



Ministério da
Ciência e Tecnologia



SER-300

PROPOSTA DE REDUÇÃO DE CUSTOS EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS POR MEIO DO USO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO

Matheus Caetano Rocha de Andrade

Trabalho desenvolvido na disciplina de Introdução ao Geoprocessamento,
orientada pelo Dr. Antonio Miguel Vieira Monteiro.

INPE
São José dos Campos
2013.

PROPOSTA DE REDUÇÃO DE CUSTOS EM INVENTÁRIOS FLORESTAIS POR MEIO DO USO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO

MATHEUS CAETANO ROCHA DE ANDRADE¹

¹Divisão de Sensoriamento Remoto
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515, CEP 12201-970 - São José dos Campos, SP.
E-mail: mathcra@dsr.inpe.br

Resumo: Cada vez mais o domínio de informações precisas acerca dos povoamentos florestais vem se tornando um diferencial para os empreendimentos florestais. Nesse contexto, as medições de campo em povoamentos florestais se tornam fundamentais para um bom planejamento pois permitem a geração de estimativas do volume e qualificação da produtividade em um determinado local, porém estas demandam muito tempo e recursos financeiros. Outro aspecto importante é o mapeamento da variabilidade existente nos projetos florestais, pois possibilitam a estratificação da população (com base em seus atributos) em subpopulações o mais homogêneas possíveis por meio de técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística para realização do inventário florestal. A estratificação permite a obtenção de estimadores mais precisos dos parâmetros da população do que a amostragem convencional e possibilita a redução do custo de amostragem através da redução do número de parcelas para um mesmo erro associado. Nesse cenário, o objetivo do presente trabalho foi propor uma alternativa para redução de custos de inventário florestal em duas fazendas no estado do Mato Grosso do Sul, através de técnicas de sensoriamento remoto e de krigagem geoestatística. Para tanto, foram utilizadas informações obtidas através de aerolevantamentos, dados cadastrais dos povoamentos e medições de campo. Foi elaborado um mapa de classes de potencial de volume (pré-estratificação) através da álgebra entre os mapas de percentual de cobertura de copa, idade e material genético ponderados e a qualidade desta estratificação foi comparada ao volume real obtido com as medições de campo processadas por meio de geoestatística. Também testou-se o efeito da redução de 20 e 30% das unidades amostrais na distribuição espacial do volume e nos resultados dos estimadores da krigagem. Os resultados mostraram que o modelo de pré-estratificação proposto apresentou um desempenho satisfatório quando comparado à distribuição espacial de volume real obtido por krigagem geoestatística e também que a redução de até 30% das amostras não afetou a distribuição espacial da variável volume quando comparado ao cenário com 100% das amostras. Estes resultados apresentaram-se como uma alternativa potencial para compreensão da variabilidade espacial do volume e possibilitam a redução da quantidade de amostras de campo através de técnicas de geoprocessamento.

Palavras-chave: inventário florestal; krigagem; estratificação.

1. INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro se encontra em plena expansão, apresentando grande competitividade no mercado mundial de produtos florestais. Assim, cada vez mais o domínio de informações precisas acerca dos povoamentos florestais vem se tornando um diferencial para os empreendimentos florestais.

Dessa forma, estudos sobre sensoriamento remoto e geoprocessamento como ferramentas para inventário florestal visando à redução de custo é de extremo valor.

Embora a medição de campo em povoamentos florestais demandem muito tempo e recursos financeiros, esta é base para estimativa do volume e qualificação da produtividade em determinado local, sendo o volume fundamental na fase de planejamento da produção para qualquer empresa florestal. (MORAIS, 2003).

Dentre os principais motivos da realização de um processo de inventário, podem-se citar os seguintes aspectos: determinar o potencial produtivo da florestas e de seus diferentes materiais genéticos e espécies plantadas; mapear fatores bióticos e abióticos que influenciam a produção da floresta; determinar os custos de produção; definir estratégias de manejo para obter uma produção sustentada (SCOLFORO, 2004).

Segundo Diniz (2007), o inventário florestal também tem por objetivo aplicar e avaliar métodos de amostragem que geram resultados mais precisos. O desejável para todo empreendimento florestal é obter informações precisas e a baixo custo sobre a produção florestal. Basicamente, a redução de do custo no inventário florestal está alicerçada na redução da intensidade amostral. Então, como reduzir custo sem perder precisão?

Os métodos tradicionais de estatística, usados para análise dos inventários, não levam em consideração as possíveis correlações entre observações vizinhas. Assim, eles não exploram suficientemente as relações que possam existir entre as unidades amostrais e um dos caminhos é através do o uso de métodos geoestatísticos que explorem adequadamente as relações existentes entre as unidades amostrais (MELLO, 2004).

Nesse contexto a adoção de novas tecnologias e técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento no inventário florestal permitem a geração de estimativas de grande acurácia do volume de madeira para cada talhão manejado pela empresa. Isto significa que, enquanto as técnicas convencionais garantem estimativas volumétricas precisas apenas para grandes áreas (estratos ou conjunto de talhões de mesma

característica), as técnicas mais desenvolvidas faz com que as decisões de manejo possam se dar ao nível de talhão, garantindo o máximo retorno financeiro aos investidores.

Outro aspecto fundamental para o planejamento florestal é o mapeamento da variabilidade existente nos projetos florestais. As técnicas convencionais de inventário florestal possibilitam apenas a adoção valores médios para a tomada de decisão, enquanto que através das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento é possível mapear variabilidade existente no povoamento. Assim, é possível aplicar manejos específicos para áreas ainda menores que o talhão para a obtenção de um máximo de resultado financeiro (por exemplo adubações diferenciadas apenas nos locais necessários) (KANEAE, 2004).

Uma vez que se conhece a variabilidade do povoamento florestal, é possível pré-estratificar a população (com base em seus atributos) em subpopulações o mais homogêneas possíveis para realização do inventário florestal, ou até mesmo pós-estratificar a população com base nos resultados obtidos com o processamento dos dados obtidos em campo.

Um dos métodos de pós-estratificação muito eficaz em inventários florestais é a krigagem geoestatística, que consiste na interpolação de dados das unidades amostrais para variáveis que possuem dependência espacial. Através da krigagem é possível obter um mapa de classes de produtividade para o povoamento que será utilizado como base para a pós-estratificação dos dados coletados (KANEAE, 2004).

Dentre as vantagens mais significativas da estratificação pode-se citar que para uma mesma intensidade amostral, é possível obter estimadores mais precisos dos parâmetros da população do que a amostragem convencional (casual simples), além da eliminação de fontes de variação que podem mascarar os resultados do inventário. Outra vantagem é a possibilidade da redução do custo de amostragem através da redução do número de parcelas para um mesmo erro associado (DINIZ, 2007).

Nesse cenário, o objetivo do presente trabalho é propor uma alternativa para redução de custos de inventário florestal em duas fazendas no estado do Mato Grosso do Sul, através de técnicas de sensoriamento remoto e de krigagem geoestatística.

2 GEOESTATÍSTICA E KRIGAGEM

O uso da teoria de amostragem clássica, associada a um sistema de amostragem adequado, propicia estimativas sem viés da variável de interesse, desde que não exista correlação espacial da característica de interesse. Havendo continuidade espacial da característica avaliada, a utilização de métodos da estatística espacial permite estimativas sem tendência e a um menor custo (MELLO, 2004).

Segundo Diniz (2007), dentre os métodos de estatística espacial comumente empregados, o método geoestatístico da krigagem pode ser considerado como o melhor estimador linear sem viés, cujo objetivo é a minimização da variância da estimativa.

O estudo da continuidade espacial de características dendrométricas, por meio da Teoria das Variáveis Regionalizadas (MATHERON, 1963), permite a interpretação e a projeção dos resultados do inventário florestal com base na estrutura da variabilidade natural da floresta. Esta estrutura, nos métodos atuais de processamento do inventário florestal, é totalmente desperdiçada. Ela exerce influência direta na qualidade das informações geradas pelo processamento do inventário, proporcionando estimativas precisas com menor número de amostras. (MELLO, 2004).

Segundo Landim (2002), a geoestatística calcula estimativas dentro de um contexto regido por um fenômeno natural com distribuição no espaço e, desse modo, supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionados. Devido a essa característica, tem sido grande a sua aplicação, principalmente para efetuarem-se estimativas e ou simulações de variáveis em locais não amostrados.

Ainda segundo Landim (2002), a krigagem usa informações a partir do variograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras com valores conhecidos, que irão estimar pontos desconhecidos. Nessa situação, o método fornece, além dos valores estimados, o erro associado a tal estimação, o que o distingue dos demais algoritmos de interpolação.

De uso pouco comum pelas empresas florestais, o método geoestatístico estende os benefícios de um sistema de inventário florestal sucessivo. O processamento e a análise geoestatística possibilita o mapeamento da variabilidade existente na floresta a cada avaliação. Isto possibilita produzir manejos ótimos para unidades independentes do talhão, isto é, manejos em conformidade com os resultados locais.

3 METODOLOGIA

3.1 Áreas de estudo

As áreas escolhidas para o estudo representam duas fazendas comerciais de eucalipto e abrangem aproximadamente 2.900 ha do município de Três Lagoas (Projeto Horto São Luiz) e 850 ha do município de Nova Andradina (Projeto Lucas), ambos no estado do MS (Figura 1). Esses municípios encontram-se na porção centro-oeste do estado e são destaques na produção de madeira de eucalipto para processo.

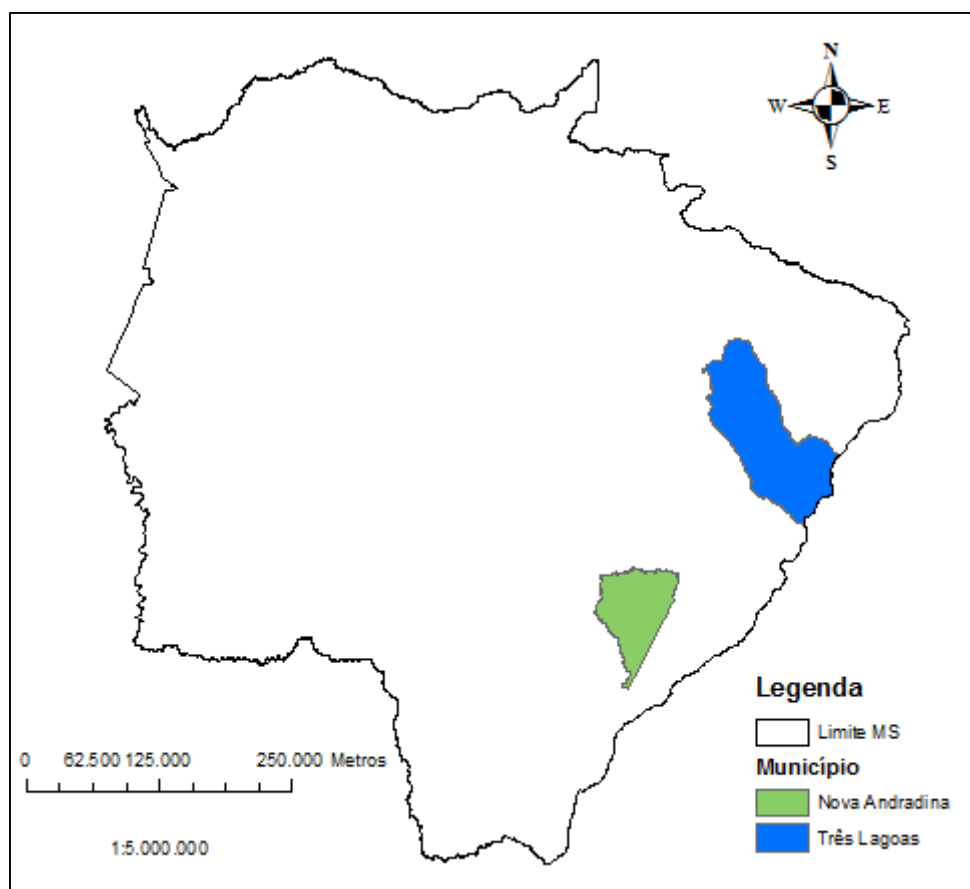


Figura 1. Localização das áreas de estudo.

3.2 Procedimentos Executados

A Figura 2 a seguir apresenta os procedimentos executados para atendimento dos objetivos propostos neste presente trabalho. Os mesmos serão detalhados nos tópicos subsequentes.

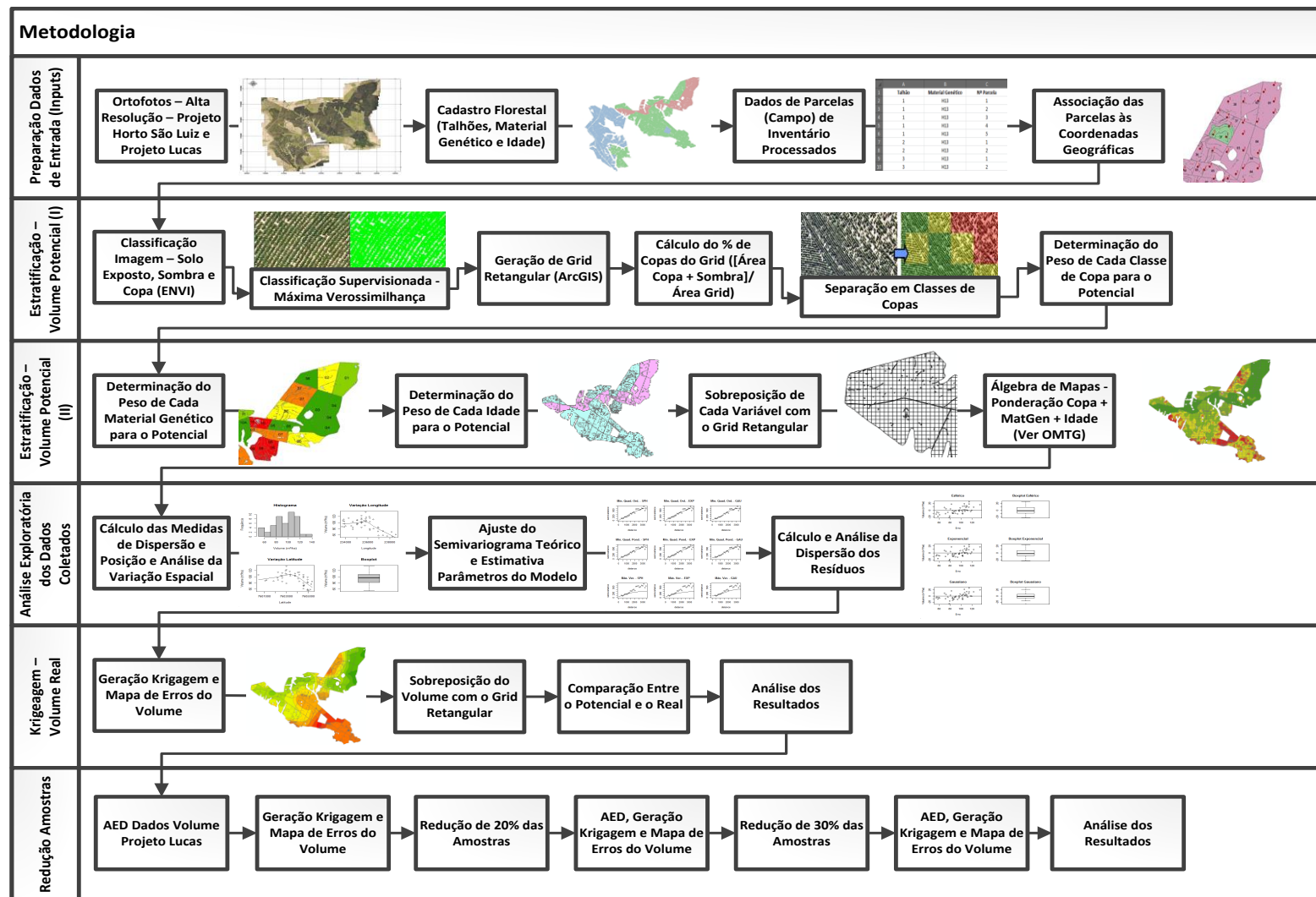


Figura 2. Procedimentos executados no trabalho.

3.2.1 Preparação dos dados de entrada e pré-estratificação da população

Foram obtidos os seguintes dados de entrada para a modelagem do banco de dados:

- Ortofotos dos Projetos Horto São Luiz e Lucas (Figuras 3 e 4), concedidas pela empresa Brasilwood, com resolução espacial de 30x30 cm, obtidas em novembro/2012 através de levantamentos aerofotogramétrico com câmera digital de pequeno formato, estabilizada e acoplada à receptores GPS para obtenção das fotografias aéreas de alta resolução.

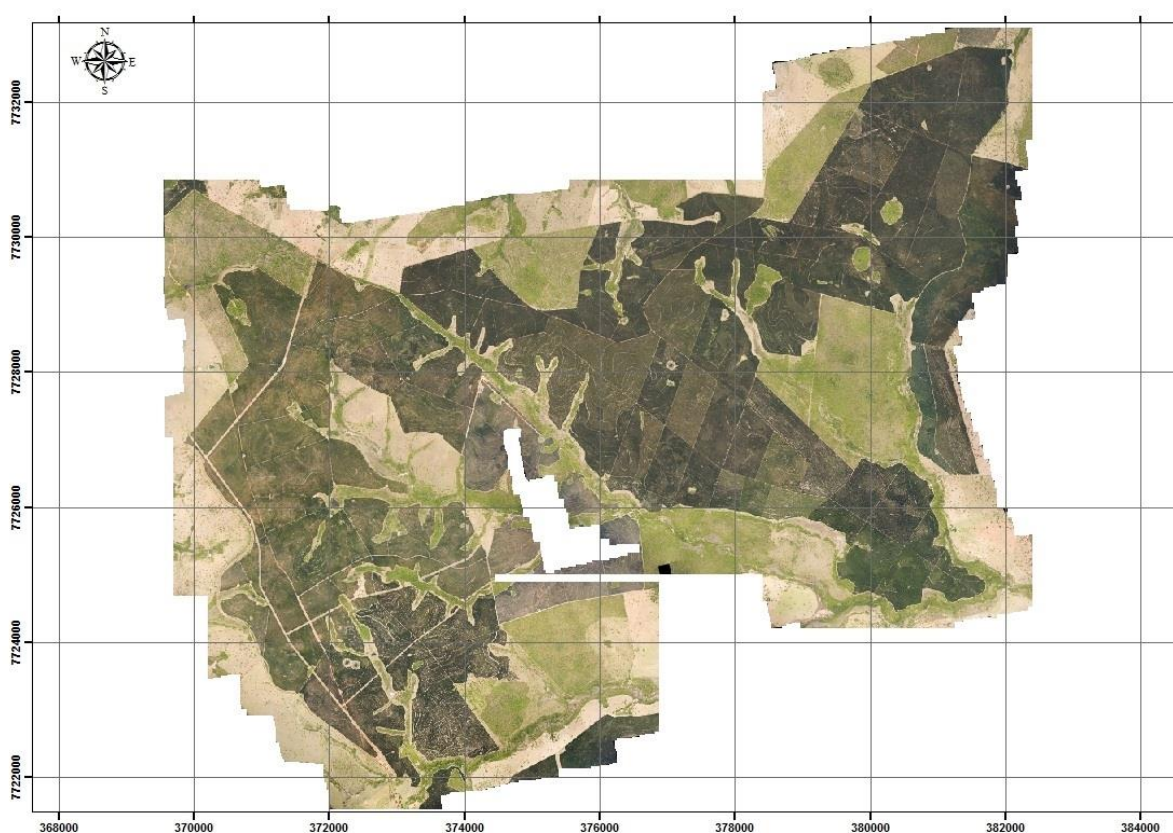


Figura 3. Ortomosaico do Projeto Horta São Luiz.

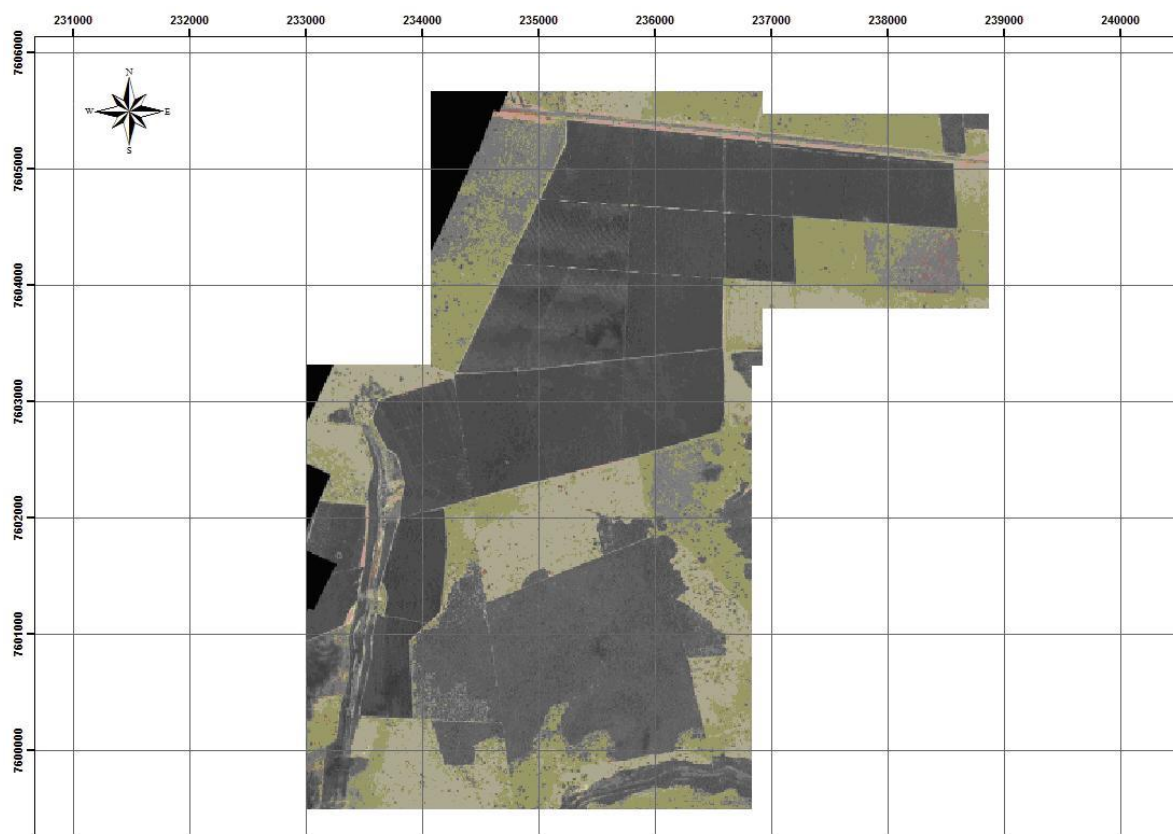


Figura 4. Ortomosaico do Projeto Lucas.

- Base de dados em *shapefile*® do Cadastro Florestal da empresa com informações sobre os talhões dos projetos, como material genético, idade, espaçamento, área, entre outros.
- Dados de medição de campo georreferenciados e processados para obtenção do volume/ha de cada unidade amostral nos projetos.

Para execução dos procedimentos supracitados, foram utilizados os aplicativos R, ArcINFO® 9.3 e ENVI® 4.5. Para todos os dados apresentados acima utilizou-se o Datum WGS-84 e projeção UTM (22S), sendo efetuados os seguintes processamentos:

- 1) A classificação da imagem em solo exposto, copa e sombra foi feita no ENVI® (software especializado para processamento digital de imagens) utilizando o método de classificação supervisionado Maximum Likelihood. A classe sombra

foi unida à classe copa, já que em análises visuais, a classe sombra ora se projetava na copa de outras árvores, ora em solo exposto.

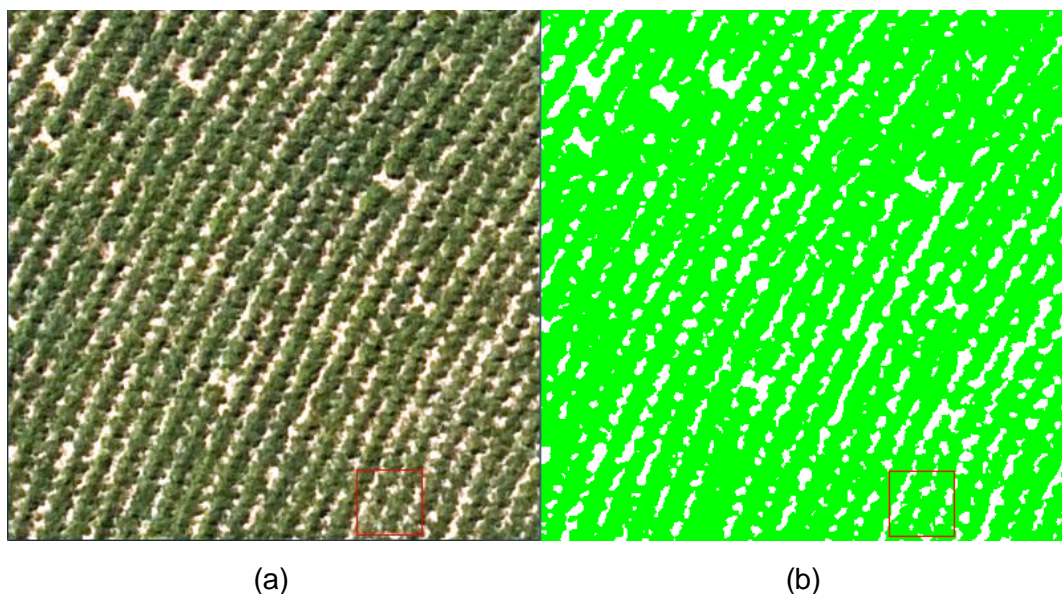


Figura 5. Ilustrativo da classificação da imagem (a) imagem aérea (b) Separação da área coberta por copa e solo exposto .

- 2) Em seguida os dados foram exportados para o ArcGIS® onde foi lançado um grid de 50 x 50 m (0,25ha), e foi calculado o percentual de cobertura de copas (proporção da área de cada pixel coberta por copas de árvores), através da Equação 1. Espera-se que quanto maior o percentual de cobertura de copa, maior a quantidade de volume de madeira presente naquele determinado pixel ou região.

$$\% \text{ de cobertura de copa} = \frac{\text{área de copa} + \text{área de sombra}}{2500} * 100 \quad (1)$$

- 3) Os dados de percentual de copas foram agrupados em cinco classes (Figura 6). O método utilizado para definição das amplitudes de cada classe foi Natural Breaks (Jenks), que utiliza um algoritmo iterativo que procura reduzir a variância dentro dos grupos e maximizar a variância entre os diferentes grupos, considerando explicitamente a distribuição dos dados. Para cada classe atribuiu-se um peso de 1 a 5, o qual o valor 5 representa a área com maior volume de madeira (Tabela 1).

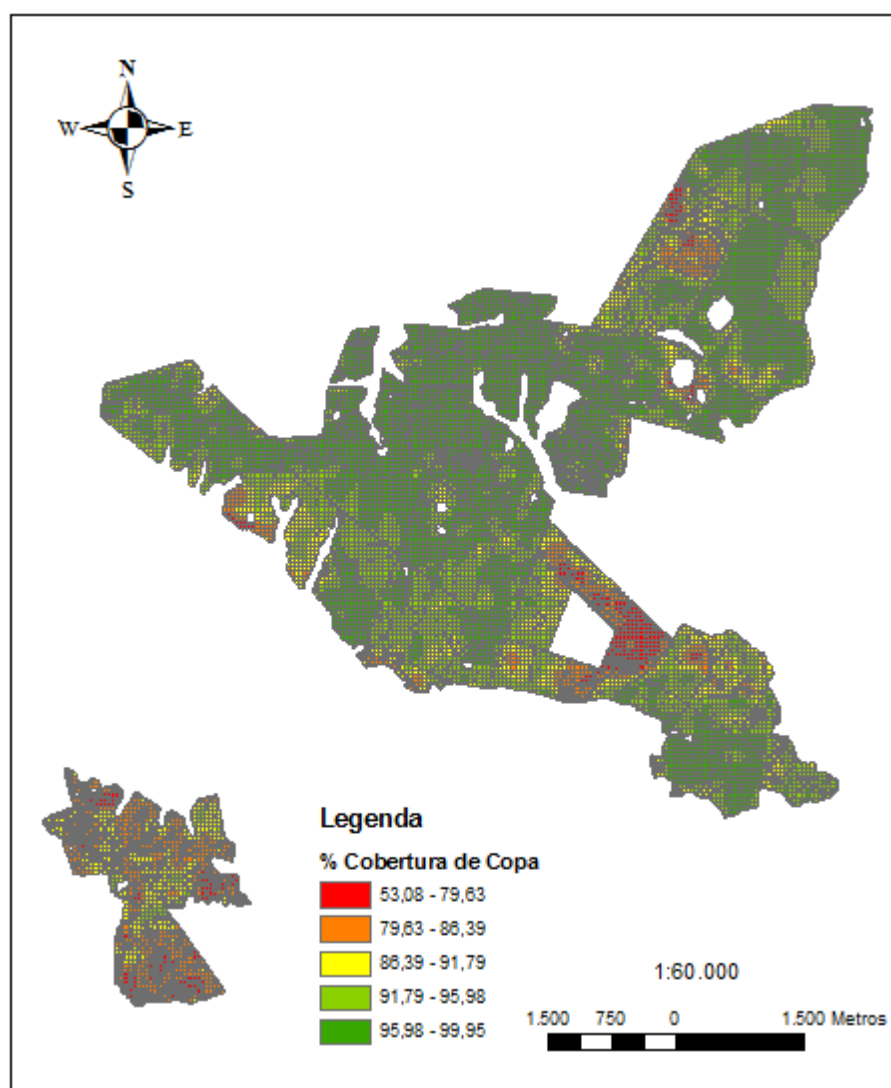


Figura 6. Mapa de classes de cobertura de copa no projeto Horto São Luiz.

Tabela 1. Atribuição de pesos para as classes de cobertura de copa.

Classes de Cobertura de Copa (%)	Peso atribuído
53,08 - 79,63	1
79,63 - 86,39	2
86,39 - 91,79	3
91,79 - 95,98	4
95,98 - 99,95	5

Fonte: Elaboração própria.

- 4) Em seguida, utilizou-se as informações de idade do plantio e de material genético, presentes no cadastro florestal, para estratificação da população. Para tal, foram gerados dois mapas, sendo o primeiro de classe de idades (Figura 7) e o último de material genéticos (Figura 8) e atribuiu-se pesos para cada classe (Tabelas 2 e 3), variando de 1 a 5, o qual o valor 5 representa a área com maior volume de madeira.

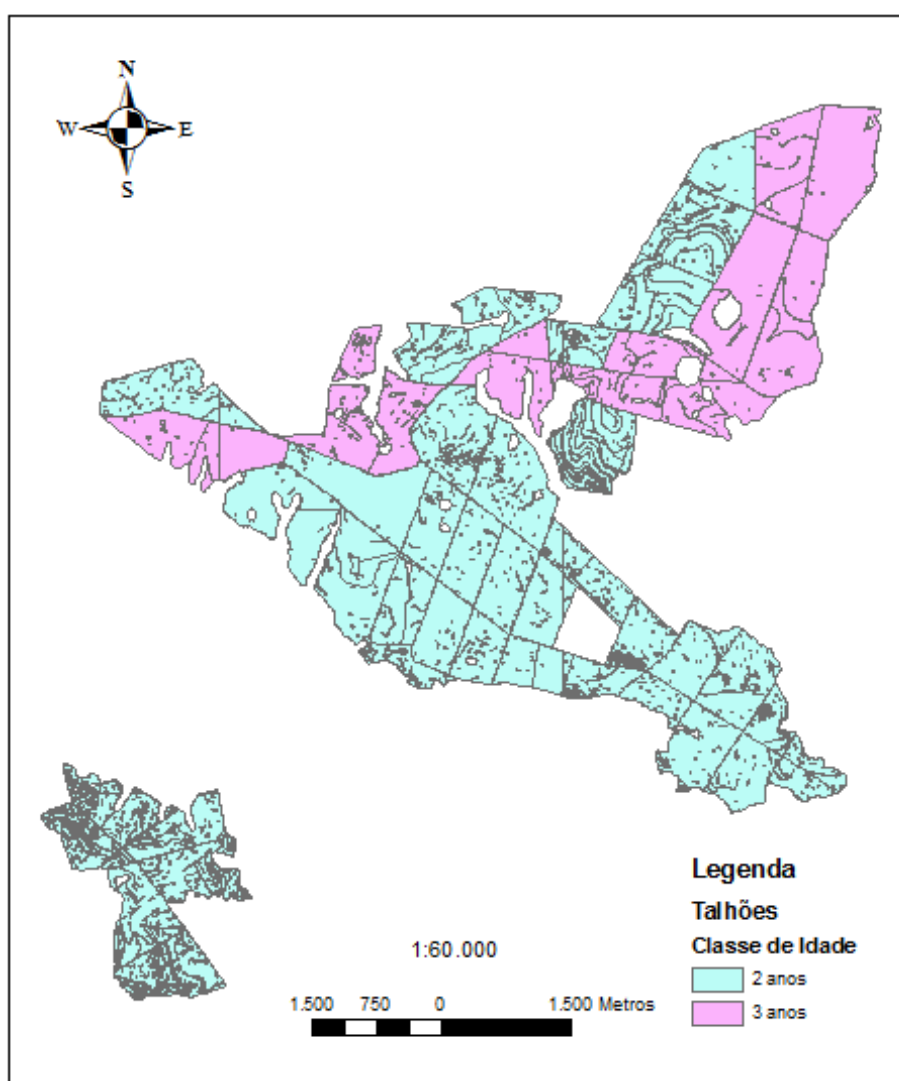


Figura 7. Mapa de classes de idades no projeto Horto São Luiz.

Espera-se que quanto maior a idade, maior seja o volume de madeira encontrado naquela classe, em função do desenvolvimento natural da floresta.

Tabela 2. Atribuição de pesos para as classes de idade.

Classes de Idade (anos)	Peso atribuído
2 anos	3
3 anos	5

Fonte: Elaboração própria.

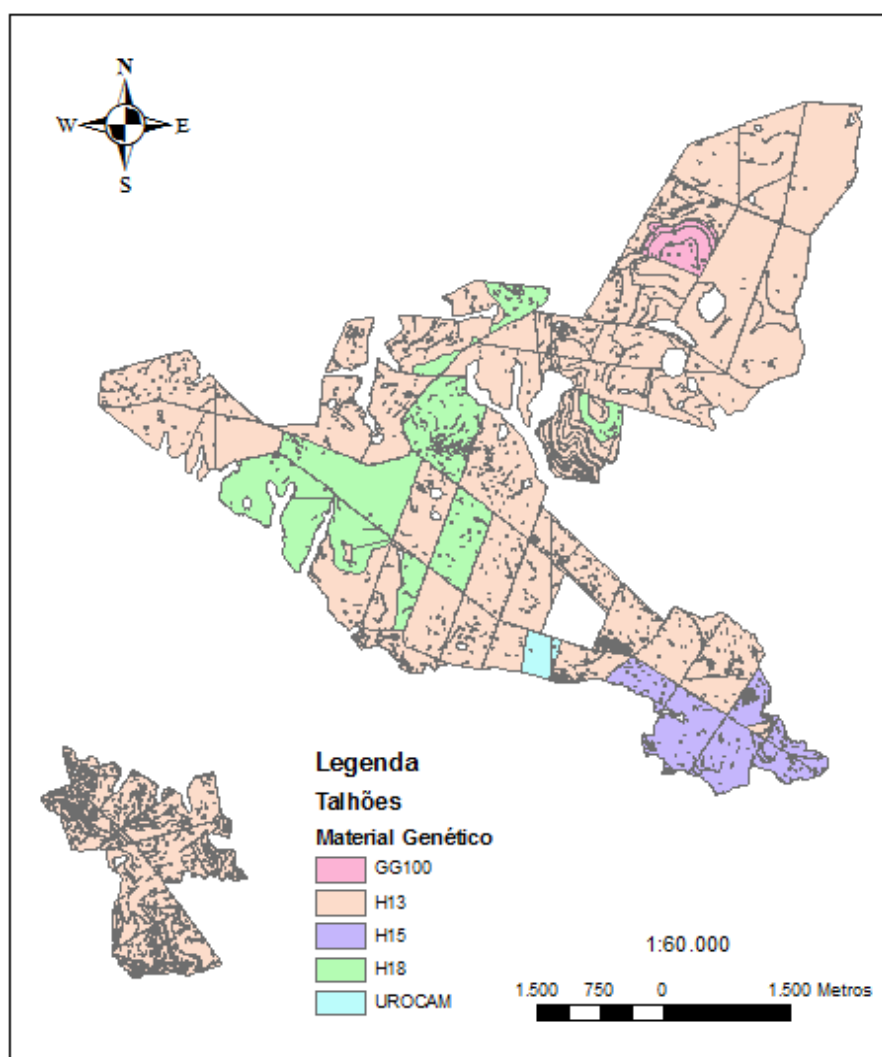


Figura 8. Mapa de tipos de material genético no projeto Horto São Luiz.

O peso atribuído para cada material genético (clone) foi determinado em função do desempenho médio histórico dos clones no estado do Mato Grosso do Sul, expressados através da variável Incremento Médio Anual (IMA) histórico,

fornecidos pela empresa Brasilwood. O IMA representa o potencial de crescimento de um determinado material genético em um sítio e quanto maior o seu valor, maior a quantidade de volume que se espera encontrar naquele local. De forma geral, plantios oriundos de mudas de semente (ex: UROCAM) apresentam valores baixos, enquanto que os oriundos de mudas clonais apresentam valores maiores.

Tabela 3. Atribuição de pesos para os materiais genéticos.

Material Genético (Tipo)	Incremento Médio Anual Histórico	Peso atribuído
UROCAM	16,35 m ³ /ha/ano	2
H15	27,21 m ³ /ha/ano	3
H18	33,95 m ³ /ha/ano	4
H13	34,96 m ³ /ha/ano	4
GG100	39,54 m ³ /ha/ano	5

Fonte: Elaboração própria.

- 5) A próxima etapa foi a sobreposição dos pesos atribuídos para o mapa de classes de idade e de material genético com o grid de 50x50 m utilizado na determinação do % de cobertura de copas, assim obteve-se o potencial de cada variável na mesma resolução.
- 6) Finalmente, realizou-se a álgebra de mapas para determinação do potencial de volume e pré-estratificação do projeto, através da média simples entre as variáveis de interesse considerada no trabalho. Utilizou-se a média simples como operador, pois considerou-se que a importância relativa de cada variável na determinação do potencial de volume era a mesma, ou seja, ambas impactavam na variável resposta da mesma forma.

3.2.2 Análise exploratória dos dados e krigagem geoestatística

Após as etapas de pré-estatificação da população do Projeto Horto São Luiz, efetuou-se a etapa de análise exploratória de dados de volume de madeira (m^3/ha) obtidos através do processamento dos dados coletados nas unidades amostrais, distribuídas de acordo com a Figura 9.

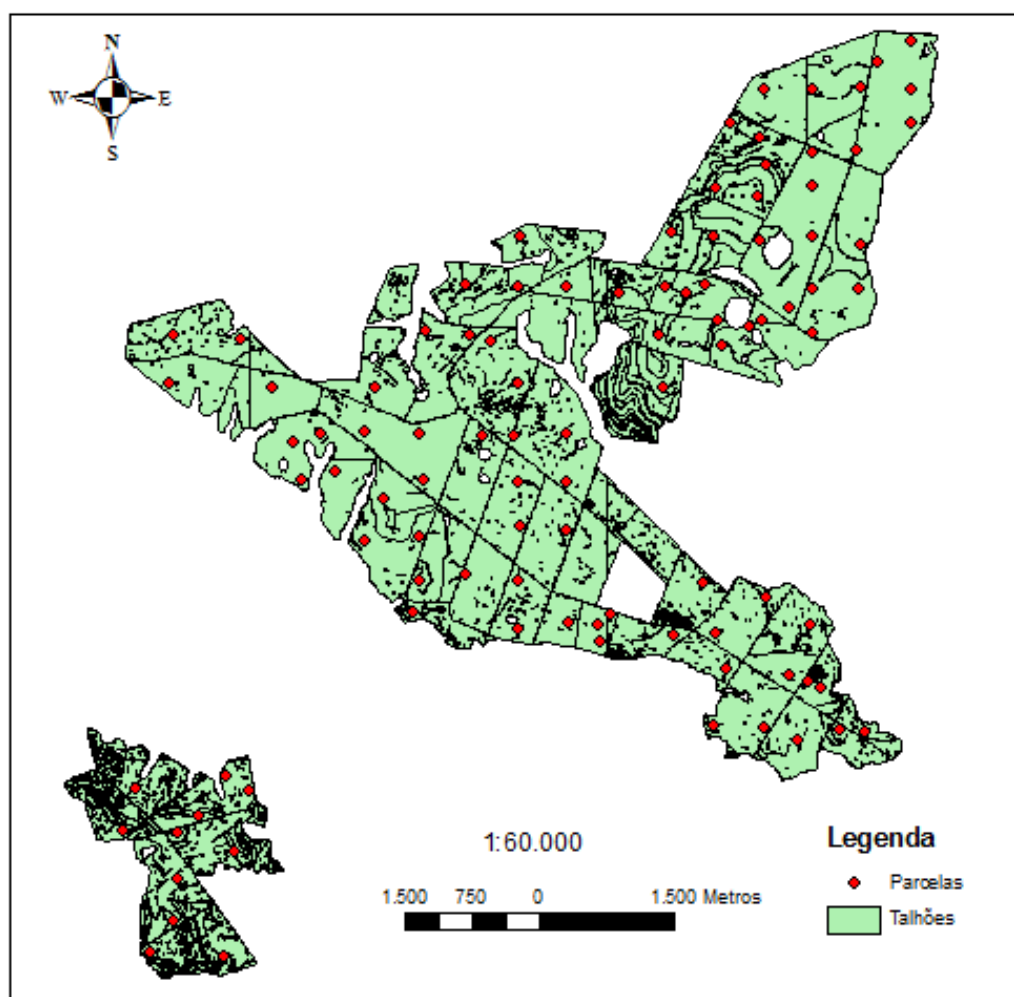


Figura 9. Distribuição das unidades amostrais (parcelas) no projeto Horto São Luiz.

Por fim, gerou-se a krigagem geoestatística da variável volume e efetuou-se a comparação entre o mapa de volume potencial obtido com a pré-estratificação e o volume real obtido com a krigagem para avaliação da qualidade da estratificação gerada.

Para execução dos procedimentos supracitados, foram utilizados os aplicativos R, ArcINFO® 9.3. Para todos os dados apresentados acima utilizou-se o Datum WGS-84 e projeção UTM (22S), sendo efetuados os seguintes processamentos:

- 1) A análise exploratória de dados foi realizada no aplicativo estatístico R e foram geradas as análises descritivas (média, desvio padrão, quartis) e gráficos de dispersão e boxplot da variável volume;
- 2) Em seguida ajustou-se o semivariograma teórico e experimental da variável volume através de três métodos de ajustes, a saber: Mínimos Quadrados Ordinários, Mínimos Quadrados Ponderados e Máxima Verossimilhança. Para cada método foram geradas três distribuições: Esférica (SHP), Exponencial (EXP) e Gaussiana (GAU). Por fim, escolheu-se aquela que melhor representava a estrutura da dissimilaridade entre os dados, através de estatísticas de erros e distribuição de resíduos.
- 3) Os parâmetros do modelo escolhido foram levados para serem ajustados no aplicativo ArcGIS®, onde gerou-se a krigagem e o mapa de distribuição do erro padrão. Em seguida sobrepôs-se o mapa de volume real com o grid 50x50m gerado na fase anterior. Através do resultado, foi possível comparar o volume obtido pela krigagem e o mapa de volume potencial elaborado na fase anterior.

3.2.3 Diagrama OMT-G

Os operadores espaciais utilizados nas fases de preparação dos dados de entrada e pré-estratificação da população, bem como na krigagem geoestatística estão esquematizados no diagrama OMT-G (Figura 10) a seguir.

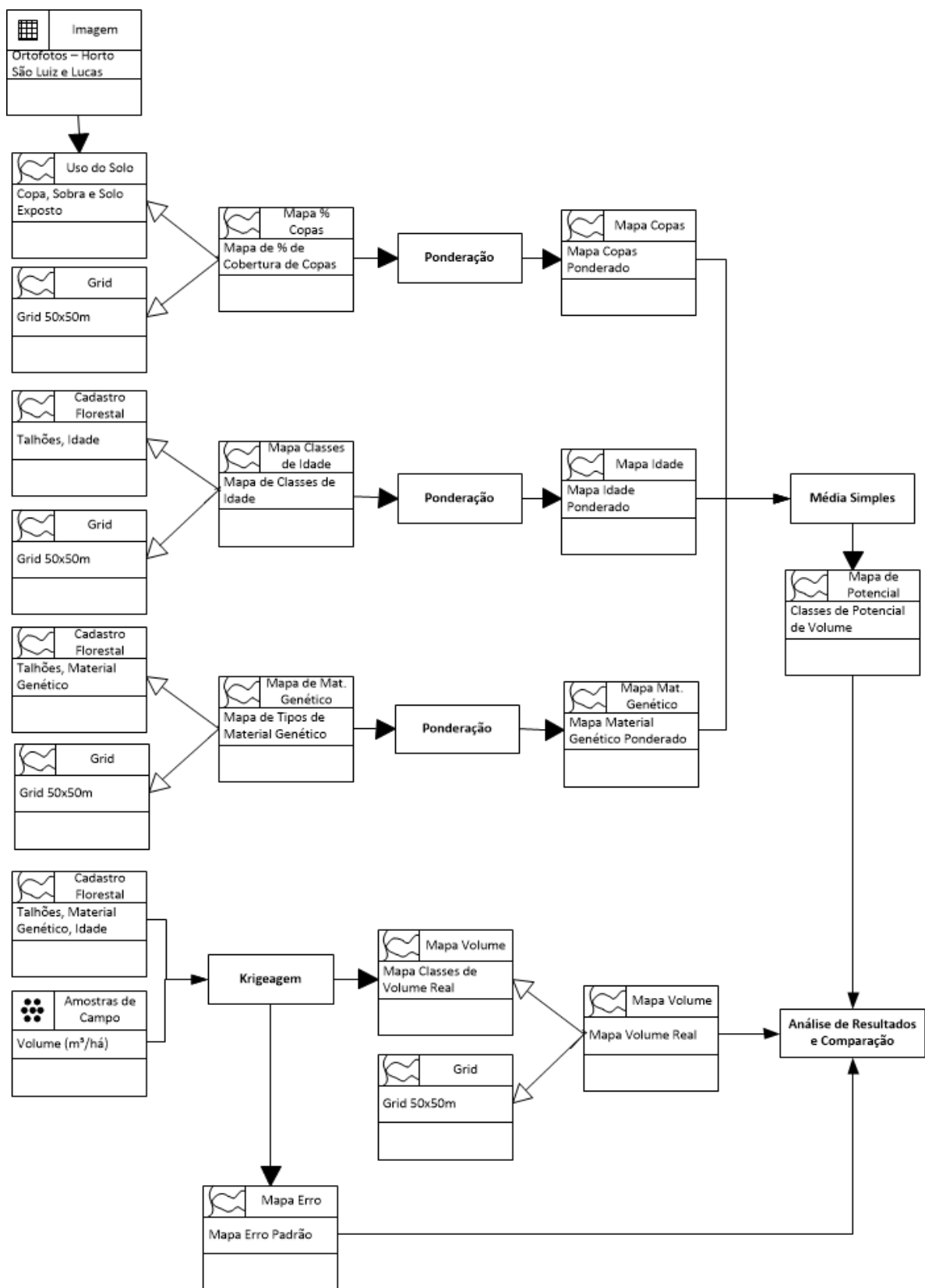


Figura 10. Diagrama OMT-G.

3.2.4 Teste redução das unidades amostrais

Para possibilitar a execução do teste de redução da quantidade de unidades amostrais, realizou-se uma preparação da base de dados que consistiu no procedimento de pré-estratificação da população do Projeto Lucas com base na distribuição do material genético, dado que não há variação da idade entre os talhões. Em seguida, com os valores de volume (m^3/ha) obtidos com o processamento das informações coletadas nas unidades amostrais, realizou-se a análise exploratória de dados e a análise do semivariograma teórico e experimental, escolhendo qual o melhor parâmetro de ajuste de acordo com as estatísticas de erro e dispersão de resíduos. Por fim, gerou-se os mapas de krigagem geoestatística e de erro padrão da variável volume.

Assim, após a preparação da base de dados, testou-se a redução de 20% e depois 30% das unidades amostrais, com base na pré-estratificação realizada, de forma a avaliar a variação do erro e da distribuição espacial da variável volume, através da krigagem geoestatística.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Preparação dos dados de entrada

Os mapas finais de cobertura de copa, idade e material genético utilizados como base para álgebra de mapas são apresentados nas Figura 11, 12 e 13 a seguir.

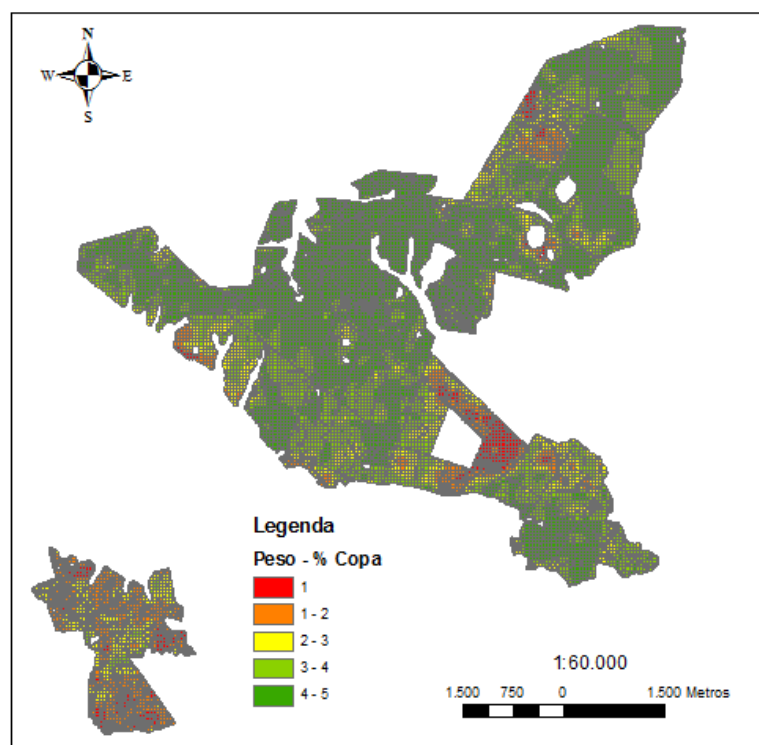


Figura 11. Mapa de pesos para a variável % de cobertura de copa.

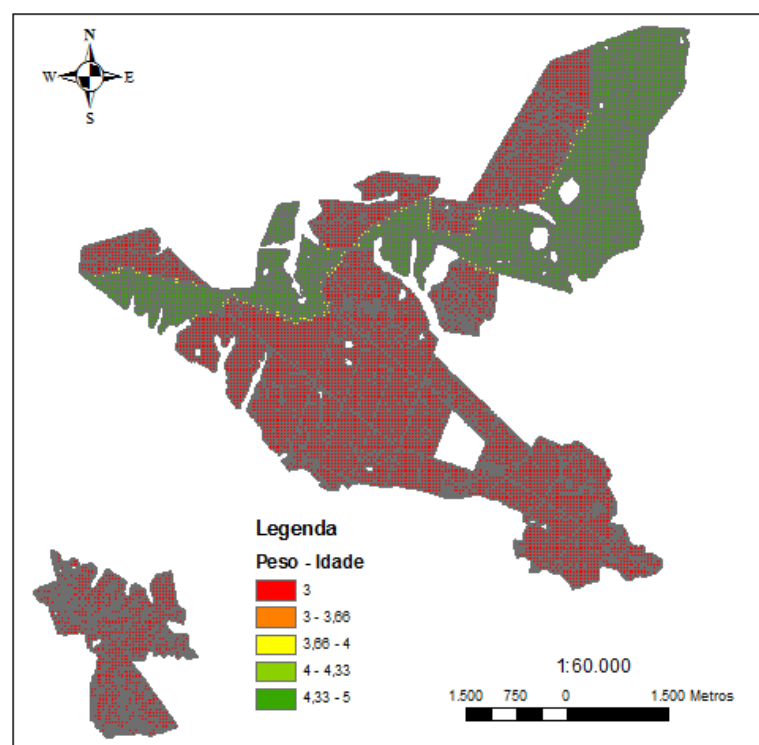


Figura 12. Mapa de pesos para a variável idade.

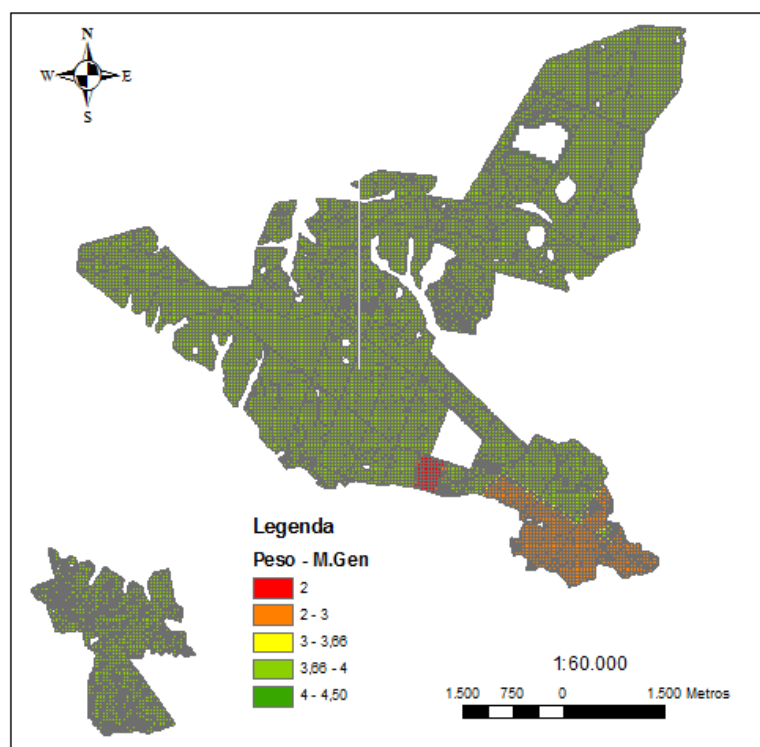


Figura 13. Mapa de pesos para a variável material genético.

As Figura 11, 12 e 13 evidenciam as diferentes classes de potencial de volume, quando consideramos as variáveis percentual de cobertura de copa, idade e material genético, respectivamente. Nota-se que a variável que mais apresentou variação espacial foi o % de cobertura de copa (Figura 11), enquanto que a idade e material genético apresentaram grandes extensões de área com o mesmo potencial, dada a distribuição espacial da variável de interesse.

4.2 Pré-Estratificação

O mapa final de pré-estratificação, obtido através da álgebra de mapas das variáveis listadas no tópico 4.1 está representado na Figura 14 a seguir.

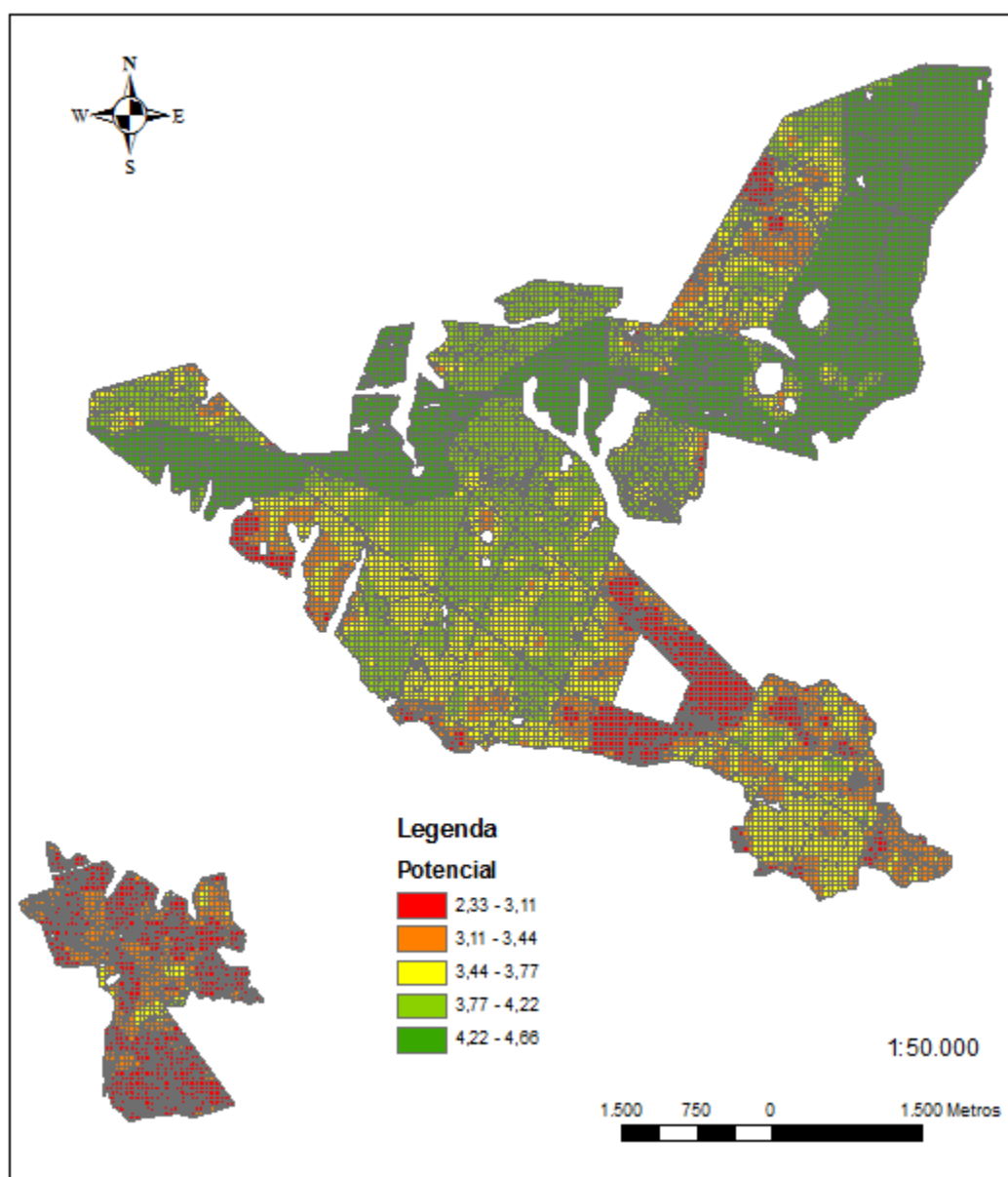


Figura 14. Mapa de potencial de volume para o projeto Horto São Luiz.

Com base no mapa apresentado, pode-se evidenciar padrões de distribuição espacial de potencial volume bem definidos, com poucas áreas de mistura entre as classes. Assim, é possível segregar a população considerada (Projeto Horto São Luiz) em subpopulações (estratos) previamente à realização do processo de amostragem e coleta de dados. Uma estratificação de boa qualidade permite a compreensão da variabilidade espacial da população e possibilita determinar intensidades amostrais específicas para cada estrato, de forma a otimizar o processo de amostragem e

consequentemente reduzir o número de amostras e custos. Os parâmetros para avaliação da qualidade da estratificação gerada serão especificados nos tópicos a seguir.

4.3 Análise Exploratória de Dados

As medidas de dispersão e posição da variável volume para o Horto São Luiz (m³/ha) estão detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4. Medidas de posição e dispersão da variável volume para o Horto São Luiz.

Variável Volume	Valor
Mínimo	36,44
1º Quartil	71,23
Mediana	98,3
Média	98,18
3º Quartil	124,2
Máximo	164,2
Variância	1116,5
Desvio Padrão	33,41
Coeficiente de Variação	34,03%

Fonte: Elaboração própria.

Já o histograma, e análises da variação da variável em função da latitude e longitude, bem como o boxplot dos dados estão dispostos na Figura 15.

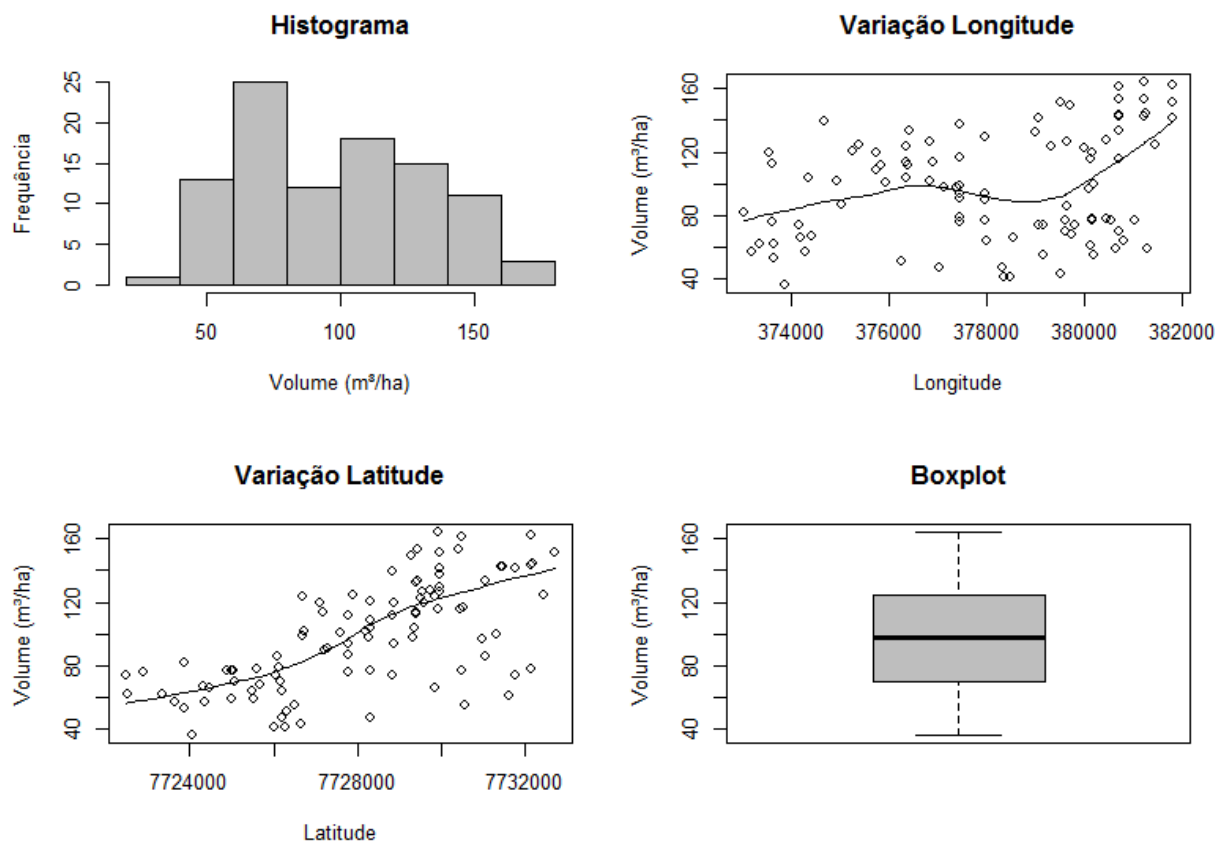


Figura 15. Histograma, Variação do Volume em função da Longitude e Latitude e Boxplot.

Através da análise do histograma e boxplot apresentados na Figura 15, nota-se que a variável volume apresenta uma distribuição que se assemelha à normal (gaussiana), possibilitando a aplicação do método geoestatístico e krigagem sem realizar transformação da variável. Nota-se também que há uma leve tendência de incremento de volume conforme se aumenta a latitude e longitude, o que é explicado pela variação de idade ao longo da extensão do projeto.

Em seguida, ajustou-se o semivariograma experimental e teóricos para determinação do melhor modelo, e os resultados estão apresentados na Figura 16.

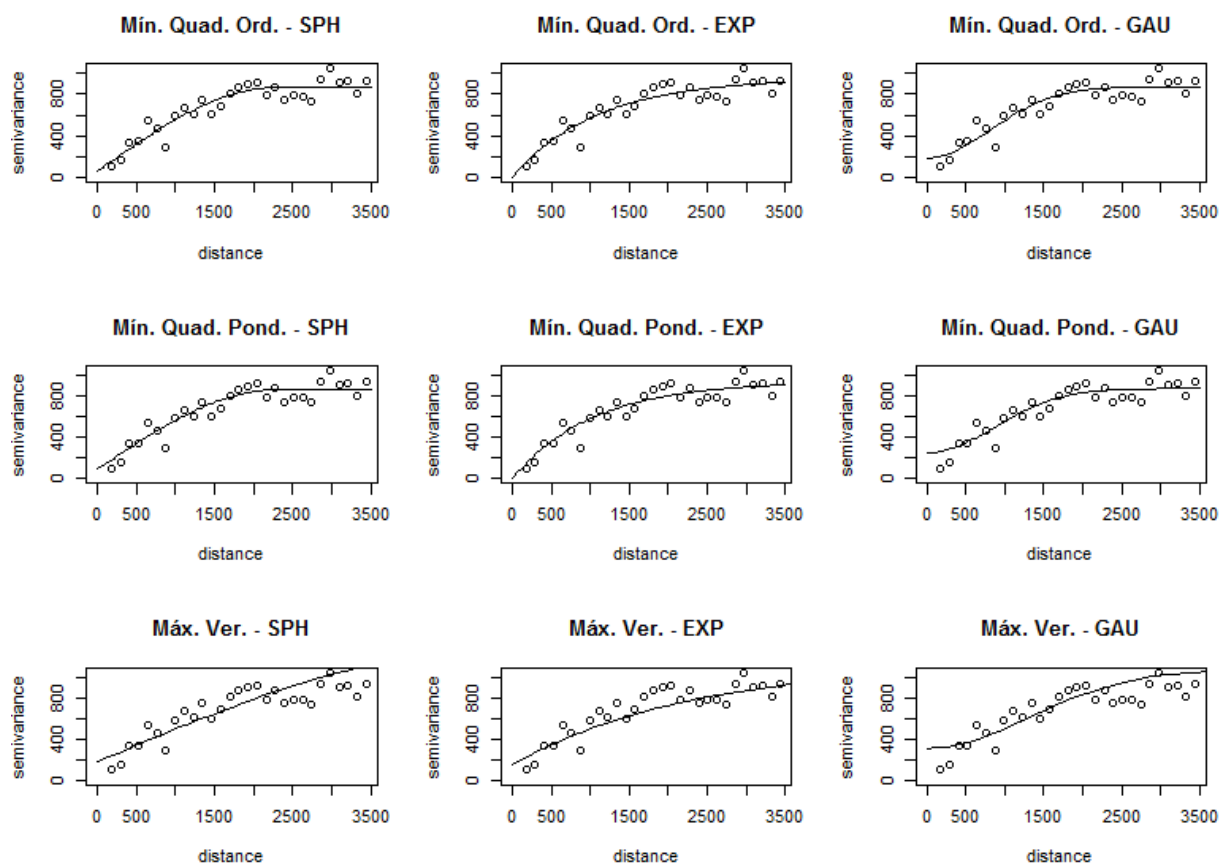


Figura 16. Semivariogramas ajustados para a variável volume.

Em uma análise preliminar, pode-se evidenciar que o melhor ajuste para a variável volume no Projeto Horto São Luiz foi o modelo exponencial, ajustado através do método dos mínimos quadrados ponderados. Nota-se também que o método da máxima verossimilhança não retratou bem o comportamento da semivariância para o conjunto de dados observados.

A Figura 17 a seguir apresenta a distribuição dos resíduos para os modelos analisados.

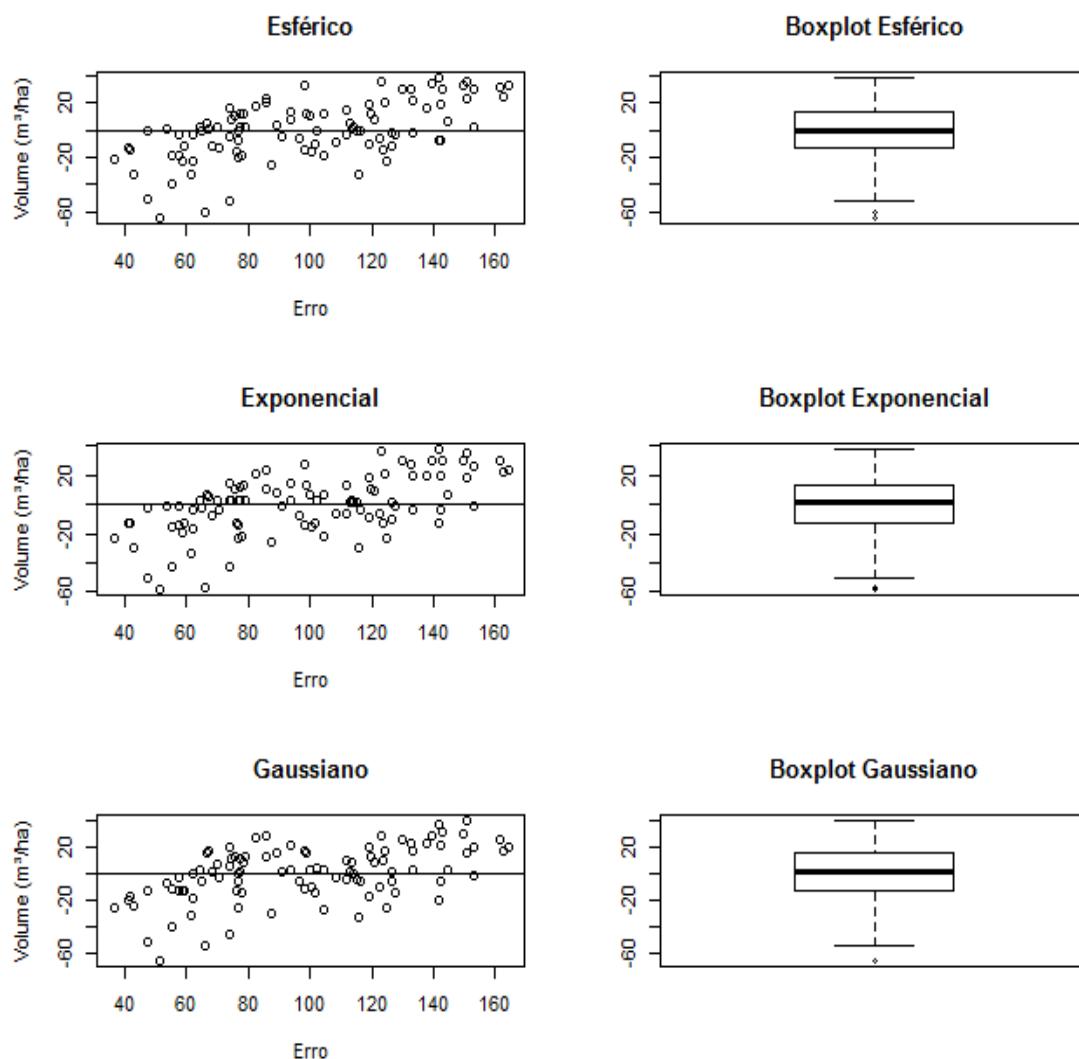


Figura 17. Gráficos de dispersão de resíduos e boxplot para os modelos ajustados.

Os valores de Erro Médio Padrão, obtidos através da validação cruzada e de processamento dos resíduos para os modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano foram 19,19; 18,22 e 19,36, respectivamente.

Ao se analisar a dispersão dos resíduos e o erro médio padrão, confirma-se que o modelo exponencial foi o que melhor retratou o comportamento da semivariância dos dados.

Os parâmetros do semivariograma gerados a partir do modelo exponencial foram:

- Contribuição: 1150
- Alcance: 2200

- Efeito pepita: 105

4.4 Krigagem Geoestatística

A Figura 18 apresenta o resultado da krigagem geoestatística gerada a partir dos parâmetros definidos na análise exploratória de dados.

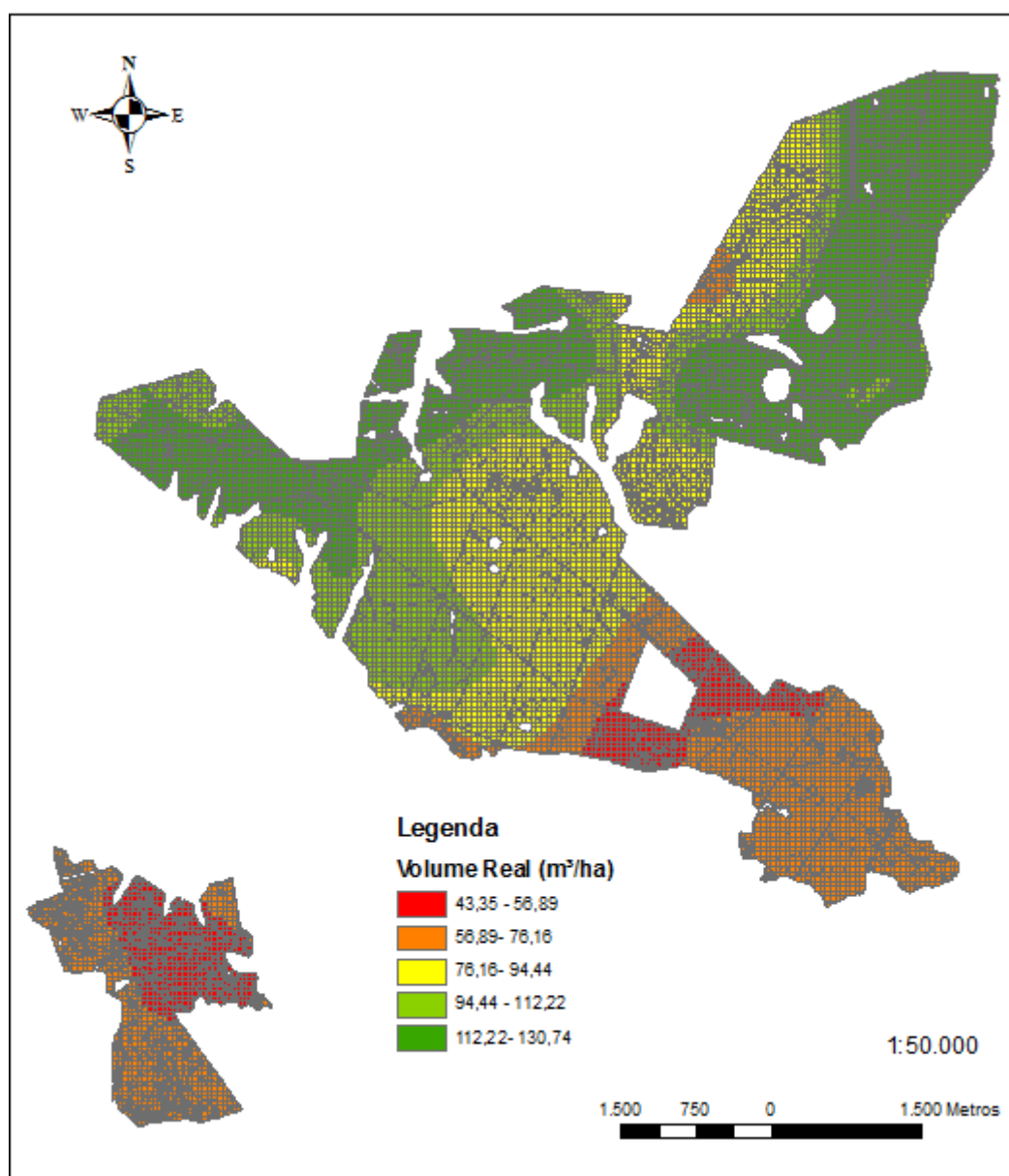


Figura 18. Mapa de distribuição espacial obtida pela krigagem geoestatística do volume.

A partir da análise da krigagem, é possível evidenciar padrões bem definidos de volume e com grandes extensões de área para as classes consideradas. Não foi evidenciado regiões com misturas entre as classes.

Já a Figura 19 apresenta a distribuição espacial do erro das estimativas.

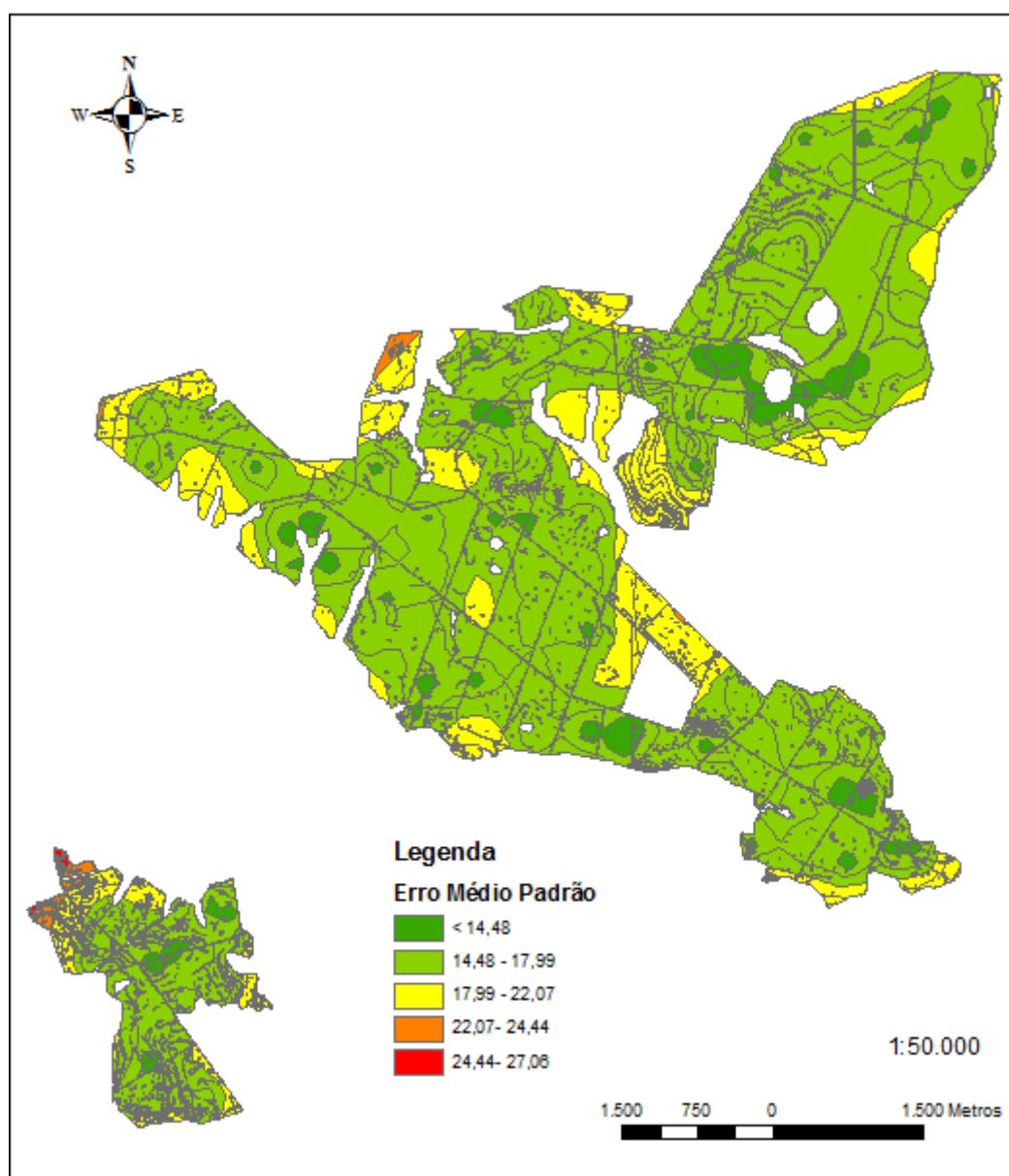


Figura 19. Mapa de distribuição espacial do erro das estimativas de volume.

Nota-se que a maioria dos talhões do projeto apresentou erro na classe de 14,48 a 17,99 m³/ha, enquanto que apenas algumas porções do projeto apresentaram erros

maiores que 22,07 m³/ha. Nota-se também a grande área do projeto apresentou uma distribuição espacial do erro bem comportada, confirmando a qualidade das estimativas geradas pela krigagem.

4.4 Comparação entre os resultados

A Figura 20 apresenta uma comparação entre a pré-estratificação da população em áreas de potencial de volume e o volume real obtido através da krigagem.

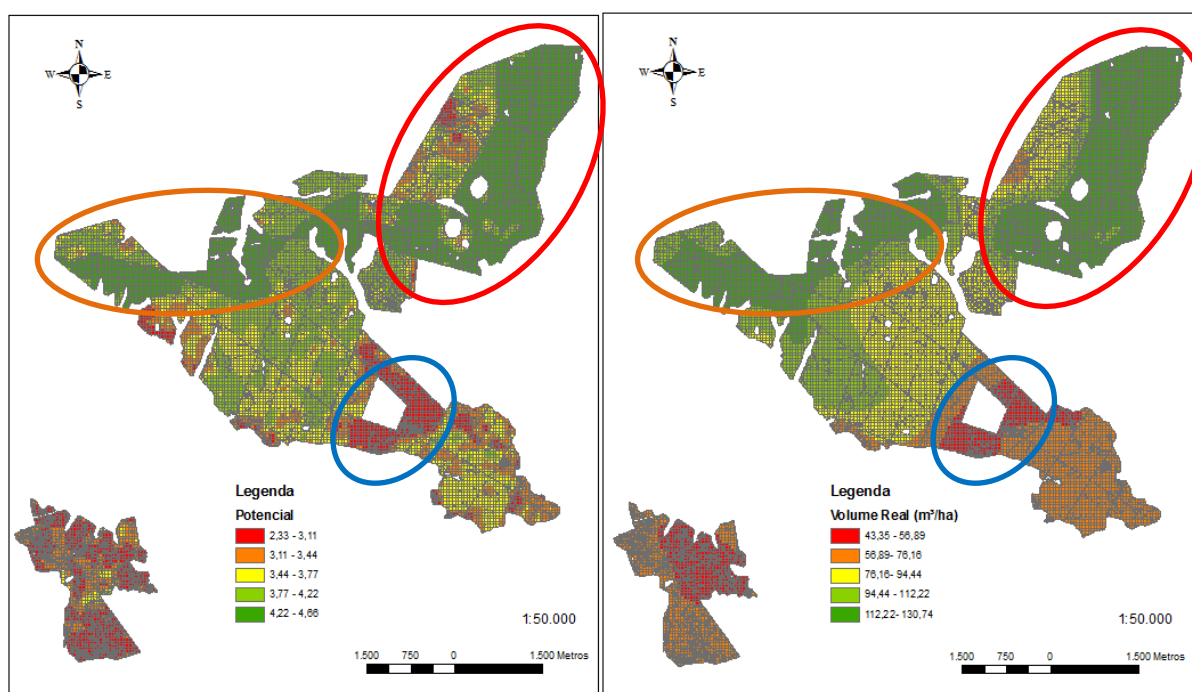


Figura 20. Mapas de potencial de volume e de volume real obtido através da krigagem.

Ao se comparar os dois mapas, nota-se que de forma geral as classes de volume real obtidas através da krigagem apresentaram distribuição espacial semelhante às classes de volume potencial (aptidão) obtidas a partir da pré-estratificação realizada na população. As regiões destacadas nos mapas apresentaram praticamente os mesmos resultados e comportamento, nos quais a pior classe de potencial (vermelho) corresponde ao menor volume real e a melhor classe de potencial (verde) corresponde ao maior volume real. Apenas algumas pequenas porções retrataram divergências

entre os dois resultados, mas ainda assim foi possível efetuar a análise e compreensão da variação espacial da variável volume. Ou seja, a pré-estratificação realizada na população apresentou uma qualidade satisfatória.

4.4 Teste redução das unidades amostrais

Com o objetivo de se testar o efeito da redução da quantidade de unidades amostrais (com base em estratificação da população) no processamento geoestatístico, realizou-se o mesmo procedimento de análise exploratória de dados e krigagem considerando-se três situações distintas (Figura 21):

- 100% das Unidades Amostrais – 48 amostras;
- 80% das Unidades Amostrais – 39 amostras;
- 70% das Unidades Amostrais – 34 amostras.

As unidades amostrais foram retiradas aleatoriamente dentro dos estratos definidos.

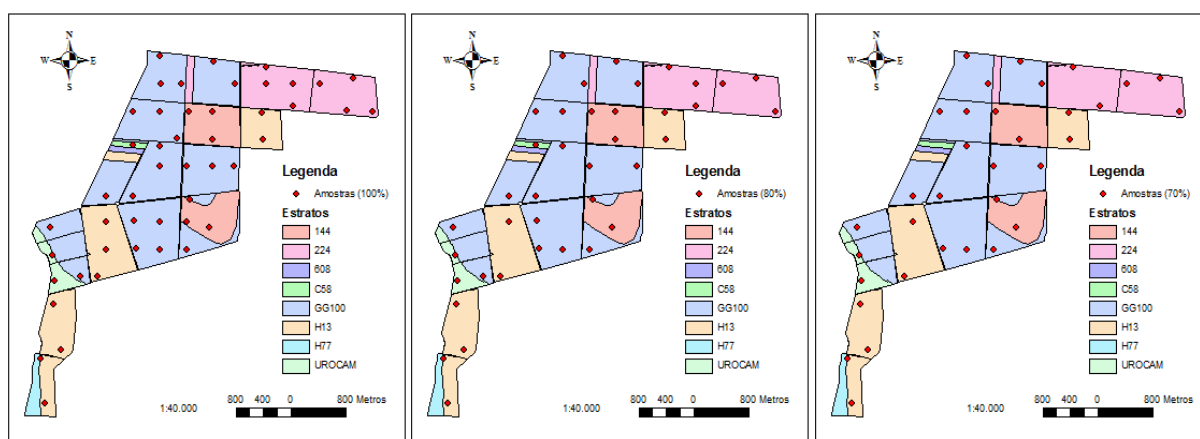


Figura 21. Mapas de distribuição de unidades amostrais para os estratos do Projeto Lucas, considerando-se 100%, 80% e 70% das unidades amostrais, respectivamente.

As medidas de dispersão e posição da variável volume para o Projeto Lucas (m^3/ha), considerando 100% das amostras estão detalhadas na Tabela 5.

Tabela 5. Medidas de posição e dispersão da variável volume para o Projeto Lucas (100% das amostras).

Variável Volume	Valor
Mínimo	54,5
1º Quartil	81,92
Mediana	96,65
Média	93,82
3º Quartil	107,5
Máximo	134,4
Variância	366,61
Desvio Padrão	19,14
Coeficiente de Variação	20,41%

Fonte: Elaboração própria.

Já o histograma, e análises da variação da variável em função da latitude e longitude, bem como o boxplot dos dados estão dispostos na Figura 22.

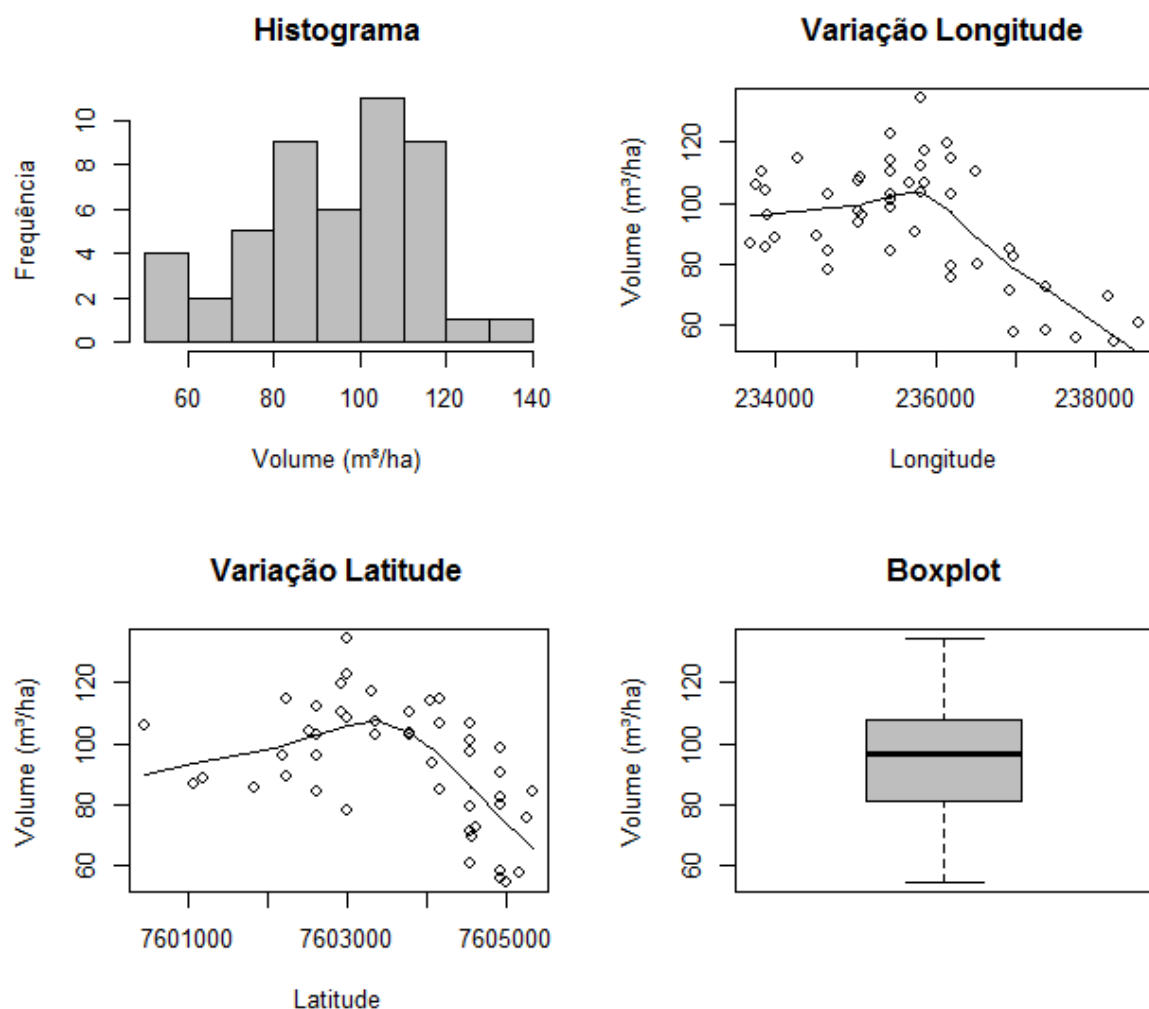


Figura 22. Histograma, Variação do Volume em função da Longitude e Latitude e Boxplot (100% das amostras).

Através da análise do histograma e boxplot apresentados na Figura 22, nota-se que a variável volume apresenta uma distribuição que se assemelha à normal (gaussiana), possibilitando a aplicação do método geoestatístico e krigagem sem realizar transformação da variável. Nota-se também que há uma tendência de redução de volume conforme se aumenta a latitude e longitude, o que é explicado pela variação de material genético plantado ao longo da extensão do projeto.

Em seguida, ajustou-se o semivariograma experimental e teóricos para determinação do melhor modelo, e os resultados estão apresentados na Figura 23.

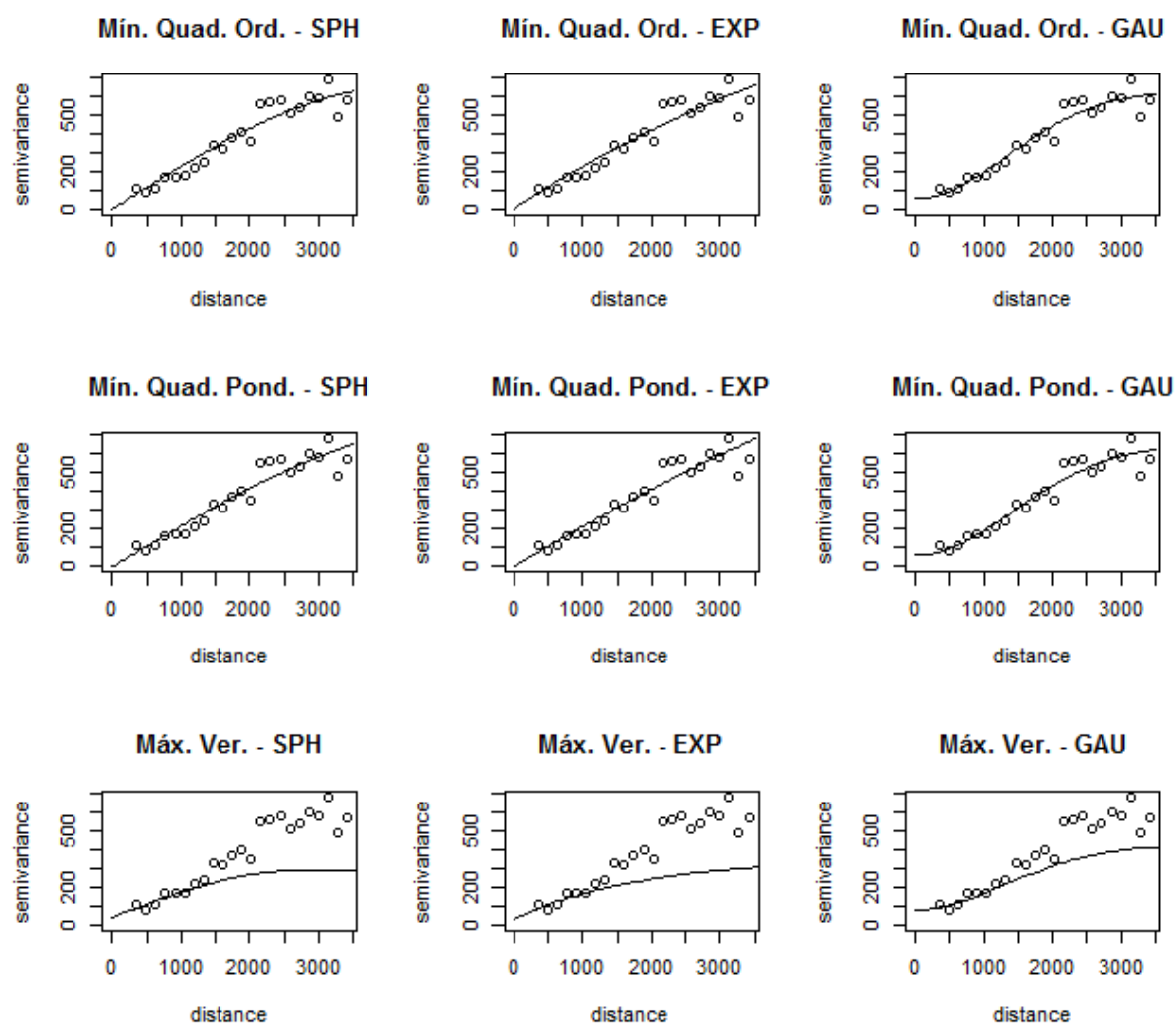


Figura 23. Semivariogramas ajustados para a variável volume (100% das amostras).

Em uma análise preliminar, pode-se evidenciar que o melhor ajuste para a variável volume no Projeto Lucas foi o modelo gaussiano, ajustado através do método dos mínimos quadrados ponderados. Nota-se também que o método da máxima verossimilhança não retratou bem o comportamento da semivariância para os dados. A Figura 24 a seguir apresenta a distribuição dos resíduos para os modelos analisados.

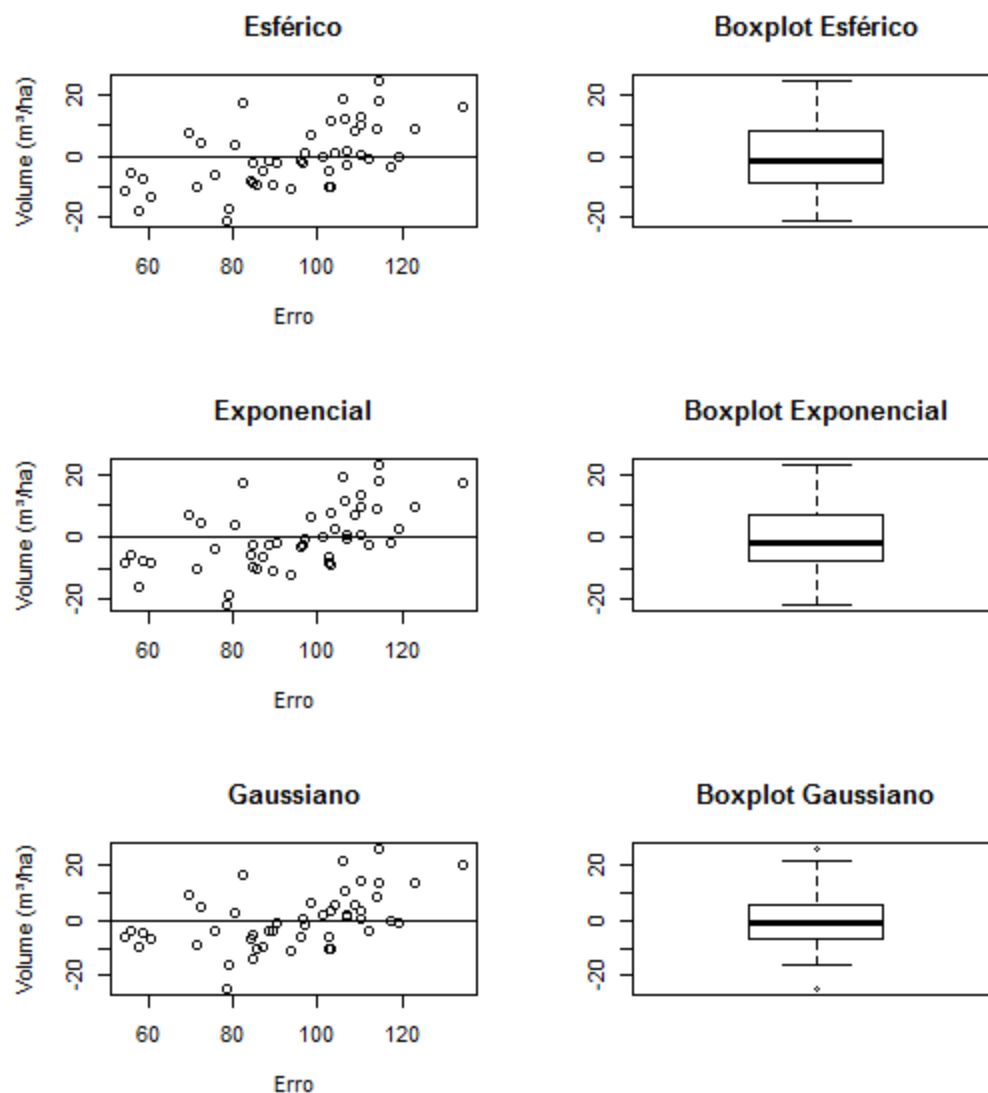


Figura 24. Gráficos de dispersão de resíduos e boxplot para os modelos ajustados (100% das amostras).

Os valores de Erro Médio Padrão, obtidos através da validação cruzada e de processamento dos resíduos para os modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano foram 9,58; 9,07 e 8,74, respectivamente.

Ao se analisar a dispersão dos resíduos e o erro médio padrão, confirma-se que o modelo gaussiano foi o que melhor retratou o comportamento da semivariância dos dados.

Em seguida, foram realizados os mesmos procedimentos para geração dos parâmetros dos modelos de semivariograma ajustados considerando-se os cenários de redução de 20% e de 30% de unidades amostrais. Os resultados obtidos para os três cenários estão detalhados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros dos modelos e erros das estimativas para os três cenários.

Cenário	Quantidade Amostras	Modelo Escolhido	Contribuição	Alcance	Efeito Pepita	Erro Padrão Médio
100%	48	Gaussiano	555,98	1900	68,57	8,74
80%	39	Gaussiano	500	2000	70	7,76
70%	34	Gaussiano	620	2450	70	6,86

Fonte: Elaboração própria.

Em seguida, os parâmetros gerados foram utilizados para realização da krigagem geoestatística e a Figura 25 apresenta o resultado da krigagem para as situações consideradas.

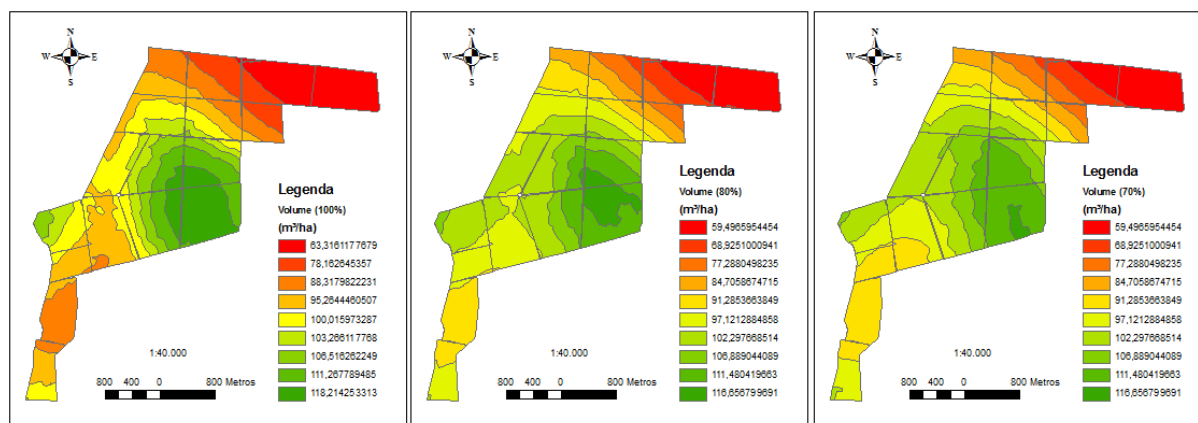


Figura 25. Mapa de distribuição espacial do volume (Projeto Lucas), considerando-se 100%, 80% e 70% das unidades amostrais, respectivamente.

A partir da análise dos mapas, é possível evidenciar padrões bem definidos de distribuição espacial de volume, observando pequenas porções com misturas entre classes, principalmente quando considerou-se 100% das unidades amostrais. Ao se

comparar as três situações, observa-se que a distribuição espacial do volume foi semelhante, com regiões bem definidas nos 3 cenários. Em ambos mapas as porções do canto superior direito e central corresponderam às regiões de menor e maior volume, respectivamente.

Já a Figura 26 apresenta a distribuição espacial do erro das estimativas para os cenários estudados.

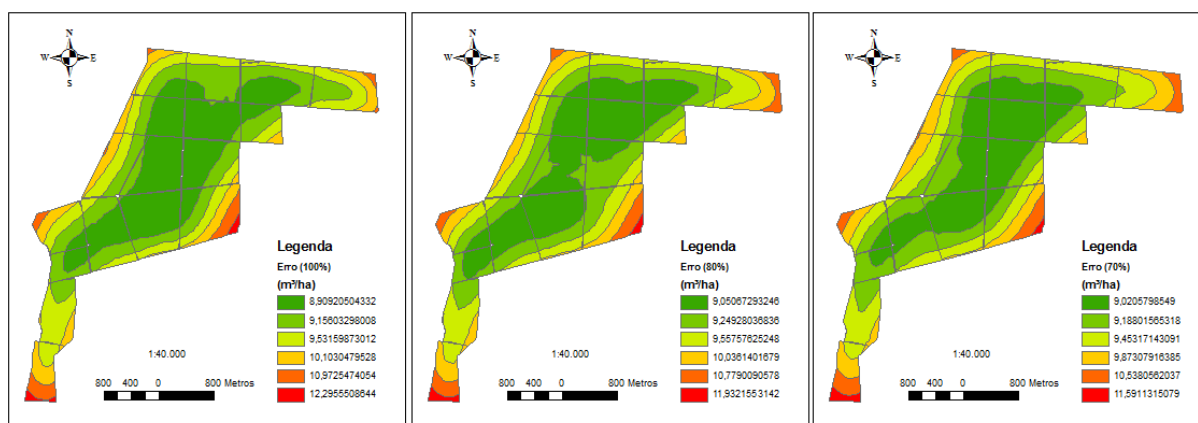


Figura 26. Mapa de distribuição espacial do erro das estimativas de volume (Projeto Lucas), considerando-se 100%, 80% e 70% das unidades amostrais, respectivamente.

Nota-se que o comportamento do erro nos três cenários foi semelhante, não apresentando grandes diferenças significativas dos valores entre os cenários. De forma geral, a maior parte do projeto (região central) apresentou erro menor que $10 m^3/ha$, enquanto que apenas algumas porções do projeto (extremidades) apresentaram erros maiores que $10 m^3/ha$. Nota-se também que a grande área do projeto, em ambos os casos apresentou uma distribuição espacial do erro bem comportada, confirmando a qualidade das estimativas geradas pela krigagem.

Ao se analisar os valores do erro padrão médio, nota-se que o menor valor (6,86) correspondeu ao cenário com redução de 30% das unidades amostrais, enquanto que o maior erro (8,74) correspondeu ao ajuste que considerou 100% das unidades amostrais.

Esse fato confirma que a redução de até 30% das amostras não só diminuiu o erro (incerteza) dos estimadores, como não afetou o resultado da krigagem quando

comparado ao cenário com 100% das amostras, ou seja, caso tivesse sido utilizada a pré-estratificação na etapa de planejamento do inventário florestal deste projeto, seria possível reduzir em 14 amostras (-30%), minimizando o custo de levantamento de campo.

6. CONCLUSÕES

O modelo de pré-estratificação utilizado neste trabalho apresentou um desempenho satisfatório no que se refere à classificação do potencial de volume quando comparado à distribuição espacial de volume real obtido por krigagem geoestatística. Conclui-se também que a redução de até 30% das amostras minimizou o erro (incerteza) dos estimadores obtidos por processamento geoestatístico e krigagem e não afetou a distribuição espacial da variável volume quando comparado ao cenário com 100% das amostras.

Dessa forma, a utilização conjunta de informações de contexto espacial (cadastro florestal) integradas com informações obtidas por aerolevantamentos (cobertura de copa) e técnicas de processamento geoestatístico não só apresenta-se como uma alternativa potencial para compreensão da variabilidade espacial do volume, como também possibilita a redução da quantidade de amostras de campo.

Esses resultados apresentam uma importância particular no planejamento e execução do inventário florestal, possibilitando a redução de custos deste processo através de ferramentas de geoprocessamento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

KANEGAE, H.; **Avaliação de sistemas de inventários sucessivos e dois interpoladores espaciais como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de *Eucalyptus sp.***. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

LANDIM, P. M. B.; **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. Rio Claro: DGA,IGCE,UNESP,2002. (Geotemática, Texto Didático 6).

MATHERON, G.;Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Lancaster, v.58, n.8, p. 1246-1266, Dec. 1963.

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

MORAIS, A. D. de; **Utilização de Métodos estatísticos em Inventário Florestal**. Seminário. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Piracicaba, 2003.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R., **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 285p.