (IFFSC), realizaram a seleção das unidades amostrais, a partir de uma estratificação preliminar de floresta e não-floresta, baseada na interpretação de imagens Landsat e SPOT, corroborando o potencial da utilização de imagens de sensoriamento como suporte ao inventário florestal de florestas nativas.

Oliveira (2006) avaliou a eficiência da estratificação de um povoamento florestal, utilizando técnicas de segmentação e classificação orientada ao objeto em imagens Landsat, Spot e QuickBird. Os resultados demonstraram que a segmentação e a posterior classificação dos segmentos foram eficientes, e que o menor erro de inventário foi obtido para a imagem Spot, concluindo, assim, que a resolução espacial é importante na segmentação e estratificação das imagens de sensoriamento remoto para fins de estratificação florestal.

Alvarenga (2012) avaliou o desempenho da segmentação e classificação orientada ao objeto de uma imagem RapidEye na estratificação de um fragmento de cerrado *sensu stricto* e comparou estimativas geradas pela AS com as

estimativas da ACE, constatando que as estimativas da ACE foram mais precisas que as estimativas da AS.

Silva et al. (2014) avaliaram o processo de estratificação de um fragmento de cerrado *stricto sensu* destinado ao inventário florestal, aplicando-se técnicas de interpretação visual de imagens de sensoriamento remoto da série Landsat e compararam as estimativas da AS com as estimativas da ACE. Os autores observaram uma redução de 43% no erro do inventário empregando-se os estimadores da ACE em relação aos estimadores da AS, no fragmento de cerrado estudado, concluindo que o procedimento de estratificação, baseado em interpretação visual de imagens foi eficiente, produzindo estratos homogêneos e reduzindo os erros do inventário florestal.

2.3 Geoestatística

A teoria geoestatística, desenvolvida pela primeira vez para explorações minerárias, foi adotada por muitas disciplinas ambientais, como, por exemplo: hidrologia (CUNHA et al., 2013; MELLO et al., 2012; VIOLA et al., 2010), ciências do solo (BARONI et al., 2013; ELDEIRY; GARCIA, 2010), ciências florestais (BOGNOLA et al., 2008; MELLO et al., 2005, 2006), epidemiologia (SCIARRETTA; TREMATERRA, 2014) e sensoriamento remoto (MENG; CIESZEWSKI; MADDEN, 2009; VIANA et al., 2012).

A geoestatística consiste em um conjunto de métodos estatísticos que analisam a dependência espacial entre as unidades amostrais (autocorrelação) e a obtenção de estimativas da variável de interesse em locais não amostrados (SCIARRETTA; TREMATERRA, 2014). Uma descrição detalhada da teoria geral e dos princípios da geoestatística pode ser encontrada, entre outros, em Chiles e Delfiner (2012), Cressie (1993) e Webster e Oliver (2007) e Yamamoto e Landim (2013).

2.3.1 Krigagem

O interpolador geoestatístico denominado de krigagem foi desenvolvido por Matheron (1963), mas foi Krige (1951) o pioneiro em introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas em minas de ouro na África do Sul, sendo que o termo “krigagem” foi cunhado em sua homenagem (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Segundo Oliver e Webster (2014) krigagem é um termo genérico para vários métodos de mínimos quadrados estritamente relacionados que fornecem previsões lineares não enviesadas, e também alguns tipos não-lineares de previsão.

O estimador da krigagem ordinária é considerado o melhor preditor linear sem viés com variância mínima, e é, de longe, o mais utilizado por pesquisadores de diversas áreas de conhecimento. No entanto, outras formas de krigagem vêm sendo desenvolvidas para contemplar diferentes tipos de dados (por exemplo, krigagem em bloco para os valores médios das áreas locais, krigagem universal quando existe uma tendência espacial, krigagem indicativa para dados binários, cokrigagem para duas ou mais variáveis espacialmente correlacionados, etc.) (SCIARRETTA; TREMATERRA, 2014).

Montes, Hernandez e Canellas (2005) utilizaram a krigagem ordinária para a estimativa da produção de cortiça na Espanha. Os autores demonstraram que todas as variáveis envolvidas na produção de cortiça (diâmetro, área basal, espessura de cortiça, etc.) mostraram-se correlacionadas, espacialmente e a krigagem ordinária apresentou estimativas mais precisas da produção de cortiça que a abordagem tradicional baseada em delineamento amostral.

Mello et al. (2006) utilizaram a krigagem em bloco para a estimativa volumétrica por talhão em povoamento de *Eucalyptus grandis* em comparação ao estimador clássico. Os autores encontraram menores variações do erro

amostral para a krigagem em bloco do que para o estimador clássico, sugerindo a utilização de estimadores geoestatísticos para a estimativa volumétrica por talhão.

Leal, Matricardi e Miguel (2014) utilizaram o interpolador geoestatístico de krigagem para a estimativa de volume de madeira em florestas plantadas. Os autores concluíram que o método de interpolação de krigagem se mostrou eficiente para estimar volume (m^3) no povoamento florestal em estudo.

2.3.2 Cokrigagem

Em situações onde duas variáveis, uma principal e outra secundária, são correlacionadas espacialmente, a estimativa da variável principal pode ser realizada, utilizando-se informações de ambas, através do semivariograma cruzado, sendo esse método denominado de cokrigagem (VIEIRA, 2000).

A cokrigagem fornece um estimador não tendencioso que minimiza a variância, estendendo o estimador de krigagem ao caso de múltiplas variáveis. Segundo Boezio, Costa e Koppe (2006) a principal vantagem da cokrigagem em comparação a outros métodos é a consideração da correlação espacial conjunta entre variáveis, e também a redução do efeito de suavização, em função da variância de cokrigagem ser menor que a variância de krigagem, resultando, assim, em modelos mais consistentes com o fenômeno natural em estudo.

Segundo Eldeiry e Garcia (2010), a cokrigagem é a mais versátil e rigorosa técnica estatística para a estimativa espacial pontual, quando ambas variáveis, primária e secundária, estão disponíveis.

Bognola et al. (2008), estudaram a variabilidade espacial do incremento médio anual (IMA) de *P. taeda*, utilizando a krigagem ordinária e a cokrigagem, considerando como variável auxiliar os teores de argila. Os autores concluíram

que o método da cokrigagem proporciona estimativas mais detalhadas da variável de interesse, mantendo a propriedade de ausência de viés.

Cunha et al. (2013) avaliaram a cokrigagem ordinária, com dados de altitude e distância do mar, em comparação à krigagem ordinária, na espacialização da precipitação pluvial dos períodos anual, seco e úmido, no Estado do Espírito Santo. Os autores concluíram que a interpolação por cokrigagem e o uso de grades regulares para amostragem são preferíveis, principalmente se as variáveis auxiliares são de fácil obtenção e de baixo custo.

Singh e Das (2014) avaliaram a utilização de índices de vegetação como variáveis secundárias na estimativa de biomassa, por meio do método de cokrigagem. Os autores encontraram baixos valores de erros obtidos a partir do método da cokrigagem, utilizando como variável secundária o índice de vegetação NDVI.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os inventários florestais constituem a principal fonte de informações sobre os parâmetros dos povoamentos florestais, sendo de suma importância para subsidiar a tomada de decisões pelo manejador florestal.

Dentre os procedimentos de amostragem utilizados comumente, aqueles baseados na estratificação resultam em estimativas mais precisas do que os procedimentos baseados na aleatorização.

As imagens de sensoriamento remoto têm se mostrado uma fonte eficaz de dados auxiliares para as estimativas de variáveis de interesse florestal.

O emprego de métodos geoestatísticos que utilizam dados auxiliares, como a cokrigagem, permite a estimativa da variável primária em áreas não amostradas com elevada precisão.

REFERÊNCIAS

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. **Imagens de alta resolução e geoestatística na estratificação da fisionomia cerrado para inventários florestais**. 2012. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

ALVARENGA, L. H. V. et al. Desempenho da estratificação em um fragmento de cerrado stricto sensu utilizando interpolador geoestatístico. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 4, p. 675-681, out./dez. 2012.

ANUÁRIO estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012. Brasília: ABRAF, 2013. 148 p.

BARONI, G. et al. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 489, p. 148-159, May 2013.

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, out./dez. 2012.

BOEZIO, M. N. M.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. C. Cokrigagem colocada aplicada ao mapeamento do nível de água subterrânea. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 2, p. 159-164, 2006.

BOGNOLA, I. A. et al. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 373-385, abr./jun. 2008.

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.

CHILES, J. P.; DELFINER, P. **Geostatistics: modeling spatial uncertainty**. 2nded. New York: J. Wiley, 2012.699 p.

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

CUNHA, A. M. et al. Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.9, p.1179-1191, set. 2013.

ELDEIRY, A. A.; GARCIA, L. A. Comparison of ordinary kriging, regression kriging, and cokriging techniques to estimate soil salinity using Landsat images. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 136, n. 6, p. 355-364, June 2010.

ESPIRITO-SANTO, F. D. B. et al. Análise da composição florística e fitossociológica da Floresta Nacional dos Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 35, n. 2, p. 45-48, 2005.

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.

GÓMEZ, C. et al. Modeling forest structural parameters in the Mediterranean pines of central Spain using quickbird-2 imagery and Classification and Regression Tree Analysis (CART). **Remote Sensing**, Washington, v. 4, n. 1, p. 135-159, Jan. 2012.

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, jul./set. 2012.

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. 6, p. 378-390, Apr. 2006.

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, 2007.

KANEGAE JÚNIOR, H. et al. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 123-136, abr./jun. 2006.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, Johannesburg, v.52, p.119-139, 1951.

LEAL, F. A.; MATRICARDI, E. A. T.; MIGUEL, E. P. Interpolador geoestatístico para estimar volume num povoamento de *Eucalyptus urophylla*, em Rio Verde/Goiás. **Nucleus**, Ituverava, v.11, n. 1, p. 153-160, abr. 2014.

LU, D. et al. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.198, n. 12, p. 149-167, Aug. 2004.

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.

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

MELLO, C. R. et al. Distribuição espacial da precipitação e da erosividade da chuva mensal e anual no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1878-1891, nov./dez. 2012.

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.

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

MENG, Q.; CIESZEWSKI, C.; MADDEN, M. Large area forest inventory using Landsat ETM+: a geostatistical approach. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 64, n.1, p. 27-36, 2009.

MONTES, F.; HERNANDEZ, M. J.; CANELLAS, I. A geostatistical approach to cork production sampling in *Quercus suber* forests. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 35, n. 12, p. 2787-2796, Dec. 2005.

OLIVEIRA, A. C. **Geotecnologias na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus spp.*** 2006. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, Amsterdam, v. 113, p. 56-69, Feb. 2014.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba: UFPR, 1997.316 p.

SCIARRETTA, A.; TREMATERRA, P. Geostatistical tools for the study of insect spatial distribution: practical implications in the integrated management of orchard and vineyard pests. **Plant Protection Science**, New Delhi, v.50, n. 2, p. 97-110, 2014.

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

SILVA, S. T. et al. Uso de imagens de sensoriamento remoto para estratificação do cerrado em inventários florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 80, p. 337-343, 2014.

SINGH, T. P.; DAS, S. Predictive analysis for vegetation biomass assessment in Western Ghat region (WG) using geospatial techniques. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, New Delhi, v. 42, n. 3, p. 549-557, 2014.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F. de; SOUZA, A. L. de. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2011. 272 p.

THENKABAIL, P.S. et al. Detecting floristic structure and pattern across topographic and moisture gradients in a mixed species Central African forest using IKONOS and Landsat-7 ETM+ images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 4, n. 3, p. 255-270, June 2003.

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.

TUOMINEN, S.; PEKKARINEN, A. Performance of different spectral and textural aerial photograph features in multi-source forest inventory. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, n. 2, p. 256-268, Jan. 2005.

VIANA, H. et al. Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models. **Ecological Modelling**, London, v. 226, p. 22-35, Feb. 2012.

VIBRANS, A. C. et al. Inventário florístico florestal de Santa Catarina (IFFSC): aspectos metodológicos e operacionais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 64, p. 291-302, 2010.

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.

VIOLA, M. R. et al. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campo Grande, v. 14, n. 9, p. 970-978, set. 2010.

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.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2nded. New York: J. Wiley, 2007. 330 p.

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

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1 Relação entre dados espectrais e variáveis dendrométricas em povoamentos de *Eucalyptus* spp.

****Normas do Boletim de Ciências Geodésicas
(versão submetida, sujeita a modificações)**

Relationship between spectral data and dendrometric variables in Eucalyptus spp.

RESUMO

A compreensão das relações existentes entre dados espectrais e características dendrométricas é fundamental para a utilização do sensoriamento remoto no manejo florestal. O objetivo desse estudo foi: (a) determinar as correlações entre a área basal, altura dominante e volume, e as reflectâncias nas bandas TM das imagens Landsat 5 e em diversos índices de vegetação; (b) explorar o impacto da idade do povoamento de *Eucalyptus* spp. nessas correlações. A área de estudo corresponde a um povoamento clonal de *Eucalyptus* spp. localizado no município de Lagoa Grande, MG. Os dados do inventário foram oriundos de um conjunto de 35 parcelas permanentes, onde foi realizado Inventário Florestal Contínuo (IFC) entre os anos de 2006 e 2011. Os dados espectrais foram obtidos a partir de imagens Landsat 5 TM. As bandas TM4 e TM5 e os índices ND54 e TM5/4 foram as que apresentaram as melhores correlações com a área basal e o volume, enquanto que a banda TM2 apresentou as melhores correlações com a altura dominante. Os dados espectrais melhor se correlacionaram com as variáveis área basal e volume na medição aos 5 anos, enquanto que a altura dominante melhor se correlacionou com os dados espectrais na medição aos 7 anos.

Palavras-chaves: Índices de vegetação. Bandas espectrais. Correlações. Volume. Área basal. Altura dominante.

ABSTRACT

Understanding the relationship between spectral data and dendrometric characteristics is essential for an efficient use of remote sensing data in forest management. Hence, the aims of this study were: (a) to determine the correlation between forest stand characteristics (viz., basal area, dominant height, and volume) and reflectance variables derived from Landsat TM spectral bands and (b) to understand how stand age impact these correlations. The study area is located in the municipality of Lagoa Grande, MG and covers plantations of *Eucalyptus* spp. Sampling data comprised a set of 35 permanent plots from a Continuous Forest Inventory (CFI) conducted between 2006 and 2011. Spectral data were derived from Landsat 5 TM images. The results showed that TM4 and TM5 spectral bands, as well as spectral indices ND54 and TM5/4, were better correlated with basal area and volume, while TM2 spectral band was better correlated with dominant height. Basal area and volume were better correlated with spectral data measured from stands with 5 years old, while dominant height was better correlated with spectral data measured from stands with 7 years old.

Keywords: Vegetation indices. Spectral bands. Correlations. Volume. Basal area. Dominant height.

1. INTRODUÇÃO

As questões ambientais e econômicas enfrentadas atualmente pelos mais diversos setores da sociedade demandam informações acuradas sobre grandes extensões territoriais. No setor florestal, a estimativa de parâmetros importantes para a tomada de decisão em escalas regionais, visando tanto a conservação ambiental como a produção econômica, tem recebido suporte das geotecnologias, principalmente através da utilização de dados coletados por sensores abordo de satélites (INPE, 2015a; INPE, 2015b; MMA, 2015). Sendo assim, o conhecimento das relações existentes entre os dados derivados de sensoriamento remoto e os parâmetros de interesse para o setor florestal torna-se fundamental para a aplicação eficiente das geotecnologias e obtenção de resultados confiáveis.

Diversos processos que caracterizam os ecossistemas florestais apresentam uma relação direta com a idade da floresta, como por exemplo, a fotossíntese, o índice de área foliar, as ciclagens de nutrientes e da água, e a produção de

biomassa (CROFT; CHEN; NOLAND, 2014). A idade da floresta também desempenha um papel importante na determinação das relações entre características dendrométricas e dados de sensoriamento remoto (LI et al., 2014).

Segundo Li et al. (2014) nas imagens de sensoriamento remoto, a estrutura do dossel, o índice de área foliar, e a reflexão do sub-bosque são os principais fatores que regulam as mudanças na reflectância das florestas com diferentes idades. Fatores como o sol, os ângulos de visada e a fenologia também apresentam efeitos consideráveis sobre a reflectância dos dosséis florestais.

Observações consistentes, repetitivas e sistemáticas do desenvolvimento das florestas por meio de imagens de sensoriamento remoto permitem-nos caracterizar as relações existentes entre os dados espectrais e as características dendrométricas ao longo do crescimento da floresta, principalmente no caso de florestas plantadas, onde se tem controle da idade de desenvolvimento das árvores.

Alguns estudos demonstraram que as imagens Landsat TM são muito úteis no manejo florestal quando combinadas com as medições realizadas em campo pelo inventário florestal (VIANA et al., 2012; TOMPPPO et al., 2008; MÄKELÄ; PEKKARIEN, 2004; FOODY; BOY; CUTLER, 2003). A informação espectral detectada por sensoriamento remoto apresenta uma forte relação com as características dendrométricas, tanto de florestas plantadas (BERRA et al., 2012; CANAVESI et al., 2009; WATZLAWICK; KIRCHNER; SANQUETTA, 2009) como de florestas nativas (ZHENG et al., 2007; MÄKELÄ; PEKKARIEN, 2004; LU et al., 2004; THENKABAIL et al., 2003; FOODY; BOY; CUTLER, 2003).

A compreensão das relações existentes entre dados espectrais e características dendrométricas ao longo do desenvolvimento da floresta é fundamental para a utilização do sensoriamento remoto no manejo de florestas

plantadas. No entanto, ainda existe a necessidade de mais esforços para determinar como a idade das florestas afeta essas relações e qual idade é mais apropriada para obtenção de dados de imagens de sensoriamento remoto visando à estimativa de parâmetros florestais. Sendo assim, o presente estudo visa contribuir para a compreensão de como as correlações entre os dados espectrais e as características dendrométricas são afetadas pela idade do povoamento florestal e quais são os dados espectrais que melhor se correlacionam com as características dendrométricas independente da idade.

Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi: (a) determinar as correlações entre as características dendrométricas área basal, altura dominante e volume e os valores de reflectância nas bandas TM das imagens Landsat 5 e em diversos índices de vegetação; (b) explorar o impacto da idade do povoamento de *Eucalyptus* spp. nessas correlações.

2.MATERIAL E MÉTODOS

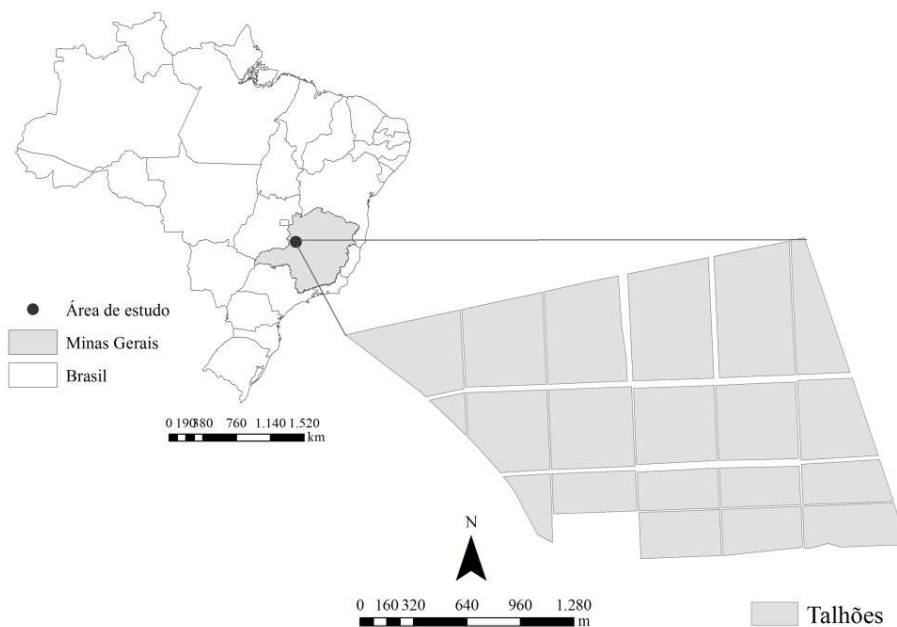
A área de estudo corresponde a um povoamento clonal de *Eucalyptus* spp., pertencentes à empresa Vallourec Florestal, localizado no município de Lagoa Grande, na região do Alto Paranaíba, no noroeste do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas 17°43'00"S - 17°44'00"S e 46°32'00"W - 46°33'00"W e altitude de 560 metros (Figura 1).

O clima nessa região é tropical úmido e seco de savana, tipo Aw segundo a classificação de Köppen, com meses mais secos durante o inverno. As principais classes de solos encontradas são Latossolos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Flúvicos e Gleissolos (EMPRABA, 2006).

Este estudo foi desenvolvido em um conjunto de 20 talhões (Figura 1) plantados entre 01/04/2004 e 29/05/2004, em espaçamento de 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m, totalizando uma área de 362,2 hectares. Os dados do inventário foram oriundos de informações obtidas de um conjunto de 35 parcelas permanentes de

400 m², onde foi realizado Inventário Florestal Contínuo (IFC), entre os anos de 2006 e 2011. O IFC consiste de uma rede de parcelas permanentes monitoradas periodicamente com o objetivo de verificar as mudanças ocorridas nas florestas, instaladas quando os povoamentos atingem dois ou três anos de idade, no caso de povoamentos de *Eucalyptus* (KANEGAE JÚNIOR et al., 2006).

Figura 1 - Localização geográfica da área de estudo.



O procedimento de amostragem adotado foi o Sistemático Desencontrado (COCHRAN, 1977), lançando-se aproximadamente uma parcela circular a cada 10 hectares de floresta. Em todas as parcelas, mediram-se a circunferência a 1,30 m do solo (CAP) de todos os fustes utilizando fita métrica, a altura total das quinze primeiras árvores com fustes normais (sem bifurcação ou qualquer outro defeito) e a altura das árvores dominantes, caso estas não

estivessem entre as quinze alturas já mensuradas da parcela, conforme o conceito de Assmann, isto é, as alturas das 100 árvores mais grossas por hectare (ASSMANN, 1970). Além disso, todas as parcelas foram georreferenciadas. A estimativa do volume foi realizada por meio da equação volumétrica, associada à equação hipsométrica, usada na estimativa das alturas das demais árvores dentro da parcela. A equação de volume foi obtida por idade, a partir da cubagem rigorosa referente a cada uma das medições realizadas na floresta, enquanto que a relação hipsométrica foi realizada por parcela.

Os dados das imagens de sensoriamento remoto foram obtidos a partir de um conjunto de imagens do satélite Landsat 5 TM com data correspondente com a coleta dos dados em campo pelo IFC, nas datas de passagem de 17/06/2006, 22/07/2007, 06/06/2008, 25/06/2009, 12/06/2010 e 27/03/2011, na órbita 220 ponto 072; com resolução espacial de 30 m; nas bandas TM1 (0,45 – 0,52 μm), TM2 (0,52 – 0,60 μm), TM3 (0,63 – 0,69 μm), TM4 (0,76 – 0,90 μm), TM5 (1,55 – 1,75 μm) e TM7 (2,18 – 2,35 μm), correspondente as regiões espectrais do azul, verde, vermelho, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho distante, respectivamente. As imagens foram adquiridas no banco de dados do USGS (*United States Geological Survey*) já corrigidas geometricamente e radiometricamente. Complementarmente, foram calculados índices de vegetação a partir das bandas espectrais das imagens Landsat 5 TM. Esses índices de vegetação estão apresentados na Tabela 1.

A partir das coordenadas geográficas das parcelas permanentes, extraiu-se a resposta espectral destas nas bandas TM das imagens Landsat e nos índices de vegetação, coletando-se os valores de reflectância dos pixels correspondentes à localização dos centroides das parcelas nas imagens em cada ano de medição da floresta. As variáveis dendrométricas área basal (G), altura dominante (HD) e volume de madeira (V) foram associadas com os dados espectrais através do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) em cada ano de medição. A partir

dessas correlações foi possível explorar a relação entre as variáveis dendrométricas e as respostas espectrais do povoamento de *Eucalyptus* spp. Em diferentes idades. O coeficiente de Pearson, bem como os p-valores associados às estatísticas do teste foram gerados utilizando-se o programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014).

Tabela 1 - Índices de vegetação utilizados nesse estudo.

Índices de Vegetação	Fórmula
Razões simples	
TM4/3	$TM4/TM3$
TM5/3	$TM5/TM3$
TM5/4	$TM5/TM4$
TM5/7	$TM5/TM7$
Razões normalizadas	
NDVI	$(TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)$
ND53	$(TM5 - TM3)/(TM5 + TM3)$
ND54	$(TM5 - TM4)/(TM5 + TM4)$
ND57	$(TM5 - TM7)/(TM5 + TM7)$
ND32	$(TM3 - TM2)/(TM3 + TM2)$
Índices de vegetação complexos	
SAVI	$((TM4 - TM3)/(TM4 + TM3 + L))(1 + L)$
MSAVI	$((2TM4 + 1) - \sqrt{(2TM4 + 1)^2 - 8(TM4 - 2TM3)})/2$

Onde: ND= Diferença normalizada, NDVI= *Normalized Difference Vegetation Index*; SAVI=*Soil-Adjusted Vegetation Index*; MSAVI = *Modified Soil-Adjusted Vegetation Index*.

3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

As características dendrométricas apresentaram correlações diretas e inversas com os valores de reflectância nas bandas TM e tais relações variaram dependendo da idade de medição da floresta. A Tabela 2 resume os coeficientes

de correlação entre as características dendrométricas e os valores de reflectância nas bandas TM nas seis idades de medição do povoamento florestal.

A área basal (G) apresentou altos valores de correlação com as bandas TM4, TM5 e TM7 em todas as idades de medição da floresta, com exceção da medição aos 2 anos de idade onde a banda TM4 não apresentou correlação significativa com a área basal. Aos 3, 6 e 7 anos, a área basal também apresentou valores significativos de correlação com a banda TM3.

A altura dominante (HD) apresentou os melhores valores de correlação com a banda TM2 em todas as idades de medição, com exceção da medição aos 5 anos onde a altura dominante não apresentou valores significativos de correlação com as bandas espectrais.

O volume (V) apresentou altos valores de correlação com as bandas TM5 e TM7 em todas as idades de medição da floresta, com exceção da medição aos 6 anos de idade onde o volume não apresentou valores significativos de correlação com estas bandas.

Segundo Meng, Cieszewski e Madden (2009) a banda TM1 das imagens Landsat contribui pouco para a análise da vegetação, uma vez que a medida que a cobertura da folha aumenta, pouca mudança acontece na reflectância da vegetação na banda TM1, fato este que pode explicar as baixas correlações encontradas entre as variáveis dendrométricas e a reflectância na banda TM1.

A banda TM2 é normalmente aplicada na avaliação do vigor da vegetação, sendo que os sítios mais produtivos tendem a apresentar árvores mais vigorosas e maiores valores de altura dominante, explicando assim os maiores valores de correlação apresentados pela banda TM2 e a altura dominante. As bandas TM4 e TM5 são normalmente aplicadas na avaliação da biomassa da cobertura vegetal (MENG; CIESZEWSKI; MADDEN, 2009), corroborando os melhores valores de correlação encontrados entre essas bandas e a área basal e o volume.

Tabela 2 - Coeficientes de Pearson (r) entre as características dendrométricas e as bandas espectrais utilizadas nesse estudo.

Variável	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
2 anos						
G	0,297 ^{ns}	0,168 ^{ns}	-0,166 ^{ns}	0,236 ^{ns}	-0,611*	-0,412*
HD	-0,181 ^{ns}	-0,444*	-0,090 ^{ns}	-0,409*	-0,028 ^{ns}	-0,078 ^{ns}
V	0,204 ^{ns}	-0,057 ^{ns}	-0,159 ^{ns}	0,025 ^{ns}	-0,478*	-0,360*
3 anos						
G	-0,129 ^{ns}	0,158 ^{ns}	-0,380*	0,570*	-0,515*	-0,461*
HD	-0,151 ^{ns}	-0,632*	-0,349*	-0,482*	-0,145 ^{ns}	-0,133 ^{ns}
V	-0,191 ^{ns}	-0,320 ^{ns}	-0,484*	0,052 ^{ns}	-0,432*	-0,380*
4 anos						
G	-0,114 ^{ns}	0,097 ^{ns}	-0,332 ^{ns}	0,539*	-0,502*	-0,447*
HD	-0,325 ^{ns}	-0,620*	-0,253 ^{ns}	-0,218 ^{ns}	0,003 ^{ns}	-0,027 ^{ns}
V	-0,366*	-0,433*	-0,456*	0,231 ^{ns}	-0,375*	-0,349*
5 anos						
G	-0,117 ^{ns}	0,162 ^{ns}	-0,186 ^{ns}	0,799*	-0,666*	-0,684*
HD	0,256 ^{ns}	-0,133 ^{ns}	-0,109 ^{ns}	-0,241 ^{ns}	0,038 ^{ns}	0,013 ^{ns}
V	0,095 ^{ns}	-0,063 ^{ns}	-0,206 ^{ns}	0,380*	-0,448*	-0,505*
6 anos						
G	-0,112 ^{ns}	0,138 ^{ns}	-0,429*	0,646*	-0,608*	-0,647*
HD	-0,313 ^{ns}	-0,703*	-0,309 ^{ns}	-0,537*	0,139 ^{ns}	0,185 ^{ns}
V	-0,288 ^{ns}	-0,400*	-0,444*	0,001 ^{ns}	-0,251 ^{ns}	-0,228 ^{ns}
7 anos						
G	-0,303 ^{ns}	-0,176 ^{ns}	-0,602*	0,459*	-0,655*	-0,653*
HD	-0,291 ^{ns}	-0,735*	0,032 ^{ns}	-0,692*	0,316 ^{ns}	0,298 ^{ns}
V	-0,388*	-0,495*	-0,514*	0,060 ^{ns}	-0,401*	-0,414*

Onde: TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7 = reflectância nas bandas do azul, verde, vermelho, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho distante, respectivamente; G = área basal (m²/ha); HD = altura dominante (m); V = volume (m³/ha); ^{ns} não significativo a 5% e *significativo a 5%.

Lu et al. (2004) exploraram as relações entre os parâmetros florestais e as respostas espectrais em imagens Landsat Thematic Mapper (TM) de três áreas

de estudo na bacia Amazônia Oriental (Altamira, Bragantina e Ponta de Pedras) e afirmam que a banda TM5 é a banda espectral que esta mais fortemente correlacionada com os parâmetros das florestais, pois é independente das diferenças entre os ambientes biofísicos. Nesse estudo, o povoamento de *Eucalyptus* spp. apresentou a mesma tendência, onde os melhores valores de correlação com a área basal e o volume foram obtidos com a reflectância na banda TM5, independente da idade analisada.

Os valores de coeficiente de correlação entre as características dendrométricas e os índices de vegetação estão apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4. Nem todos os índices de vegetação apresentaram-se significativamente relacionados com as características dendrométricas em todas as idades de medição da floresta. No entanto, os índices de vegetação apresentaram melhores correlações com as características dendrométricas que as reflectâncias nas bandas espectrais, corroborando os resultados obtidos por Lu et al. (2004).

Os índices de vegetação que incluem em sua composição as bandas TM4 e TM5, como o ND54 e TM5/4, apresentaram altos valores de correlação com a área basal em todas as idades de medição da floresta. Com exceção da medição aos 2 anos, os índices NDVI, TM4/3, SAVI e MSAVI também apresentaram altos valores de correlação com a área basal.

A altura dominante apresentou melhores valores de correlação com os índices de vegetação nas medições aos 4, 6 e 7 anos. Aos 4 e 6 anos, a altura dominante melhor se correlacionou com os índices ND53 e TM5/3. Aos 7 anos, a altura dominante apresentou valores de correlação significativos com todos os índices de vegetação estudados, com destaque para o SAVI ($r = -0,641$) e MSAVI ($r = -0,610$).

O volume apresentou os melhores valores de correlação com os índices NDVI, ND54 e TM5/4 aos 5 anos de idade. Aos 6 e 7 anos, o volume apresentou

valores significativos de correlação apenas com o índice NDVI, porém de baixa magnitude.

Tabela 3 - Coeficientes de Pearson (r) entre as características dendrométricas e os índices de vegetação (razões normalizadas) utilizados nesse estudo.

Variável	NDVI	ND53	ND54	ND57	ND32
2 anos					
G	0,250 ^{ns}	-0,398*	-0,656*	-0,026 ^{ns}	-0,296 ^{ns}
HD	-0,069 ^{ns}	0,094 ^{ns}	0,188 ^{ns}	0,047 ^{ns}	0,375*
V	0,165 ^{ns}	-0,271 ^{ns}	-0,430*	0,026 ^{ns}	-0,065 ^{ns}
3 anos					
G	0,608*	-0,037 ^{ns}	-0,720*	0,281 ^{ns}	-0,572*
HD	0,113 ^{ns}	0,346*	0,124 ^{ns}	0,101 ^{ns}	0,408*
V	0,483*	0,210 ^{ns}	-0,392*	0,233 ^{ns}	-0,102 ^{ns}
4 anos					
G	0,443*	-0,229 ^{ns}	-0,538*	0,299 ^{ns}	-0,485*
HD	0,115 ^{ns}	0,584*	0,070 ^{ns}	0,021 ^{ns}	0,141 ^{ns}
V	0,427*	0,302*	-0,350*	0,219 ^{ns}	-0,252 ^{ns}
5 anos					
G	0,812*	-0,611*	-0,878*	0,457*	-0,480*
HD	-0,026 ^{ns}	0,224 ^{ns}	0,108 ^{ns}	-0,019 ^{ns}	0,053 ^{ns}
V	0,543*	-0,280 ^{ns}	-0,538*	0,373*	-0,178
6 anos					
G	0,771*	-0,172 ^{ns}	-0,733*	0,515*	-0,538*
HD	-0,083 ^{ns}	0,542*	0,361*	-0,255 ^{ns}	0,287 ^{ns}
V	0,382*	0,258 ^{ns}	-0,174 ^{ns}	0,100 ^{ns}	-0,102 ^{ns}
7 anos					
G	0,637*	-0,278 ^{ns}	-0,596*	0,559*	-0,405*
HD	-0,451*	0,560*	0,550*	-0,383*	0,574*
V	0,337*	0,058 ^{ns}	-0,242 ^{ns}	0,300 ^{ns}	-0,088 ^{ns}

Onde: ND= Diferença normalizada, NDVI= *Normalized Difference Vegetation Index*; G = área basal (m²/ha); HD = altura dominante (m); V = volume (m³/ha); ^{ns} não significativo a 5% e *significativo a 5%.

Tabela 4 - Coeficientes de Pearson (r) entre as características dendrométricas e os índices de vegetação (razões simples e índices de vegetação complexos) utilizados nesse estudo.

Variável	TM4/3	TM5/3	TM5/4	TM5/7	SAVI	MSAVI
2 anos						
G	0,199 ^{ns}	-0,393*	-0,660*	0,010 ^{ns}	0,316 ^{ns}	0,318 ^{ns}
HD	-0,135 ^{ns}	0,097 ^{ns}	0,164 ^{ns}	0,042 ^{ns}	-0,355*	-0,296 ^{ns}
V	0,098 ^{ns}	-0,261 ^{ns}	-0,444*	0,052 ^{ns}	0,108 ^{ns}	0,130 ^{ns}
3 anos						
G	0,608*	-0,015 ^{ns}	-0,712*	0,327 ^{ns}	0,698*	0,706*
HD	0,104 ^{ns}	0,350*	0,114 ^{ns}	0,116 ^{ns}	-0,287 ^{ns}	-0,161 ^{ns}
V	0,463*	0,229 ^{ns}	-0,397*	0,271 ^{ns}	0,270 ^{ns}	0,357*
4 anos						
G	0,436*	-0,223 ^{ns}	-0,494*	0,273 ^{ns}	0,529*	0,528*
HD	0,126 ^{ns}	0,594*	0,023 ^{ns}	0,015 ^{ns}	-0,088 ^{ns}	-0,054 ^{ns}
V	0,438*	0,317 ^{ns}	-0,353*	0,188 ^{ns}	0,328 ^{ns}	0,355*
5 anos						
G	0,763*	-0,625*	-0,872*	0,430*	0,857*	0,858*
HD	-0,124 ^{ns}	0,202 ^{ns}	0,040 ^{ns}	-0,048 ^{ns}	-0,176 ^{ns}	-0,180 ^{ns}
V	0,438*	-0,305	-0,583*	0,336*	0,466*	0,463*
6 anos						
G	0,675*	-0,145 ^{ns}	-0,755*	0,506*	0,724*	0,734*
HD	-0,177 ^{ns}	0,550*	0,315 ^{ns}	-0,281 ^{ns}	-0,434*	-0,387*
V	0,255 ^{ns}	0,284 ^{ns}	-0,218 ^{ns}	0,082 ^{ns}	0,115 ^{ns}	0,150 ^{ns}
7 anos						
G	0,564*	-0,264 ^{ns}	-0,623*	0,523*	0,525*	0,546*
HD	-0,493*	0,542*	0,510*	-0,421*	-0,641*	-0,610*
V	0,250 ^{ns}	0,066 ^{ns}	-0,282 ^{ns}	0,250 ^{ns}	0,144 ^{ns}	0,177 ^{ns}

Onde: SAVI = *Soil- Adjusted Vegetation Index*; MSAVI = *Modified Soil-Adjusted Vegetation Index*; G = área basal (m²/ha); HD = altura dominante (m); V = volume (m³/ha); ^{ns} não significativo a 5% e *significativo a 5%.

Os índices de vegetação que utilizam as bandas espectrais da região do infravermelho sofrem menor dispersão atmosférica (JENSEN, 2009), fato este

que pode contribuir com os maiores valores de correlação apresentados por estes índices e as variáveis dendrométricas em comparação com os índices que utilizam em sua composição as bandas da região do visível.

Os maiores valores de correlação entre os dados espectrais e as características dendrométricas área basal e volume na idade de 5 anos e o decréscimo das correlações aos 6 e 7 anos pode ser explicado pela possível saturação em qualquer uma das bandas espectrais, e ainda pela presença de sombras que ocasionem oscilações inesperadas nos valores de reflectância dos dosséis, resultando assim em um comportamento irregular de resposta espectral desses alvos (BERRA et al., 2012). Segundo Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2012) uma vez que uma região espectral (ou uma banda espectral) atinge seu ponto de saturação, o crescimento da vegetação não resulta em alterações nos valores de reflectância nessa região espectral.

Para estudos de crescimento e produção em povoamentos de *Eucalyptus* spp. com diferentes idades recomenda-se a utilização de dados espectrais obtidos a partir das bandas TM4 e TM5 de imagens Landsat 5 TM como variáveis auxiliares na estimativa das características dendrométricas área basal e volume, assim como os índices de vegetação que incluem em sua composição estas bandas, como o ND54 e TM5/4. Já para a estimativa da variável dendrométrica altura dominante, recomenda-se a utilização de dados espectrais obtidos a partir da banda TM2 de imagens Landsat 5 TM independente da idade do povoamento.

Berra et al. (2012) relacionando a variável dendrométrica volume de *Eucalyptus* sp. com índices de vegetação obtidos em imagens TM do Landsat 5, encontraram correlação positiva de 0,79 entre o NDVI e o volume de madeira (m³/ha) e 0,82 entre TM4/3 e o volume de madeira (m³/ha). Nesse estudo os índices NDVI e TM4/3 também se relacionaram positivamente com o volume de madeira (m³/ha), porém em menor magnitude.

4. CONCLUSÕES

As bandas TM4 e TM5 das imagens Landsat 5 TM foram as que melhor se correlacionaram com as variáveis área basal e volume, enquanto que a banda TM2 apresentou os melhores valores de correlação com a altura dominante.

Os índices de vegetação que incluem em sua composição as bandas TM4 e TM5, como o ND54 e TM5/4, foram os que apresentaram os melhores valores de correlação com as variáveis dendrométricas.

A idade do povoamento de *Eucalyptus* spp. afetou diretamente as correlações entre os dados espectrais e as características dendrométricas. A área basal e o volume melhor se correlacionaram com os dados espectrais na medição aos 5 anos, enquanto que a altura dominante melhor se correlacionou com os dados espectrais na medição aos 7 anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSMANN, E. *The principles of forest yield study*. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506p.
- 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, out./dez. 2012.
- CANAVESI, V. *et al.* Estimativa de volume de madeira em plantios de *Eucalyptus* spp. utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 539-549, maio/jun. 2010.
- COCHRAN, W. G. *Sampling techniques*. 3. ed. New York: J. Wiley, 1977. 555 p.
- CROFT, H.; CHEN, J. M.; NOLAND, T. L. Stand age effects on Boreal forest physiology using a long time-series of satellite data. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 328, p. 202–208, 2014.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 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*, v. 85, p. 463–474, June 2003.
- KANEGAE JÚNIOR, H. *et al.* Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos como instrumento de estratificação de povoamentos clonais

- de *Eucalyptus sp. Cerne*, Lavras, MG, v. 12, n. 2, p. 123-136, abr./jun. 2006.
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). *Projeto PRODES: monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite*. 2015a. Acesso: 24/03/2015. <http://www.obt.inpe.br/prodes/>.
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). *CANASAT: Monitoramento da Cana-de-açúcar via imagens de satélite*. 2015B. Acesso: 24/03/2015. <http://http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/>.
- JENSEN, J. R. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.
- LI, D. *et al.* Estimating the age of deciduous forests in northeast China with Enhanced Thematic Mapper Plus data acquired in different phenological seasons. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 8, n. 1, p. 112-127, 2014.
- LU, D. *et al.* Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, v.198, p. 149–167, Aug 2004.
- MÄKELÄ, H.; PEKKARIEN, A. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. *Forest Ecology and Management*, v. 196, p. 245–255, July 2004.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. *Cadastro Ambiental Rural*. 2015. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/desenvolvimento-rural/cadastro-ambiental-rural>. Acesso em: 24 mar 2015.
- MENG, Q.; CIESZEWSKI, C.; MADDEN, M. Large area forest inventory using Landsat ETM+: A geostatistical approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, v. 64, n .1, p. 27–36, 2009.
- PONZONI, F. J., SHIMABUKURO, Y. E. KUPLICH, T. M. *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. 2. ed. atual. ampl. São Paulo: oficina de Textos, 2012. 160 p.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: < <http://www.R-project.org> >.
- THENKABAIL, P.S. *et al.* Detecting floristic structure and pattern across topographic and moisture gradients in a mixed species Central African forest using IKONOS and Landsat-7 ETM+ images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 4, p. 255-270, June 2003.
- TOMPPO, E. *et al.* Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, p. 1982–1999, May 2008.
- VIANA, H. *et al.* Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubl and above-ground biomass using forest inventory data, remotely

- sensed imagery and spatial prediction models. *Ecological modelling*, London, v. 226, p. 22-35, Feb. 2012.
- 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.
- ZHENG, G. et al. Combining remote sensing imagery and forest age inventory for biomass mapping. *Journal of Environmental Management*, v. 85, p. 616–623, 2007.

ARTIGO 2 Estratificação de povoamentos de eucaliptos por meio de krigagem e cokrigagem

****Normas da Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira
(versão submetida, sujeita a modificações)**

Resumo – O objetivo desse estudo foi avaliar o potencial da utilização de interpoladores geostatísticos na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus* spp., e comparar as estimativas da amostragem casual estratificada (ACE) com as estimativas da amostragem sistemática (AS) para a variável de interesse volume em diferentes intensidades amostrais na idade de corte. A área de estudo corresponde a um povoamento clonal de *Eucalyptus* spp. localizado no município de Lagoa Grande, MG. O inventário florestal foi realizado no ano de 2011, onde foram consideradas quatro situações com diferentes intensidades amostrais. Utilizou-se como variável auxiliar a reflectância na banda TM5 de uma imagem Landsat 5 TM, onde foram coletados quatro conjunto amostrais de pontos. Realizou-se a estratificação da área com base na krigagem ordinária da área basal e da reflectância na banda TM5 e com base na cokrigagem dessas variáveis. As variáveis área basal e reflectância na banda TM5 apresentaram-se espacialmente estruturadas. A krigagem ordinária e a cokrigagem ordinária apresentaram-se eficientes na definição dos estratos. Os estimadores da ACE foram mais precisos que da AS. A área basal e a reflectância na banda TM5 podem ser utilizadas individualmente (krigagem ordinária) ou em conjunto (cokrigagem ordinária) como ferramentas de estratificação pelas empresas florestais.

Termos para indexação: *Eucalyptus* spp., inventário florestal, erro de amostragem.

Stratification of eucalyptus plantations through kriging and cokriging

Abstract – The aim of this study was to evaluate the potential use of geostatistical interpolation and remote sensing images for the stratification of *Eucalyptus* spp. stands, as well as to compare the volume estimated at the cutting age for different sampling intensities using two sampling designs: the random stratified sampling (ACE) and the systematic sampling (AS). The study area is located in the municipality of Lagoa Grande, MG and is covered by *Eucalyptus* spp. plantations. The forest inventory was conducted in 2011, considering four situations with different sampling intensities. The reflectance values of band 5 image from the Landsat 5 TM sensor was used as auxiliary variable. The stratification of the area was carried out based on ordinary kriging of basal area data and reflectance values in TM5 band, as well as on the ordinary cokriging of these variables. The basal area data and the reflectance values were spatially structured. The ordinary kriging and ordinary cokriging showed to be efficient in defining the strata since the estimators of ACE were more accurate than the estimators of AS. The basal area data and the reflectance values in TM5 band can be used individually (ordinary kriging) or together (ordinary cokriging) as stratification tools by forestry companies.

Index terms: *Eucalyptus* spp., forest inventory, sampling error.

Introdução

O Inventário Florestal Contínuo (IFC) é o método de amostragem mais utilizado no Brasil pelas empresas reflorestadoras para acompanhar o crescimento da floresta. O IFC consiste de uma rede de parcelas permanentes monitoradas periodicamente com o objetivo de verificar as mudanças ocorridas

nas florestas. Nos povoamentos de *Eucalyptus* spp., as parcelas são instaladas entre dois a três anos de idade (KANEGAE JÚNIOR et al., 2006).

Durante o ciclo da floresta, a manutenção e o processamento das parcelas do IFC têm um custo significativo no processo de produção florestal e, no entanto, as informações obtidas com o processamento do IFC não são suficientes para gerar estimativas seguras sobre o volume e sobre o erro do inventário por talhão na idade de corte (MELLO et al., 2006), havendo a necessidade de se efetuar o inventário pré-corte.

O inventário pré-corte é realizado a partir de parcelas temporárias lançadas com uma maior intensidade amostral em comparação ao IFC, naqueles talhões definidos para o corte de acordo com o plano de suprimento da empresa, obtendo-se assim estimativas mais precisas, porém a um custo mais elevado (SCOLFORO; MELLO, 2006).

A utilização de interpoladores geoestatísticos na estratificação dos povoamentos florestais surge como uma alternativa para a obtenção de maior precisão do IFC (KANEGAE JÚNIOR et al., 2006; MELLO et al., 2006; GUEDES et al., 2012), eliminando-se assim a necessidade da realização do inventário pré-corte. Tradicionalmente, a estratificação de florestas plantadas é realizada com base em informações cadastrais, tais como a idade, a espécie, o espaçamento e o regime de manejo (KANEGAE JÚNIOR et al., 2007; ASSIS et al., 2009).

Contudo, essas informações não levam em consideração a distribuição espacial dos diferentes estratos formados e possíveis relações entre estratos vizinhos. Assim, a utilização de interpoladores geoestatísticos, como a krigagem ordinária e a cokrigagem ordinária, oferece uma alternativa eficiente na busca de informações complementares que melhor caracterizem os povoamentos florestais (MELLO et al., 2005; BOGNOLA et al., 2008; MELLO et al., 2009; MENG; CIESZEWSKI; MADDEN, 2009; ALVARENGA et al., 2012; VIANA

et al., 2012; LEAL et al., 2014; PELISSARI et al., 2014; SINGH; DAS, 2014) auxiliando, assim, o processo de estratificação.

Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi avaliar o potencial da utilização dos interpoladores geoestatísticos krigagem ordinária e cokrigagem ordinária na estratificação de povoamentos de *Eucalyptus* spp., e comparar as estimativas da amostragem casual estratificada (ACE) com as estimativas da amostragem sistemática (AS) para a variável de interesse volume (m^3/ha) em diferentes intensidades amostrais na idade de corte.

Material e Métodos

A área de estudo corresponde a um povoamento clonal de *Eucalyptus* spp., pertencente à empresa Vallourec Florestal, localizado no município de Lagoa Grande, na região do Alto Paranaíba, no noroeste do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas 17°43'00" S - 17°44'00" S e 46°32'00" W - 46°33'00" W e altitude de 560 metros.

O clima nessa região é tropical úmido e seco de savana, tipo Aw segundo a classificação de Köppen, com meses mais secos durante o inverno. As principais classes de solos encontradas são Latossolos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Flúvicos e Gleissolos.

Este estudo foi desenvolvido em um conjunto de 20 talhões plantados entre 01/04/2004 e 29/05/2004, em espaçamento de 3,0 x 2,0 m e 3,0 x 3,0 m, totalizando uma área de 362,2 hectares. Os dados do inventário foram oriundos de informações obtidas a partir de parcelas de 201,1 m^2 e 400 m^2 , onde foi realizado o inventário florestal no ano de 2011, correspondente com a idade de corte do povoamento florestal.

O procedimento de amostragem adotado no inventário florestal foi o Sistemático Desencontrado (COCHRAN, 1977). Foram consideradas quatro situações com diferentes intensidades amostrais (IA) (Figura 1): IA1: lançando-

se aproximadamente uma parcela circular de 400 m² a cada 10 hectares de floresta, resultando em uma amostra de 35 parcelas, correspondente com a intensidade amostral adotada no inventário florestal contínuo (IFC); IA2: lançando-se aproximadamente uma parcela circular de 201,1 m² a cada 5 hectares de floresta, resultando em uma amostra de 72 parcelas; IA3: lançando-se aproximadamente uma parcela circular de 201,1 m² a cada 3 hectares de floresta, resultando em uma amostra de 120 parcelas e IA4: lançando-se aproximadamente uma parcela circular de 201,1 m² a cada 1,6 hectares de floresta, resultando em uma amostra de 222 parcelas. As situações IA2, IA3 e IA4 correspondem às intensidades amostrais comumente adotadas no inventário pré-corte (IPC) pelas empresas florestais.

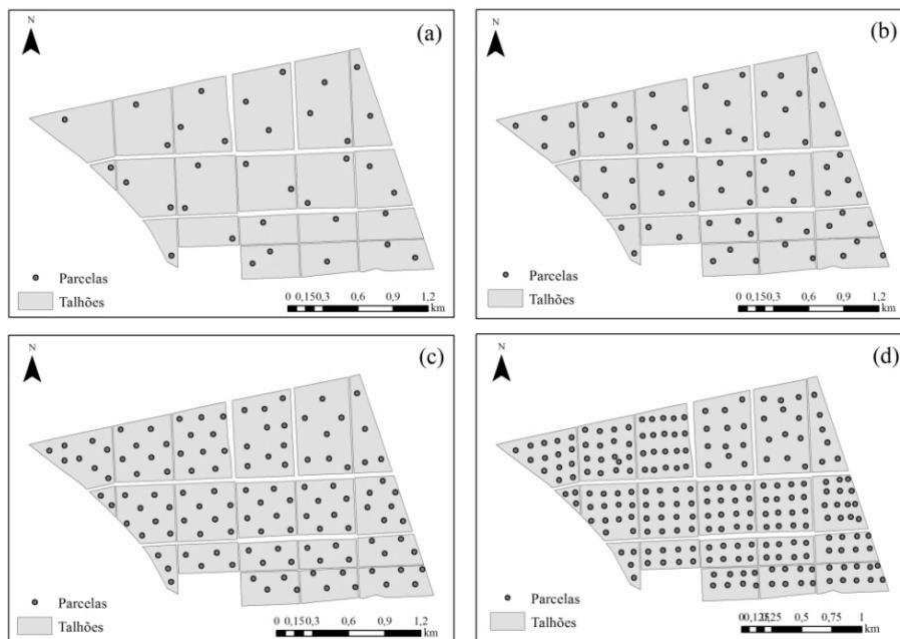


Figura 1. Diferentes intensidades amostrais do inventário florestal: (a) IA1; (b) IA2; (c) IA3 e (d) IA4.

Em todas as parcelas, mediram-se a circunferência a 1,30 m do solo (CAP) de todos os fustes utilizando fita métrica, a altura total das quinze primeiras árvores com fustes normais (sem bifurcação ou qualquer outro defeito) e a altura das árvores dominantes, caso estas não estivessem entre as quinze alturas já mensuradas da parcela, conforme o conceito de Assmann (1970). Além disso, todas as parcelas foram georreferenciadas. A partir das informações coletadas nas parcelas, obtiveram-se as estimativas de área basal (m^2/ha), altura dominante (m) e volume (m^3/ha).

Como variável secundária ou auxiliar, utilizou-se a reflectância na região espectral do infravermelho médio, correspondente à banda TM5 de uma imagem do satélite Landsat 5 TM. Lu et al. (2004) afirmam que a banda TM5 é a banda espectral que está mais fortemente correlacionada com os parâmetros dos povoamentos florestais, pois é independente das diferenças entre os ambientes biofísicos.

Utilizou-se uma imagem do satélite Landsat 5 TM na data de passagem de 27/03/2011, correspondente com a coleta dos dados em campo pelo inventário florestal, na órbita 220 ponto 072; com resolução espacial de 30 m. A imagem foi obtida junto ao banco de dados do USGS (*United States Geological Survey*), já apresentando as correções geométricas e radiométricas.

Foram distribuídos sistematicamente quatro conjuntos amostrais (CA) de pontos pela área de estudo para a coleta dos dados auxiliares, de modo que cada conjunto amostral apresentasse pontos coincidentes com as parcelas do inventário florestal. Os conjuntos amostrais CA1, CA2, CA3 e CA4 possuem, respectivamente, 386, 423, 471 e 573 pontos. Esses conjuntos amostrais apresentam 35, 72, 120 e 222 pontos coincidentes com as parcelas do inventário florestal, respectivamente.

Para a determinação do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) entre os valores de área basal e os valores de reflectância na banda TM5 utilizou-se os pontos coincidentes entre as parcelas do inventário e os conjuntos amostrais. Juntamente com o coeficiente correlação de Pearson, foi determinado o p-valor associado à estatística do teste.

O estudo variográfico foi realizado com o intuito de verificar a estrutura de dependência espacial da variável dendrométrica área basal e da variável reflectância na banda TM5. Este estudo foi constituído das etapas de geração do semivariograma experimental e do semivariograma cruzado, ajustes de modelos teóricos aos semivariogramas e seleção do melhor modelo para a representação dos dados. Inicialmente foram gerados os semivariogramas experimentais para os dados de área basal nas quatro intensidades amostrais e para os dados de reflectância na banda TM5 nos quatro conjuntos amostrais, e em seguida, foram gerados os semivariogramas cruzados para essas variáveis. A partir desses, foram ajustados os modelos esférico, exponencial e gaussiano, descritos por Journel e Huijbregts (1978). Os ajustes foram feitos pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados. A avaliação do desempenho de cada modelo se deu através da validação cruzada, conforme descrito por Vieira (2000).

Após a obtenção do melhor modelo espacial foi determinado o grau de Dependência Espacial (DE) a partir dos parâmetros desse modelo. O grau de DE é uma relação percentual entre a variação estruturada (σ^2) em relação ao patamar ($\tau^2 + \sigma^2$), apresentado por Biondi, Myers e Avery (1994).

As interpolações dos valores de área basal e reflectância na banda TM5 foram realizadas a partir da krigagem ordinária descrita por Meusburger et al. (2012), Journel e Huijbregts (1978), dentre outros. A krigagem ordinária é um interpolador geoestatístico que estima os valores de pontos não amostrados com base nos pontos amostrados, levando em consideração a estrutura de dependência espacial dos dados. Foram gerados mapas que demonstram o

comportamento de dependência espacial para a variável área basal nas intensidades amostrais IA1, IA2, IA3 e IA4 do inventário florestal e para a variável reflectância na banda TM5 nos conjuntos amostrais CA1, CA2, CA3 e CA4.

A cokrigagem é a extensão multivariada da krigagem que permite a incorporação de dados auxiliares no processo de interpolação da variável de interesse (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Uma melhoria substancial na aplicação da cokrigagem em relação à krigagem ordinária é obtida quando as variáveis auxiliares são amostradas mais densamente do que a variável principal. Nesse estudo, a variável principal corresponde à área basal e a reflectância na banda TM5 representa a variável auxiliar. A variável área basal nas intensidades amostrais IA1, IA2, IA3 e IA4 foi associada a variável reflectância na banda TM5 nos conjuntos amostrais CA1, CA2, CA3 e CA4, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta os códigos e as descrições dos estratificadores, correspondentes às interpolações geoestatísticas da krigagem ordinária e da cokrigagem ordinária para os valores de área basal nas diferentes intensidades amostrais e os valores de reflectância na banda TM5 para os diferentes conjuntos amostrais que foram testados nesse estudo. Nas estratificações, foram formados três estratos. O número de estratos foi definido em função da exigência da localização de no mínimo três parcelas em cada estrato para possibilitar o processamento do inventário.

Para avaliar o desempenho dos estratificadores utilizou-se o processamento do inventário florestal utilizando-se os valores de volume obtidos pelo inventário florestal realizado em campo. Efetuou-se o cálculo do erro de amostragem (E%) considerando as seguintes situações: a) adoção de toda a área como um todo, com o processamento do inventário utilizando-se a amostragem sistemática (AS) com os estimadores da amostragem casual simples (ACS); b) considerando as estratificações geradas pela krigagem ordinária e pela

cokrigagem, com o processamento do inventário efetuado pelos estimadores da Amostragem Casual Estratificada (ACE).

Tabela 1. Estratificadores utilizados nesse estudo.

Código	Estratificador
KoG-IA1	Krigagem da área basal na IA1
KoTM5-CA1	Krigagem da reflectância na banda TM5 no CA1
CoK-IA1-CA1	Cokrigagem da área basal na IA1 e da reflectância na banda TM5 no CA1
KoG-IA2	Krigagem da área basal na IA2
KoTM5-CA2	Krigagem da reflectância na banda TM5 no CA2
CoK-IA2-CA2	Cokrigagem da área basal na IA2 e da reflectância na banda TM5 no CA2
KoG-IA3	Krigagem da área basal na IA3
KoTM5-CA3	Krigagem da reflectância na banda TM5 no CA3
CoK-IA3-CA3	Cokrigagem da área basal na IA3 e da reflectância na banda TM5 no CA3
KoG-IA4	Krigagem da área basal na IA4
KoTM5-CA4	Krigagem da reflectância na banda TM5 no CA4
CoK-IA4-CA4	Cokrigagem da área basal na IA4 e da reflectância na banda TM5 no CA4

Onde: IA = intensidade amostral; CA = conjunto amostral.

Após a estratificação, definiram-se as parcelas de cada estrato e os processamentos da ACE foram comparados àqueles da AS. A formulação detalhada desses dois procedimentos pode ser encontrada em Cochran (1977) e Scolforo e Mello (2006). A comparação do desempenho de cada um dos estratificadores foi realizada através do erro de amostragem e da sobreposição dos intervalos de confiança. A sobreposição dos mesmos significa que as estimativas de média a partir das diferentes estratificações são semelhantes.

Os programas utilizados para as análises foram R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014), por meio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGLLE, 2001), ArcGis versão 10.1 (ESRI, 2010), por meio da extensão *Geostatistical Analyst* (ESRI, 2010) e GS+ versão 10 (ROBERTSON, 1998).

Resultados e Discussões

O teste de correlação de Pearson entre a variável primária (área basal) e a variável auxiliar (reflectância na banda TM5) resultou em uma relação linear inversa entre as variáveis de -0,655 com 0,5% de significância. A existência de correlação entre a variável primária e a variável auxiliar é indispensável para a eficiência da cokrigagem (AERTSEN et al., 2012). No entanto, Kitamura, Carvalho e Lima (2007) afirmam que mesmo não existindo evidências de altos coeficientes de correlação entre a variável primária e a variável auxiliar, esse fato não invalida a hipótese da existência de uma estrutura de dependência espacial entre a combinação dessas variáveis.

A análise variográfica mostrou que todas as variáveis apresentaram-se espacialmente estruturadas. A Tabela 2 apresenta os parâmetros efeito pepita (τ^2), que indica a variação aleatória; patamar (σ^2), que corresponde a variação explicada pela componente espacial e alcance teórico (ϕ), ponto a partir do qual os dados se comportam de forma independente; e o grau de dependência espacial (DE) para os modelos de função de semivariância selecionados para cada uma das variáveis em estudo.

Todas as variáveis apresentaram o grau de dependência espacial de médio ($35 < DE < 75\%$) a forte ($DE > 75\%$), segundo a classificação proposta por Biondi, Myers e Avery (1994). A reflectância na banda TM5 (variável auxiliar) apresentou o grau de dependência espacial mais elevado que a área basal (variável principal) em todas as intensidades amostrais, com exceção da IA1 onde ambas apresentaram $DE=100\%$. Este fato é benéfico quando se deseja

utilizar uma variável como auxiliar na cokrigagem. Segundo Yamamoto e Landim (2013), umas das situações onde a utilização da cokrigagem produz resultados satisfatórios é quando a variável principal exibe uma baixa autocorrelação espacial e a variável auxiliar uma alta autocorrelação espacial.

Tabela 2. Parâmetros do modelo e grau de dependência espacial para os modelos selecionados para todas as variáveis em estudo.

Variável	Modelo Selecionado	τ^2	σ^2	ϕ (m)	DE (%)
KoG-IA1	Exponencial	0	20,05	194	100
KoTM5-CA1	Esférico	0	$7,048 \times 10^{-4}$	673	100
CoK-IA1-CA1	Exponencial	-0,0001	-0,08009	208	98,88
KoG-IA2	Esférico	3,83	12,35	730	76,33
KoTM5-CA2	Esférico	$3,668 \times 10^{-5}$	$6,912 \times 10^{-4}$	667	94,96
CoK-IA2-CA2	Esférico	-0,0001	-0,06250	797	99,84
KoG-IA3	Esférico	3,01	13,09	825	81,30
KoTM5-CA3	Esférico	0	$7,027 \times 10^{-4}$	669	100
CoK-IA3-CA3	Esférico	-0,0001	-0,0612	783	99,84
KoG-IA4	Esférico	3,89	9,99	998	71,97
KoTM5-CA4	Esférico	$4,782 \times 10^{-5}$	$6,458 \times 10^{-4}$	661	93,10
CoK-IA4-CA4	Esférico	-0,0001	-0,0473	805	99,79

Onde: G = área basal; TM5 = reflectância na banda TM5; IA = intensidade amostral; CA = conjunto amostral.

Todas as variáveis apresentaram o grau de dependência espacial de médio ($35 < DE < 75\%$) a forte ($DE > 75\%$), segundo a classificação proposta por Biondi, Myers e Avery (1994). Na intensidade amostral IA1 o grau de dependência espacial apresentou-se elevado ($DE=100\%$). No entanto, o número de parcelas utilizadas para o ajuste dos modelos foi menor que nas demais intensidades amostrais. Este fato produz uma incerteza em relação à estimativa dos parâmetros dos modelos, sobretudo do efeito pepita, devido à insuficiência

amostral na pequena escala, ou seja, a falta de amostragem de parcelas próximas uma das outras (MELLO et al., 2006).

A reflectância na banda TM5 (variável auxiliar) apresentou o grau de dependência espacial mais elevado que a área basal (variável principal) em todas as intensidades amostrais, com exceção da IA1 onde ambas apresentaram DE=100%. Este fato é benéfico quando se deseja utilizar uma variável como auxiliar na cokrigagem. Segundo Yamamoto e Landim (2013), umas das situações onde a utilização da cokrigagem produz resultados satisfatórios é quando a variável principal exibe uma baixa autocorrelação espacial e a variável auxiliar uma alta autocorrelação espacial.

A presença da estrutura de dependência espacial nos dados de área basal e reflectância na banda TM5 permite a geração de mapas que correspondem a uma estratificação do povoamento de *Eucalyptus* spp., sem tendência e não enviesados. Na Figura 2 têm-se as diferentes estratificações geradas a partir da krigagem ordinária dos dados de área basal nas intensidades amostrais IA1 (a), IA2 (b), IA3 (c), IA4 (d) e a Figura 3 apresenta as diferentes estratificações geradas a partir da krigagem ordinária dos dados de reflectância na banda TM5 nos diferentes conjuntos amostrais CA1 (b), CA2 (b), CA3 (c) e CA4 (d) para os povoamentos de *Eucalyptus* spp.. Observa-se que a melhor definição dos estratos ocorre à medida que a intensidade amostral torna-se mais elevada.

A Figura 4 apresenta as diferentes estratificações geradas a partir da cokrigagem da área basal e da reflectância na banda TM5 para os povoamentos de *Eucalyptus* spp. nas diferentes situações estudadas.

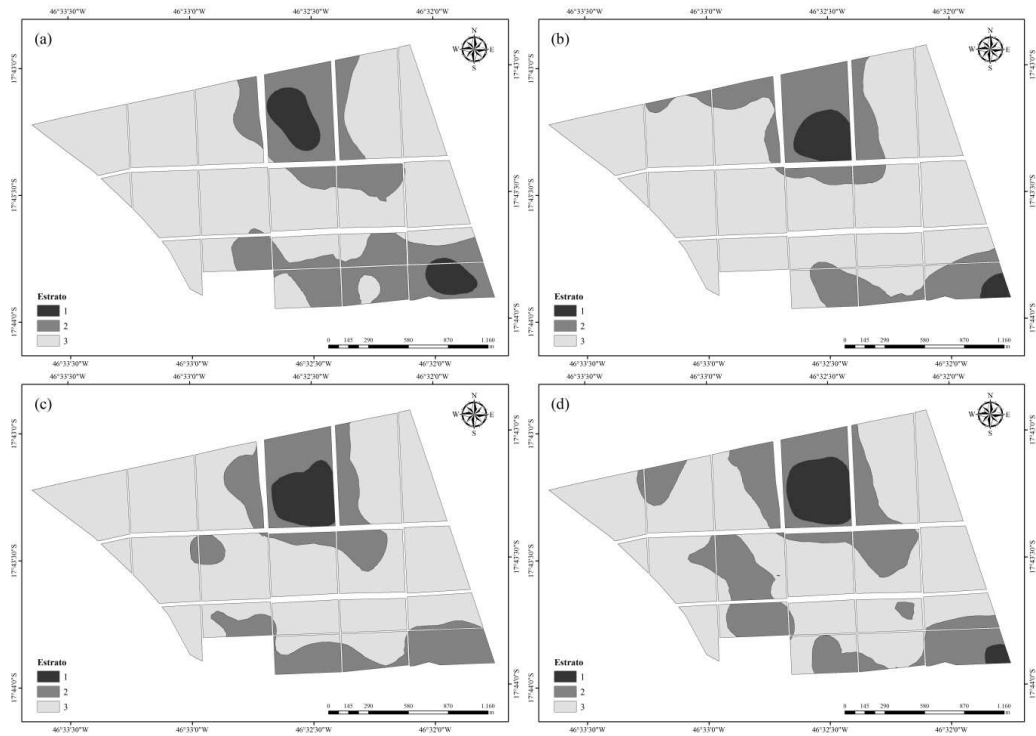


Figura 2. Estratificações obtidas a partir da krigagem ordinária da área basal nas IA1(a), IA2 (b), IA3 (c) e IA4 (d).

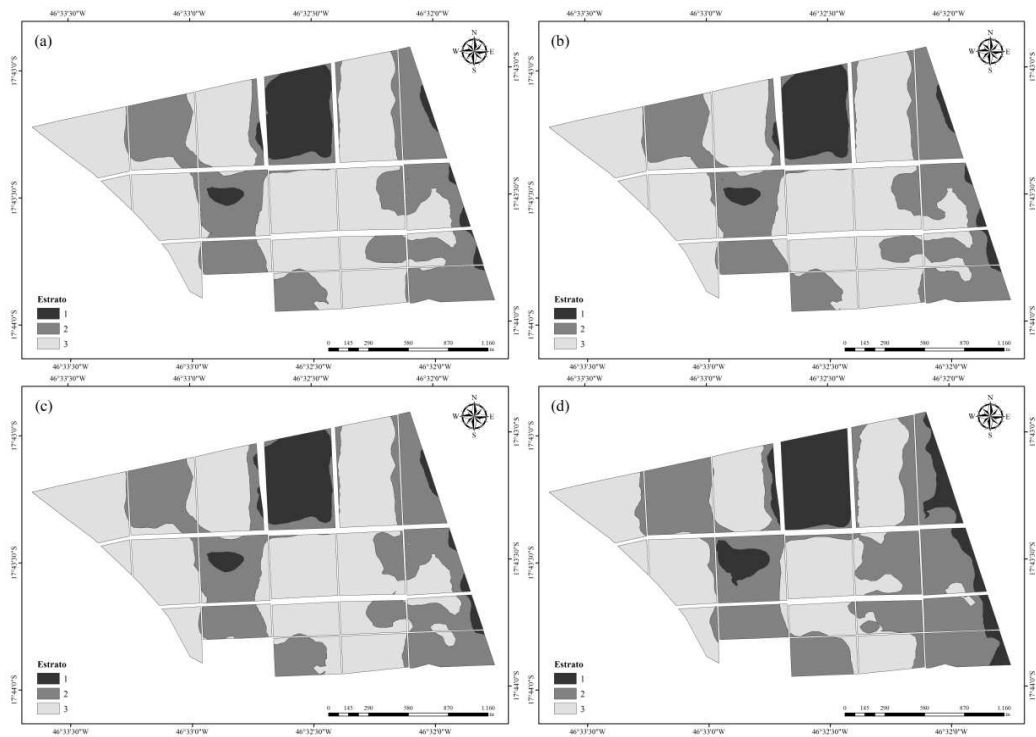


Figura 3. Estratificações obtidas a partir da krigagem ordinária da reflectância na banda TM5 nos CA1(a), CA2 (b), CA3 (c) e CA4 (d).

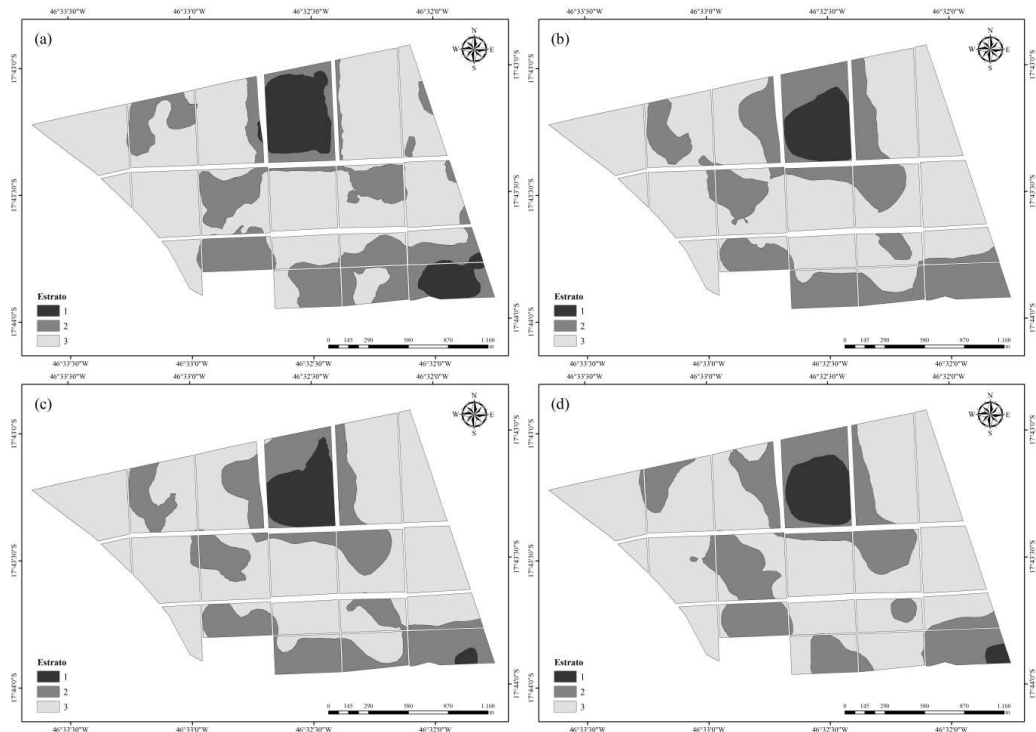


Figura 4. Estratificações obtidas a partir da cokrigagem ordinária dos dados de área basal com a refletância na banda TM5 nas IA1(a), IA2 (b), IA3 (c) e IA4 (d).

Observa-se que as estratificações obtidas a partir da cokrigagem ordinária dos valores de área basal e reflectância na banda TM5 conseguiram captar melhor a distribuição espacial dos estratos em função da elevada intensidade amostral da variável auxiliar reflectância na banda TM5. Este fato pode trazer ganhos substanciais no processamento do inventário florestal, pois a delimitação precisa das áreas dos estratos é de fundamental importância para a utilização dos estimadores da amostragem casual estratificada (ACE).

Os resultados do processamento do inventário, considerando os dois procedimentos de amostragem estão apresentados na Tabela 3. O erro de amostragem do inventário variou de 3,11% a 10,77% para a AS nas diferentes intensidades amostrais, e variou de 2,31% a 7,87% para as diferentes estratificações geradas.

Os menores erros foram observados para as estratificações geradas a partir da krigagem ordinária dos valores de área basal na IA4 (KoG-IA4), da krigagem ordinária dos valores de reflectância na banda TM5 (KoTM5-IA4) e da cokrigagem entre a área basal na IA4 e a reflectância na banda TM5 no CA4 (CoK-IA4-CA4). No entanto, no processamento do inventário dessas estratificações foi utilizado um grande número de parcelas, fato este que implica diretamente num elevado tempo de medição das parcelas em campo e, conseqüentemente, em elevados custos.

A utilização de dados obtidos em imagens de sensoriamento remoto na estratificação dos povoamentos de *Eucalyptus* spp. produziu resultados satisfatórios na redução do erro de amostragem do inventário quando utilizadas individualmente. No entanto, quando a reflectância na banda TM5 foi utilizada juntamente com a área basal pela cokrigagem nas intensidades amostrais IA2, IA3 e IA4, o erro de amostragem obtido a partir da cokrigagem foi superior ao erro de amostragem obtido com base na estratificação da área basal pela krigagem nessas intensidades amostrais. Porém, na intensidade amostral IA1, o

erro de amostragem obtido pela cokrigagem foi inferior ao erro de amostragem obtido pela krigagem da área basal.

Esse fato pode ter ocorrido em função das diferenças no número de parcelas utilizadas pela cokrigagem em casa intensidade amostral. Nas situações onde a variável principal foi pouco amostrada, a incorporação da variável auxiliar acarretou na melhoria das estimativas da variável principal, e conseqüentemente, menores erros de amostragem. Já nas situações onde a variável principal foi amostrada em alta intensidade, a incorporação da variável auxiliar não trouxe ganhos para o processo de estimativa.

Os dados obtidos em imagens de sensoriamento remoto podem ser adquiridos em uma elevada intensidade amostral e a custos relativamente baixos, e caso não haja informações de campo, estes dados podem ser utilizados para pré-estratificações de povoamentos de *Eucalyptus*, desde que identificada previamente a variável que melhor se correlacione com as características dendrométricas do povoamento. Silva et al. (2014) afirmam que a utilização de imagens de sensoriamento remoto para a estratificação antes do levantamento de campo proporciona uma melhor distribuição espacial das parcelas, evitando que ocorram estratos sem amostragem adequada ou a amostragem de áreas impróprias ao manejo florestal.

Aplicando-se a cokrigagem aos valores de área basal na IA1 obtém-se, praticamente, o mesmo erro do processamento do inventário pela AS na IA2, onde foram medidas o dobro de parcelas do que na IA1. Ao utilizar a cokrigagem nos dados de área basal na IA2 obteve-se o mesmo erro do processamento do inventário pelos estimadores da amostragem sistemática na IA3, sendo que na IA2 foram medidas 72 parcelas e na IA3 foram medidas 120 parcelas. O mesmo raciocínio pode ser aplicado na comparação entre o erro de amostragem do processamento do inventário utilizando o estratificador KoG-IA3 e AS-IA4.

Tabela 3. Volume médio (m³/ha), desvio padrão (m³/ha), erro do inventário (m³/ha), erro de amostragem (%) e intervalo de confiança (m³/ha) para a amostragem sistemática (AS) e as diferentes amostragens casual estratificada (ACE).

Estimadores	Volume Médio (m ³ /ha)	Desvio Padrão (m ³ /ha)	Erro do inventário (m ³ /ha)	Erro de amostragem (%)	Intervalo de confiança (m ³ /ha)
AS-IA1	209,71	62,83	21,54	10,27	188,17 - 231,25
KoG-IA1	211,63	41,69	15,98	7,55	195,65 - 227,61
KoTM5-CA1	208,28	48,64	16,39	7,87	191,90 - 224,67
CoK-IA1-CA1	211,39	36,98	12,91	6,11	198,48 - 224,30
AS-IA2	215,10	56,61	13,25	6,16	201,85 - 228,35
KoG-IA2	216,40	35,55	8,35	3,86	208,05 - 224,75
KoTM5-CA2	214,56	43,88	10,24	4,77	204,32 - 224,81
CoK-IA2-CA2	214,91	42,90	10,05	4,68	204,86 - 224,96
AS-IA3	213,50	55,38	9,94	4,66	203,56 - 223,44
KoG-IA3	212,43	36,11	6,56	3,09	205,87 - 219,00
KoTM5-CA3	215,73	43,84	7,76	3,60	207,97 - 223,48
CoK-IA3-CA3	213,27	37,99	6,85	3,21	206,43 - 220,12
AS-IA4	217,41	51,68	6,75	3,11	210,65 - 224,16
KoG-IA4	215,34	37,88	4,97	2,31	210,37 - 220,31
KoTM5-CA4	215,97	46,97	6,37	2,95	209,60 - 222,34
CoK-IA4-CA4	215,32	38,46	5,04	2,34	210,28 - 220,36

Onde: AS= Amostragem Sistemática; KoG-IA1 = Krigagem da área basal na IA1; KoTM5-CA1 = Krigagem da reflectância na banda TM5 no CA1; CoK-IA1-CA1 = Cokrigagem da área basal na IA1 e da reflectância na banda no CA1; KoG-IA2 = Krigagem da área basal na IA2; KoTM5-CA2 = Krigagem da reflectância na banda TM5 no CA2; CoK-IA2-CA2 = Cokrigagem da área basal na IA2 e da reflectância na banda no CA2; KoG-IA3 = Krigagem da área basal na IA3; KoTM5-CA3 = Krigagem da reflectância na banda TM5 no CA3; CoK-IA3-CA3 = Cokrigagem da área basal na IA3 e da reflectância na banda no CA3; KoG-IA4 = Krigagem da área basal na IA4; KoTM5-CA4 = Krigagem da reflectância na banda TM5 no CA4; CoK-IA4-CA4 = Cokrigagem da área basal na IA4 e da reflectância na banda no CA4.

A utilização da estratificação no inventário florestal proporciona uma redução na variabilidade da população estratificada (GUEDES et al., 2012), o que implica diretamente na redução da intensidade amostral necessária para se obter um determinado erro do inventário máximo pré-estabelecido pelas empresas florestais. Com isso, os custos operacionais da amostragem podem ser reduzidos, uma vez que são fortemente influenciados pelo tempo gasto no processo de demarcação e mensuração das unidades amostrais em campo.

Segundo Silva et al. (2014) há uma tendência considerável no setor florestal brasileiro pela busca da minimização do erro reduzindo-se o custo do levantamento florestal e uma das alternativas para alcançar tal objetivo é por meio de técnicas geoestatísticas que permitem o controle da variabilidade da floresta, que nesse caso trata-se do emprego da estratificação.

Houve uma redução de aproximadamente 40% no erro de amostragem do processamento do inventário utilizando o estratificador CoK-IA1-CA1 em relação a AS na intensidade amostral IA1. Nas intensidades amostrais IA2, IA3 e IA4, observa-se uma redução de 37,34%, 33,69% e 25,72%, respectivamente, no erro de amostragem da ACE obtida através da krigagem da área basal em relação a AS. Observa-se também que os intervalos de confiança são semelhantes entre si, evidenciando que a estratificação com base nos interpoladores geoestatísticos produz resultados satisfatórios na redução do erro de amostragem do inventário.

Kanegae Júnior et al. (2006) utilizaram uma intensidade amostral de 1 parcela a cada 10 ha de floresta, verificaram uma redução de 66 % na variabilidade do povoamento ao se efetuar a estratificação com base na variável de interesse volume em povoamentos de eucalipto utilizando a krigagem ordinária como ferramenta de estratificação.

Guedes et al. (2012) estudaram a possibilidade do uso da estrutura de dependência espacial para a definição de estratos com base no volume em

povoamentos florestais utilizando a intensidade amostral de 1 parcela a cada 10 hectares de floresta. Os autores compararam, com base no erro de amostragem, a ACS e a ACE, encontrando 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.

Conclusões

1. Os interpoladores geoestatísticos krigagem ordinária e cokrigagem ordinária apresentaram-se eficientes na definição de estratos em povoamentos de *Eucalyptus* spp., gerando ganhos de precisão para as estimativas volumétricas nas diferentes intensidades amostrais do inventário.
2. As informações obtidas em imagens de sensoriamento remoto se mostraram eficientes quando utilizadas individualmente ou como variáveis auxiliares pela cokrigagem no processo de estratificação.
3. Os estimadores da amostragem casual estratificada (ACE) foram mais precisos que da amostragem sistemática (AS), indicando que a estratificação com base na área basal e na reflectância da banda TM5 produz resultados satisfatórios na redução do erro de amostragem do inventário.
4. As variáveis área basal e reflectância na banda TM5 podem ser utilizadas individualmente (através da krigagem ordinária) ou em conjunto (através da cokrigagem ordinária) como ferramentas de estratificação pelas empresas florestais.

Referências

AERTSEN, W. et al. Comparison of location-based, attribute-based and hybrid regionalization techniques for mapping forest site productivity. **Forestry**, v. 85, n. 4, p. 539 – 550, 2012.

ASSIS, A. L. et al. Development of a sampling strategy for young stands of *Eucalyptus* sp. using geostatistics. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 166-173, abr./jun. 2009.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506 p.

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

BOGNOLA, I. A. et al. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, abr./jun. 2008.

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

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE **ArcGIS Desktop**: Release 10.1. Redlands, CA: ESRI, 2010.

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, jul.-set., 2012.

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

KANEGAE JÚNIOR, H. et al. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* **Cerne**, Lavras, MG, v. 12, n. 2, p. 123-136, abr./jun. 2006.

KANEGAE JÚNIOR, H. et al. Avaliação da continuidade espacial de características dendrométricas em diferentes idades de povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.* **Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 859-866, 2007.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C. G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.31, n.2, p. 361-369, 2007.

LEAL, F. A.; MATRICARDI, E. A. T.; MIGUEL, E. P. Interpolador geoestatístico para estimar volume num povoamento de *Eucalyptus urophylla*, em Rio Verde/Goiás. **Nucleus**, Ituverava, v.11, n.1, 2014.

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

MELLO, J. M. de. et al. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Revista 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.

MELLO, J. M. de. et al. Métodos de amostragem e geoestatística para estimativa do número de fustes e volume em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 39, n. 1, p. 157-166, jan./mar. 2009.

MENG, Q.; CIESZEWSKI, C.; MADDEN, M. Large area forest inventory using Landsat ETM+: A geostatistical approach. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 27–36, 2009.

MEUSBURGER, K. et al. Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, 16, 167–177, 2012.

PELISSARI et al. Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos florestais de teca, em períodos pré-desbaste seletivo, no estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v.32, n.3, p.430-444, 2014.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014. Disponível em: < <http://www.R-project.org>>.

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

ROBERTSON, G. P. **GS+**: geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.

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

SINGH, T. P.; DAS, S. Predictive analysis for vegetation biomass assessment in Western Ghat region (WG) using geospatial techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 42, n. 3, p. 549-557, 2014.

SILVA, S. T. et al. Uso de imagens de sensoriamento remoto para estratificação do cerrado em inventários florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 80, p. 337-343, 2014.

VIANA, H. et al. Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models. **Ecological modelling**, London, v. 226, p. 22-35, 2012.

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: SBCS, 2000.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 1º Ed., 2013. 215 p.