



LUIZ HENRIQUE VICTOR ALVARENGA

**IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO E
GEOESTATÍSTICA NA ESTRATIFICAÇÃO
DA FISIONOMIA CERRADO PARA
INVENTÁRIOS FLORESTAIS**

**LAVRAS - MG
2012**

LUIZ HENRIQUE VICTOR ALVARENGA

**IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO E GEOESTATÍSTICA NA
ESTRATIFICAÇÃO DA FISIONOMIA CERRADO PARA
INVENTÁRIOS FLORESTAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Dr. José Márcio de Mello

LAVRAS - MG
2012

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Alvarenga, Luiz Henrique Victor.

Imagens de alta resolução e geoestatística na estratificação da
fisionomia Cerrado para inventários florestais / Luiz Henrique
Victor Alvarenga. – Lavras : UFLA, 2012.

91 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: José Márcio de Mello.

Bibliografia.

1. Segmentação e classificação de imagens. 2. Geotecnologia. 3.
Inventário florestal. 4. Krigagem. I. Universidade Federal de Lavras.
II. Título.

CDD – 634.9285

LUIZ HENRIQUE VICTOR ALVARENGA

**IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO E GEOESTATÍSTICA NA
ESTRATIFICAÇÃO DA FISIONOMIA CERRADO PARA
INVENTÁRIOS FLORESTAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para obtenção do título de “Mestre”.

Aprovada em 27 de Fevereiro de 2012.

Dr. Renato Ribeiro de Lima

DEX/UFLA

Dr. Carlos Rogério de Mello

DEG/UFLA

Dr. José Márcio de Mello
Departamento de Ciências Florestais / UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

A Deus por tudo.

Aos meus pais, Hélio Sérgio e Rosana.
a minha irmã Lívia.
as minhas avós Laura e Marly.
aos familiares.

Ao amigo, professor e orientador José Marcio de Mello
pela dedicação, apoio, ensinamentos e conselhos durante toda minha formação.

Muito obrigado a todos, de coração!

"Não confunda jamais conhecimento com sabedoria. Um o ajuda a ganhar a
vida; o outro a construir uma vida." (Sandra Carey)

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar sabedoria e saúde para que eu conquistasse essa etapa de minha vida.

Aos meus pais e familiares por suporte, educação, compreensão, e todos os outros valores que com eles eu aprendi.

A UFLA, em especial ao Departamento de Ciências Florestais, pela oportunidade e pelo suporte técnico científico para minha formação profissional.

Ao professor José Marcio de Mello, por mais uma oportunidade de trabalho que gerou esta dissertação.

Aos professores do LEMAF José Roberto S. Scolforo, Antônio Donizette de Oliveira, Fausto Weimar Acerbi Junior, Luis Marcelo Tavares de Carvalho, José Luiz Pereira Resende e Lucas Rezende Gomide, pelo apoio e ensinamentos em minha formação profissional.

Aos amigos e companheiros de trabalho do LEMAF, pelos bons anos vividos ali, em especial para o Gustavo, pelo grande apoio no desenvolvimento do trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Ciências Florestais (DCF), pela convivência e auxílio constante.

Aos colegas de mestrado Thiza, Emanuel (Calango), Vinícius (Chapolin), Thiago (Tião), Thiago (Bola) e Álvaro.

Aos companheiros de república Bola, Thales, Tõe, Paulinho e Vitor e a todos os amigos de Lavras pelo companheirismo.

E a todas as pessoas que passaram por minha vida, e algumas que se mantêm comigo e de certa forma me ajudaram a ser uma pessoa melhor.

Muito obrigado a todos, de coração!

RESUMO GERAL

O Cerrado brasileiro é um dos biomas mais ameaçados do mundo. Dessa forma, é extremamente necessária a utilização de seus recursos mediante a um manejo florestal sustentável. O inventário florestal é a base para um bom manejo florestal. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar o uso de ferramentas de geotecnologia, como estratificadores de fragmento florestal de Cerrado *Sensu stricto*. Especificamente, pretendeu-se avaliar o processo de segmentação e classificação de imagem de satélite como pré-estratificação do fragmento florestal; avaliar o uso do interpolador espacial como pós-estratificador do fragmento florestal, e comparar as estimativas da amostragem casual estratificada (ACE) de cada estratificação com as estimativas da amostragem sistemática (AS). A área de estudo localiza-se no município de São Romão – MG, com área de 7.706,59 hectares. Foram alocadas 157 parcelas de 1000m² de forma sistemática na área. Em todas as parcelas foram medidos a circunferência a 1,3 m do solo e altura total de todas as árvores. O volume de cada parcela foi obtido por equações de volume geradas para a fisionomia. A pré-estratificação se deu por segmentação da imagem de satélite realizada de duas formas: automatizada e baseada em interpretação visual. A pós-estratificação se deu com o uso do interpolador geoestatístico krigagem. O processamento do inventário foi realizado, utilizando-se os estimadores da AS, para a amostra original e dos estimadores da ACE, para cada estratificação gerada. Também foi realizada uma redução de 40% da intensidade amostral para as estratificações, a fim de perceber a possibilidade de redução de custo e tempo dos trabalhos de campo. Foram realizadas 1000 simulações para garantir a estabilidade dos estimadores na redução de 40% da intensidade amostral. Foi encontrado uma diminuição de 24,71% e 6,48% no erro de inventário para a ACE, baseada em segmentação visual e segmentação automática, respectivamente, em relação à AS. Foi notada uma diminuição de 43,8% no erro do inventário da ACE por pós-estratificação em relação à sistemática. Outro resultado importante foi que mesmo com a diminuição de aproximadamente 60% na intensidade amostral, a ACE baseada em interpolador geoestatístico apresentou erro do inventário menores que da AS. Desta maneira, pode-se concluir que o processo de estratificação baseado em geotecnologia mostrou-se eficiente para ser incorporado ao inventário florestal.

GENERAL ABSTRACT

The Brazilian Savanna is one of the most threatened biomes in the world. Thus, it is extremely necessary to use its resources through sustainable forest management. Forest inventory is the basis for good forest management. Given this, this study aimed to evaluate the use of the geotechnology tools for stratification of a Brazilian Savanna fragment. Specifically, it was intended to evaluate the process of segmentation and classification of satellite imagery as a pre-stratification of the forest fragment; evaluate the use of spatial interpolation as post-stratification of the forest fragment and compare the estimates of the stratified random sampling (SRS) for each stratification estimates of systematic sampling (SS). The study area was located in São Romão - MG with an area of 7,706.59 hectares. One hundred fifty seven 1000-m² plots were allocated in a systematic way in the area. The circumference at 1.3m from the ground and the total height of all trees were measured in all plots. The volume of each plot was obtained by volume equations generated for the physiognomy. The pre-stratification was generated by the satellite image segmentation performed in two approaches: automated and based on visual interpretation. The post-stratification was generated with the use of kriging geostatistical interpolator. Inventory processing was performed using the estimators of the original sample for SS and SRS estimators generated for each stratification. Also, a reduction of 40% in the intensity for the sample stratification was performed in order to check the possibility of reducing labor costs and time. One thousand simulations were also performed to ensure the stability of the estimators in reducing sampling intensity. Decreases of 24.71% and 6.48% in inventory errors were found for SRS based on visual segmentation and automatic segmentation, respectively, compared to the AS. A decrease of 43.8% was found in the inventory error of ACE by post-stratification in relation to the SS. Another important result was that even with the decrease of approximately 60% in sampling intensity, the inventory error of ACE based on geostatistical interpolation was lesser than the AS's error. Thus, it can be concluded that the process of stratification based on geotechnology proved to be efficient to be incorporated in the forest inventory.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Informações gerais por estrato em cada método de segmentação e classificação.....	51
TABELA 2. Amostragem sistemática (AS); Amostragem casual estratificada (ACE) e Amostragem casual estratificada com redução de 39,86% e 40,12% para segmentação visual e automática respectivamente. ...	54
TABELA 3. Parâmetros dos modelos, grau de dependência espacial (DE) e critério de informação de Akaike (AIC).....	69
TABELA 4. Amostragem sistemática (AS); Amostragem casual estratificada (ACE) e Amostragem casual estratificada com redução de 41,4% no número de parcelas (ACE (41,4%)).	73
TABELA 1A. Base de dados com classificação dos estratos em cada processo de estratificação	78

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Espectro eletromagnético	25
Figura 2. Curvas de assinatura espectral.....	26
Quadro 1. Características do sensor RapidEye®.....	30
Figura 3. Ponto a ser estimado e influência de pontos amostrados.....	30
Figura 4. Localização da área de estudo	46
Figura 5. Mapas de estratos gerados a partir de segmentação automática.	50
Figura 6. Mapas de estratos gerados a partir de segmentação automática.	52
Figura 7. Localização da área de estudo	65
Gráfico 1. Ajuste dos modelos exponencial (linha cheia) e esférico (linha tracejada) pelo método dos mínimos quadrados ponderados (a) e mínimos quadrados ordinários (b).....	69
Figura 8. Resultado da krigagem obtida na área de estudo.....	71

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 INVENTÁRIOS FLORESTAIS.....	16
2.1.1 <i>Procedimentos de amostragem</i>	18
2.1.1.1 Amostragem Casual Simples.....	18
2.1.1.2 Amostragem Sistemática.....	19
2.1.1.3 Amostragem Casual Estratificada.....	20
2.1.2 <i>Aspectos legais da exploração de vegetação nativa</i>	21
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO.....	22
2.2.1 <i>Conceitos básicos</i>	22
2.2.2 <i>Segmentação e classificação de imagens</i>	27
2.2.3 <i>Características do sensor RapidEye®</i>	28
2.3 INTERPOLADORES ESPACIAIS.....	30
2.3.1 <i>Conceitos</i>	30
2.3.2 <i>Krigagem</i>	33
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
4. REFERÊNCIAS.....	36
CAPÍTULO 2: DESEMPENHO DA AMOSTRAGEM CASUAL ESTRATIFICADA UTILIZANDO TÉCNICAS DE SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE IMAGEM RAPIDEYE® EM CERRADO <i>SENSU STRICTO</i>	43
RESUMO.....	44
ABSTRACT.....	45
1. INTRODUÇÃO.....	46
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	49
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E COLETA DOS DADOS.....	49
2.2 SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM RAPIDEYE®.....	50
2.3 <i>Processamento do inventário</i>	52
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
3.1 PROCESSO DE SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	54
3.2 PROCESSAMENTO DO INVENTÁRIO.....	57
5. REFERÊNCIAS.....	61
CAPÍTULO 3: DESEMPENHO DA ESTRATIFICAÇÃO EM UM FRAGMENTO DE CERRADO <i>SENSU STRICTO</i> UTILIZANDO INTERPOLADOR GEOESTATÍSTICO	65
RESUMO.....	66
ABSTRACT.....	67
1. INTRODUÇÃO.....	68
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	70
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E COLETA DOS DADOS.....	70
2.2 ESTUDO VARIOGRÁFICO E INTERPOLAÇÃO ESPACIAL.....	71

2.3 PROCESSAMENTO DO INVENTÁRIO	73
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
3.1 ANÁLISE VARIOGRÁFICA.....	74
3.2 PROCESSAMENTO DO INVENTÁRIO	78
4. CONCLUSÕES.....	80
5. REFERÊNCIAS	81
ANEXOS.....	85

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

O cerrado brasileiro é o segundo maior bioma do país, com cobertura em cerca de 21% do território e o de maior expressão dentro do estado de Minas Gerais. Sua distribuição no estado se concentra nas regiões norte, noroeste e oeste (CARVALHO; SCOLFORO, 2008).

O Cerrado se destaca pelo grande número de espécies da fauna e da flora, sendo responsável por um terço da biodiversidade brasileira e 5% das espécies do mundo (HOGAN et al., 2002). Em contrapartida, é um dos biomas mais ameaçados do mundo, em decorrência da crescente intervenção antrópica para urbanização, agronegócio e mineração. Estudos, realizados a partir de sensoriamento remoto, mostram que quase 55% da área original do Cerrado já sofreram algum tipo de degradação, normalmente relacionada às atividades de pastoreio, agricultura, mineração, hidroelétricas e carvoarias (KLINK; MACHADO, 2005).

Uma saída para a conciliação da conservação do Cerrado com as atividades antrópicas é o manejo florestal sustentável. O manejo sustentável é aquele, que favorece a uma produção contínua do recurso explorado, sem a deterioração dos demais recursos e benefícios envolvidos (SCOLFORO, 1998). O conhecimento dos atributos quali-quantitativos, faz-se extremamente necessária a execução de um bom plano de manejo florestal.

Assis et al. (2009) colocam que para otimizar o uso dos recursos florestais deve-se quantificá-los e monitorá-los de forma precisa. Neste sentido, o uso de técnicas de amostragem adequadas por meio do inventário florestal é de suma importância no desenvolvimento de um plano de manejo.

Uma dificuldade encontrada em quantificar e monitorar os fragmentos de Cerrado é a heterogeneidade do mesmo devido à complexidade de seu sistema. Silva (2009), aponta como fatores que influenciam na sua

produtividade: tipo de solo, clima, fisiografia, dentre outros. Desta maneira, é necessária a adoção de técnicas adequadas de amostragem, que propiciem a representatividade e acurácia do inventário florestal. Tradicionalmente, utiliza-se em grande escala nos inventários florestais de cerrado, procedimentos de amostragem, que visem captar ao máximo a variabilidade existente na área com relação à característica de interesse a ser avaliada. Nesse sentido, é comum o uso da Amostragem Sistemática, cuja teoria está amplamente divulgada em livros e artigos relacionados ao inventário florestal.

A amostragem casual estratificada é um procedimento de amostragem bastante adequado para o caso, uma vez que este, ao captar a variabilidade da floresta, consegue atenuar seu efeito e aumentar a precisão do inventário. O grande problema é que a definição dos estratos é muito difícil por não existir nenhuma informação da floresta anteriormente ao inventário florestal. O uso de geotecnologias como o geoprocessamento e interpoladores espaciais podem se tornar ferramentas tanto para a pré-estratificação quanto para a pós-estratificação.

As técnicas de segmentação e classificação de imagens digitais permitem a estratificação de áreas em porções de maior homogeneidade, com base em informações de semelhança entre feições e objetos vizinhos (DEFINIENS, 2003). As imagens RapidEye® se caracterizam por serem imagens de alta resolução espacial e espectral, proporcionando boa segmentação e classificação das mesmas além de serem disponibilizadas, gratuitamente, para todo o Estado de Minas Gerais.

Os interpoladores espaciais se utilizam de amostras lançadas na área, para estratificar a população em estudo. Neste caso, a grande vantagem é ter a possibilidade de aumentar a precisão do inventário, pós levantamento por meio da estratificação, sem a necessidade de lançar mais parcelas na área.

Diante disto, este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de inventário florestal, que se utilize dessas geotecnologias, para a estratificação de fragmentos florestais de Cerrado. Especificamente, pretendeu se avaliar o processo de segmentação e classificação de imagem e o uso do interpolador geoestatístico, como pré e pós-estratificadores de um fragmento de Cerrado *sensu stricto*; comparar as estimativas da amostragem casual estratificada (ACE) proveniente da segmentação e classificação da imagem e da krigagem com os estimadores da amostragem sistemática.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Inventários florestais

O conhecimento e obtenção de informações confiáveis sobre um povoamento florestal são os primeiros passos, para o planejamento adequado da exploração desses recursos de forma sustentável. O inventário florestal por meio da teoria da amostragem é a ferramenta utilizada, para obtenção dessas informações com tais níveis de precisão exigidos para o “bom manejo florestal” e, também, para aprovação perante aos órgãos legais. Dessa maneira, Scolforo e Mello (2006) conceituam o inventário florestal, como o uso de fundamentos de amostragem, para a determinação ou estimativa de características quantitativas e/ou qualitativas das florestas.

Para o correto entendimento do inventário florestal é necessário de antemão conhecer alguns conceitos fundamentais da teoria da amostragem (BOLFARINE; BUSSAB, 2005):

- **População:** é um conjunto de indivíduos ou valores unitários comuns, com características semelhantes sobre os quais fazemos inferências. Do ponto de vista de inventário florestal, pode-se ter a população alvo, aquela que se refere a área de estudo em questão e a população estatística. Esta trata-se do nº de unidades amostrais possíveis de participar da amostra (MELLO, 2004).

- **Amostra:** é um conjunto de unidades amostrais retiradas da população, que deve ser representativa da mesma e sobre as quais fazemos inferências com o uso das estimativas dos parâmetros. No caso da avaliação de toda a população (censo), já não existe mais amostra e, neste caso, a inferência é a obtenção do próprio parâmetro.

- **Precisão:** em toda situação em que há amostragem existe um erro associado a esta amostragem. Desta forma, a precisão diz respeito ao erro de

amostragem, que existe devido à fração não amostrada da população. Quanto menor for este erro maior será a precisão da amostragem (ASSIS et al., 2009).

Outros conceitos importantes colocados por Scolforo e Mello (2006) são os conceitos de procedimento, método e sistema de amostragem. Os métodos de amostragem são aqueles relacionados às unidades amostrais: tamanho de parcela, forma de parcela, área fixa ou variável, temporária ou permanente, etc. Os procedimentos de amostragem remetem a forma, como as unidades amostrais serão alocadas. Por exemplo, na amostragem casual simples, não há qualquer restrição na casualização, ou seja, todas as parcelas cabíveis na população têm a mesma chance de pertencerem à amostra (KANEGAE JÚNIOR et al., 2007). Já na amostragem casual estratificada a casualização sofre restrições referentes à divisão da população em estratos ou subpopulações, que têm por finalidade eliminar fontes de variação (tornar o estrato mais homogêneo possível). O método de amostragem escolhido, aliado ao procedimento, define o sistema de amostragem.

Estratos são subáreas dentro de uma população, que apresentam menor variabilidade dentro dos mesmos. Desta forma, a obtenção de estratos o mais homogêneos possíveis é imprescindível para o aumento da precisão do inventário. A pós-estratificação consiste na realização do inventário para posterior separação em subáreas, conforme as informações obtidas no levantamento sendo, portanto, sem utilidade no caso de inventários pré-corte. Já a pré-estratificação torna-se uma ferramenta valiosa nessas situações, uma vez que ajuda a planejar o inventário da melhor maneira possível, a fim de se obterem os melhores resultados em termos de precisão, custo e tempo. O uso de imagens de satélite é uma maneira de se obter a pré-estratificação (KANEGAE JÚNIOR, 2004).

Segundo Cressie (1993) e Matérn (1960), durante a realização de inventários florestais, normalmente, emprega-se com maior frequência os

procedimentos da amostragem casual simples (ACS), casual estratificada (ACE) e sistemática.

2.1.1 Procedimentos de amostragem

2.1.1.2 Amostragem Casual Simples

A amostragem casual simples (ACS) é o procedimento mais básico e mais antigo existente (SHIVER; BORDERS, 1996). Péllico Neto e Brena (1997), ainda afirmam que todos os demais procedimentos de amostragem derivam dele.

Neste procedimento, não existe nenhuma restrição à casualização das parcelas, ou seja, todas as N amostras cabíveis na população possuem a mesma probabilidade de compor a amostra. A área florestal é tratada como uma população única, em que cada amostra de parcela fixa, compõem as unidades espaciais, que caracterizam a população estatística (THOMPSON, 1992).

A aleatorização de cada unidade amostral faz com que o procedimento seja livre de qualquer viés ou inconsistência estatística. Porém, a amostragem casual simples possui algumas desvantagens como: tempo de deslocamento entre as unidades amostrais, menor precisão em populações heterogêneas exigindo maior quantidade de amostras e, principalmente, amostragem inadequada devido à agregação das amostras em porções pontuais da população causadas pela casualização (HUSCH; BEERS; KERSHAW JÚNIOR, 2003).

Desta maneira, Péllico Neto e Brena (1997) recomendam a utilização da ACS em populações menores e de baixa heterogeneidade. Estas reduções nas populações acabam por aproximarem as parcelas e reduzirem os problemas de tempo de deslocamento entre as amostras.

Redin et al. (2011) utilizaram o processo aleatório simples, para estudar a composição florística e estrutura da regeneração natural arbórea de uma floresta no Rio Grande do Sul. A área amostrada foi de 2 ha, mostrando que o procedimento é bastante eficiente em populações pequenas.

Ubialli et al. (2009), compararam o procedimento aleatório e sistemático em uma floresta ecotonal no norte matogrossense e concluíram que ambos obtiveram estimativas precisas de área basal.

2.1.1.2 Amostragem Sistemática

Loetsch, Zohrer e Haller (1973) definem o processo sistemático de amostragem como um sistema rígido de locação de amostras, com a finalidade de distribuir as parcelas uniformemente em toda a área de estudo. De acordo com Péllico Netto e Brena (1997), a amostragem sistemática (AS) situa-se entre os processos probabilísticos não aleatórios, em que o critério de probabilidade se estabelece através da aleatorização da primeira unidade amostral.

Este procedimento é indicado para populações de grande extensão das quais não se têm conhecimentos prévios. A distribuição das parcelas, de forma a varrer a área, possibilitam a atenuação do efeito da variabilidade da população (HUSCH; BEERS; KERSHAW JÚNIOR, 2003). Outra vantagem é a execução do inventário florestal de maneira mais rápida e de menor custo, em relação a um procedimento aleatório. Isto, porque o deslocamento entre as unidades amostrais é menor, pelo fato de seguir uma direção fixa preestabelecida, resultando em menor tempo e, conseqüentemente, em menor custo (PÉLLICO NETTO; BRENA 1997).

Porém, de acordo com Shiver e Borders (1996), por não se tratar de um processo aleatório, não é possível estimar a variância da amostra. Fundamentalmente, a razão pela qual uma amostra sistemática não produz

estimativas válidas do erro de amostragem é que o cálculo da variância exige, no mínimo, duas amostras obtidas de forma aleatória (PÉLLICO NETTO; BRENA 1997).

Entretanto, na prática os estudos mostram que a amostragem sistemática obtém resultados muito mais precisos do que da amostragem casual simples, para populações heterogêneas e que como a amostra sistematizada é uma possível conformação das inúmeras possibilidades da ACS, utilizam-se os estimadores da ACS com grande segurança.

A ACS é o procedimento mais usual em florestas nativas. Vários estudos como Cavalcanti et al. (2011), Gama e Pinheiro (2010) e Ubialli et al. (2009) utilizaram este procedimento em seus trabalhos.

2.1.1.2 Amostragem Casual Estratificada

A amostragem casual estratificada (ACE) consiste em subdividir a população em estudo, em estrato ou subpopulações mais homogêneas. A estratificação é utilizada, quando a floresta apresenta alto grau de variabilidade na característica de interesse (BOLFARINE; BUSSAB, 2005).

De acordo com Péllico Netto e Brena (1997) a intensidade amostral depende da variabilidade da floresta. Desta maneira, a estratificação se torna uma ferramenta valiosa no aumento da precisão do inventário florestal.

Dentre as vantagens mais significativas do procedimento estão o aumento substancial da precisão, em relação a ACS, quando em uma mesma intensidade amostral ou a diminuição da intensidade amostral, quando fixada uma precisão desejada. Outra vantagem é a diminuição dos custos do inventário, em consequência de diminuição do número de unidades amostrais (MELLO; SCOLFORO, 2000).

A desvantagem deste procedimento está em qual informação se baseará a estratificação, uma vez que se esta não apresentar correlação com a característica de interesse, a estratificação pode ser ineficaz e até diminuir a precisão do inventário florestal. Em florestas plantadas a estratificação pode se basear nas informações cadastrais, uma vez que, por esta, é possível obterem áreas mais semelhantes entre si (clone, espaçamento, manejo, etc.). Já em florestas nativas, a obtenção de estratos se torna mais difícil, uma vez que não existe nenhuma informação prévia sobre a população.

Poucos estudos utilizando a ACE para florestas nativas são encontrados na literatura, Gama et al. (2007) usou a estratificação para um estudo fitossociológico em floresta ombrófila aberta com cipó e floresta ombrófila aberta com palmeira no estado do maranhão. Kanegae Júnior et al. (2006) avaliaram o uso de interpoladores determinísticos e estatísticos para a estratificação de povoamentos de *Eucalyptus sp.*

2.1.2 Aspectos legais da exploração de vegetação nativa

Segundo a Lei 14.309 de 10 de junho de 2002, é possível a exploração de vegetação nativa, mediante anuência do órgão público competente, o qual analisará o estudo apresentado pelo proponente, emitindo parecer favorável ou não, mediante condicionantes para intervenção na área proposta (MINAS GERAIS, 2002). Em seu artigo 41, a lei condiciona a exploração de vegetação nativa a planos de manejo, cujos critérios de execução são regidos por portarias do Instituto Estadual de Florestas - IEF (2002).

Segundo a Portaria nº 191, de 16 de setembro de 2005, a intervenção sobre vegetação nativa está condicionada à formalização de documentação prévia descritiva da área a sofrer intervenção, da qual, o atendimento ao Anexo II desta portaria, onde é exigido a apresentação do inventário quantitativo e qualitativo da biomassa florestal (IEF, 2005).

Conforme descrito no Anexo V da portaria 191, item 4.3.3.9, o limite máximo do erro de amostragem admissível, para os processos formalizados é de no máximo 15%, ao nível de 90% de nível de confiança. O projeto Inventário Florestal de Minas Gerais avaliou inúmeros fragmentos de cerrado *sensu stricto* e encontrou erros de inventário superiores a 20%, mostrando a necessidade de ferramentas que auxiliem no aumento da precisão do inventário.

2.2 Sensoriamento remoto

2.2.1 Conceitos básicos

Sensoriamento remoto é conceituado de maneira mais usual, como sendo uma técnica utilizada para estudo de objetos, em que os dados coletados por instrumentos, não estejam em contato direto com os mesmos (AVERY; BERLIN, 1992; MENESES, 2001).

Já autores, como Florenzano (2002), restringem esse conceito ao uso destes sensores para o monitoramento da superfície terrestre. Para estes o sensoriamento remoto é a utilização de sensores para captação de imagens da superfície terrestre, utilizando, para isso, a energia refletida ou emitida por esta superfície.

O sensoriamento remoto segue o princípio da captação da energia refletida ou emitida (ex: incêndios florestais) pela superfície terrestre (BAUERMANN, 2008). Desta forma três elementos são fundamentais ao sensoriamento remoto:

- **Sensor:** Aparelho que capta a energia refletida ou emitida em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

- **Radiação eletromagnética (REM):** Junção de campo magnético e campo elétrico que se propagam no vácuo transportando energia.

- **Objeto:** Corpo em estudo que, em função de sua natureza (física, química e biológica), reflete a energia, em diferentes comprimentos de onda, no espectro eletromagnético.

Os sensores utilizados para estudos de sensoriamento remoto podem ser divididos em sensores ativos e passivos. Os sensores ativos são aqueles que emitem as ondas eletromagnéticas e captam as ondas refletidas pelos objetos na superfície terrestre (ex: radares). Já os sensores passivos são aqueles que apenas captam a radiação refletida ou emitida pela superfície terrestre. Neste caso, a radiação eletromagnética é emitida pelo sol.

A qualidade de imageamento de um sensor é definida pelas resoluções: espacial, espectral, temporal e radiométrica (MORAES, 2002).

A resolução espacial está relacionada ao nível de detalhamento conseguido pela imagem. Ela expressa o tamanho do menor elemento que pode ser identificado pela imagem. Por exemplo, o sensor do satélite RapidEye® possui resolução espacial de 5m x 5m.

A resolução espectral é definida como o número e amplitude de bandas (faixas) de comprimento de onda do espectro eletromagnético que o sensor consegue captar. O sistema ótico capta parte do espectro eletromagnético e um sensor projetado para determinados comprimentos de onda será capaz de receber a radiação refletida ou emitida pela superfície terrestre ou objeto (SILVA, 2009).

A resolução radiométrica é dada pelo número de valores digitais (DN), representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. Quanto maior o número de valores, maior é a resolução radiométrica. O número de níveis de cinza é comumente expresso, em função do número de dígitos binários (bits) necessários para armazenar, em forma digital, o valor do nível máximo (GONZALEZ; WOODS, 2000).

A resolução temporal remete à periodicidade em que o sensor consegue imagear uma mesma área. E é dada pelo tempo em que o sensor consegue repetir a informações referentes ao objeto. Por exemplo, a resolução temporal do sensor RapidEye é diária (offnadir) e 5,5 dias (nadir).

A completa faixa de comprimentos de onda e de frequência da REM é chamada de espectro eletromagnético. Este espectro varia desde as radiações gama com comprimentos de onda da ordem de 10^{-6} μm , até as ondas de rádio da ordem de 100 metros.

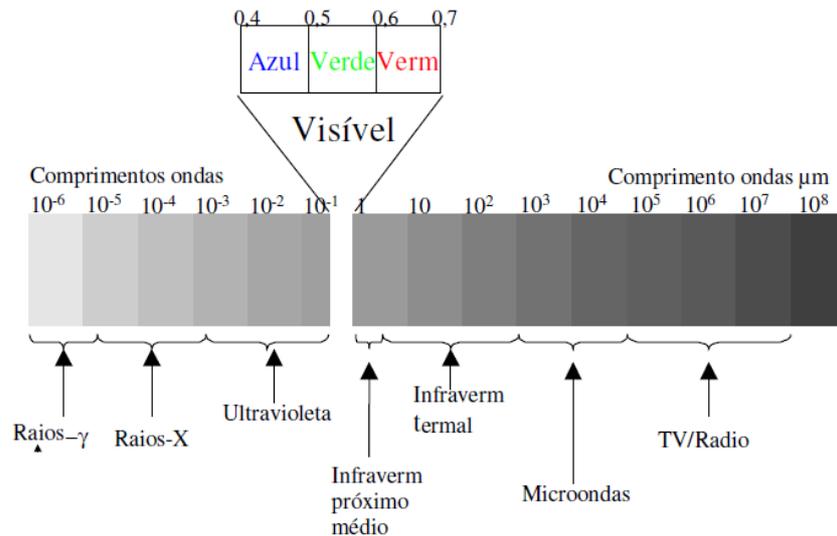


Figura 1 Espectro eletromagnético
 Fonte: Moraes (2002)

A Figura 1 apresenta o espectro eletromagnético. A medida que se avança para a direita do espectro eletromagnético, as ondas apresentam maiores comprimentos de onda e menores frequências. A faixa espectral mais utilizada em sensoriamento remoto estende-se de 0,3 μm a 15 μm , embora a faixa de microondas também seja utilizada (MORAES, 2002).

Os objetos, corpos ou áreas na superfície terrestre podem absorver, refletir ou transmitir a energia eletromagnética incidente, de acordo com suas características físicas químicas e biológicas. Pelo princípio da conservação da energia, a soma desses três componentes (reflectância, absorptância e transmitância) é sempre igual, em intensidade, à energia incidente. Os sensores remotos, que obtêm imagens nas regiões do visível ao infravermelho, medem a intensidade da radiação eletromagnética refletida (MENESES, 2001).

O comportamento de cada material, em relação à quantidade refletida da REM, em função do comprimento de onda, recebe o nome de *curvas de assinatura espectral* (AVERY; BERLIN, 1992). A maior parte da radiação eletromagnética (luz) dos intervalos do azul (0,35 a 0,50 μm) e do vermelho (0,50 a 0,62 μm) é absorvida pela clorofila, enquanto no intervalo do verde (0,62 a 0,70 μm) boa parte é refletida. A radiação do infravermelho próximo (0,74 a 1,10 μm) é pouco afetada pela clorofila, mas muito influenciada pela estrutura foliar da vegetação alvo (BAUERMANN, 2008). Desta maneira, o conhecimento das curvas de assinatura espectral dos materiais, influencia diretamente na escolha do melhor sensor para cada tipo de estudo, uma vez que estas auxiliam na escolha das bandas que são melhores para diferenciar tais materiais. Na Figura 2 tem-se a assinatura espectral de alguns materiais.

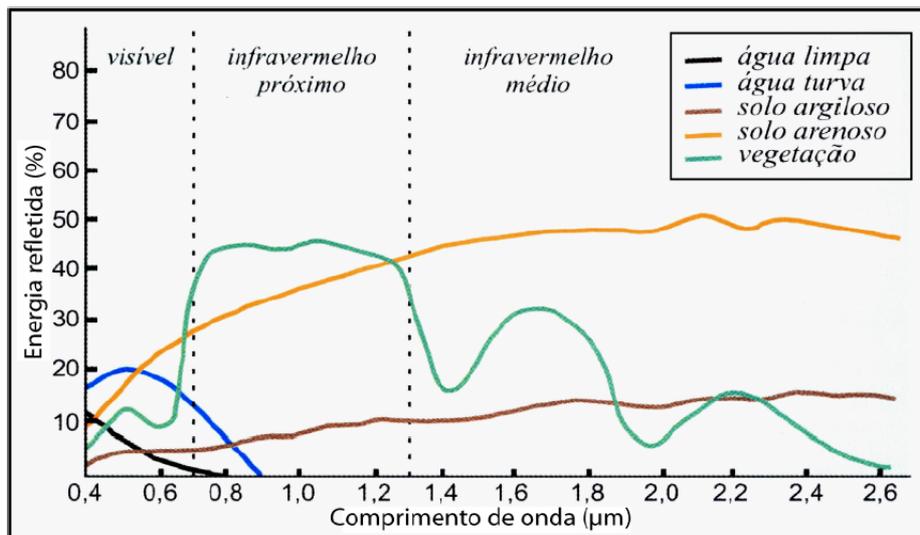


Figura 2 Curvas de assinatura espectral

Fonte: Bauermann (2008). Adaptação de Florenzano (2002)

2.2.2 Segmentação e classificação de imagens

O processo de segmentação de imagens de satélite pode ser definido como a subdivisão da imagem em porções menores e mais homogêneas, levando em consideração um conjunto de características intrínsecas como: uniformidade do pixel, textura, reflectância, nível de cinza, etc. (WOODCOCK et al., 1994). De acordo com Halle (1999), Jahn (1997) e Ryherd e Woodcock (1996) a aplicação de procedimentos de segmentação no sensoriamento são recentes.

A segmentação parte do pressuposto de que as informações contextuais são importantes e que desta forma a interpretação de uma cena deve considerar não apenas a dimensão espectral, como também, a dimensão espacial. Para tanto, é necessário que o processo de segmentação seja moldado, em função da resolução da imagem e da escala esperada para os objetos (ANTUNES, 2003).

A decisão de se agrupar ou não um pixel ou objeto é tomada pelo grau de homogeneidade. Os pixels ou objetos são associados se o grau de homogeneidade calculado for inferior ao parâmetro de escala. O parâmetro de escala determina a heterogeneidade máxima dos objetos e influencia no seu tamanho (DEFINIENS, 2003).

A classificação de imagens pode ser visual, baseada pixel a pixel ou baseada em objetos. Esta pode ser diferenciada em classificação supervisionada, em que o usuário define alguns pixels e deixa que o algoritmo classifique os outros, ou em não supervisionada, em que o computador realiza toda a classificação.

A classificação visual é realizada com base em objetos ou segmentos de imagem, uma vez que ficaria muito difícil ao interprete classificar a um nível de detalhamento tão pequeno quanto o pixel. Já a classificação pixel a pixel é feita

de maneira automatizada, por computação, em que algoritmos especializados classificam ao nível de detalhamento de pixel a pixel (DEFINIENS, 2003).

Baatz e Schäpe (2000) definem como um dos principais requisitos para a classificação baseada em objeto que os seguimentos criados tenham força descritiva e que contenham pixel apenas de uma classe semântica do mesmo grupo.

Para cada segmento (objeto), são calculadas características do objeto e arquivadas em bancos de dados. Em comparação às concepções de classificação baseadas em pixel, que somente utilizam as características espectrais, os objetos de imagem conhecem, já no estado não classificado, os seus vizinhos e contêm diversas informações adicionais, tais como textura, forma, relações com, sobre, ou sub-objetos e diversas outras (ANDERSEN et al., 2005).

Blaschke et al. (2000) apresentaram as perspectivas de utilização de processamento de imagens orientado ao objeto para o estudo ambiental.

Bernardi et al. (2007) compararam o processo de classificação orientado ao objeto com o pixel a pixel, salientando a importância de uma boa segmentação no processo de classificação de imagens.

Ferreira et al. (2005) trabalharam com diferentes técnicas de classificação visual e digital para a identificação de fragmentos florestais nativos em imagens LandSat e CBERS.

2.2.3 Características do sensor RapidEye®

A RapidEye® opera seu próprio sistema, composto por cinco satélites de Sensoriamento Remoto, capazes de coletar imagens sobre grandes áreas, com alta capacidade de revisita. O sistema foi especialmente desenvolvido e configurado para satisfazer as necessidades específicas do mercado que utiliza imagens de satélites de forma regular e com alta definição. A combinação das

resoluções espacial, espectral e temporal é única no mercado de imagens de satélites em todo o mundo (FELIX; KAZMIERCZAC; ESPINDOLA, 2009). No Quadro 1 encontra-se as especificações técnicas gerais do sistema RapidEye.

Quadro 1 Características do sensor RapidEye®

Fonte: Felix, Kazmierczac e Espindola (2009)

NÚMERO DE SATÉLITES	5
ALTITUDE DE ÓRBITA	630 Km, Órbita síncrona com o sol
HORA DE PASSAGEM NO EQUADOR	11:00 hs (aproximadamente)
VELOCIDADE	27.000 km/h
LARGURA DA IMAGEM	77km
TEMPO DE REVISITA	variavelmente (off-nadir); 5,5 dias (nadir)
CAPACIDADE DE COLETA	4,5 milhões de km ² /dia
TIPO DO SENSOR	Multiespectral (pushbroom imager)
BANDAS ESPECTRAIS	5 (Red, Green, Blue, Red Edge, Near IR)
RESOLUÇÃO ESPACIAL (NADIR)	6,5 m
TAMANHO DO PIXEL (ORTORRETIFICADO)	5 m
ARMAZENAMENTO DE DADOS A BORDO	1.500 km de dados de imagem por órbita
RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA	15 bits
VELOCIDADE DE DOWNLOAD (BANDA X)	80 Mbps

As imagens RapidEye® possuem aplicações nas mais diversas áreas como: agricultura, floresta, cartografia, energia e segurança.

2.3 Interpoladores espaciais

2.3.1 Conceitos

O processo de interpolação pode ser entendido como o mecanismo para se encontrar o valor de um campo, em um número tão grande quanto se queira de posições, a partir de uma de suas possíveis representações discretas. Como cada representação possui suas particularidades, técnicas diferentes são usadas na determinação dos valores de um geo-campo em todas as suas posições desejadas (BARBOSA, 1997).

A interpolação é uma técnica utilizada para a estimativa do valor de um atributo em locais não amostrados, a partir de pontos amostrados na mesma área ou região. A interpolação espacial converte dados de observações pontuais em campos contínuos, produzindo padrões espaciais que podem ser comparados a outras entidades espaciais contínuas. O raciocínio que está na base da interpolação é, em média, os valores do atributo tendem a ser similares em locais mais próximos do que em locais mais afastados.

A Figura 3 ilustra o conceito de vizinhança e influência dos pontos amostrados sobre o ponto a ser estimado. O ponto amarelo refere-se ao local que se deseja estimar. Os pontos vermelhos são os locais amostrados mais próximos ao local a ser estimado e, portanto, exercem maior influência sobre o ponto a ser estimado. Os pontos brancos são os locais amostrados mais distantes, com menor influência sobre o ponto a ser estimado.

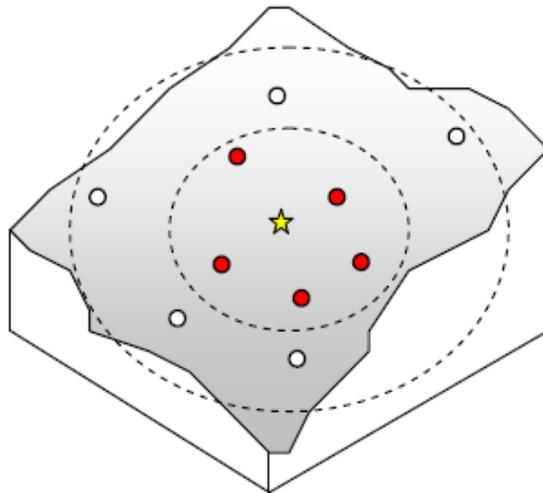


Figura 3 Ponto a ser estimado e influência de pontos amostrados
Fonte: Kanegae Júnior (2004)

Esse conceito também fundamenta a base das relações espaciais entre fenômenos geográficos, utilizando a correlação espacial como meio de diferença dos atributos estimados (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

De acordo com Environmental Systems Research Institute - ESRI (2001), os interpoladores espaciais podem ser divididos em dois grupos: determinísticos e estatísticos. Os interpoladores determinísticos são aqueles que geram estimativas, a partir de pontos medidos e se baseiam na configuração espacial da amostra. Estes interpoladores não reconhecem agrupamentos de pontos, sendo os pesos proporcionais ao inverso da distância (YAMAMOTO, 2001). A redundância de informação dos pontos amostrados não é considerada por esses interpoladores.

Segundo Landim (1998), como interpoladores determinísticos destacam-se o peso do inverso da distância - IDW, a função de base radial - RBF e a triangulação linear - TIN. Como interpolador geoestatístico tem-se a krigagem ou krigeagem.

O interpolador geoestatístico ou krigagem utiliza-se das propriedades estatísticas e estimativas da configuração espacial dos pontos amostrados, para a estimativa do ponto desejado. A técnica de krigagem baseia-se no estudo da variabilidade espacial da característica de interesse. Esta técnica é superior aos demais interpoladores por permitir calcular o erro associado a cada estimativa ou variância da krigagem (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1978).

Tais interpoladores podem forçar a superfície resultante passar pelos locais medidos ou não. Diz-se interpolador exato, quando o mesmo prediz um valor idêntico ao medido e inexato, quando ele prediz um valor diferente daquele amostrado. A utilização de um ou outro, deve-se, essencialmente, ao objetivo do estudo, pois o interpolador inexato é utilizado, quando se quer suavizar as estimativas, evitando-se picos ou vales nas estimativas locais (KANEGAE JÚNIOR, 2004).

Os interpoladores determinísticos podem ser subdivididos em interpoladores globais, os quais fazem previsões, usando todos os pontos amostrados e os locais que utilizam apenas pontos vizinhos ao local que se deseja estimar, ou seja, pequenas áreas em relação ao total da área em estudo (KANEGAE JÚNIOR, 2004).

2.3.2 Krigagem

Krigagem é um interpolador geoestatístico desenvolvido por Matheron (1963), que deu este nome em homenagem ao pesquisador Daniel Krige. Por ser um interpolador geoestatístico a krigagem necessita que os dados possuam dependência espacial. Desta maneira, todo o estudo variográfico deve ser realizado previamente ao uso deste interpolador. Mais informações sobre estudo variográfico, assim como seu desenvolvimento podem ser encontrados em Mello et al. (2006).

A diferença entre krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a $1/N$ (N = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos, como: o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Na krigagem os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Tanto a krigagem quanto a cokrigagem efetuam as previsões com variância mínima e sem viés, sob a validade da hipótese intrínseca da geoestatística. A hipótese intrínseca assume que a $E\{Z(X_i)\}$ é igual a média, e que a variância seja constante, dependendo apenas da distância e não da posição.

Esta estimativa pode ser obtida através da seguinte fórmula:

$$\hat{z}(x_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

em que $\hat{z}(x_o)$ é o estimador no ponto não amostrado (x_o) ; λ_i é o peso que cada valor avaliado recebe, conforme a estrutura de continuidade espacial do volume e $z(x_i)$ é o valor do i -ésimo ponto amostrado. Este processo é efetuado numa grade quadrada ou retangular com as coordenadas pré-definidas, sendo esta uma krigagem do tipo pontual.

Diversos trabalhos utilizaram a técnica de interpolação geoestatística ao inventário florestal. Assis et al. (2009) utilizaram técnicas de interpolação como estratégia de amostragem para povoamentos jovens de *Eucalyptus sp.* Mello et al. (2006) usaram krigagem em bloco para predizer o volume de um talhão de *Eucalyptus grandis*. Ushizima, Bernardi e Landim (2003) aplicaram a teoria geoestatística para a detecção e predição do padrão espacial de *Anadenanthera peregrina*, diferenciando áreas com maior agregação de indivíduos das áreas com menor agregação e áreas desprovidas de indivíduos, com o intuito de fornecer subsídios para a exploração florestal, otimizando a relação entre volume de madeira obtida e tamanho da área.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos da vegetação com utilização de sensoriamento remoto e geoprocessamento ainda são muito recentes, principalmente, a utilização destas técnicas aplicadas ao inventário florestal. Silva (2009) trabalhou a utilização de técnicas de segmentação e classificação de imagens LandSat5 TM baseada em interpretação visual, para a estratificação da fisionomia cerrado *sensu stricto*.

Neste trabalho serão utilizadas imagens de maior resolução espacial e, também, a implementação de técnicas de segmentação automática. As técnicas de segmentação automática permitirão trabalhar com um volume muito maior de dados.

Já a geoestatística é bastante utilizada em estudos de inventários florestais. Porém, sua grande maioria aplica-se a florestas plantadas. A utilização dessas técnicas em florestas nativas precisam ser mais estudadas, a fim de verificar a existência de correlação espacial entre amostras e incorporá-las ao inventário florestal, buscando maior precisão no processo de estimação da característica de interesse.

REFERÊNCIAS

ANDERSEN, T. et al. Análise orientada a objetos de dados de sensoriamento remoto para a obtenção de parâmetros aquáticos/terrestres. In: BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG Avançados**: novos sistemas sensores métodos inovadores. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. p. 286

ANTUNES, A. F. B. **Classificação de ambiente ciliar baseada em orientação a objeto de imagens de alta resolução espacial**. 2003. 147 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

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, 2009.

AVERY, T. E.; BERLIN, G. L. **Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation**. 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1992.

BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J., BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Ed.). **Angewandte geographische informations verarbeitung XII**. Heidelberg: Wichmann-Verlag, 2000. p. 12-23. Disponível em: <www.definiens.com>. Acesso em: 23 ago. 2007.

BARBOSA, C. C. F. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento**. 1997. 160 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

BAUERMANN, G. C. **Uso de imagens de sensores remotos na estimativa de características dendrométricas de povoamentos de eucalipto**. 2008. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

BERNARDI, H. V. F. et al. Classificação digital do uso do solo comparando os métodos “*pixel a pixel*” e orientada ao objeto em imagem QuickBird. **Anais SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: [s. n.], 2007. p. 5595-5602.

BLASCHKE, T. et al. Object-oriented image processing in na integrated GIS/Remote Sensing environmnet and perspectives for environmental applications. In: CREMERS, A.; GERVE, K. (Ed.). **Environmental information for planning, politics and the public**. Marburg: Metropolis-Verlag, 2000. v. 2, p. 555-570.

BOLFARINE, H.; BUSSAB, W. O. **Elementos de amostragem**. São Paulo: Blusher, 2005. 274 p.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.). **Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura**. 2. ed. ver. ampl. Brasília: Embrapa-SPI, Embrapa-CPAC, 1998. p. 3-11.

CARVALHO, L. M. T; SCOLFORO, J. R. S. **Inventário florestal de Minas gerais: monitoramento da flora nativa 2005-2007**. Lavras: UFLA, 2008. 357 p.

CAVALCANTI, F. J. B. et al. Comparação dos valores estimados por amostragem na caracterização da estrutura de uma área de floresta na amazônia com as informações registradas no censo florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1061-1068, 2011.

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

DEFINIENS, I. **Ecognition user guide 3**. München: Definiens Imaging, 2003. 413 p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **Using ArcGIS geostatistical analyst**. Redlands, 2001. 300 p.

FELIX, I. M.; KAZMIERCZAC, M. L.; ESPINDOLA, G. M. RapidEye: a nova geração de satélites de observação da terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...**Natal: INPE, 2009. p. 7619-7622.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

GAMA, J. R. V. et al. Fitossociologia de duas fitocenoses de floresta ombrófila aberta no município de Codó, Estado do Maranhão. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, 2007.

GAMA, J. R. V.; PINHEIRO, J. C. Inventário florestal para adequação ambiental da fazenda santa rita, município de santarém, estado do Pará. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 3, p. 585-592, jul./set. 2010.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: E. Blücher, 2000. 509 p.

HALLE, W. **Ausgewahlte Algorithmen der segmentierung und klassifikation zur thematischen Bildverarbeitung in der Fernerkundung**. 1999. Disponível em: <<http://elib.dlr.de/17918>>. Acesso em: 22 nov. 2011.

HOGAN, D. J. et al. **Migração e ambiente no Centro-Oeste**. Campinas: NEPO/UNICAMP, 2002. 324 p.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JÚNIOR, J. A. **Forest mensuration**. 3rd ed. New York: J. Willey, 2003. 443 p.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (Minas Gerais). **Portaria 191, de 16 de setembro de 2005**. Dispõe sobre as normas de controle da intervenção em vegetação nativa e plantada no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.mltengenharia.com.br/pdfs/flor/Portaria%20191-05.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2011.

JAHN, H. An unified approach for grey value and texture segmentation. In SANDAU, R.; JAHN, H. (Ed.). **Autonome sensorsysteme II, aspekte, methoden, komponenten, systeme, Forschungsbericht 97-03, DLR**. Berlin: Institut für Weltraumsensorik, 1997.

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

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

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. **Avaliação de sistema de inventários sucessivos e dos interpoladores espaciais como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *eucalyptus* sp.** 2004. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 147-155, jul. 2005.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: UNESP, 1998. 226 p.

LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. München: BLV, 1973. v. 2, 469 p.

MATÉRN, B. Spatial variation. Stochastic models and their application to some problems in forest surveys and other sampling investigations. **Meddelanden från Statens Skogsforskningsinst**, Berlin, v. 49, n. 5, p. 144, 1960.

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

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

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

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

MENESES, P. R. Fundamentos de radiometria óptica espectral. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

MINAS GERAIS. **Lei 14309, de 19 de junho de 2002**. Dispõe sobre as políticas florestal de proteção à biodiversidade no Estado. Disponível em: < <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5306>>. Acesso em: 24 nov. 2011.

MORAES, E. C. Fundamentos de sensoriamento remoto. In: RUDORFF et al. **Curso de uso do sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente**. São José dos Campos: INPE, 2002. 191 p.

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

REDIN, C. G. et al. Composição florística e estrutura da regeneração natural do Parque Estadual do Espinilho, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 7, p. 1195-1201, jul. 2011.

- RYHERD, S.; WOODCOCK, C. Combining spectral and texture data in segmentation of remotely sensed images. **Photogrammetri Engineering and Remote Sensing**, Maryland, v. 6, n. 2, p. 181-194, Feb. 1996.
- SCOLFORO, J. R.S. **Manejo florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 443 p.
- SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. **Inventário florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 561 p.
- SILVA, S. T. **Estratificação da fitofisionomia cerrado para inventário florestal utilizando geotecnologia**. 2009. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- SHIVER, B. D.; BORDERS, B. E. **Sampling techniques for forest resource inventory**. New York: J. Wiley, 1996. 356 p.
- THOMPSON, S. K. **Sampling**. New York: J. Wiley, 1992. 343 p.
- UBIALLI, J. A. et al. Comparação de métodos e processos de amostragem para estimar a área basal para grupos de espécies em uma floresta ecotonal da região norte matogrossense. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 39, n. 2, p. 305-314, 2009.
- USHIZIMA, T. M.; BERNARDI, J. V. E.; LANDIM, P. M. B. Estudo da distribuição espacial do angico (*Anadenanthera peregrina*) na Floresta Estadual “Edmundo Navarro de Andrade” – Rio Claro, SP, Brasil, empregando metodologia geoestatística. **Holos Environment**, Rio Claro, v.3, n. 1, p.59-73, 2003.
- WOODCOCK, C. E. et al. Mapping forest vegetation using Landsat TM imagery and a canopy reflectance model. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 50, n. 3, p. 240-254, 1994.

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

**CAPÍTULO 2: DESEMPENHO DA AMOSTRAGEM CASUAL
ESTRATIFICADA, UTILIZANDO TÉCNICAS DE SEGMENTAÇÃO E
CLASSIFICAÇÃO DE IMAGEM RAPIDEYE® EM CERRADO *SENSU*
*STRICTO***

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o processo de segmentação e classificação orientada ao objeto da imagem RapidEye® e o desempenho desta, como estratificador de um fragmento florestal de cerrado *sensu stricto* e comparar as estimativas geradas pela amostragem sistemática (AS) com as estimativas da amostragem casual estratificada (ACE). O estudo foi realizado no município de São Romão – MG em uma área de 7.706,59 hectares. Foram distribuídas 157 parcelas de 1000 m² de forma sistemática no fragmento. Em todas as parcelas foram medidas a circunferência a 1,3 m do solo e altura total de todas as árvores. O volume de cada parcela foi obtido por equações de volume geradas para a fisionomia. O processo de segmentação e classificação da imagem foi conduzido de duas formas: automática, em que ambos os processos foram feitos computacionalmente com base no valor de brilho de pixel da imagem e com base em interpretação visual. O resultado da segmentação e classificação da imagem gerou três estratos para ambos os processos. O processamento do inventário mostrou redução de 10,38% do erro de inventário para a ACE com base em segmentação visual em relação a AS e de 4,65% para a ACE com base em segmentação visual. Também observou-se que com 40% de redução da intensidade amostral da ACE baseada em interpretação visual de imagem. O erro de inventário apresentado foi menor do que da AS. Portanto, é possível afirmar que o processo de segmentação e classificação de imagem de satélite se mostrou eficiente na estratificação e na incorporação desta ao inventário florestal.

Palavras-chave: Segmentação e classificação de imagem. RapidEye®. Inventário florestal. Estratificação.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the process of RapidEye ® image segmentation and classification orientated to object and the performance of this image in stratifying a forest fragment of Brazilian Savanna and compare the estimates generated by systematic sampling (SS) with estimates of the stratified random sampling (SRS) . The study was conducted in São Romão - MG in an area of 7,706.59 hectares where 157 1000-m² plots were systematically distributed in the fragment. The circumference at 1.3m from the soil and the total height of all trees were measured in all plots. The volume of each plot was obtained by volume equations generated for this physiognomy. The process of image segmentation and classification was made in two ways: automatic where both processes were made computationally based on the brightness value of image's pixels and based on visual interpretation. The result of image segmentation and classification generated three strata for both processes. The inventory processing showed a reduction of 10.38% of the inventory error for ACE based on visual segmentation in relation to AS and 4.65% for ACE based on visual segmentation. It was also noted that reducing 40% in sampling intensity of ACE based on visual interpretation of image, its inventory error was lower than that of AS. Therefore, the process of segmentation and classification of satellite imagery was proved to be effective for the stratification and its incorporation of the forest inventory.

Keywords: Image segmentation and classification. RapidEye ®. Forest Inventory. Stratification.

1 INTRODUÇÃO

O cerrado brasileiro é o segundo maior bioma do país, com cobertura em cerca de 21% do território e o de maior expressão dentro do estado de Minas Gerais. Sua distribuição no estado se concentra nas regiões norte, noroeste e oeste (CARVALHO; SCOLFORO, 2008). Em contrapartida, é um dos ecossistemas mais ameaçados do mundo. Estima-se que, aproximadamente 55% de sua área original, já tenha sofrido algum tipo de degradação por atividades antrópicas (KLINK; MACHADO, 2005). No estado de Minas Gerais essa degradação se dá, principalmente, pela: expansão urbana, agropecuária e produção mineral.

O manejo sustentável é aquele que favorece uma produção contínua do recurso explorado, sem a deterioração dos demais recursos e benefícios envolvidos (SCOLFORO, 1998). Com a utilização deste, é possível a exploração dos recursos naturais de forma sustentável, a fim de garantir ganhos econômicos e sociais sem levar à deterioração dos recursos naturais.

No entanto, o conhecimento prévio das características da floresta se faz necessário para o manejo florestal sustentável. Segundo Mello et al. (2009), o inventário florestal, por meio da teoria da amostragem, é a maneira eficaz de estimarem-se características quali-quantitativas da floresta. Uma dificuldade encontrada em quantificar e monitorar os fragmentos de Cerrado é a heterogeneidade do mesmo devido à complexidade de seu sistema. Silva, S. (2009) apontam como fatores que influenciam na sua produtividade: tipo de solo, clima, fisiografia, dentre outros. Dessa maneira, são necessárias adoção de técnicas adequadas de amostragem, que propiciem a representatividade e acurácia do inventário florestal.

Segundo Mello e Scolforo (2000), a Amostragem Casual Estratificada (ACE) é o procedimento indicado, quando existe uma grande heterogeneidade

da população em questão. A ACE consiste em subdividir a população de interesse em estratos de maior homogeneidade, a fim de melhorar a precisão do inventário florestal. Porém, para a fitofisionomia Cerrado *Sensu stricto*, é difícil obter uma fonte estratificadora confiável, uma vez que não se tem nenhum tipo de informação prévia da floresta anterior ao inventário florestal.

Segundo Acerbi Júnior, Clevers e Scheapman (2006), a descrição e classificação das fitofisionomias em campo é algo muito oneroso e que demanda um tempo de execução muito grande. Desta maneira, o uso de imagens de sensores remotos, vêm sendo cada vez mais utilizadas, uma vez que permitem o levantamento de grandes extensões de área num curto período de tempo e com custos relativamente, baixos. Vários estudos têm aplicado o sensoriamento remoto ao estudo da vegetação. Mascarenhas, Ferreira e Ferreira (2009) destacaram o uso do sensoriamento remoto como instrumento de proteção ambiental. Souza et al. (2007) apresentam uma revisão bibliográfica sobre os usos do sensoriamento remoto em florestas implantadas.

O processo de segmentação de imagens de satélite pode ser definido como a subdivisão da imagem, em porções menores e mais homogêneas, levando em consideração um conjunto de características intrínsecas como: uniformidade do pixel, textura, reflectância, nível de cinza, etc. (HUSSAIN, 1991; WOODCOCK et al., 1994). O método de segmentação e classificação orientada a objeto, através do processo de segmentação, permite utilizar como unidade de classificação não o pixel individual, mas sim um conjunto de pixels, tornando, assim, possível o incremento de mais variáveis para o processo de classificação. Para além da informação espectral, é possível considerarem-se outros parâmetros bem presentes nas imagens de alta resolução espacial, tais como a forma, textura e relação entre objetos vizinhos (CASTILLEJO-GONZÁLEZ et al., 2009) .

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar o processo de classificação e segmentação de imagem do sensor RapidEye® de forma automática e visual, para a estratificação da fitofisionomia Cerrado *Sensu Stricto* e comparar as estimativas da amostragem casual estratificada (ACE), com estratificação proveniente da segmentação e classificação de imagem, com as estimativas da amostragem sistemática (AS).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área e coleta dos dados

O fragmento está situado no município de São Romão, MG, com área de 7.706,59 hectares, cuja fitofisionomia é do tipo Cerrado *Sensu stricto*. A altitude média do município é de 425,5 metros e o clima, segundo a classificação de Köppen é do tipo Aw, tropical chuvoso típico. A temperatura média do mês mais frio é superior a 18 °C (NIMER, 1979). O tipo de solo predominante é o Neossolo (SCOLFORO; CARVALHO; OLIVEIRA, 2008).

Foram lançadas de forma sistemática 157 unidades amostrais retangulares de 1000 m², com distância de 700 metros entre si. Todas as parcelas foram georeferenciadas, sendo que nestas foram medidas a circunferência a 1,30 m do solo (CAP) e a altura total de todas as árvores com CAP \geq 15,7 cm. O volume foi obtido por equação gerada para a fitofisionomia disponíveis em Rufini et al. (2010).

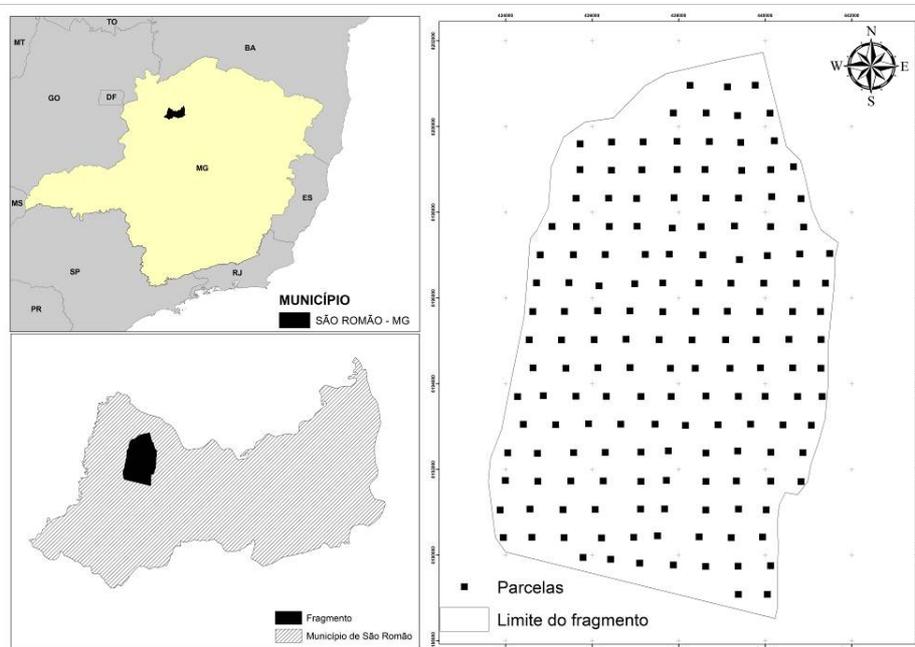


Figura 4 Localização da área de estudo

2.2 Segmentação e classificação da imagem RapidEye®

Os cinco satélites que compõem a constelação da RapidEye®, são equipados com sensores multiespectrais compostos de scanners de linha, com 12.000 pixels cada, capazes de capturar imagens em cinco bandas espectrais, com alcance de comprimento de onda entre 440 Um e 850 Um. É o primeiro sistema orbital a incluir a banda Red-Edge, específica para o monitoramento da atividade fotossintética da vegetação (FELIX; KAZMIERCZAC; ESPINDOLA, 2009), proporcionando, então, a realização deste estudo.

Outras informações importantes sobre a imagem utilizada são: a resolução espacial de 5 metros, resolução radiométrica de 16 bits e, também, o fato desta ser ortorretificada, aumentando de forma significativa a acurácia sobre o posicionamento.

Numa primeira instância, a segmentação é determinada por um grau de homogeneidade, que permite um agrupamento de pixels, de acordo com uma resolução o mais fina possível. O critério de semelhança é usado para definir a uniformidade dos segmentos. Dois critérios são usados para descrever a separação do objeto da imagem: critério da cor (espectral) e o critério da forma (suavização e compactação) (ANTUNES, 2003).

Este processo baseia-se na utilização de algoritmos estatísticos, para a diminuição dos dados de uma imagem digital ao nível de pixel, para objetos maiores e homogêneos. A segmentação multiresolução pode ser descrita como uma técnica *bottom-up* de fusão de regiões, que leva em consideração, múltiplas característica da imagem e que utiliza um algoritmo baseado em crescimento de regiões (BAATZ; SCHAPE, 2000). Este procedimento necessita maior atenção já que, a sua qualidade, afetará diretamente no resultado da classificação. Para este resultado, os parâmetros devem ser ajustados para imagens com diferentes resoluções espaciais e, também, depende de quais alvos estão presentes na imagem e quão estão espalhados.

O parâmetro de escala é utilizado para controlar o tamanho dos objetos na imagem. Este procedimento é realizado pelo algoritmo, na função *Multiresolution Segmentation*, encontrado no software *eCognition®* e se demonstrou bastante eficaz na segmentação das mais diferentes imagens e solução de problemas específicos (GITAS; MITRI; VENTURA, 2004; WANG et al., 2004).

A classificação foi realizada por um novo método de classificação digital de imagens, diferente de pixel-a-pixel, que se baseia apenas nas informações pontuais de cada pixel, utiliza-se de vários atributos como, por exemplo, textura e geometria. Outra vantagem deste processo é que a decisão da classe do objeto, não é realizada apenas pelas características próprias do segmento, mas o contexto em que ele está, ou seja, as informações de cada

objeto podem também ser influenciadas pelos objetos vizinhos, associando-se às informações do ambiente ao elemento (RIBEIRO; KUX, 2009).

A classificação orientada a objetos busca simular técnicas de interpretação visual através da modelagem do conhecimento, para a identificação de feições baseadas na descrição de padrões identificadores, tais como: cor, textura, métrica, contexto (CRUZ et al., 2007). Não muito diferente, este trabalho se utilizou valores de brilho dos objetos para classificar as regiões.

A segmentação e classificação baseada em interpretação visual de imagem utiliza os princípios de fotointerpretação, onde o interprete busca delinear áreas homogêneas com base na tonalidade do pixel. Para a realização deste método utilizou-se composição falsa cor 532 na composição RGB (Red, Green, Blue), pois esta apresentou melhor contraste para o processo.

2.3 Processamento do inventário

O processamento do inventário foi realizado de duas maneiras: i) considerando-se todas as amostras sistematizadas na área como um único estrato, utilizando-se os estimadores da Amostragem Casual Simples (ACS); ii) considerando-se a estratificação realizada pela segmentação e classificação da imagem rapideye®, onde o processamento foi realizado com base nos estimadores da Amostragem Casual Estratificada (ACE).

A fim de verificar o ganho, não somente em precisão, mas também em custo, efetuou-se o processamento de ACE com uma redução de aproximadamente 40% na intensidade amostral em cada estrato. Para se verificar a estabilidade dos estimadores com esta redução, foram efetuadas 1000 simulações em cada estrato, retirando-se, aleatoriamente, 40% das parcelas ali existentes. Para cada simulação, foi obtido o valor de média e variância da amostra “i” do estrato “j”. Efetuadas as 1000 simulações foram, então, obtidas as

estimativas médias de média e variância para cada estrato, as quais foram utilizadas no processamento do inventário.

A precisão dos procedimentos foi avaliada pelo erro de amostragem. O objetivo desta comparação foi avaliar a qualidade e o potencial do uso das técnicas de segmentação e classificação de imagens para obtenção de estratos. A formulação detalhada dos procedimentos de amostragem utilizadas podem ser encontradas em: Cochran (1963), Mello e Scolforo (2000) e Péllico Netto e Brena (1997).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Processo de segmentação e classificação

A segmentação automática foi realizada, tomando como princípio o grau de homogeneidade. Cada segmento formado possui pixels com semelhanças entre si. A classificação foi feita com base no valor médio de brilho de cada segmento, sendo este inversamente proporcional ao volume. Desta maneira, foram obtidos três estratos denominados de: estrato I – Baixa volumetria, estrato II – média volumetria e estrato III – alta volumetria. A Figura 5 mostra a imagem RapidEye® segmentada e cada estrato gerado após a segmentação.

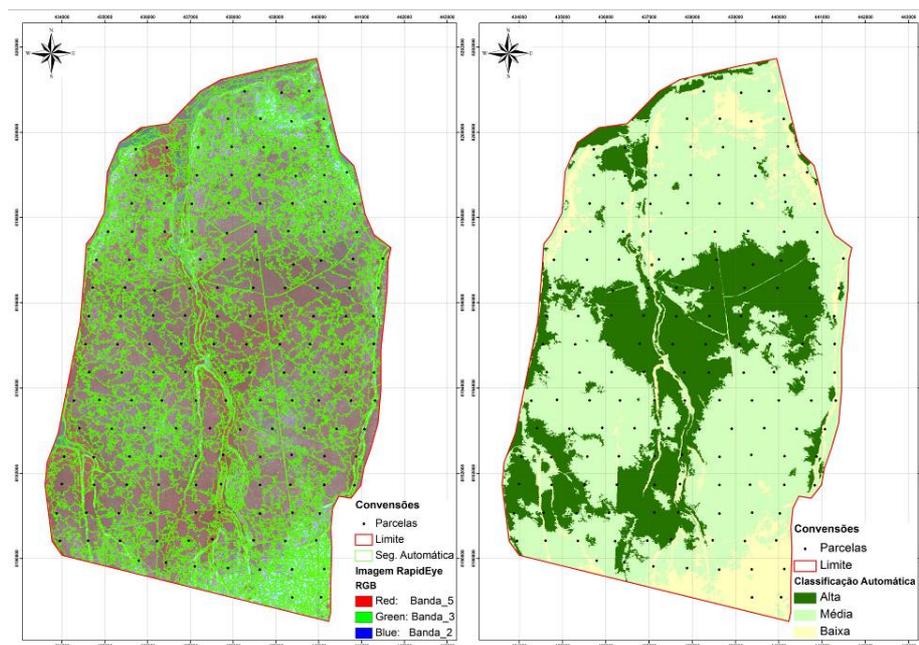


Figura 5 Mapas de estratos gerados pela de segmentação automática

A segmentação com base em interpretação visual, também permitiu a detecção de diferentes regiões na cena, sendo possível a distinção de polígonos com mesmas características espectrais. De antemão, a segmentação visual já se mostrou superior, por permitir a identificação de uma área de preservação permanente, que se estende por toda área de estudo. Desta maneira, foi possível eliminarem-se as unidades amostrais que estavam na APP com vegetação de floresta semidecidual. Esta fisionomia é bem diferente do cerrado e, portanto, deveria ser tratada numa análise separada, pois em conjunto ela provocaria uma variabilidade acentuada nos dados. Tal variabilidade afeta de forma significativa o erro e a média amostral.

A classificação foi realizada posteriormente, considerando que: quanto maior o tom de vermelho no segmento, maior a volumetria. Também foram obtidos três estratos, sendo eles: estrato I – baixa volumetria, estrato II – média volumetria e estrato III – alta volumetria. A Figura 6 representa a segmentação visual, com posterior classificação em estratos. A tabela 1 mostra a quantidade de parcelas e volume médio por estrato pelas duas formas de classificação.

Tabela 1 Informações gerais por estrato em cada método de segmentação e classificação

Método	Estratos	Nº de Parcelas	Volume médio (m ³ /ha)
Seg. Visual	I	27	15,18
	II	66	28,89
	III	50	40,70
Seg. Automático	I	16	16,02
	II	90	27,79
	III	37	43,07

Pelas informações da Tabela 1 é possível verificar que de fato a volumetria média variou entre os estratos de forma acentuada. Portanto, considerar a área total na análise sem separar as variações discrepantes, afeta de forma significativa a precisão do inventário.

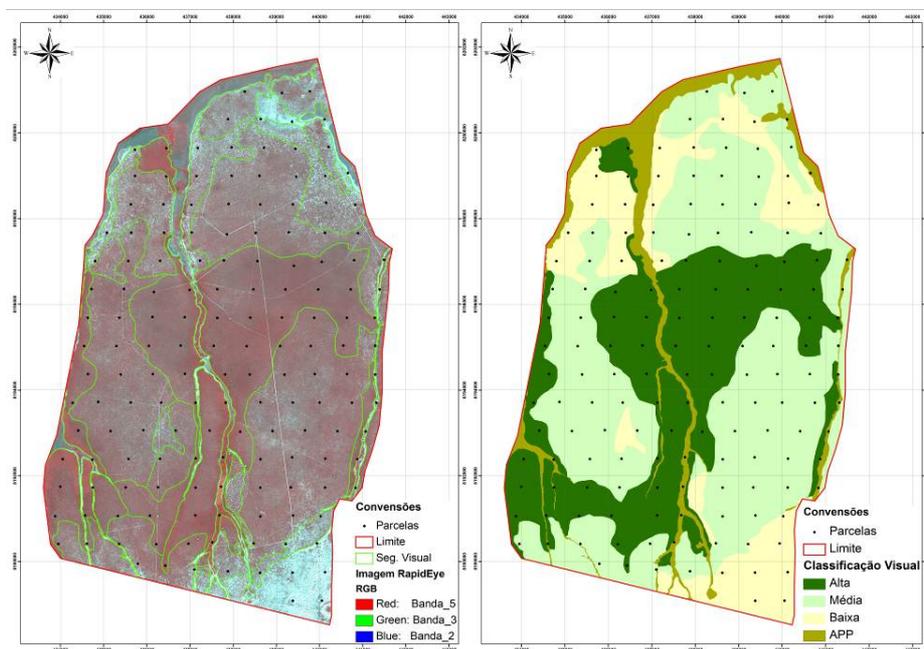


Figura 6 Mapas de estratos gerados pela de segmentação visual

Mesmo sabendo que a vegetação não apresenta mudanças abruptas, a imagem RapidEye® se mostrou eficiente no processo de segmentação com base no volume.

3.2 Processamento do inventário

Após ter detectado, pela classificação visual, a presença de 14 parcelas em uma outra fisionomia que não cerrado, estas foram removidas para o processamento. Por conhecimento “*in loco*”, trata-se de uma floresta semidecidual na Área de Preservação Permanente (APP). A Tabela, contendo o volume por parcelas, assim como, cada estrato pertencente se encontra no anexo I.

A Tabela 2 contém os resultados do processamento do inventário florestal pela amostragem sistemática e amostragem casual estratificada, onde a estratificação foi obtida pela classificação automática e visual das imagens. Na mesma tabela, encontram-se, também, os resultados do processamento do inventário, com redução da intensidade amostral em 40%. Isto implica em reduzir de 143 para 86 parcelas avaliadas na área. A redução foi baseada em um processo com 1000 simulações, retirando diferentes parcelas de forma aleatória em cada estrato.

Tabela 2 Amostragem sistemática (AS); Amostragem casual estratificada (ACE) e Amostragem casual estratificada, com redução de 40% para segmentação visual e automática

Estimadores	Segmentação Visual			Segmentação Automática	
	AS	ACE	ACE (40%)	ACE	ACE (40%)
Média (m ³ .ha ⁻¹)	30,43	30,22	30,22	31,03	31,03
Desvio Padrão (m ³ .ha ⁻¹)	20,92	18,83	18,83	19,61	19,57
Erro do inventário (m ³)	3,4553	3,0967	4,0143	3,2945	4,2774
Erro do inventário (%)	11,35	10,25	13,28	10,62	13,78
Int. de Confiança (m ³ .ha ⁻¹)	26,97 - 33,89	27,12 - 33,31	26,20 - 34,24	27,74 - 34,33	26,75 - 35,31

A Tabela 2 mostra as estatísticas de cada procedimento de amostragem. O erro de amostragem foi de 11,35% para a AS, 10,25% para a ACE com base em segmentação visual e 10,62% para ACE com base em segmentação automática. Como foi possível perceber, a diminuição no erro percentual foi pequena. No entanto, essa estatística é gerada a partir de duas variáveis aleatórias (média e erro do inventário). Caso haja flutuações consideradas na média ou no erro, acontecerá impacto para mais ou para menos. Assim, comparou-se o erro na unidade da variável avaliada. A diminuição do erro de inventário foi de 10,38% para a ACE baseada em segmentação e classificação visual e de 4,65% para a ACE baseada em segmentação e classificação automática, quando comparada à amostragem sistemática, o que mostra a superioridade da segmentação visual em relação à automática.

Silva, P. (2009), comparando métodos de classificação de imagem, coloca que a classificação depende, fundamentalmente, de uma boa segmentação. Nesse caso percebe-se que há superioridade da segmentação visual

e que são necessários mais estudos para definir parâmetros em uma segmentação automática.

Silva, S. (2009), trabalhando com fragmentos de Cerrado *Sensu stricto*, encontrou diminuição nos erros de amostragem na ordem de 48%, utilizando imagem Landsat 5 TM e técnicas de segmentação visual. Uma hipótese que justifica tal discrepância pode ser o fato de a intensidade amostral neste trabalho ser bem maior do que no trabalho supracitado, sendo assim, maior a possibilidade de coleta de dados mais heterogêneos, mesmo dentro de um dado estrato.

Do total de parcelas (143), reduzir em 40% implica em diminuir o número de parcelas avaliadas em 57 unidades. Com esta redução, houve um pequeno aumento no erro do inventário, porém insuficiente para que o mesmo ultrapassasse o limite de 15% da legislação vigente. Apesar deste aumento no erro, em termos de trabalho foi bem significativo. Ao invés de 143 parcelas, serão medidas apenas 86. Segundo informações dos gestores do inventário de Minas Gerais, o tempo gasto para lançar e medir 1 parcela em área de cerrado são de 2 dias trabalhados. Portanto, caso sejam considerados os rendimentos das equipes do inventário de Minas, houve um ganho de 114 dias de trabalho. Este valor representa, aproximadamente, 5 meses de trabalho. Logo, é um número bastante significativo no cômputo do custo do levantamento, sem que haja impacto na precisão do mesmo.

4 CONCLUSÕES

i) A segmentação da imagem RapidEye® mostrou-se eficiente, principalmente, quando feita com base em interpretação visual;

ii) A segmentação automática mostrou-se eficiente; não existem padrões na escolha dos parâmetros a serem utilizados no processo de segmentação, propiciando, como ocorreu neste caso, com qualidade inferior ao realizado de forma visual;

iii) A amostragem casual estratificada se mostrou superior ao da amostragem sistemática pelos dois processos de estratificação;

iv) Esta metodologia torna-se uma ferramenta valiosa para redução de tempo e custo de levantamento em campo, uma vez que as imagens RapidEye® serão fornecidas, gratuitamente, para todo o estado de Minas Gerais, na internet, além de possibilitar a redução substancial na intensidade amostral sem que este exceda ao erro máximo permitido por lei.

REFERÊNCIAS

ACERBI JÚNIOR, F. W.; CLEVERS, J. P. G. W.; SCHEAPMAN, M. E. The assessment of multi-sensor image fusion using wavelet transforms for mapping the Brazilian Savanna. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 8, n. 4, p. 278–288, Dec. 2006.

ANTUNES, A. F. B. **Classificação de ambiente ciliar baseada em orientação a objeto de imagens de alta resolução espacial**. 2003. 147 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J., BLASCHKE, T.; GRIESEBNER, G. (Ed.). **Angewandte geographische informations verarbeitung XII**. Heidelberg: Wichmann-Verlag, 2000. p. 12-23. Disponível em: <www.definiens.com>. Acesso em: 23 ago. 2007.

CARVALHO, L. M. T; SCOLFORO, J. R. S. **Inventário florestal de Minas gerais: monitoramento da flora nativa 2005-2007**. Lavras: UFLA, 2008. 357 p.

CASTILLEJO-GONZÁLEZ, I. L. et al. Object-and pixel-based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using Quick Bird imagery. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 68, n. 2, p. 207-215, 2009.

COCHRAN, W. G. **Técnicas de amostragem**. Rio de Janeiro: USAID, 1963 555 p.

CRUZ, C. B. M. et al. Classificação orientada a objetos no mapeamento dos remanescentes da cobertura vegetal do bioma Mata Atlântica, na escala 1:250.000. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 5691-5698.

DEFINIENS, I. **Ecognition user guide 3**. München: Definiens Imaging, 2003. 413 p.

FELIX, I. M.; KAZMIERCZAC, M. L.; ESPINDOLA, G. M. RapidEye: a nova geração de satélites de observação da Terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 7619-7622.

GITAS, I. Z.; MITRI, G. H.; VENTURA, G. Object-based image classification for burned area mapping of Creus Cape, Spain, using NOAA-AVHRR imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 92, n. 3, p. 409-413, 30 Aug. 2004.

HUSSAIN, Z. **Digital image processing**: practical application of parallel processing techniques. Sussex: E. Horwood, 1991. 406 p.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 147-155, jul. 2005.

MASCARENHAS, L. M. A.; FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G. Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: análise da cobertura vegetal remanescente na bacia do rio Araguaia. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 21, p. 1, p. 5-18, abr. 2009.

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

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

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 422 p.

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

RIBEIRO, B. M. G.; KUX H. J. H. Classificação orientada a objeto para mapeamento do uso do solo: métodos de análise de expansão urbana. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 7893-7900.

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

SCOLFORO, J. R. S.; CARVALHO, L. M. T.; OLIVEIRA, A. D. **Inventário da flora nativa e dos reflorestamentos de Minas Gerais**. Lavras: UFLA, 2008. 150 p.

SCOLFORO, J. R. S. **Manejo florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 443 p.

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

SILVA, P. R. **Comparação de métodos na classificação digital de imagens**. 2009. 34 p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) - Lavras: UFLA, 2009.

SILVA, S. T. **Estratificação da fitofisionomia cerrado para inventário florestal utilizando geotecnologia**. 2009. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

SOUZA, C. C. et al. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 409-417, out./dez. 2007.

WANG, Z. et al. **Object-oriented classification and application in land use classification using SPOT-5 PAN imagery**. 2004. (Abstract). Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1370370>. Acesso em: 23 dez. 2011.

WOODCOCK, C. E. et al. Mapping forest vegetation using Landsat TM imagery and a canopy reflectance model. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 50, n. 3, p. 240-254, 1994.

**CAPÍTULO 3: DESEMPENHO DA ESTRATIFICAÇÃO EM UM
FRAGMENTO DE CERRADO *SENSU STRICTO* UTILIZANDO
INTERPOLADOR GEOESTATÍSTICO**

RESUMO

O objetivo deste estudo foi verificar a existência de dependência espacial, em um fragmento de cerrado *sensu stricto*, incorporá-la ao inventário florestal como estratificador e comparar o desempenho da amostragem casual estratificada (ACE) com a amostragem sistemática (AS), além de verificar a precisão da ACE com intensidade amostral reduzida. Foram distribuídas de forma sistemática 157 unidades amostrais, com área de 1000 m². Em todas as parcelas foram medidas a circunferência a 1,3 m do solo e altura total de todas as árvores. O volume de cada parcela foi obtido por equações de volume geradas para a fisionomia. Verificou-se que a característica dendrométrica volume se encontra estruturada espacialmente. O erro de amostragem do inventário obtido para a AS foi de 11,38% e 6,47% para ACE com a intensidade amostral reduzida em 58,6%, o erro para ACE foi de 9,93%. Foi verificado que mesmo com uma redução acentuada na intensidade amostral, as estimativas da ACE são mais precisas que as estimativas da AS. Portanto, pode-se dizer que, a estratificação com base na dependência espacial da característica de interesse torna-se uma ferramenta muito útil na melhora da qualidade da estimação no inventário florestal mesmo com redução da intensidade amostral.

Palavras-chave: Inventário florestal. Estatística espacial. Interpolador espacial. Krigagem.

ABSTRACT

The purpose of this study was to verify the existence of spatial dependence in a Brazilian Savanna fragment, incorporate it to the forest inventory as a stratifier and compare the accuracy of systematic sampling (SS) and stratified random sampling (SRS), such as verifying the accuracy of SRS with decreased sampling intensity. A total of 157 100-m² sample plots were distributed systematically in the area. The circumference at 1.3m from the soil and the total height of all trees were measured in the plots. The volume of each plot was obtained by volume equations generated for this physiognomy. It was found that the dendrometric characteristic volume is spatially structured. The inventory error obtained for the SS was 11.38% and 6.47% for SRS. With the sampling intensity decreased by 58.6% the error for ACE was 9.93%. In addition, it was found that even with a marked reduction in the sampling intensity, the estimates of the stratified random sampling is more accurate than the estimates of systematic sampling. Therefore, we can say that the stratification based on the spatial dependence in the characteristic of interest is a very useful tool in improving the quality of forest inventory estimators even with a reduction in sampling intensity.

Keywords: Forestry inventory. Spatial statistic. Spatial interpolator. Kriging.

1 INTRODUÇÃO

O cerrado ocupa cerca de 21% do território nacional, sendo o segundo maior bioma brasileiro, além de ser considerado a última fronteira agrícola do mundo (BORLAUG, 2002). Com a ocupação do homem e o crescente desenvolvimento, a destruição dos ecossistemas, que constituem o cerrado se agrava cada vez mais. Estima-se que 55% da área original do cerrado foi desmatada ou modificada pela ação antrópica (KLINK; MACHADO, 2005).

Para garantir a sustentabilidade no processo de exploração dos recursos naturais necessários ao desenvolvimento, adotam-se práticas de manejo sustentado. Ele propicia uma série de bens, para os quais não há mercado perfeito e que são de difíceis mensurações em termos monetários. O manejo sustentável é aquele que favorece a uma produção contínua do recurso explorado, sem a deterioração dos demais recursos e benefícios envolvidos (SCOLFORO, 1998). Para a efetivação com qualidade de um plano de manejo, é de fundamental importância conhecer o potencial produtivo. Este conhecimento se fundamenta no sistema de amostragem adotado na área objeto de manejo.

Segundo Assis et al. (2009), para promover a otimização do uso dos recursos florestais é fundamental conhecê-los, quantificá-los e monitorá-los de maneira adequada. Isso só é possível, utilizando-se técnicas de amostragem que permitem a obtenção de informações confiáveis com custos oportunos, onde o monitoramento dos recursos é realizado por uma amostra representativa da população. O inventário florestal utiliza os conceitos da teoria da amostragem, para a estimação de características quantitativas e/ou qualitativas da floresta (MELLO et al., 2009).

Segundo Péllico Netto e Brena (1997), amostragem casual simples é considerada um procedimento de amostragem de aleatoriedade irrestrita. O fundamento para aplicação desse procedimento é que a floresta seja homogênea

na característica de interesse. Quando o atributo de interesse apresenta alto grau de variabilidade, uma alternativa para a melhoria da precisão é a estratificação.

A amostragem casual estratificada consiste na divisão da área em subpopulações mais homogêneas na característica avaliada. A estratificação pode ser baseada em informações cadastrais, imagens de satélite ou ainda em informações da própria característica, por meio de interpoladores espaciais. O fato de se obterem estratos homogêneos na variável estudada contribui para o aumento da precisão do levantamento (ASSIS et al., 2009; COCHRAN, 1963; KANEGAE JÚNIOR et al., 2006; McROBERTS; NELSON; WENDT, 2002).

Os estimadores usados no inventário florestal são da estatística clássica e devem respeitar o princípio de que as amostras são independentes entre si e seguem uma distribuição normal. Contudo, diversos trabalhos desenvolvidos na área florestal verificaram presença de estrutura de continuidade espacial nas características dendrométricas avaliadas (ASSIS et al., 2009; KANEGAE JÚNIOR et al., 2007; MELLO et al., 2005b; MELLO et al., 2005a; MELLO et al., 2006; MELLO et al., 2009).

Assim, uma análise variográfica se faz necessária antes do processamento do inventário florestal, pois, se houver dependência espacial entre as amostras, esta deve ser considerada nas análises, a fim de se obter estimativas, as mais precisas e confiáveis (ASSIS et al., 2009).

Diante do exposto, os objetivos deste estudo foram: i) verificar a existência de dependência espacial da variável volume em um fragmento de Cerrado *sensu stricto*; ii) realizar a estratificação com base no interpolador geoestatístico; iii) comparar a precisão da amostragem sistemática, com a amostragem casual estratificada gerada pelo interpolador geoestatístico; iii) avaliar o impacto da redução da intensidade amostral sobre a precisão do inventário.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área e coleta dos dados

O fragmento está situado no município de São Romão, MG, com área de 7.706,59 hectares, cuja fitofisionomia é do tipo Cerrado *Sensu stricto*. A altitude média do município é de 425,5 metros e o clima, segundo a classificação de Köppen é do tipo Aw, caracterizado por clima tropical com estação seca no inverno. A temperatura média do mês mais frio é superior a 18 °C (NIMER, 1979). O tipo de solo predominante é o Neossolo (SCOLFORO; MELLO; OLIVEIRA, 2008).

Foram distribuídas de forma sistemática 157 unidades amostrais retangulares de 1000 m², com distância de 700 metros entre si. Todas as parcelas foram georeferenciadas, sendo que nestas foram medidas a circunferência a 1,30 m do solo (CAP) e a altura total de todas as árvores com CAP \geq 15,7 cm (DAP = 5 cm). O volume foi obtido por equação gerada para a fitofisionomia, disponíveis em Rufini et al. (2010).

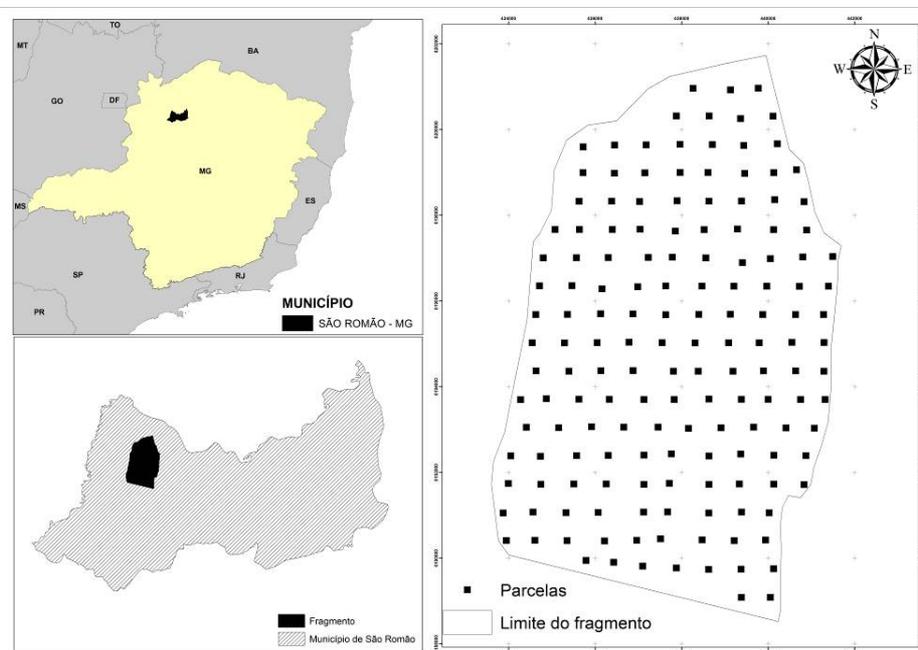


Figura 7 Localização da área de estudo

2.2 Estudo variográfico e interpolação espacial

Com o intuito de entender o comportamento geral dos dados, foi realizada a análise exploratória. Foram determinadas as medidas de posição, dispersão, avaliação da normalidade pelo teste de *Shapiro-Wilk* com um nível de significância $\alpha=5\%$, análise de tendência da disposição das amostras, em relação à latitude e à longitude e a identificação de valores discrepantes.

O estudo variográfico foi realizado por meio da confecção do semivariograma experimental, que permite verificar a estrutura da dependência espacial do volume (m^3/ha). O estimador da semivariância é igual à média aritmética das diferenças ao quadrado entre pares de valores experimentais, em todos os pontos separados pela distância h (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978).

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

Em que:

$\hat{y}(h)$ é a semivariância estimada entre pares de pontos, na mesma distância h ;

$N(h)$ é o número de pares de pontos separados por um vetor h ;

$Z(x_i)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x_i (coordenada geográfica);

$Z(x_i + h)$ é o valor no ponto $x_i + h$.

Ao semivariograma experimental, foram ajustados os modelos esférico e exponencial, pelos métodos dos quadrados mínimos ponderados e quadrados mínimos ordinários. Após o ajuste dos modelos faz-se necessário a seleção do melhor modelo ajustado ao semivariograma experimental. Segundo Vendrusculo (2003), o processo de seleção é crucial para a correta interpretação de fenômenos com dependência espacial, além disto, esta escolha influencia diretamente na confiabilidade dos resultados oriundos do interpolador geoestatístico.

O processo de seleção na modelagem geoestatística inicia-se com a validação cruzada. Posteriormente, avaliou-se o grau de dependência espacial (DE), que 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). Burnhan e Anderson (2002) propuseram o uso do critério de informação AIC (Akaike's Information Criterion) apresentado por Akaike (1983).

Após a obtenção do modelo espacial, foi realizada a interpolação por meio da krigagem, um interpolador geoestatístico, desenvolvido por Matheron (1963), que estima os valores de pontos não amostrados com base nos pontos amostrados, levando em consideração a estrutura de dependência espacial. A krigagem da área de estudo foi realizada, considerando cinco classes de produtividade.

2.3 Processamento do inventário

O processamento do inventário foi realizado de duas maneiras: i) considerando todas as unidades amostrais dentro de uma população não estratificada, utilizando os estimadores da Amostragem Casual Simples (ACS); ii) considerando a estratificação da população pelo interpolador geoestatístico, onde o processamento foi realizado com base nos estimadores da Amostragem Casual Estratificada (ACE).

A fim de verificar o ganho, não somente em precisão, mas também em custo, efetuou-se o processamento de ACE com uma redução de aproximadamente 60% na intensidade amostral em cada estrato. Para verificar a estabilidade dos estimadores com esta redução, foram efetuadas 1000 simulações em cada estrato, retirando-se aleatoriamente 60% das parcelas ali existentes. Posteriormente, para cada estrato, obtiveram-se as estimativas médias das simulações para as estatísticas do inventário.

A precisão dos procedimentos foi avaliada pelo erro de amostragem em porcentagem. O objetivo da comparação foi avaliar a qualidade e o potencial do uso do interpolador geoestatístico para obtenção de estratos. A formulação detalhada dos procedimentos de amostragem utilizados pode ser encontrada em Cochran (1963), Péllico Netto e Brena (1997) e Scolforo e Mello (2006).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise variográfica

Pela análise exploratória dos dados de volume (m^3/ha) foi observado um valor médio de $33,18 \text{ m}^3/\text{ha}$, desvio padrão de $23,97 \text{ m}^3/\text{ha}$ e coeficiente de variação de $72,2\%$, mostrando alto grau de variabilidade, o que justifica a realização da estratificação. Pelo teste de Shapiro-Wilk foi possível observar que os valores de volume (m^3/ha) não apresentaram distribuição normal ($p\text{-value} < 0,05$). Esta informação é importante, pois permite adotar métodos de ajuste que demandam o conhecimento, a priori, da distribuição dos dados, como é o caso do método da Máxima Verossimilhança.

Não foram observadas tendências, em relação aos sentidos norte-sul e leste-oeste e presença de dados discrepantes. Os valores discrepantes podem influenciar o resultado do semivariograma experimental, principalmente na sua porção inicial (CRESSIE, 1993; RIBEIRO JÚNIOR, 1995), enquanto que, a presença de tendência pode mascarar a estrutura de dependência espacial ou ainda apresentar uma falsa estrutura de dependência.

No Gráfico 1 apresentam-se o semivariograma experimental e os modelos a ele ajustados pelos métodos dos mínimos quadrados ponderados e ordinários. Foi possível detectar-se que há uma estrutura correlacionada espacialmente da característica volume, independente do modelo e método de ajuste avaliado. Verificou-se pela figura 1 que o modelo exponencial foi aquele que teve o menor efeito pepita, que é a parte do erro não explicada pelo modelo. Isto implica em estimativas mais precisas no processo da krigagem.

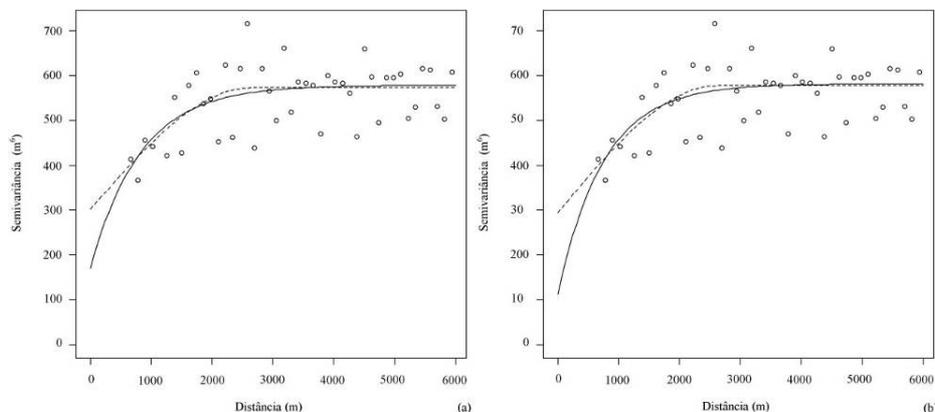


Gráfico 1 Ajuste dos modelos exponencial (linha cheia) e esférico (linha tracejada), pelo método dos mínimos quadrados ponderados (a) e mínimos quadrados ordinários (b)

A Tabela 3 mostra os parâmetros efeito pepita (τ^2), que indica a variação aleatória; contribuição (σ^2), variação explicada pela componente espacial e alcance (\emptyset), ponto a partir do qual os dados se comportam de formas independentes; grau de dependência espacial (DE) e o critério de informação de Akaike (AIC), para os métodos de ajuste e modelos utilizados. Estas informações auxiliam na definição do melhor modelo e do melhor método de ajuste.

Tabela 3 Parâmetros dos modelos, grau de dependência espacial (DE) e critério de informação de Akaike (AIC)

Método de Ajuste	Modelo	τ^2	σ^2	\emptyset^*	DE	AIC
OLS	Exponencial	112,48	468,60	751,60	80,64	1431,48
	Esférico	293,97	282,79	2612,50	49,03	1432,85
WLS	Exponencial	171,46	406,57	827,84	70,33	1431,72
	Esférico	302,15	269,94	2630,38	47,18	1432,76

* Para o modelo exponencial, trata-se do alcance teórico.

Segundo Burnhan e Anderson (2002), os modelos são considerados semelhantes entre si, pois a diferença entre os valores de AIC é menor que 2. Contudo, foi selecionado o modelo exponencial ajustado pelo método dos Quadrados Mínimos Ordinários (OLS) por apresentar o menor valor de AIC (McBRATNEY; WEBSTER, 1986), além de apresentar o maior grau de dependência espacial (DE). Este fato pode ser observado na figura 1, onde percebeu-se, claramente, que este modelo com o ajuste OLS teve o menor efeito pepita.

O efeito pepita, sendo diferente de zero, indica que nem toda a variação pode ser explicada pela componente espacial. Isto ocorre por falta de amostragem nas distâncias menores que a menor distância entre as parcelas. No presente trabalho a menor distância média entre as parcelas foi de 700 metros.

No modelo exponencial o alcance fornecido é o alcance teórico, sendo que o alcance prático deve ser multiplicado por três. Neste caso, o alcance teórico foi de 751,60 metros. Na situação do presente estudo, levantamentos com amostras distantes entre si, superiores a 2.254,80 metros, podem ser tratados pela estatística clássica. Para os casos em que a distância entre as amostras for menor que o valor do alcance, a estrutura de continuidade espacial deve ser considerada nas análises.

Segundo Biondi, Myers e Avery (1994), quando a dependência espacial (DE) $> 75\%$, o grau de dependência espacial é considerado alto; $35 \leq DE \leq 75\%$, médio grau de dependência espacial e $< 35\%$, fraca estrutura de dependência espacial. Todos os modelos ajustados evidenciaram uma estrutura de continuidade espacial de média a forte. No presente estudo, o grau de dependência espacial para volume foi de 80,64%. Desta forma, a estrutura de correlação entre as parcelas nas análises estatísticas, melhora a qualidade da precisão nas estimativas.

Nos projetos com grau de dependência espacial de médio a forte, é possível gerar mapas, que correspondam a uma pós-estratificação com base no volume, sem tendência e não viesados, isto é, mais precisos no detalhamento espacial da variável dendrométrica de interesse (ASSIS et al., 2009). A Figura 2 apresenta o mapa da pós-estratificação obtido para o fragmento.

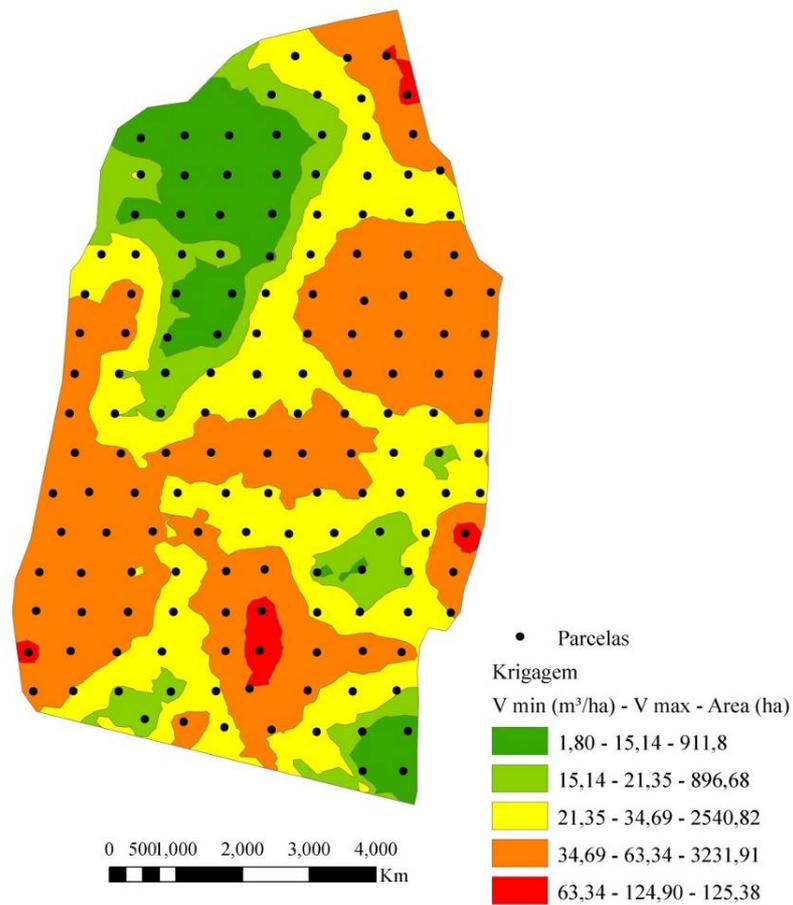


Figura 8 Resultado da krigagem obtida na área de estudo

3.2 Processamento do inventário

Utilizando-se as 157 parcelas do inventário, foram processadas através da amostragem sistemática, com os estimadores da amostragem casual simples e pela formulação da amostragem estratificada. Posteriormente, a amostragem casual estratificada (ACE) foi realizada, utilizando 65 parcelas das 157 totais amostradas. A escolha das parcelas por estrato considerou a distribuição das mesmas dentro do estrato gerado pela krigagem e a quantidade de parcelas por estrato. Sendo assim, foram aleatorizadas 8, 8, 21, 26 e 2 parcelas para os estratos das classes I, II, III, IV e V, respectivamente, sendo estas ordenadas da menor para a maior classe de produtividade (volume).

Os resultados do processamento do inventário, considerando os dois procedimentos de amostragem, estão apresentados na Tabela 2. O erro de inventário foi de 11,38% para a AS, de 6,47% para a ACE e 9,93% para ACE com redução da intensidade amostral em 58,60% (65 parcelas). Os intervalos de confiança apresentados na tabela 2 foram semelhantes, tornando evidente que o processo de estratificação, mesmo com a redução da intensidade amostral, que reduz o erro de inventário, gera estimativas do parâmetro próximas daqueles que envolveram um número elevado de parcelas e, também, outro procedimento de amostragem.

Tabela 4 Amostragem sistemática (AS); Amostragem casual estratificada (ACE) e Amostragem casual estratificada com redução de 41,4% no número de parcelas (ACE (41,4%))

Estimadores	AS	ACE	ACE (58,60%)
Média (m³.ha⁻¹)	33,18	32,74	32,70
Desvio Padrão (m³.ha⁻¹)	23,97	13,04	12,95
Erro do inventário (m³)	3,7755	2,1195	3,2499
Erro do inventário (%)	11,38	6,47	9,93
Intervalo de Confiança (m³.ha⁻¹)	29,40 - 36,95	30,62 - 34,86	29,45 - 35,95

Resultados satisfatórios foram encontrados, também por Mello et al. (2000), os quais utilizando-se do procedimento de estratificação, observaram uma redução no erro de amostragem na ordem de 29,42%, quando comparado com a AS.

Silva (2009) estratificou fragmentos de cerrado no estado de Minas Gerais, com base em imagens de satélite (pré-estratificação) e constatou que para reduções de 20 e 40% na intensidade amostral, o erro de inventário (%) apresentava pequeno aumento, porém, este aumento não superou o limite imposto pela legislação vigente. Desta maneira, pelos resultados obtidos, pode-se perceber que a estratificação torna-se uma ferramenta valiosa não somente no aumento da precisão, mas também na redução do custo e tempo de inventário, quando se admite um erro máximo pré-estabelecido.

4 CONCLUSÕES

i) Foi detectada a existência de dependência espacial para a variável volume em fragmento de Cerrado *sensu stricto*, implicando que a correlação existente deve ser incorporada em análises estatísticas futuras, visando a melhoria da precisão das estimativas;

ii) os estimadores da amostragem casual estratificada foram mais precisos do que a amostragem sistemática, indicando que o uso do interpolador geoestatístico para estratificação da população foi eficiente.

iii) com a redução do número de parcelas na amostra, o erro do inventário da amostragem casual estratificada (ACE) foi mais preciso que o da amostragem sistemática (AS), indicando que sempre que for possível realizar uma estratificação confiável da característica de interesse, as estimativas da ACE serão mais precisas, quando comparadas às estimativas da AS.

REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. Information measures and model selection. **Bulletin of the International Statistical Institute**, Rome, v. 44, p. 277-291, 1983.

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, 2009.

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

BORLAUG, N. E. Feeding a world of 10 billion people: the miracle ahead. In: BAILEY, R. (Ed.). **Global warming and other eco-myths**. Roseville: Competitive Enterprise Institute, 2002. p. 29-60.

BURNHAN, K. P.; ANDERSON, D. R. **Model selection and multimodel inference**. 2nd ed. New York: Springer, 2002. 350 p.

COCHRAN, W. G. **Técnicas de amostragem**. Rio de Janeiro: USAID, 1963. 555 p.

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

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

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

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 147-155, jul. 2005.

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

McBRATNEY, A. G.; WEBSTER, A. G. Choosing functions for semi-variograms and fitting them to sampling estimates. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, p. 617-639, 1986.

McROBERTS, R. E.; NELSON, M. D.; WENDT, D. G. Stratified estimation of forest area using satellite imagery, inventory data, and the k-nearest neighbors technique. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 82, p. 457-468, 2002.

MELLO, J. M. et al. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 69, p. 25-37, dez. 2005a.

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

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

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

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

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 422 p.

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

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

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

SCOLFORO, J. R. S. **Manejo florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 443 p.

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

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D. **Inventário florestal de Minas Gerais: cerrado – florística, diversidade, similaridade, distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas aptas para manejo florestal**. Lavras: UFLA, 2008. 216 p.

SILVA, S. T. **Estratificação da fitofisionomia cerrado para inventário florestal utilizando geotecnologia**. 2009. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

VENDRUSCULO, L. G. **Uso de índices de desempenho e do critério de Akaike para ajuste de modelos de semivariograma.** Campinas: Embrapa, 2003. 5 p. (Comunicado Técnico, 58).

ANEXOS

Tabela 1A Base de dados com classificação dos estratos em cada processo de estratificação

Coord_ X	Coord_ Y	PARCEL A	V (m ³ /ha)	Estratos (Seg. automática)	Estratos (Seg. visual)	Estratos (krigagem)
439773	8200968	1	80,20	II	II	V
439130	8200928	2	26,00	II	II	III
438265	8200962	3	44,40	II	II	III
440115	8200313	4	91,40	I	IV	V
439362	8200256	5	6,90	I	I	III
438636	8200317	6	23,10	I	I	III
437879	8200318	7	19,40	II	II	II
440211	8199667	8	52,20	II	II	IV
439438	8199628	9	30,20	II	II	III
438711	8199651	10	11,90	II	II	II
437964	8199656	11	2,10	II	I	I
437182	8199644	12	3,10	II	I	I
436451	8199640	13	7,60	III	III	I
435725	8199598	14	8,70	I	I	I
440656	8199061	15	32,90	I	IV	III
440130	8198993	16	29,50	I	I	III
439459	8198976	17	19,90	II	II	III
438609	8198997	18	19,60	II	II	II
437965	8198997	19	8,00	II	II	I
437149	8198991	20	19,00	II	I	I
436448	8198981	21	7,40	II	I	I
435723	8198994	22	31,50	II	I	II
440829	8198318	23	26,50	I	I	III
440151	8198364	24	11,50	II	I	III
439385	8198333	25	33,60	II	II	III
438629	8198328	26	33,00	II	II	III
437894	8198338	27	3,10	II	II	I
437031	8198320	28	6,80	II	I	I
436385	8198330	29	14,70	II	I	I
435630	8198327	30	4,70	II	I	I
440889	8197656	32	34,90	II	II	IV

...continua...

TABELA 1A. Continuação...

Coord X	Coord Y	PARCELA	V (m ³ /ha)	Estratos (Seg. automática)	Estratos (Seg. visual)	Estratos (krigagem)
440125	8197664	33	91,90	II	II	IV
439291	8197680	34	43,30	II	II	IV
438521	8197664	35	21,00	I	II	III
437855	8197632	36	7,70	II	II	I
437038	8197674	37	26,20	II	II	II
436401	8197667	38	17,30	II	I	II
435640	8197667	39	25,50	II	II	III
435076	8197668	40	19,70	I	I	III
441493	8197036	41	41,10	I	IV	IV
440800	8197027	42	57,40	II	III	IV
440052	8196988	43	68,80	III	III	IV
439406	8196895	44	61,70	III	III	IV
438561	8197007	45	50,10	III	III	IV
437783	8197022	46	28,20	II	III	III
437229	8197014	47	1,80	II	I	I
436305	8197013	48	4,90	II	I	I
435568	8197009	49	55,90	II	II	IV
434803	8197007	50	27,60	II	I	III
441393	8196345	51	21,10	I	IV	IV
440722	8196343	52	63,80	III	III	IV
439970	8196346	53	55,10	III	III	IV
439209	8196344	54	35,80	III	III	IV
438469	8196347	55	37,60	III	III	IV
437632	8196351	56	26,00	III	III	III
436988	8196333	57	2,50	III	III	I
436162	8196284	58	7,80	III	III	I
435468	8196358	59	53,50	II	II	IV
434717	8196355	60	41,80	II	II	IV
441281	8195684	61	31,70	II	III	IV
440633	8195683	62	80,60	III	III	IV
439876	8195683	63	22,80	II	II	IV
439127	8195688	64	44,20	III	III	IV

...continua...

TABELA 1A. Continuação...

Coord X	Coord Y	PARCELA	V (m ³ /ha)	Estratos (Seg. automática)	Estratos (Seg. visual)	Estratos (krigagem)
438396	8195685	65	17,80	III	III	III
437632	8195681	66	40,80	III	III	IV
436875	8195698	67	22,30	III	III	III
436128	8195701	68	16,70	III	III	II
435364	8195685	69	12,20	II	II	II
434631	8195684	70	64,90	II	III	IV
441292	8195031	71	51,40	II	II	IV
440550	8195034	72	23,20	III	III	III
439794	8195025	73	39,00	II	II	III
439087	8195024	74	30,30	III	II	III
438311	8195021	75	21,30	III	III	III
437550	8195029	76	20,20	III	III	III
436785	8195038	77	38,30	III	III	III
436048	8195029	78	6,50	II	III	II
435295	8195023	79	12,30	II	II	III
434546	8195026	80	47,30	III	III	IV
441288	8194360	81	28,60	I	IV	III
440636	8194370	82	10,50	II	II	II
439891	8194369	83	27,30	II	II	III
439188	8194359	84	35,20	II	II	IV
438383	8194360	85	115,40	III	III	IV
437813	8194360	86	61,30	III	III	IV
436881	8194376	87	56,40	II	III	IV
436135	8194371	88	42,30	II	II	IV
435396	8194360	89	40,50	II	II	IV
434635	8194369	90	41,80	II	III	IV
441316	8193701	91	10,10	I	II	III
440751	8193702	92	9,50	II	II	III
440000	8193705	93	33,90	II	II	III
439381	8193704	94	34,50	II	II	IV
438630	8193712	95	24,70	II	II	III
437828	8193702	96	19,40	II	III	III

...continua...

TABELA 1A. Continuação...

Coord X	Coord Y	PARCELA	V (m ³ /ha)	Estratos (Seg. automática)	Estratos (Seg. visual)	Estratos (krigagem)
437128	8193702	97	25,00	III	III	III
436329	8193705	98	28,40	II	II	III
435627	8193709	99	34,90	II	II	IV
434873	8193721	100	44,80	II	II	IV
434279	8193698	101	54,00	II	III	IV
441067	8193032	102	124,90	I	IV	V
440413	8193038	103	11,80	II	II	III
439664	8193056	104	11,00	II	II	II
438911	8193041	105	31,40	II	II	III
438161	8193027	106	28,50	II	III	III
437456	8193054	107	13,30	II	III	III
436665	8193054	108	44,70	II	II	IV
435918	8193063	109	37,00	II	II	IV
435159	8193042	110	32,50	II	II	IV
434412	8193052	111	54,50	III	III	IV
440875	8192390	112	67,30	I	IV	IV
440133	8192399	113	9,20	II	II	II
439367	8192427	114	12,40	II	II	I
438630	8192382	115	5,40	II	II	I
437764	8192432	116	56,20	III	IV	IV
437129	8192404	117	37,50	III	III	IV
436303	8192396	118	33,60	II	II	III
435574	8192390	119	29,70	II	II	III
434739	8192374	120	40,70	II	IV	IV
434051	8192386	121	22,70	III	III	IV
440831	8191714	122	36,00	II	IV	IV
440128	8191726	123	17,20	II	II	III
439335	8191728	124	16,20	II	II	II
438629	8191720	125	20,00	II	II	III
437717	8191743	126	103,40	I	IV	V
437128	8191720	127	40,80	III	III	IV
436258	8191729	128	18,10	I	II	III

...continua...

TABELA 1A. Continuação...

Coord_ X	Coord_ Y	PARCEL A	V (m ³ /ha)	Estratos (Seg. automática)	Estratos (Seg. visual)	Estratos (krigagem)
435510	8191728	129	66,70	III	III	IV
434748	8191723	130	26,10	I	IV	IV
433997	8191742	131	65,80	III	III	IV
440023	8191055	132	44,60	II	I	IV
439384	8191073	133	70,20	II	II	IV
438628	8191051	134	24,70	II	II	IV
437678	8191078	135	103,90	III	IV	V
437123	8191075	136	31,20	III	III	IV
436072	8191065	137	29,80	II	III	III
435328	8191057	138	38,00	III	III	IV
434567	8191073	139	55,30	III	III	IV
433875	8191053	140	93,60	III	III	V
439941	8190420	141	18,90	I	I	III
439216	8190406	142	20,70	II	I	III
438473	8190423	143	46,10	II	II	IV
437514	8190449	144	84,70	III	IV	IV
436962	8190415	145	13,80	II	II	III
436218	8190401	146	10,00	II	III	II
435354	8190407	147	12,30	II	II	II
434610	8190414	148	29,80	I	III	III
433949	8190409	149	23,60	II	II	IV
440127	8189749	150	3,90	I	I	I
439374	8189741	151	11,90	I	I	I
438623	8189734	152	18,70	II	I	III
437880	8189770	153	34,90	II	II	II
437100	8189811	154	19,10	II	II	III
436429	8189902	155	66,10	III	III	IV
435792	8189945	156	3,90	I	II	II
440053	8189084	157	13,20	I	I	I
439380	8189083	158	11,10	I	I	I

Roteiro processamento R

#Carregar dados#

```
est2<-read.table("Est2.txt",header=T)
```

Criando objeto Simulação#

```
Simulação<data.frame(md1=rep(0,1000),var1=rep(0,1000),md2=rep(0,1000),va  
r2=rep(0,1000),md3=rep(0,1000),var3=rep(0,1000))
```

#Rotina de simulação 1000x#

```
for(i in 1:1000){  
a<-sample(est1$V,8,replace=F)  
b<-sample(est2$V,54,replace=F)  
c<-sample(est3$V,22,replace=F)  
Simulação$md1[i]<-mean(a)  
Simulação$md2[i]<-mean(b)  
Simulação$md3[i]<-mean(c)  
Simulação$var1[i]<-var(a)  
Simulação$var2[i]<-var(b)  
Simulação$var3[i]<-var(c)  
}
```

Obs: 8, 54 e 22 referem-se ao tamanho da amostra retirada de cada estrato com a redução da intensidade amostral em 40%

```
mean(Simulação$md1)  
mean(Simulação$md2)  
mean(Simulação$md3)  
mean(Simulação$var1)  
mean(Simulação$var2)  
mean(Simulação$var3)
```