



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JAVIER DIAS PITA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E
DENDROMÉTRICOS EM PLANTIO DE TECA (*Tectona grandis* L. f. Lamiaceae)
NO MUNICÍPIO DE ABAETETUBA-PA.**

BELÉM
2012



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JAVIER DIAS PITA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E
DENDROMÉTRICOS EM PLANTIO DE TECA (*Tectona grandis* L. f. Lamiaceae)
NO MUNICÍPIO DE ABAETETUBA-PA.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais: área de concentração Silvicultura, para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria de Nazaré Martins Maciel

BELÉM
2012

Pita, Javier Dias

Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e dendrométricos em plantio de Teca (*Tectona grandis* L. f. Lamiaceae) no município de Abaetetuba-PA/ Javier Dias Pita. - Belém, 2012.

91 f.:il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2012.

1. Geoestatística 2. Variabilidade Espacial 3. Atributos Químicos do Solo 4. Atributos Dendrométricos 5. *Tectona grandis* I. Título.

CDD – 551.072



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JAVIER DIAS PITA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E
DENDROMÉTRICOS EM PLANTIO DE TECA (*Tectona grandis* L. f. Lamiaceae)
NO MUNICÍPIO DE ABAETETUBA-PA.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, para obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 23 de Dezembro de 2011

Banca Examinadora

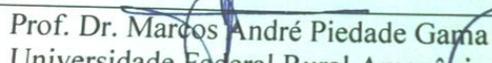


Prof. Dr.ª Maria de Nazaré Martins Maciel
Orientadora

Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA



Prof. Dr. Paulo Cerqueira dos Santos
Universidade Federal do Pará
1º examinador



Prof. Dr. Marcos André Piedade Gama
Universidade Federal Rural Amazônia
2º examinador



Prof. Dr. Francisco de Assis Oliveira
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA
3º examinador

1º Lei da Geografia

“Todas as coisas se parecem, porém as mais próximas no espaço se parecem mais”.

Waldo Tobler

A DEUS, pela sua graça.

Ao meu Pai José Maria Pita Arocena, que não mediu esforços para educar seus filhos.

A minha Mãe Ana Cristina Dias Pita, por todo esforço empregado em minha formação e pelo amor dedicado.

A minha irmã Laura Dias Pita, pelo incentivo e carinho.

A minha orientadora Prof^a. Maria de Nazaré Martins Maciel, pelo esforço, dedicação e paciência que teve para conclusão desta dissertação.

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todos os momentos, e por todas as conquistas;

A empresa Silvo Florestal Abaeté Ltda., pela disponibilização da área de estudo e apoio logístico que foram fundamentais para execução deste trabalho.

Aos Engenheiros Florestais, Stephan Almeida, César Donato e Leonam Braz pelo apoio, incentivo e confiabilidade dada ao trabalho.

Ao Engenheiro Agrônomo Bruno Wendell e ao Engenheiro de Minas Fábio Conceição pelo auxílio nas atividades de campo.

À Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, em especial ao Programa de Mestrado em Ciências Florestais, e a todos os professores deste programa, pelo apoio institucional, e pelos valiosos conhecimentos transmitidos.

A Dr^a. Maria de Nazaré Martins Maciel, por sua orientação no meu trabalho, colaboração na minha formação profissional, amizade e incentivo.

Aos meus colegas de mestrado.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESPÉCIE <i>Tectona grandis</i> L.f.....	16
3.1.1 Descrição da espécie.....	16
3.1.2 Perspectivas econômicas.....	17
3.1.3 Reflorestamento.....	18
3.1.4 Aspectos silviculturais.....	20
3.1.5 Demanda edafoclimática.....	21
3.1.6 Adubação do solo.....	22
3.2 SILVICULTURA DE PRECISÃO.....	23
3.3 GEOESTATÍSTICA.....	28
3.3.1 Semivariograma.....	31
3.2.2 Modelos variográficos.....	33
3.2.3 Seleção do modelo teórico de semivariograma.....	34
3.2.4 Krigagem.....	36
4 MATERIAL E MÉTODOS	38
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	38
4.1.1 Localização.....	38
4.1.2 Descrição do plantio.....	40
4.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS.....	41
4.2.1 Amostragem do solo.....	41
4.2.2 Análise de solo.....	42
4.2.3 Levantamento dendrométrico.....	43
4.3 ANÁLISE DOS DADOS.....	43
4.3.1 Determinação do volume.....	43
4.3.2 Análise dos dados geoestatísticos.....	44
4.3.3 Análise exploratória dos dados.....	44
4.4 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA.....	45
4.4.1 Ajuste do modelo de semivariograma.....	46

4.4.2 Validação cruzada (<i>Cross-validation</i>).....	47
4.4.3 Krigagem e mapeamento.....	47
4.5 RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DENDROMÉTRICOS DO PLANTIO DE <i>Tectona grandis</i> L.f.....	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS.....	49
5.1.1 Teste de normalidade.....	49
5.1.2 Estatística descritiva.....	51
5.1.3 Análise de tendência.....	54
5.2 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA.....	56
5.2.1 Semivariograma experimental.....	56
5.2.2 Modelos ajustados.....	59
5.2.3 Mapas de predição e incerteza dos atributos químicos do solo.....	64
5.2.4 Mapas de predição e incerteza dos atributos dendrométricos.....	69
5.3 RELAÇÃO ENTRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E ATRIBUTOS DENDROMÉTRICOS EM PLANTIO DE <i>Tectona grandis</i> L.f.....	71
6. CONCLUSÃO.....	74
REFERÊNCIAS.....	75
ANEXOS	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Plantio de <i>Tectona grandis</i> L. f.....	17
Figura 2- Aplicações da silvicultura de precisão.....	26
Figura 3- Mapa de recomendação aplicado na silvicultura convencional (A) e silvicultura de precisão (B).....	28
Figura 4- Exemplo de Semivariograma.....	32
Figura 5 - Modelos semivariográficos do tipo transitivo (com patamar) mais usuais em geoestatística.....	33
Figura 6- Delimitação do município e da área de plantio.....	39
Figura 7 - Esquema da amostragem de solo na área de estudo, indicando os pontos amostrais dos atributos químicos do solo.....	41
Figura 8 - A – Coleta de Solos sob a projeção da copa e marcação das árvores selecionadas com tinta vermelha; B – Procedimentos para evitar contaminação do solo; C – Acondicionamento em sacos plásticos devidamente identificados; D – Aquisição de Coordenadas UTM.....	42
Figura 9- Esquema de amostragem dos atributos dendrométricos, indicando as parcelas amostrais do plantio de <i>Tectona grandis</i> L.f.	43
Figura 10 – Instrumentos utilizados para o levantamento dendrométrico.....	43
Figura 11 – Histograma de frequência dos atributos químicos do solo.....	50
Figura 12- Histograma de frequência dos atributos dendrométricos.....	51
Figura 13 – Gráficos de tendência dos dados relativos às variáveis químicas do solo...	55
Figura 14 – Gráficos de tendência dos dados relativos às variáveis dendrométricas.....	56
Figura 15 – Semivariogramas experimentais das variáveis químicas do solo.....	58
Figura 16- Semivariogramas experimentais das variáveis dendrométricas.....	59
Figura 17- Semivariogramas ajustados para as variáveis químicas do solo.....	62
Figura 18- Semivariogramas ajustados para as variáveis dendrométricas.....	64
Figura 19 – Mapa de predição dos teores de potássio (A) e mapa de incerteza do potássio (B).....	65
Figura 20 – Mapa de predição dos teores de cálcio (A) e mapa de incerteza do cálcio (B).....	66
Figura 21 – Mapa de predição dos teores de magnésio (A) e mapa de incerteza do magnésio(B).....	67
Figura 22 - Mapa de predição dos teores de matéria orgânica (A) e mapa de incerteza da matéria- orgânica (B).....	68

Figura 23 - Mapa de predição dos teores de pH em água (A) e mapa de incerteza do pH em água (B).....	69
Figura 24 - Mapa de predição do DAP (A) e mapa de incerteza do DAP (B).....	70
Figura 25 - Mapa de predição da Altura (A) e mapa de incerteza da Altura (B).....	70
Figura 26 - Mapa de predição do Volume (A) e mapa de incerteza do Volume (B)	71
Figura 27 – Relação entre mapas de predição dos atributos químicos do solo (A) e mapas de predição dos atributos dendrométricos (B)	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis químicas do solo em profundidade de 0-20 cm.....	52
Tabela 2 – Estatística Descritiva das variáveis dendrométricas.....	54
Tabela 3 - Parâmetros dos semivariogramas das variáveis químicas do solo e ajustados aos modelos selecionados; índice do efeito pepita relativo $E = C_0/C_1$, razão $K = C_0 / C_0 + C_1$	60
Tabela 4 - Parâmetros dos semivariogramas das variáveis dendrométricas e ajustados aos modelos selecionados; índice do efeito pepita relativo $E = C_0/C_1$, razão $K = C_0 / C_0 + C_1$	63
Tabela 5 - Matriz de correlação entre os mapas dos atributos químicos do solo e dos atributos dendrométricos.....	73

RESUMO: O estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e dos atributos dendrométricos é de fundamental importância para o manejo adequado dos plantios florestais, visando à diminuição do impacto econômico, social e ambiental. A utilização de técnicas de geoestatística e geoprocessamento envolvidas no contexto da Silvicultura de Precisão permitem a realização do mapeamento da variabilidade espacial dos atributos estudados. Este trabalho teve por objetivo analisar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e dos atributos dendrométricos em um plantio de *Tectona grandis* L. f. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, teste de normalidade, análise de tendência e verificação da dependência espacial por meio de semivariogramas experimentais e posteriormente o ajuste das variáveis que apresentavam dependência espacial, por fim realizando a krigagem ordinária dos dados, gerando mapas de predição e incerteza das variáveis em estudo. De posse destes mapas, foi realizado o estudo das relações entre atributos químicos do solo e atributos dendrométricos, por meio de análise de correlação entre mapas (pixel-a-pixel). Os resultados mostraram que as variáveis químicas do solo Potássio(K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Matéria Orgânica (M.O) e pH em água (pH H₂O) apresentaram dependência espacial, enquanto que Fósforo (P), Alumínio (Al), Hidrogênio + Alumínio (H + Al) e pH em KCl não apresentaram dependência espacial. As variáveis dendrométricas DAP, Altura e Volume apresentaram dependência espacial, onde os resultados da análise de correlação mostraram que as áreas com maiores valores de DAP, altura e volume apresentaram menores teores de nutrientes, o que pode-se pressupor que nestas regiões houve o maior consumo de nutrientes por parte da *Tectona grandis* L. f., fator este também evidenciado pela matriz de correlação entre mapas, o qual mostrou fraca correlação entre os atributos químicos do solo e os atributos dendrométricos.

Palavras-chave: Geoestatística, Variabilidade Espacial, Atributos Químicos do solo, Atributos Dendrométricos, *Tectona grandis* L. f.

ABSTRACT: The study of spatial variability of soil chemical properties and dendrometric attributes is of fundamental importance for the proper management of forest plantations in order to reduce the impact economic, social and environmental. The use of geostatistics and geoprocessing in the context of the Precision Forestry enable the achievement of mapping the spatial variability of the attributes studied. The main objective this work was analyze the spatial variability of soil chemical properties and dendrometric attributes in planting of *Tectona grandis* L.f. Data were submitted to descriptive statistics, normality test, trend analysis and verification of spatial variability dependence by experimental semivariograms and then adjusting the variables that showed spatial dependence, finally realizing the ordinary kriging of data, generating maps of prediction and uncertainty of the variables under study. With these maps, the study was conducted of the relationship between soil chemical properties and dendrometric attributes through correlation analysis between maps (pixel-by-pixel). The results showed that the chemical variables of soil potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), Organic Matter (OM) and pH in water (pH H₂O) showed spatial dependence, while phosphorus (P), Aluminum (Al), Aluminum +Hydrogen (H + Al) and pH in KCl showed no spatial dependence. The dendrometric variables: DAP, Altura e Volume, showed dependence spatial .In general, areas with higher levels of DAP, height and volume had lower levels of nutrients, which can be assumed that these regions were the highest consumption of nutrients by the *Tectona grandis* L.f, this factor also is evident in the correlation matrix that maps, because have a weak correlation between soil chemical properties and dendrometric attributes.

KEYWORDS: Geostatistics, Spatial Variability, Soil Chemical Properties, Dendrometric Attributes, *Tectona grandis* L. f.

1. INTRODUÇÃO

A análise do histórico recente do setor florestal evidencia três fases distintas. A primeira fase (1960-1980), responsável pela formação da base florestal, resultou de uma “política estratégica” governamental de concessão de incentivos fiscais para formação de plantios florestais. A segunda fase (1980- 2000) faz referência à profissionalização do setor florestal. Na terceira fase (2000-2010) ocorreu a consolidação do Brasil como um grande *player* internacional do setor de florestas plantadas. Essa fase caracterizou-se pela ampliação das áreas de plantios e pela consolidação do processo de desenvolvimento tecnológico do setor (ganho de produtividade) (ABRAF, 2011).

O setor florestal em 2008 representou 3,4% do Produto Interno Bruto nacional, gerou mais de 8,6 milhões de empregos diretos, além de ter arrecadado em termos de tributos cerca de US\$ 7,2 bilhões e exportado um valor de US\$ 8,8 bilhões (5,5% do total das exportações nacionais), sendo que sua participação no mercado internacional é em média de 3% (ABIMCI, 2008). Assim, o aprimoramento do setor, buscando maior lucratividade e também certificação, geram informações confiáveis que agilizam e aperfeiçoam o processo de tomada de decisão, em termos estratégicos e técnicos (VETTORAZZI; FERRAZ, 2000).

Esta crescente demanda por produtos madeireiros tem proporcionado a abertura de novos mercados e a busca de novas fontes produtoras, ampliando o horizonte para o setor florestal. O investimento em reflorestamento no Brasil mostra-se promissor, pois o país apresenta condições físicas e naturais para o desenvolvimento da atividade e a produção da indústria brasileira, que tem como base a madeira de reflorestamento. (SOARES et al., 2007).

Neste contexto, a madeira da espécie *Tectona grandis* L. f. (Teca) apresenta-se como uma opção viável para o abastecimento da indústria de base florestal no Brasil. Segundo Lunz et al. (2010), nos últimos anos, o estado do Pará despontou como potencial produtor de madeira de teca, dadas as grandes quantidades de áreas antropizadas disponíveis para reflorestamentos.

Considerando que dados de crescimento e produção para plantios de teca ainda são escassos nos trópicos e muito reduzidos no Brasil, e a possibilidade de que os

reflorestamentos com essa espécie venham a ser utilizados em maior escala na Amazônia, torna-se necessária à avaliação do seu desempenho em plantios sob diferentes condições edafoclimáticas (TONINI; COSTA; SCHWENGBER, 2009).

Neste sentido tem-se buscado realizar intervenções precisas nas florestas, para obter o máximo rendimento de acordo com as potencialidades do solo e dos demais fatores ambientais locais. Para tanto, é necessário o acompanhamento e gerenciamento de volume significativo de dados e das conseqüentes informações, que irão variar com o espaço e o tempo (BRANDELERO; ANTUNES; GIOTTO, 2007).

A este gerenciamento localizado das atividades silviculturais denomina-se Silvicultura de Precisão, que objetiva conhecer o levantamento de manchas de produtividade dentro de um determinado talhão, identificando suas causas e possibilitando tomadas de decisões localizadas, minimizando custos, otimizando os recursos e atividades produtivas, minimizando impactos ambientais, acarretando ganho de produtividade e maximização dos lucros (MOLIN 2003, ORTIZ 2004).

A recomendação de atividades silviculturais diferenciadas, dentro do mesmo talhão, é ainda pouco conhecida na área florestal, embora já consolidada na área agrícola, com a agricultura de precisão. A lógica da silvicultura de precisão reside nos mesmos conceitos que norteiam a criação das Unidades de Manejo, ou seja, tratamentos silviculturais diferenciados para condições diferenciadas (STAPE, 2004).

A adoção do conceito de silvicultura de precisão, nada mais é do que a reestruturação de atividades que as empresas já vêm realizando e a introdução de algumas outras, quando couber, sempre visando à obtenção e ao tratamento de dados de natureza espacial, com a exatidão e a precisão necessárias a cada atividade. (VETTORAZZI; FERRAZ, 2000).

De acordo com PALLETT e SALE (2002), o ganho em produtividade é da ordem de 80% devido às melhorias das práticas silviculturais, enquanto que somente 20% é resultado de melhores materiais genéticos. Nota-se, portanto, que a qualidade das operações é fundamental para se conseguir altas produtividades. Dentre essas práticas silviculturais, a adubação desempenha papel importantíssimo no desenvolvimento inicial e crescimento ao longo do ciclo da floresta, pois cria condições favoráveis nos atributos químicos do solo para o desenvolvimento radicular e crescimento das mudas (HAKAMADA; STAPE, 2004; MINATEL; STAPE, 2005).

A necessidade de adubação decorre do fato de que nem sempre o solo é capaz de fornecer todos os nutrientes que as plantas precisam para um adequado crescimento. Isso se deve aos solos muito intemperizados e lixiviados usados para os plantios florestais e pelo contínuo processo de exportação de nutrientes devido às diversas rotações de exploração de culturas agrícolas ou florestais. As características e quantidade de adubos a aplicar dependem das necessidades nutricionais da espécie, da fertilidade do solo, da reação dos adubos com o solo, da eficiência dos adubos e de fatores de ordem econômica (GONÇALVES, 2005).

Esses fatores devem ser levados ainda mais em consideração em plantios localizados em solos amazônicos, em virtude de apresentarem baixa fertilidade e grande ação de lixiviação em decorrência do histórico de desmatamento das áreas e do índice pluviométrico da região, havendo a necessidade de uma determinação mais precisa de onde se aplicar e as quantidades necessárias de adubo a serem utilizadas para correção dessas áreas. Sendo de fundamental importância para melhoria da produtividade dos plantios, além de ganhos econômicos para os proprietários principalmente na produtividade final e na economia de insumos em determinadas regiões do plantio.

Ao considerar a complexidade e dinamismo dos processos que envolvem a produção florestal, faz-se necessário ampliar a discussão sobre o tema, de modo que se possa dispor de informações que permitam a análise do potencial produtivo da floresta, por meio do uso de tecnologias adequadas.

Assim sendo, nesta pesquisa trabalhou-se com a hipótese de que existe dependência espacial para os atributos químicos do solo e dendrométricos na área de plantio de *Tectona grandis* L.f., e essa dependência pode ser descrita por semivariogramas. O conhecimento do modelo de variabilidade espacial dos atributos químicos dos solos e dendrométricos em plantio de *Tectona grandis*, e a realização de estimativas, em locais não amostrados, utilizando a krigagem, contribuem para o mapeamento desses atributos.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e dendrométricos em um plantio de *Tectona grandis* L. f., visando fornecer subsídios para a adoção da Silvicultura de Precisão.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar a variabilidade dos atributos químicos do solo;
2. Determinar a variabilidade dos atributos dendrométricos do plantio de *Tectona grandis* L. f.
3. Gerar Mapas de predição e incerteza dos Atributos Químicos do Solo;
4. Gerar Mapas de predição e incerteza de Atributos Dendrométricos;
5. Relacionar a variabilidade dos atributos químicos do solo com a variabilidade dos atributos dendrométricos do plantio *Tectona grandis* L. f.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ESPÉCIE *Tectona grandis* L. f.

3.1.1 Descrição da espécie

A teca (*Tectona grandis* L. f.), da família Lamiaceae, é uma espécie florestal originária das florestas tropicais de monção do sudeste da Ásia (Índia, Myanmar, Tailândia e Laos). Foi introduzida na região norte do Brasil em 1994 com a finalidade de cumprir a reposição florestal obrigatória em atendimento à legislação ambiental vigente (FIGUEIREDO, 2005).

O nome *Tectona* é originário da palavra portuguesa Teca, que é derivado do grego “*tekton*”, significando carpinteiro. *Grandis*, em latim, possui o significado de grande, nobre. Relaciona-se, portanto, com as qualidades da madeira de Teca, que é muito apreciada pelos carpinteiros e marceneiros. Assim sendo, surgiu o nome literal dessa espécie: *Tectona grandis* L. f., cuja tradução significa: “o maior orgulho dos carpinteiros” (TEWARI, 1999).

A *Tectona grandis* L. f., classifica-se como uma espécie heliófila caducifólia com queda de folhas no período de menor precipitação pluviométrica (CARVALHO, 2006).

Sua altura varia entre 20-30 m, possui tronco retilíneo, espesso, cilíndrico, de casca parda, com fissuras longitudinais e geralmente bifurcado (LORENZI, 2003). Apresenta folhas simples, grandes, decíduas, largas e ovaladas, espessas, verde-opacas, opostas, tomentosas, ou seja, revestida de pêlos na face abaxial, inseridas em ramos quadrangulares, de 20-30 cm de comprimento e 25 cm de largura (FIGUEIREDO, 2005).

As flores são brancas, pequenas, eretas, apresentando pecíolos curtos e inflorescências do tipo panícula. Comercialmente, o que é chamado de semente, na realidade, trata-se do fruto, que pode conter até quatro sementes viáveis; tratados como unidade de dispersão, os frutos são chamados de diásporos (ROCHA et al., 2011).

A teca possui alto valor econômico (cerca de US\$ 1.500/m³), sendo muito usada para laminação, compensados e, principalmente, decoração de interiores, mobiliário fino e construção naval. De acordo com ANGELI (2003), a durabilidade do cerne deve-se a tectoquinona, um pesticida natural contido nas células da madeira, talvez seja esse o motivo de haver poucos registros, nos países onde a teca é cultivada, de ataques de pragas que possam comprometer os plantios (Figura 1).



Figura 1- Plantio de *Tectona grandis* L. f.

3.1.2. Perspectivas Econômicas

Atualmente, a teca é a terceira espécie de folhosas tropicais com maior área plantada no mundo, ficando atrás dos plantios de eucaliptos e acácias. Mundialmente, a área plantada com teca excede os 2 milhões de hectares. Sua madeira é de alto valor no mercado internacional, no qual registram-se preços bem mais elevados que o do mogno (*Swietenia macrophylla* King) (KRISHNAPILLAY, 2000; TSUKAMOTO FILHO et al., 2003).

Durante a última década, um dos fatores que impulsionaram os investimentos privados em plantios de teca na Índia, Ghana, Costa Rica e Brasil, foi o desenvolvimento de uma estratégia de comercialização para madeiras jovens e de pequena dimensão. Na Costa Rica, a produção de teca visa atender ao mercado norte-americano, e o metro cúbico da madeira em tora pode chegar a 1.000 dólares (MALDONADO; LOUPPE, 2000).

Finger et al. (2001) afirmam que o desequilíbrio entre a oferta e a procura determinou a continuada valorização da madeira de teca, cujo preço registrou um ganho médio de 8,32% a.a., em dólar norte-americano, entre 1970 e 1999.

Na Índia, o corte da teca oriunda de florestas nativas foi proibido desde 1986, nas principais regiões produtoras. Na Tailândia e na República Democrática Popular de Laos, desde 1989, está proibida totalmente a exploração industrial dos bosques naturais. As restrições impostas para a exportação de toras existentes em outros países produtores, particularmente Indonésia, Filipinas, Vietnã, Malásia peninsular e Ghana, também influenciam e continuarão influenciando na elevação dos preços da madeira no comércio mundial de teca (PANDEY; BROWN, 2000).

A madeira de teca é uma alternativa para substituição de espécies nativas de grande valor econômico, como o Mogno (*Swietenia macrophylla* King) e a Cerejeira (*Torresia acreana* Ducke), por exemplo, aliviando a pressão de exploração às florestas nativas que ainda resistem às investidas da pecuária, agricultura e dos madeireiros. Oferece excelentes perspectivas ao mercado madeireiro, proporcionando segurança no atendimento da reposição florestal por ser vigorosa e de resultados comprovados e, ao mesmo tempo, apresentando-se como uma alternativa para a possibilidade de suprimento sustentável da indústria florestal (BEHLING, 2009).

O valor de mercado para a madeira de teca madura, livre de nós e com diâmetro para serraria, chega a superar os valores da espécie Mogno (*Swietenia macrophylla* King), cujo metro cúbico serrado é comercializado por valores que chegam a US\$ 1500,00 como produto final, já o produto do desbaste inicial é comercializado entre 60 e 80 dólares o metro cúbico (EMBRAPA, 2007).

3.1.3. Reflorestamento

O reflorestamento tornou-se uma alternativa para reduzir o impacto da exploração madeireira na Amazônia, bem como de promover a cobertura florestal das áreas degradadas (FIGUEIREDO; OLIVEIRA; BARBOSA, 2005). Plantios comerciais de espécies exóticas, como a teca (*Tectona grandis* L. f.) possibilitam a extração de madeiras para a comercialização, evitando assim, a utilização das espécies nativas.

A teca é uma espécie amplamente empregada em reflorestamentos em várias partes do mundo, sendo cultivada pelos britânicos na Índia, a partir do século XVIII, quando estes demandavam grandes quantidades de madeira para construir as embarcações (FIGUEIREDO, 2001). De fato, a teca parece atender aos principais critérios de seleção das espécies florestais para a produção de madeira de rápido crescimento, tais como a resistência às pragas e doenças e o alto valor econômico (VIEIRA et al., 2002; FIGUEIREDO, 2001).

O Brasil possui grande potencial para produção de madeira de teca. Somente nos últimos três anos as áreas de plantio comercial de Teca aumentaram em mais de 34,3%, contabilizando 65.240 ha em 2009. Já as áreas de plantio de teca em 2010 foi de 65.440 ha, apresentando um crescimento de 0,3%. Os principais plantios estão nos estados do Mato Grosso, Amazonas, Acre e Pará (ABRAF, 2011). O Pará desponta nos últimos anos como potencial produtor de madeira de teca, dadas as grandes quantidades de áreas alteradas disponíveis para reflorestamentos (ABRAF, 2009).

A rotação de reflorestamentos com teca em regiões aptas na Amazônia é de 25 anos (FIGUEIREDO, 2001). Considerando-se o ciclo de corte de até 80 anos nos países de origem (Índia, Myanmar, Tailândia e Laos), atesta-se a adaptação às condições edafoclimáticas favoráveis do Brasil, aliados aos tratamentos silviculturais mais adequados e intensos (TSUKAMOTO FILHO et al., 2003).

Segundo Krishnapillay (2000) a espécie tornou-se a preferida para compor os projetos de reflorestamento, em decorrência do baixo rendimento dos povoamentos com espécies nativas. Essa espécie apresenta grande rusticidade em plantios puros, consorciados e em sistemas produtivos integrados com agropecuária.

A expectativa é que investimentos em povoamentos de teca no Brasil constituam uma ótima opção econômica para as regiões que atendam às demandas edafoclimáticas da espécie. Estudos realizados apontam um déficit mundial de madeira de aproximadamente 500 milhões de metros cúbicos por ano, já em 2010. Veit (1996) afirma que a diferença entre a demanda e a oferta de madeira de teca de boa qualidade imprime uma continuada valorização do produto. A expectativa é que ocorra uma elevação do preço na madeira de teca em 6% a.a. para os próximos 30 anos.

3.1.4. Aspectos Silviculturais

A teca é uma cultura perene com ciclo que varia de 25 a 80 anos. No Brasil, o ciclo de 25 anos nas plantações de teca se deve principalmente ao elevado incremento médio anual (IMA), que tem variado de 15 a 25 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (FIGUEIREDO, 2001), sendo bem maior que de outros países, como por exemplo, Índia e Java, com IMA de aproximadamente 8 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e ciclo de 60 a 80 anos (UGALDE; PÉREZ, 2001).

Para que os plantios de teca tornem-se mais produtivos, além do manejo e local apropriados, a qualidade das mudas também é de fundamental importância (ALCANTARA, 2009). Entretanto, a principal dificuldade para a produção de mudas dessa espécie é a germinação lenta e irregular das sementes.

A teca é uma espécie heliófila que apresenta um aumento na mortalidade de plantas jovens quando a densidade de plantio é muito alta (PASSOS; BUFULIN; GONÇALVES, 2006). A densidade de plantio pode variar de 1666 a 2173 árvores ha⁻¹, equivalentes a espaçamentos de 3,0 x 2,0 m a 2,3 x 2,0 m, sendo recomendado o uso do menor espaçamento com desbastes mais frequentes, pois estes apresentam o melhor desempenho silvicultural (FIGUEIREDO, 2001).

Uma questão importante a ser analisada é a capina, onde esta técnica tem que ser de forma sistemática pelo menos durante o primeiro ano, uma vez que as ervas daninhas competem por luz, nutrientes e umidade. Durante os primeiros meses as ervas daninhas além de retardar o crescimento da planta vão colaborar para uma maior mortalidade das mesmas e aumentar os riscos de incêndio. Além disso, recomenda-se também a prática da desrama, que além de auxiliar a produção de um fuste reto pela árvore, assim como na capina servirá de auxiliar na prevenção de incêndios ocasionados por galhos e também por ervas daninhas. Propiciando assim, um aumento na produção de Teca no país (DELGADO; GOMES; ARAUJO, 2008).

A idade de aplicação do primeiro desbaste depende da qualidade de sítio, existindo algumas indicações, quanto à idade e à intensidade: aos quatro anos e desbaste seletivo de 40% das árvores ou remoção de 25% das árvores seguida de nova retirada ao quinto ano do mesmo número de árvores (CORDERO; KANNINEN, 2003). A aplicação do primeiro desbaste também pode ser efetuada quando as árvores alcançam uma altura média de 9,0 a 9,5 m (KRISHNAPILLAY, 2000). Outro indicador para a

época de aplicação do primeiro desbaste, segundo Galloway, Ugalde e Vásquez (2001), é o fechamento do dossel, que tem sido muito utilizado devido à alta correlação com a redução do crescimento em diâmetro.

3.1.5. Demanda Edafoclimática

A espécie tolera uma grande variedade de climas, porém cresce melhor em condições tropicais moderadamente úmidas e quentes, apresentando seu melhor desenvolvimento em regiões onde a precipitação anual fica entre 1250 mm e 3750 mm, temperatura mínima de 13 °C e máxima de 43 °C, e uma estação biologicamente seca (disponibilidade hídrica menor que 50 mm mês⁻¹) de três meses (KRISHNAPILLAY, 2000).

Segundo Tropical Flora (2008) o clima mais indicado é o tropical úmido, com verão chuvoso e inverno seco, com precipitações anuais entre 500 e 5.000 mm e a temperaturas entre a mínima de 2° C e a máxima de 48°C.

Krishnapillay (2000) aponta que estudos de crescimento e produção de plantios de teca, realizados na Malásia, em regiões com pluviosidades de 2.500, 2.600, 2.700 e 2.800 mm/ano, não mostraram diferenças significativas. O rendimento dos plantios em climas quentes e úmidos tem atraído o estabelecimento de empreendimentos florestais de maior porte. Para Pandey e Brown (2000), a espécie apresenta seu melhor desenvolvimento em regiões onde a precipitação anual fica entre 1.250 mm a 3.750 mm, temperatura mínima de 13° C a 17 ° C e máxima entre 39° C a 43° C.

A teca é uma espécie florestal exigente por luz e não tolera a sombra ou supressão da luz em qualquer fase de ciclo de vida. Para alcançar um adequado desenvolvimento, requer que não ocorra impedimento de luz sobre sua copa (PANDEY; BROWN, 2000).

A árvore da teca pode crescer em diversos solos e formações geológicas. A qualidade de seu desempenho depende da profundidade, estrutura, porosidade, drenagem e da capacidade de retenção de água.

Devido às raízes serem sensíveis à deficiência de oxigênio, a espécie se desenvolve melhor em solos com boa aeração. Esta característica de alta demanda por oxigênio leva a espécie a concentrar entre 65% a 80% de sua biomassa radicular fina

nos primeiros 30 cm de solo, com a maior concentração entre 10 e 20 cm (KRISHNAPILLAY, 2000).

O desenvolvimento é melhor em solos profundos, bem drenados e férteis, especialmente em solos aluviais de diversas origens (FIGUEIREDO; OLIVEIRA; BARBOSA, 2005). O potencial hidrogeniônico (pH) ótimo do solo é de 6,5 a 7,5. A disponibilidade de cálcio é também um fator limitante, visto que a falta de cálcio traduz-se em raquitismo das árvores (KRISHNAPILLAY, 2000).

Por ser considerada nutricionalmente exigente, obter conhecimentos com relação aos seus aspectos nutricionais é importante para o processo da introdução da teca em qualquer região (BARROSO et al., 2005).

3.1.6. Adubação do Solo

A adubação do solo consiste no fornecimento de todos os elementos necessários para que a planta tenha um desenvolvimento saudável e equilibrado. A necessidade de adubação decorre do fato de que nem sempre o solo é capaz de fornecer todos os nutrientes que as plantas precisam para um adequado crescimento.

Como a teca é considerada nutricionalmente exigente, obter conhecimentos com relação aos seus aspectos nutricionais, principalmente em condições de baixa disponibilidade de nutrientes, vem a ser importante no processo de sua introdução em qualquer região, desde seu desenvolvimento inicial, na fase de mudas, que é afetado pela omissão de todos os macronutrientes, principalmente N e Ca, até sua retirada da área (BARROSO et al., 2005).

A teca é uma espécie que necessita que o solo de sua área de implantação seja profundo (mais de 1,5 m), permeável, bem drenado, mas com capacidade média a alta de retenção de água. Os solos de textura média são os mais indicados. Um estudo de avaliação do estado nutricional, crescimento de teca e suas relações com os fatores de solo, mostrou que o melhor desenvolvimento está relacionado à riqueza dos nutrientes, matéria orgânica e pH próximo da neutralidade. É uma essência exigente em teores de bases trocáveis do solo, principalmente cálcio. Barra (1996) relata que a concentração

de Cálcio (Ca) tem sido um dos principais fatores edáficos assinalados como limitantes para o crescimento da teca.

Desta forma o conhecimento dos teores de nutrientes disponíveis no solo orienta na formulação das recomendações mais acertadas para a adubação das plantas, evitando-se o desperdício e o uso inadequado de adubos e corretivos e prejuízo, que haveria tanto nas despesas com adubação como na redução das colheitas. Assim o crescimento da teca associado aos atributos de solo e as informações da literatura, indicam que a calagem e a adubação são fundamentais para o aumento da produtividade e o sucesso comercial da espécie no local estudado, sendo necessário o estabelecimento de ensaios de adubação em diferentes condições edafoclimáticas.

Magalhães (2008) considera a calagem e a adubação, os responsáveis por até 100% do aumento da produtividade dos cultivos, embora dependam do conhecimento prévio das características químicas do solo.

3.2. SILVICULTURA DE PRECISÃO

De acordo com Taylor et al. (2006), “silvicultura de precisão” é um termo que se tornou parte do vocabulário da comunidade florestal. Este termo é similar aos usados pela agricultura, tais como: agricultura de precisão, cultivo de precisão, ou agricultura em um lugar específico (sítio).

No Brasil, a Agricultura de Precisão foi introduzida em meados da década de 1990. A indústria de máquinas agrícolas teve uma participação importante nessa fase, com a introdução de conceitos como o mapeamento da produtividade das lavouras de grãos e de aplicações de georreferenciamento na agricultura. A introdução ocorreu com tecnologia totalmente importada, principalmente por empresas multinacionais. Já a Silvicultura de Precisão e a Zootecnia de precisão foram introduzidas em meados da década de 2000, seguindo os preceitos da agricultura de precisão, porém levando em consideração suas características intrínsecas.

Taylor et al. (2006) definem silvicultura de precisão como o planejamento e condução de um determinado sítio da floresta com a gestão das atividades e operações florestais, visando a melhoria da qualidade e utilização da madeira, a redução do

desperdício, o aumento dos lucros e a manutenção da qualidade do meio ambiente. Os mesmos autores dividem a silvicultura de precisão em três categorias principais, sendo elas:

a) utilização de informações geoespaciais para subsidiar o planejamento e o manejo florestal – O manejo e o planejamento florestal são áreas da silvicultura de precisão, as quais abrangem uma grande variedade de atividades e usam as informações geoespaciais para auxiliar no manejo florestal do sítio e no planejamento de futuras operações. Por exemplo, a utilização da tecnologia de informação para otimizar a rota de transporte de madeira da floresta até o local de processamento mais adequado;

b) operação silvicultural específica para cada sítio – Sítios com operações silviculturais específicas envolvem o uso de tecnologia geoespacial como, o Sistema de Posicionamento Global (GPS) e o Sistema de Informações Geográficas (SIG), os quais propiciam um aumento da eficiência operacional e reduzem o custo da madeira. Outra tecnologia que também pode ser utilizada, é a tecnologia de taxas variáveis, para aumentar a eficiência da aplicação de herbicidas e fertilizantes;

c) tecnologia avançada adaptada aos sítios, para encontrar demanda de mercado para produtos com alto valor – Os maiores componentes do custo final da madeira são as atividades de colheita e transporte. Os altos custos dessas operações têm impacto direto nas empresas florestais, reduzindo, logicamente, os seus rendimentos. Nesse sistema é possível coletar dados sobre a localização e o volume das árvores, bem como a forma como elas são cortadas durante a colheita. Esses dados podem ser confrontados com os dados da demanda das empresas madeireiras locais, aumentando, dessa forma, a eficiência da utilização da madeira.

De acordo com Brandelero, Antunes e Giotto (2007), a silvicultura de precisão consiste em um novo modelo de administração, baseado no conhecimento prévio que abarca a variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção e da própria produtividade, permitindo intervenções localizadas na floresta. Trata-se de uma nova área do setor florestal, com inédita concepção, que modifica o enfoque dado à silvicultura até então, pois, enquanto no sistema convencional a abordagem da unidade florestal se dá de maneira uniforme, na silvicultura de precisão esta mesma área é tratada geograficamente ponto a ponto, ou seja, a área total é dividida em frações de unidades diferenciadas pelo índice de qualidade de sítio.

Neste contexto, a silvicultura de precisão se baseia na coleta e na análise de dados de natureza espacial, viabilizando intervenções localizadas na floresta com a exatidão e a precisão adequadas. Neste contexto, as técnicas de geoprocessamento assumem grande importância uma vez que fornecem subsídios para a identificação e a correlação de variáveis que afetam a produtividade florestal, por meio de operações em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) envolvendo essas variáveis sob a forma de mapas digitais (BRANDELERO; ANTUNES; GIOTTO, 2007; ORTIZ et al., 2006).

Com isso pode-se dizer que, o emprego das técnicas de geoprocessamento, serve como um valioso auxílio por levar em consideração a variabilidade espacial das variáveis envolvidas. O emprego dessas técnicas no gerenciamento de unidades de produção florestal fundamenta-se na estruturação de um banco de dados georreferenciados, através de Sistemas de Informação Geográfica, que possibilitam o armazenamento, tratamento, cruzamento, sobreposição, análise e visualização, em conjunto, dessas informações espaciais, sob a forma de mapas digitais. Isto permite tomada de decisões rápidas, ágeis e eficientes, ao minimizar custos e otimizar os recursos e atividades produtivas, acarretando ganho de produtividade e maximização dos lucros (MALINOVSKI, 2007). Daí a importância prática da silvicultura de precisão, pois nos dá a vantagem de inferir sobre os plantios com maior precisão (reduzindo custos e melhorando o rendimento operacional), levando em consideração a variabilidade existente nos talhões, evitando assim os desperdícios que podem ocorrer em maior quantidade na silvicultura tradicional e ainda manter o controle sobre a qualidade.

Partindo dos princípios básicos de garantir padrões e níveis mais elevados de qualidade nas atividades de campo (qualidade das operações) e gerar informações úteis para planejamento e gestão, a silvicultura de precisão possibilita inúmeras aplicações em diversas áreas (Figura 2). Como exemplo, podemos citar:



Figura 2. Aplicações da silvicultura de precisão (CASTRO, 2008).

a) No preparo e conservação do solo - Pode-se fazer a análise de solo para busca das causas da variação de produtividade; aplicação de fertilizantes e corretivos a taxas variáveis no decorrer do terreno; ou ainda fazer estudos de susceptibilidade à erosão do solo. Na silvicultura de precisão, o modelo digital de elevação (MDE) pode ser utilizado para modelar com exatidão e escoamento superficial que, associado a outros fatores, permite avaliar o potencial erosivo do terreno, com maior precisão, estabelecendo métodos e estratégias de controle mais eficientes;

b) No plantio - Com a silvicultura de precisão pode-se planejar/executar plantio e adubação a taxas variáveis (adubação diferenciada) de acordo com a fertilidade e o potencial produtivo de cada área;

c) No monitoramento da cultura - Possibilita o acompanhamento da cultura com informações georreferenciadas; monitoramento da fitossanidade dos talhões e aplicação localizada de adubos e defensivos agrícolas. Neste caso, o sensoriamento remoto é um poderoso aliado, pois permite obter imagens digitais de baixo custo em amplo espectro da radiação eletromagnética. É possível, com o uso dessa tecnologia, detectar estresses vegetativos nos seus estágios iniciais. Esses dados são incorporados ao SIG para verificar se a distribuição espacial de nutrientes do solo, plantas daninhas, insetos e doenças ocorrem de forma aleatória ou tendenciosa, resultando em produtividade variável;

d) Na colheita - Auxilia na seleção dos indivíduos para desbaste; otimização da seqüência de exploração; colheita com máquinas com sensores de produtividade; geração de mapas de produtividade.

e) Geração de informações georreferenciadas - Possibilita o controle e monitoramento de parâmetros de interesse das operações; análise das informações para tomada de decisão e auxílio a procedimentos de rotina.

Assim sendo, em função de um prévio conhecimento das relações existentes entre o crescimento do povoamento florestal e as propriedades edáficas, é possível avaliar a maior ou menor adequabilidade da terra para cada atividade, dentro de um plano anteriormente sugerido para a área. As características fisiográficas do ambiente são mais determinantes da produtividade do que a fertilidade do solo, ou seja, quando uma unidade amostral ocupa uma posição adequada em termos de exposição, posição na toposequência e declividade, a fertilidade do solo tem efeito pouco expressivo (BRAGA, 1997).

Portanto, conhecer a variabilidade espacial de propriedade do solo e da planta, que controlam a produtividade de culturas, é um fator indispensável na implementação de técnicas de gerenciamento agroflorestais modernas, como silvicultura de precisão. No manejo convencional do solo, assume-se que ele é homogêneo para uma vasta área e somente uma única prática de manejo e condução da cultura poderia ser utilizada para toda a área, desprezando-se as variabilidades. No entanto, as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, a produtividade das culturas e as infestações de pragas e doenças podem variar de local para local.

Tal variabilidade, via de regra, é apresentada em forma de mapa, que é uma das formas mais efetivas, eficientes e universais para comunicação visual de um conjunto complexo de informações geograficamente referenciadas, sendo geralmente o formato preferido para a apresentação dos resultados de uma análise (BRANDELERO; ANTUNES; GIOTTO, 2007). Com isso, os mapas de produtividade, fertilidade, controle de pragas e doenças, erosão e irrigação e os de correção das variáveis de produção, são importantes para expressar as informações oriundas do campo e as intervenções que serão realizadas. A exemplo do que é apresentado na figura 3.

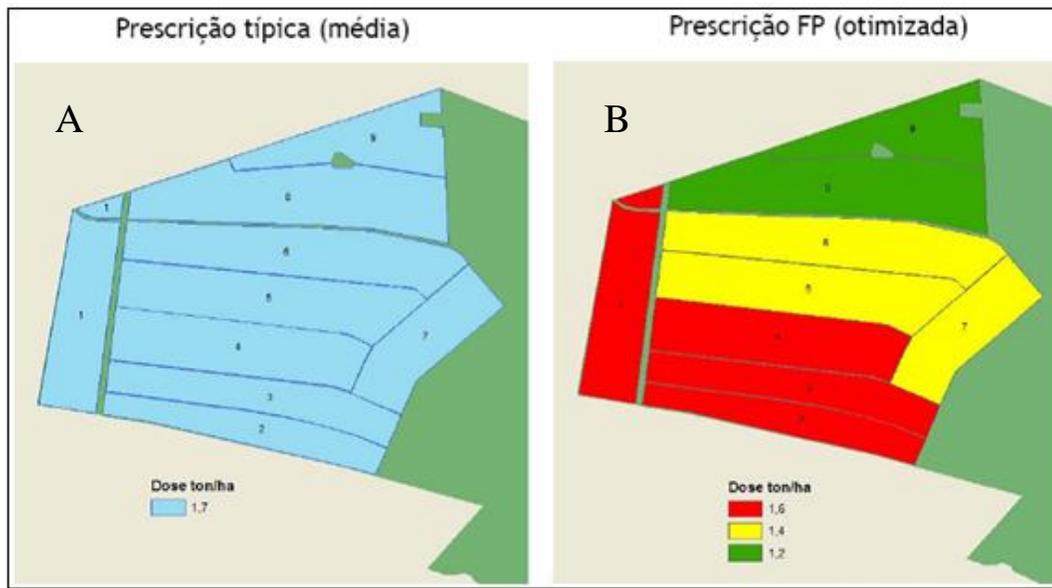


Figura 3- Mapa de recomendação aplicado na silvicultura convencional (A) e silvicultura de precisão (B) (Fonte: VRECHI, 2008).

Apesar da grande vantagem proposta pela silvicultura de precisão nas diversas áreas aplicáveis, ainda se vê muitas barreiras que impedem esse conhecimento de se propagar mais rapidamente.

Castro (2008) cita algumas das barreiras que dificultam e/ou atrasam a adoção da silvicultura de precisão. São elas:

- a) Empresa produtoras e prestadoras de serviço: ainda existe muita resistência às mudanças; insegurança/ dificuldade para operacionalização.
- b) Dificuldade na viabilização: alto custo de implantação; requer mão-de-obra especializada o que acarreta em mudanças e processos internos (operacional);
- c) Empresas fornecedoras de tecnologia: a produção dos equipamentos tecnológicos é em baixa escala (alto preço).

3.3. GEOESTATÍSTICA

A base teórica da geoestatística foi desenvolvida, nos anos 50 e 60, como um método para caracterização e interpolação de padrões espaciais de reserva de ouro (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Krige (1951) trabalhando com dados de concentração de ouro concluiu que havia necessidade de incluir as distâncias entre as observações, pois as informações oferecidas através de variâncias não são suficientes para explicar o fenômeno em estudo. Mais tarde, Matheron (1963) baseado nessas observações desenvolveu uma teoria denominada por ele de teoria das variáveis regionalizadas, contendo a base da geoestatística.

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

Se x representa uma posição em uma, duas ou três dimensões, então o valor da variável Z , em x , é dado por:

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

Em que:

- $M(x)$ é uma função determinística que descreve a componente estrutural Z em x ;
- ε'_x é um termo estocástico, que varia localmente e depende espacialmente de $M(x)$;
- ε_i é um ruído aleatório não correlacionado, com distribuição normal média zero e variância σ^2 . A geoestatística atua no termo estocástico ε'_x .

A teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Segundo Matheron (1965), a geoestatística é uma função que varia de um lugar a outro no espaço com certa aparência de continuidade. São variáveis cujos valores amostrados estão relacionados com a posição espacial que ocupam, assumindo valores diferentes em diferentes lugares de observação, com certa independência de um lugar a outro.

A geoestatística aplicada tem por objetivos identificar, na aparente desordem entre as amostras, uma medida da correção espacial entre os atributos, estudar padrões de amostras adequadas e realizar estimativas de valores de locais não amostrados com base em alguns valores conhecidos na população, técnica na qual denominamos krigagem (VIEIRA, 2000).

Quando se utiliza as técnicas geoestatísticas, para a análise dos dados, algumas hipóteses básicas de trabalho são assumidas:

- A estacionaridade de 1ª ordem é a esperança do valor de um ponto no espaço ser igual à média admitindo-se que a média amostra é igual à média populacional;
- A estacionaridade de 2ª ordem assume que há uma variação da média, mas a variância é constante dentro dos limites da continuidade espacial (VIEIRA, 1995);
- A hipótese intrínseca diz que a probabilidade de variação dos valores tomados entre pontos com a mesma distância de separação é igual, ou seja, a relação de dependência espacial é a mesma em qualquer posição de “h”, que é o vetor que separa dois pontos amostrais, assim sendo, é assumida a estacionaridade dentro do alcance da continuidade espacial.

Ocorre que tanto a estacionaridade de 1ª como a de 2ª ordem podem não ser satisfeitas por alguns fenômenos físicos que têm a capacidade infinita de dispersão. Para tais situações, a hipótese intrínseca, menos restritiva, requer apenas a existência e estacionaridade do variograma (quando o variograma atinge o patamar ou soleira, explicando toda a variância amostral), sem nenhuma restrição quanto à existência da variância finita, sendo a mais adotada em geoestatística (HUIJBREGTS, 1975).

Assim sendo, a hipótese intrínseca, que requer apenas a estacionaridade do variograma, passa a ser a principal hipótese sobre a qual a geoestatística está alicerçada.

Segundo Vieira (2000), uma variável regionalizada é intrínseca quando:

- existir a esperança matemática para a variável regionalizada e ela não depende da posição x ;

$$E[Z(x)] = m, \forall x; \quad (2)$$

- para todo vetor h , a variância da diferença $[V(x)-V(x+h)]$ é finita e independe da posição x , dependendo apenas do vetor de h .

$$VAR[Z(x) - Z(x + h)] = E[Z(x) - Z(x + h)]^2 = 2\gamma(h) \quad (3)$$

Assim sendo, a geoestatística em suas análises, a priori lança mão do semivariograma, pois mostra à medida do grau de dependência espacial entre amostras, tornando-se, o semivariograma, a etapa mais relevante para o sucesso das estimativas (GOOVAERTS, 1997; LANDIM, 1997).

3.2.1. Semivariograma

O variograma é definido como ferramenta que expressa resultados quantitativos de fenômenos regionalizados através de modelos matemáticos (PIRES; STRIEDER, 2006). Para Guimarães (2004), o variograma é uma forma numérica de expor a continuidade espacial de um fenômeno natural, que utiliza a anisotropia e as feições estruturais do meio para previsões geoestatísticas. A correlação espacial, dita dessas variáveis ambientais num referido espaço geográfico é dado pela covariância ou pelos chamados semivariograma.

O semivariograma é um processo de estimação por médias móveis, isto é, utiliza-se de ponderadores espaciais (GOOVAERTS, 1997; DUARTE, 2000; LANDIM; STURARO, 2002; ZIMBACK, 2003). A semivariância é a medida do grau de dependência espacial entre duas amostras. A magnitude da semivariância entre dois pontos depende da distância entre eles, implicando em semivariâncias menores para distâncias menores e semivariâncias maiores para distâncias maiores.

Andriotti (2003) define um semivariograma como uma variância do erro de estimativa do valor desconhecido através de um ponto dado. Dessa forma, é uma função intrínseca que reflete a estrutura do fenômeno estudado, medindo as relações estatísticas, pelas covariâncias que existem entre amostras espaçadas de sucessivos valores. É uma função crescente até um determinado valor conhecido como amplitude, mostrando quão díspares se tornam os valores quando a distância aumenta.

Vieira (2000) cita que dentre os vários estimadores de semivariâncias, o mais utilizado é o método dos momentos.

Para tanto, Goovaerts (1997) apresenta a seguinte equação para o modelo geral do semivariograma:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (4)$$

Em que:

$\gamma(h)$ = Semivariância estimada para cada distância (h);

$N(h)$ = Número de pares de pontos separados por uma distância h ;

$Z(x)$ = Valor da variável regionalizada no ponto x ; e

$Z(x+h)$ = Valor no ponto $x + h$.

A função semivariograma permite gerar o gráfico da semivariância em função da distância (h), denominado de semivariograma experimental, o qual permite interpretar a continuidade espacial da variável regionalizada e ajustar esses resultados sobre um modelo matemático, chamado de semivariograma teórico.

Os parâmetros do semivariograma podem ser observados na Figura 4:

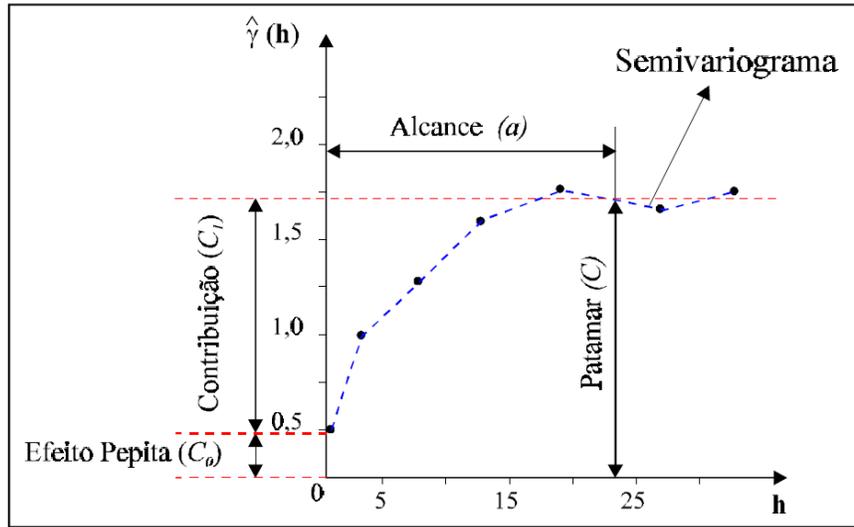


Figura 4- Exemplo de Semivariograma (CAMARGO, 1997).

- Alcance (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente. Na Figura 4, o alcance ocorre próximo de 25m.

- Patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ($\text{Var}[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})]$) torna-se invariante com a distância.

- Efeito Pepita (C_0): idealmente, $g(\mathbf{0})=0$. Entretanto, na prática, à medida que h tende para 0 (zero), $g(\mathbf{h})$ se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989), mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.

- Contribuição (C_1): é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0).

3.2.2. Modelos Variográficos

Os modelos variográficos serão definidos tomando como base o gráfico do semivariograma teórico, a fim de ajustar ao modelo que melhor expresse o fenômeno aleatório. Os principais modelos são: gaussiano, esférico e exponencial (Figura 5).

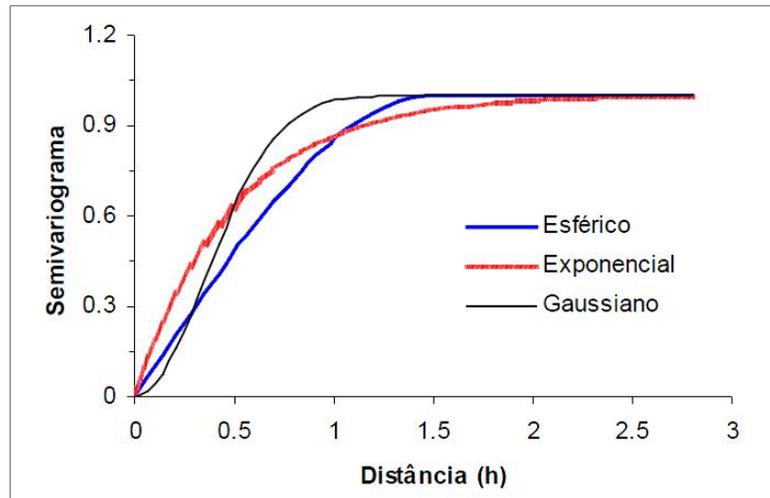


Figura 5 - Modelos semivariográficos do tipo transitivo (com patamar) mais usuais em geoestatística (QUEIROZ, 2003).

- Gaussiano: com comportamento parabólico, por isso representa fenômenos altamente contínuos.

$$\gamma(h) = c \left[1 - \exp\left(-h^2/a^2\right) \right] = c \left[1 - \exp\left(-3h^2/A^2\right) \right] \quad (5)$$

- Esférico: modelo mais comum, apresenta comportamento linear próximo à origem.

$$Sph(|h|) = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ 1,5 \left(\frac{|h|}{a}\right) - 0,5 \left(\frac{|h|}{a}\right)^3 & , 0 < |h| \leq a \\ 1 & , |h| > a \end{cases} \quad (6)$$

- Exponencial: este modelo atinge o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

$$Exp(|h|) = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) & , |h| \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

O semivariograma experimental é ajustado à curva que proporciona a máxima correlação possível com os pontos plotados. O modelo ajustado é chamado de modelo teórico do semivariograma. Na região onde se observa a continuidade espacial, a geoestatística é aplicada com eficiência (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

É importante que o modelo de semivariograma ajustado represente a tendência das semivariâncias calculadas, de tal forma que as estimativas obtidas a partir da krigagem sejam mais exatas e, portanto, mais confiáveis (VIEIRA, 1995).

3.2.3 Seleção do modelo teórico de semivariograma

O modelo ajustado deve aproximar-se ao máximo da descrição do fenômeno no campo. Cohen, Spies e Bradshaw (1990) explicam que a verificação do melhor ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental pode ser realizada pela validação cruzada ou *Cross-Validation*, que envolve a reestimação dos valores conhecidos através dos parâmetros ajustados do semivariograma, analisado pelo coeficiente de determinação (R^2).

O parâmetro R^2 é o coeficiente de determinação, utilizado na validação cruzada, que expressa o percentual de ajuste do modelo de semivariograma testado. Quanto mais alto esse coeficiente, melhor a eficiência do ajuste entre os valores observados e estimados para o modelo proposto ao conjunto de dados (NETER; WASSERMAN; KUTNER, 1990).

Mello e Scolforo (2000) afirmam que os componentes ou variáveis do solo apresentam uma grande variação espacial, de tal forma que, os valores de R^2 , para os modelos observados foram aceitos segundo a recomendação de Isaacs e Srivastava (1989), que citam como satisfatórios valores de correlação entre 60 e 70 %, e ótimos acima de 70 %, para modelos de estimação da variabilidade dos atributos de solo, que apresentam uma grande variação espacial deste componente.

Segundo Cressie (1993), a validação cruzada consiste em se retirar do conjunto de dados alguns valores e estimá-los com base nas observações remanescentes. O erro será obtido pela diferença entre os valores preditos e medidos. Com várias repetições, pode-se ter uma estimativa da variabilidade do erro de predição.

Como a interpolação por Krigagem está fortemente associada ao modelo de semivariograma escolhido, a validação cruzada pode ser usada para se decidir qual modelo usar dentre alguns candidatos (VIEIRA; NIELSEN; BIGGAR, 1981). O usual é a retirada de um dado de cada vez do conjunto original e estimá-lo por krigagem, o que permitirá o cálculo do erro de estimativa nesse ponto, conforme (ISSAKS; SRIVASTAVA, 1989).

De acordo com Vieira (1995), na validação cruzada, procura-se verificar se o erro reduzido, ou seja, o erro em cada ponto dividido pela variância de krigagem correspondente tem média nula e variância unitária. Além disso, para uma avaliação visual, têm sido usados mapas de vetores medidos versus estimados e mapas de erros, como os fornecidos por programas como GeoEAS (ENGLUND; SPARKS, 1988).

Obtido o semivariograma experimental para um conjunto de valores de uma propriedade e ajustado um modelo matemático a ele, tem-se uma função contínua que descreve a dependência espacial da variável em estudo, sendo de grande utilidade para a compreensão de vários aspectos da variabilidade do solo, da sua formação, implicações no manejo, etc.

Segundo Vieira (1995) e Cohen, Spies, Bradshaw (1990), o semivariograma mais bem ajustado é aquele que possui o maior ajuste de dados à reta de 45° (valores reais versus estimados) obtido pela validação cruzada.

O valor da semivariância média das amostras é um estimador, sem tendência, da semivariância média da população, assumindo que a hipótese intrínseca foi satisfeita, quando o patamar é atingido tem-se a variância da população e independência entre as amostras (DOURADO NETO, 1989).

O patamar, que é definido a partir da distância de estabilização dos valores de semivariâncias, está, portanto, associado ao alcance da dependência espacial. O patamar ($C_1 + C_0$), associado à contribuição (C_1), definem o grau de dependência espacial do modelo, dado pela fórmula: $GDE = (C_1 / C_1 + C_0) \times 100$, sendo considerada fraca se essa razão for $\leq 25\%$, moderada quando a razão estiver entre 25% e 75% , e forte se a razão for $> 75\%$ (ROBERTSON, 1998).

O critério do grau de dependência espacial (GDE) nada mais é do que a razão entre a variância estrutural (C_1) e o patamar ($C_1 + C_0$), em porcentagem, é bastante difundida na geoestatística quando precisa-se dispor de informações do quanto da variância esta sendo explicada pelo modelo ajustado (VIEIRA, 1995).

3.2.4. Krigagem

Após a semivariância, a krigagem é a segunda ferramenta geoestatística com reconhecida relevância (GOOVAERTS, 1997; LANDIM, 1997). A krigagem é o interpolador geoestatístico, ou seja, é um método de estimação que se utiliza de um estimador linear não-viciado (semivariograma) com mínima variância para interpolação do atributo medido em posições não amostradas (LAMPARELLI; ROCHA; BORGHI, 2001).

A krigagem é um procedimento de interpolação que se preocupam com a mitigação do erro de estimação. Soares (2000) menciona a krigagem como sendo um processo geoestatístico com fins de estimativas de atributos em um volume de suporte através da ponderação de todas as amostras disponíveis, na qual, atribuem-se os pesos ponderadores.

A krigagem segue o princípio dito na primeira lei da geografia, onde Tobler (1979) cita que “Todas as coisas se parecem, porém as mais próximas no espaço se parecem mais”. Assim, para Soares (2000) os ponderadores do interpolador resumem-se necessariamente em duas premissas: quanto mais próximas estiverem as amostras do ponto a estimar, maior será o seu peso no estimador; e quanto mais correlacionadas estiverem os pontos amostrados, maior será o efeito de agrupamento ou redundância e menor será o seu peso individual na construção do estimador, como apresentado na seguinte equação:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (8)$$

Em que:

$Z(x_0)$: estimativa do valor na posição 0;

λ : ponderador em função da distância; e

$z(x_i)$: Valor da variável na posição i .

Segundo Gonçalves (1997) e Silva Junior (2001), este interpolador pondera os vizinhos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não tendenciosidade e mínima variância.

A krigagem demanda de uma gama formas que são possíveis de serem utilizadas no contexto de interpolação geoestatística, sendo os mais usuais os seguintes:

- Krigagem simples: utilizada quando a média é assumida como estatisticamente uniforme em toda a área e de valor estatisticamente igual ao da média real da população. A média da população é utilizada para cada estimacão local, em conjunto com os pontos vizinhos estabelecidos como necessários para a estimacão (GOOVAERTS, 1997; LANDIM; STURARO, 2002);

- Krigagem ordinária: utilizada quando a variável regionalizada assume a média como inconstante por toda a área, sendo esta uma característica do fenômeno estudado (GOOVAERTS, 1997; LANDIM e STURARO, 2002; SANCHEZ et al., 2005). Portanto, a estimativa é feita para determinar um valor médio em um local não amostrado demandando de um interpolador exato, no sentido de que os valores estimados nos locais coincidentes dos locais amostrados irão coincidir com os valores dos pontos amostrados (ANDRIOTTI, 2003);

- Co-krigagem: é uma extensão da krigagem no caso em que se deseja utilizar na estimativa de $Z(\mathbf{u})$ mais de uma variável, expressas como combinações lineares de variáveis primárias e secundárias.

Ainda, para que seja possível a utilização da interpolação por krigagem o conjunto de dados deve conter pontos suficientes para modelar o variograma, além disso, a variável analisada não pode apresentar um efeito pepita muito alto, para não comprometer o ajuste do modelo (GOOVAERTS, 1997).

Quando seguem distribuição normal, os estimadores de krigagem linear são geral e condicionalmente não-viciados, caso contrário são apenas não-viciados de forma geral e geralmente são condicionalmente viciado (HAWKINS; CRESSIE, 1984).

Para avaliar os resultados obtidos no processo de interpolação por krigagem, existe uma gama de metodologias distintas empregada, entre elas destaca-se a que utiliza a validação cruzada com embasamento nos coeficientes de precisão do ajustamento para regressões matemáticas, onde o ajuste de modelos de semivariograma é dado em função do maior coeficiente de determinação (R^2) e a menor soma de quadrado de resíduos, permitindo comparar os resultados reais com os estimados (NOVAES FILHO, 2007).

Com base no conteúdo apresentado são definidas algumas vantagens de utilizar krigagem, são elas:

- Considera o número de pontos necessário para se calcular uma média local;
- Evita ponderação arbitrária dos pontos amostrados;
- Permite a determinação das melhores estimativas sem tendenciosidade: o melhor estimador é aquele que produz a melhor precisão (menor variância);
- Permite o estabelecimento de limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada;
- Integra as características espaciais dos pontos amostrais;
- Otimiza a interpolação; e
- Aponta a incerteza através da estimativa da confiabilidade da superfície interpolada.

Por ser uma técnica inovadora de redução de custos e melhor precisão em levantamentos amostrais, a krigagem ainda apresenta algumas desvantagens, são elas:

- O usuário pode não compreender o uso dos controles matemáticos e apesar disto os resultados são sempre obtidos, porém podem ser gerados com erros sistêmicos;
- É necessário tempo para preparo do variograma e entendimento de geoestatística;
- Pode não ser possível a construção de um variograma adequado devido à natureza da variação espacial da variável analisada. Isto pode ocorrer devido à magnitude da amostragem e por erros analíticos;
- Requer longo tempo de computação para grupos de dados grandes ou complexos; e
- Necessidade de software capacitado.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1. Localização

O estudo foi desenvolvido em uma área de plantio florestal de 1,8 ha de *Tectona grandis* L. f. localizado na Empresa Silvo Florestal Abaeté Ltda., situada no estado do

Pará, na divisa entre os municípios de Abaetetuba e Moju entre as coordenadas geográficas: 01° 50' 20" e 01° 47' 49" de latitude Sul, 48° 43' 33" e 48° 44' 28" de longitude Oeste. No entanto, o plantio de teca esta localizado na região pertencente ao município de Abaetetuba (Figura 6).

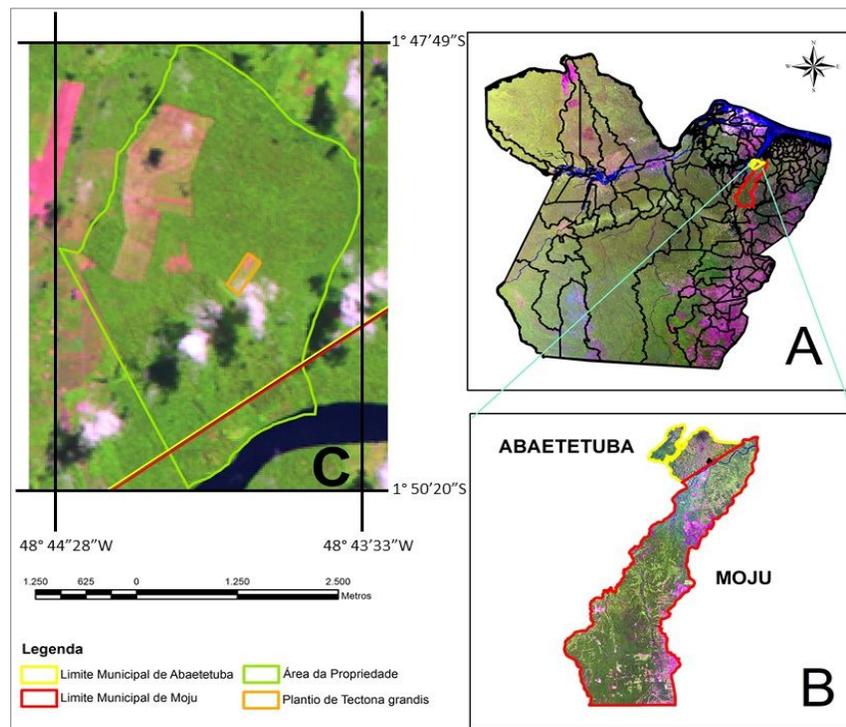


Figura 6 - Delimitação do município e da área de plantio: **A** - Estado do Pará; **B** - Municípios de Moju e Abaetetuba; **C** - Área da Propriedade e Plantio de *Tectona grandis* L. f.

A área de estudo está localizada no município de Abaetetuba, na mesoregião Nordeste Paraense. O clima da região é do tipo Am_i , segundo a classificação de Köppen, que corresponde à categoria de super úmido. A temperatura média anual vai de 25 °C a 27 °C. A precipitação pluviométrica anual varia de 2.000 mm a 3.000 mm, com distribuição irregular, tendo pequeno período seco que vai de agosto a outubro. A insolação mensal varia entre 148,0h e 275,8h e os valores mais elevados ocorrem no período de junho a dezembro, apresentando estreita relação com a precipitação (NEMER, 2003).

Os solos na região são classificados predominantemente como distróficos, do tipo latossolo amarelo com textura média e baixa fertilidade natural. É o tipo de solo que necessita de um determinado nível de investimento para apresentar bons resultados

em termos de rendimento das culturas, com adoção de tecnologias apropriadas, como a melhoria da fertilidade e redução da acidez, que são de fácil resolução quando da implantação do projeto (NEMER, 2003).

A estrutura geológica de Abaetetuba é constituída pela formação barreiras (Terrenos sedimentares do terciário) e terrenos quaternários. Esta formação reflete na simplicidade de seu relevo, com acidentes topográficos são inexpressivos, e cotas oscilando entre 5 a 20 metros.

A cobertura vegetal original, representada pela floresta densa de terra firme, que recobria maior parte do município de Abaetetuba, indistintamente, é, praticamente, inexistente, dando lugar à Floresta Secundária, intercalada com cultivos agrícolas. Já as áreas de várzea apresentam sua vegetação característica, com espécies ombrófilas latifoliadas, intercaladas com palmeiras (IDESP, 2011).

4.1.2. Descrição do Plantio

Anteriormente à implantação do plantio, a área era constituída por uma vegetação sucessional secundária em estágio avançado, com a presença de árvores como o ParaPará (*Jacaranda copaia* (Aubl.) D.Don e Morototó (*Schefflera morototoni* (Aubl.) Maguire, Steyern. ; Frodin), sendo que esta foi suprimida por um trator de esteira visando o estabelecimento do plantio de *Tectona grandis* L. f.

A área destinada ao estudo foi um talhão de Teca (*Tectona grandis* L. f.) de 1,8 ha com 7 anos de idade, denominada pela empresa Silvo Florestal de Quadro 3, cujas sementes foram provenientes do estado de Mato-Grosso e as mudas foram produzidas em viveiro localizado na própria fazenda, onde as que apresentavam-se melhor desenvolvidas foram transplantadas para o campo após 3 meses.

É importante salientar que não foi realizado o preparo da área e nem a análise do solo para que fossem recomendadas as doses corretas de adubação no momento do plantio. O plantio foi realizado nos meses de dezembro a janeiro (aproveitando as chuvas na região) através de coveamento manual, com a aplicação de uma adubação de base de NPK 18-18-18. O espaçamento utilizado no plantio foi de 3 x 2,5 m, totalizando 2400 árvores.

No decorrer dos 7 anos, não houve nenhuma adubação de cobertura, sendo que o resíduo da roçagem era depositado nas entrelinhas, servindo de nutrimento para as plantas de teca.

4.2. LEVANTAMENTO DOS DADOS

4.2.1. Amostragem do Solo

Na área experimental foi instalada uma grade irregular de 32 pontos amostrados aleatoriamente, tentando abranger a maior área possível, onde em cada ponto foram coletadas amostras simples de solo na profundidade 0-20 cm (Figura 7).

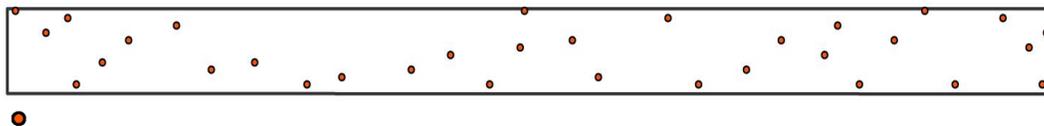


Figura 7. Esquema da amostragem de solo na área de estudo, indicando os pontos amostrais dos atributos químicos do solo (EMBRAPA, 1997).

Pontos Amostrais dos atributos Químicos do Solo

Na coleta de solo foi utilizado trado do tipo holandês, realizada sob a projeção da copa das árvores selecionadas, e cada uma das árvores onde se coletou solo foi marcada com tinta vermelha (Figura 8A). As amostras foram coletadas conforme recomendação da EMBRAPA 1997 (Figura 8B).

Após a coleta as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados (Figura 8C) e enviadas ao laboratório de Análise de solos da Universidade Federal Rural da Amazônia. Após coleta das amostras em cada ponto amostral, bem como nos vértices da área, foram coletados os valores de sua posição espacial, com o auxílio de um receptor de Sistema de Posicionamento Global (GPS), configurado no sistema de coordenadas métricos (UTM) obtendo os valores X e Y (Figura 8D). Este procedimento de georreferenciamento dos pontos amostrais é de fundamental importância, pois o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos estudados só é possível conhecendo-se a posição espacial dos pontos de amostragem. A partir da

ordenação e do processamento desses dados, podem-se visualizar mapas temáticos em diferentes planos, utilizando técnicas de geoprocessamento e geoestatística.



Figura 8 - **A** – Coleta de Solos sob a projeção da copa e marcação das árvores selecionadas com tinta vermelha; **B** – Procedimentos para evitar contaminação do solo; **C** – Acondicionamento em sacos plásticos devidamente identificados; **D** – Aquisição de Coordenadas UTM.

4.2.2. Análises de solo

Os métodos aplicados, nas análises laboratoriais de solo, seguiram às normas adotadas pela EMBRAPA (1997). As amostras foram secas ao ar em ambiente protegido de contaminações, até atingirem peso constante. Após este procedimento foram realizadas as análises no laboratório da Universidade Federal Rural da Amazônia, onde foram determinadas as seguintes informações: pH (H_2O e KCl), P e K (Mehlich), Ca e Mg (extração com KCl 1M), H+Al (acetato de cálcio em pH₇), Matéria Orgânica (M.O).

4.2.3. Levantamento Dendrométrico

Para a amostragem dos atributos dendrométricos na área de estudo, foram levantadas 32 parcelas circulares de 6 metros de raio, totalizando 113,1 m² de superfície. O centro de cada parcela correspondeu ao ponto de amostragem de solo (Figura 9). Dentro das parcelas georreferenciadas coletou-se o diâmetro à altura do peito (DAP), com auxílio de fita diamétrica, e altura total das árvores, medidas através de Hipsômetro Vertex IV da *Haglof Sweden* (Figura 10).

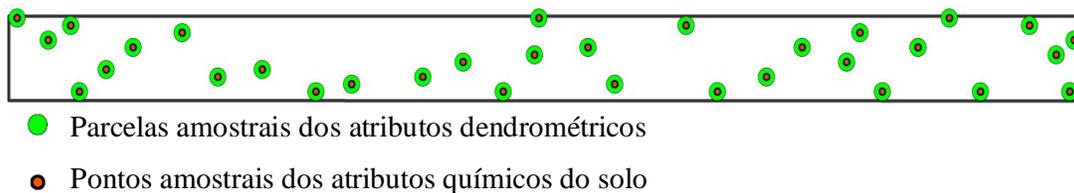


Figura 9. Esquema da amostragem dos atributos dendrométricos indicando as parcelas amostrais determinadas na área de plantio de *Tectona grandis* L. f..



Figura 10 - Instrumentos utilizados para o levantamento dendrométrico: **A** – Coleta do Diâmetro a altura do peito (DAP) com fita diamétrica **B** – Hipsômetro Vertex utilizado para medição da altura total.

4.3. Análise dos dados

4.3.1. Determinação do Volume

Com o intuito de obter a produtividade do plantio de teca, foi determinado o volume (m³) para cada árvore, utilizando os dados do levantamento dendrométrico,

Altura (m) e DAP (m) e o fator de forma de 0,52 determinado por Figueiredo et al (2005) para povoamentos de *Tectona grandis* entre 5 e 7 anos para região norte do Brasil, através da seguinte equação:

$$Vtotal = [(DAP^2 \times 3,1416)/4] \times Ht \cdot f \quad (9)$$

$$Vtotal = [(DAP^2 \times 3,1416)/4] \times Ht \cdot 0,58 \quad (10)$$

DAP = diâmetro à altura do peito, em metro (1,3 m do colo da árvore);

Ht = altura total da árvore;

f = fator de forma médio.

4.3.2. Análise dos Dados Geoestatísticos

Os dados referentes aos atributos químicos do solo e aos atributos dendrométricos foram utilizados para realização dos estudos estatísticos e geoestatísticos gerando a modelagem dos semivariogramas e mapas de predição e incerteza da área; posteriormente tendo sua verificação testada pela validação cruzada (*Cross-Validation*) dos modelos ajustados. É importante ressaltar que nenhum *outlier* foi retirado da base, visto que estes não foram considerados erros e, sim, características intrínsecas locais da variável analisada.

4.3.3. Análise Exploratória dos Dados

Os dados obtidos para cada variável foram armazenados em planilhas eletrônicas com o posicionamento geográfico de cada amostra. A primeira etapa da análise destes dados consistiu na análise exploratória dos mesmos, realizada com o objetivo de analisar o comportamento geral dos dados (forma, distribuição e tendência central).

De acordo com Cressie (1993), um fundamento comum da modelagem estocástica, é que os dados tenham distribuição Normal, sob a qual toda inferência geoestatística linear tem-se desenvolvido. Deve-se observar, porém, que é a

normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as análises. Entretanto, mesmo que o estudo geoestatístico de um conjunto de dados não exija que estes tenham distribuição normal (CORÁ et al., 2004) a normalidade deste conjunto de dados possibilita um melhor ajuste do semivariograma, além de facilitar este processo (MACHADO et al. 2007)

Assim sendo, procedeu-se a verificação da normalidade dos dados com auxílio do programa estatístico MINITAB 14. Para tanto se utilizou o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5%, adotando-se a hipótese inicial de que as variáveis em estudo seguem uma distribuição normal.

Foi realizado o resumo estatístico dos dados, com a determinação de medidas de posição (média e mediana) e dispersão (valores mínimo e máximo, variância, desvio-padrão e coeficiente de variação) e forma (gráfico de probabilidade normal, coeficiente de simetria e curtose).

Os gráficos de tendência espacial dos dados completam o quadro da análise inicial, e verificam a continuidade espacial das amostras dispostas nas direções N-S (latitude) e E-W (longitude), objetivando constatar a existência de tendências dos valores amostrados, do ponto de vista espacial, o que pode prejudicar a aplicação da geoestatística, pela não concordância das hipóteses estacionárias.

Para que o estimador seja ótimo, ele não pode ser tendencioso e deve ter variância mínima. A condição de não tendência significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos para o mesmo ponto deve ser nula. A condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças, ponto por ponto, entre o valor estimado e o medido, essas diferenças devem ser mínimas (MELLO, 2004).

4.4. Análise Geoestatística

A geoestatística foi utilizada com o objetivo de definir o modelo de variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e atributos dendrométricos envolvidos na pesquisa, sendo que a mesma foi realizada a partir de semivariogramas. Para cada variável foram realizados os cálculos das semivariâncias e a representação dos modelos

de semivariogramas, demonstrados por meio de gráficos da semivariância $\gamma(h)$ como função da distância (h). As inferências para a variabilidade espacial nas áreas experimentais foram determinadas a partir dos modelos de semivariogramas e seus parâmetros, principalmente o efeito pepita e o alcance da dependência espacial.

O cálculo e ajuste das semivariâncias, para posterior escolha do modelo de semivariograma, foram inicialmente feitos para cada variável nas direções -45° , 0° , 45° , 90° , utilizando o software Variowin (PANNATIER, 1996). Constatada a isotropia das semivariância, toda a análise subsequente foi feita para o caso isotrópico.

Para a análise do grau de dependência espacial das variáveis foi utilizada a classificação de Cambardella et al. (1994), onde são considerados de forte dependência espacial os semivariogramas que têm efeito pepita $\leq 25\%$ do patamar, moderada quando entre 25% e 75% e de fraca quando $>75\%$. De acordo com Vieira (1997), quanto menor a proporção do efeito pepita para o patamar, maior será a semelhança entre os valores vizinhos e a continuidade do fenômeno e menor a variância da estimativa e, portanto, maior a confiança que se pode ter nas estimativas.

4.4.1- Ajuste do Modelo de Semivariograma

A definição do modelo ajustado às semivariâncias experimentais foi feita introduzindo-se os parâmetros (efeito pepita, contribuição e amplitude) na equação e testando-se diversos modelos (esférico, exponencial e gaussiano).

Os semivariogramas experimentais omnidirecionais foram calculados e modelados com o programa geoestatístico VARIOWIN (PANNATIER, 1996). A seleção dos modelos teóricos foi baseada no índice IGF (*Indicative goodness of fit*) e na inspeção visual dos semivariogramas experimentais. Esse índice computado pelo Variowin é o quadrado médio da diferença entre os valores observados e estimados. A análise do comportamento visual dos semivariogramas é importante porque fornece uma descrição sintética das estruturas dos fenômenos estudados. A adequação do modelo de semivariograma ao caracterizar a estrutura de determinado conjunto de pontos deve ser verificada antes de usá-lo para a geração de mapas, prognósticos e de cenários.

4.4.2. Validação Cruzada (*Cross-Validation*)

Como critério de seleção do modelo, utilizou-se a técnica de validação-cruzada, implementada no módulo Geoestatistical Analyst no software ArcGis 9.3. A validação dos semivariogramas foram efetuadas por meio da análise do erro de estimativa, obtido com o procedimento de validação cruzada. Foi utilizado como parâmetro de decisão o erro de estimativa com média reduzida igual a zero e variância reduzida unitária.

A validação cruzada é um método de seleção do modelo semivariográfico bastante eficiente, pois permite selecionar o modelo matemático que melhor descreve a dependência espacial das observações das variáveis em função das distâncias (VIEIRA; NIELSEN; BIGGAR, 1981). Na validação cruzada supõe-se, que um elemento da amostra, não tenha sido observado. Para isto, retira-se o valor amostrado e obtém-se a estimativa do mesmo pela krigagem, usando os valores dos pontos vizinhos. Este processo é realizado para todos os pontos amostrados. Ao final para cada ponto existirá o valor verdadeiro e o valor estimado e, portanto, o erro de estimação.

4.4.3. Krigagem e mapeamento

Após o ajuste do modelo teórico de semivariograma no software Variowin, foram realizadas interpolações estimadas pelo método de krigagem com o auxílio da ferramenta Geoestatistical Analyst no software ArcGIS 9.3. A partir dos resultados da krigagem, foram gerados mapas de predição e incerteza dos atributos químicos do solo e dos parâmetros dendrométricos.

4.5. Relações entre atributos químicos do solo e dendrométricos do plantio de *Tectona grandis* L. f.

Os atributos químicos do solo são alguns dos possíveis responsáveis pela influência na oscilação da produtividade em áreas consideradas homogêneas. Porém, antes de buscar qualquer relação destes elementos com a cultura, é importante avaliar a extensão e a intensidade da dependência espacial desta variação, isoladamente ou em conjunto com outros atributos (Gandah et al., 2000).

Assim sendo, após a determinação da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e dos atributos dendrométricos do plantio de *Tectona grandis* L. f., procurou-se determinar a relação entre estes dois conjuntos de atributos. Tal procedimento foi realizado através do módulo *Spatial Analyst*, implantado no programa ArcGis 9.3, através da ferramenta *Multivariate - Band Collection Statistics*, o qual gerou a matriz de correlação entre os mapas de variabilidade espacial, através da seguinte expressão:

$$Corr_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{\delta_i \delta_j} \quad (11)$$

Em que,

Corr = correlação

Cov = covariância

i, j = layers da camada

δ = desvio padrão

$$COV_{ij} = \left\{ \sum_{k=1}^N \frac{(Z_{ik} - \mu_i)(Z_{jk} - \mu_j)}{N-1} \right. \quad (12)$$

Em que,

Z – valor da Célula

i,j- layers da camada

μ – média do layer

N- número de células

k- denota uma célula específica

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

5.1.1. Teste de Normalidade

A análise preliminar e exploratória dos dados amostrados, através dos histogramas, assim como a avaliação da normalidade dos dados através do teste de Komolgorov-Smirnov a 95% de probabilidade (Figura 11 e Figura 12), indicam que as variáveis químicas do solo, bem como as variáveis dendrométricas estudadas, apresentam distribuição normal, com exceção do fósforo que mostrou um p -value=0,039 inferior ao nível alfa adotado de 5%, rejeitando-se assim a hipótese de normalidade.

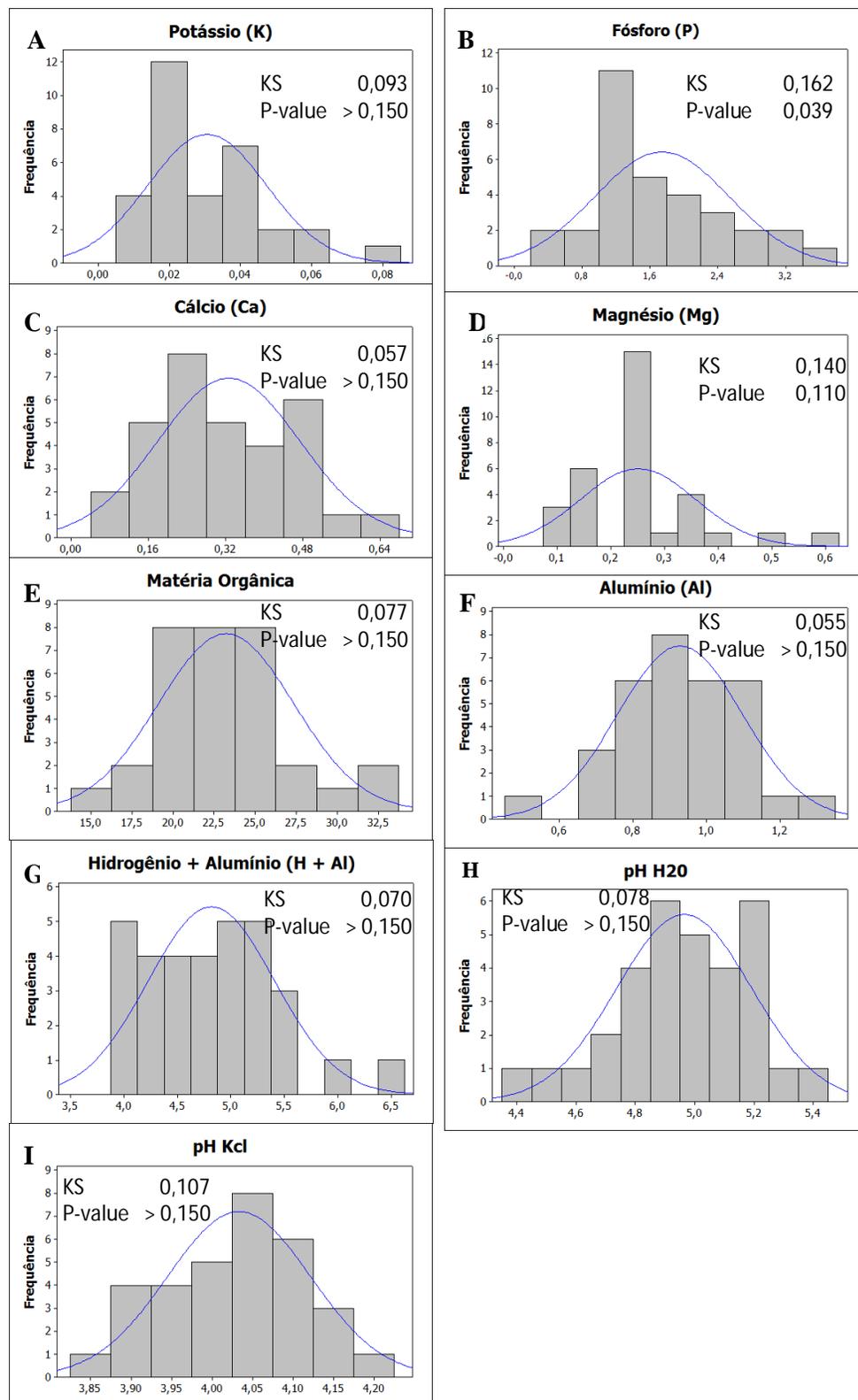


Figura 11. Histograma de frequência das variáveis químicas do solo – A) Potássio; B) Fósforo; C) Cálcio; D) Magnésio; E) Matéria Orgânica; F) Alumínio; G) Hidrogênio + Alumínio; H) pH H₂O; I) pH KCl.

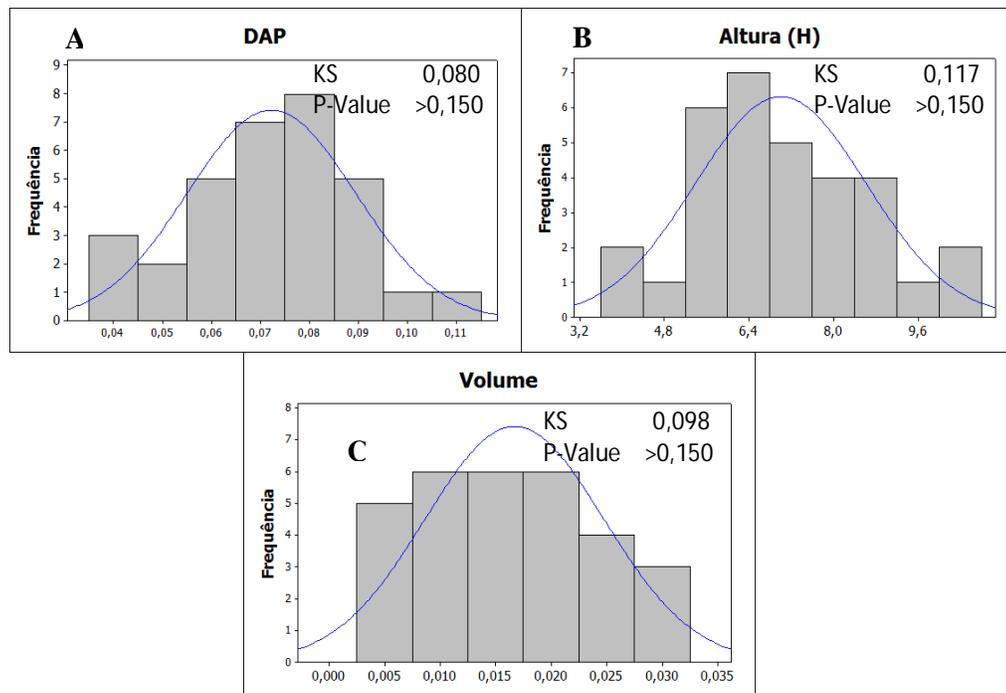


Figura 12. Histograma de frequência das variáveis dendrométricas do plantio de *Tectona grandis* L. f.– A) Altura; B) DAP; C) Volume

A verificação do pressuposto de normalidade dos dados torna-se importante uma vez que o processo de estimação por krigagem tende a apresentar resultados mais significativos quando a condição de normalidade dos dados é satisfeita (CARVALHO CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002). Por outro lado, a realização de inferências através de método geostatístico não exige que seja satisfeita a condição de normalidade dos dados a serem utilizados.

5.1.2. Estatística Descritiva

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados da estatística descritiva dos atributos químicos do solo, analisados para a camada de 0 a 20 cm.

Tabela 1 - Estatística descritiva das variáveis químicas do solo em profundidade de 0-20 cm.

Variáveis	Média	Variância	Mediana	Desvio padrão	Curtose	Assimetria	Mínimo	Máximo	CV(%)
K (cmol _c dm ⁻³)	0,03	0,0003	0,03	0,003	1,10	1,06	0,01	0,08	10,00
P (mg dm ⁻³)	1,75	0,63	1,46	0,80	0,27	0,78	0,51	3,78	45,71
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0,33	0,02	0,33	0,03	-0,59	0,29	0,08	0,66	9,10
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,93	0,03	0,93	0,03	-0,08	-0,20	0,52	1,29	3,22
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,25	0,01	0,25	0,02	2,29	1,00	0,08	0,58	8,00
MO (g kg ⁻¹)	23,22	17,04	22,94	0,73	0,68	0,55	15,07	33,42	3,14
C org (g kg ⁻¹)	13,47	5,74	13,30	0,42	0,69	0,55	8,74	19,39	3,12
pH KCl	4,03	0,01	4,06	0,02	-0,60	-0,12	3,86	4,22	0,50
pH H ₂ O	4,96	0,05	4,98	0,04	-0,06	-0,29	4,44	5,44	0,80
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	4,82	0,35	4,78	0,10	0,35	0,58	3,95	6,41	2,10

Segundo Pimentel Gomes (2000) na estatística clássica, em condições de campo experimental, se o coeficiente de variação for inferior a 10%, diz que o coeficiente de variação é baixo, ou seja, o experimento tem alta precisão; de 10 a 20% são considerados médios e de boa precisão; 20 a 30% alto, com baixa precisão e acima de 30%, muito alto.

Portanto, para as amostras analisadas (Tabela 1), pode-se observar que os coeficientes de variação das variáveis Ca, Al, Mg, MO, pH em H₂O, pH em KCl e H + Al foram menores que 10%, o que indica que houve um coeficiente de variação baixo e com alta precisão no experimento. Em relação ao potássio (K) o coeficiente de variação demonstra média variabilidade, caracterizando boa precisão no experimento. Quanto a análise do componente fósforo (P) foi obtido um coeficiente de variação acima de 30%, esta elevada variabilidade implica segundo Kim (1988), na possível presença na amostra de valores discrepantes (*outliers*).

A assimetria e curtose foram utilizadas para estudar a forma da distribuição de probabilidade das variáveis.

Ao se analisar a coluna do coeficiente de assimetria, (Tabela 1), observa-se que as variáveis P, Ca, Al, Mg, MO, pH em KCl, pH em H₂O e H+Al produziram assimetrias menores que 1, sendo estes os atributos que apresentaram maior proximidade com a distribuição normal. Vale destacar que, os teores de Al, pH em KCl e pH em H₂O apresentam assimetria negativa, ou seja, tiveram seus dados levemente concentrados à direita, já para os teores de P, Ca, Mg e H + Al, a assimetria é positiva,

com maior acúmulo dos dados à esquerda, apresentando leve assimetria. As variáveis K e Mg apresentaram coeficientes de assimetria 1 e 1,06, respectivamente, o que representa uma leve distribuição assimétrica.

Apesar da ocorrência de algumas distribuições assimétricas, os valores da média e mediana de todos os atributos químicos estudados são próximos, evidenciando que os dados não apresentam assimetria acentuada. Nesse sentido, conforme Little e Hills (1978) quando os valores da média e mediana apresentam valores semelhantes, os dados apresentam ou aproximam da distribuição normal. Isto pode ser um indicativo de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição (Cambardella et al., 1994), demonstrando que todos os atributos envolvidos no estudo estão aproximando-se de uma distribuição normal indicando que os dados estão adequados para o uso da geoestatística.

Com relação aos coeficientes de curtose, que é o grau de achatamento da curva de distribuição, as variáveis K, P, Mg, MO e H+ Al apresentaram distribuição mais alta (afunilada) e concentrada que a distribuição normal, denominada distribuição leptocúrtica; enquanto as variáveis Ca, Al, pH em KCl e pH em H₂O apresentam distribuição mais "achatada" que a distribuição normal, denominada distribuição platicúrtica, que tende a imprimir as amostras uma maior variabilidade.

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados da estatística descritiva dos atributos dendrométricos do plantio de *Tectona grandis* L. f. Observa-se que o coeficiente de variação das variáveis altura e DAP encontram-se no intervalo de 20 a 30%, o que segundo Pimentel Gomes (2000) indica que houve um coeficiente de variação alto, caracterizando portanto baixa precisão no experimento. O coeficiente de variação do volume foi superior a 30% sendo considerado muito alto. Por outro lado, as variáveis (DAP e ALTURA) apresentam grande homogeneidade entre si, característica não observada para a variável (VOLUME) com (CV=66,84%) caracterizando a amostra bastante heterogênea.

Tabela 2 - Estatística descritiva das variáveis dendrométricas de um plantio de *Tectona grandis* L. f. localizado no município de Abaetetuba – PA.

Variáveis	Média	Variância	Mediana	Desvio padrão	Curtose	Assimetria	Mínimo	Máximo	CV(%)
DAP(m)	0,0722	0,0003	0,0734	0,0172	0,1149	0,0013	0,0393	0,1134	23,82
Altura(m)	7,01	2,61	6,83	1,62	-0,23	0,32	4,03	10,66	23,11
Volume(m ³)	0,0193	0,0002	0,0172	0,0129	4,9665	1,8649	0,0035	0,0660	66,84

Na análise dos coeficientes de assimetria, (Tabela 2), observa-se que as variáveis DAP e Altura produziram assimetrias menores que 1, sendo estes os atributos que apresentaram maior proximidade da distribuição normal. O volume apresentou coeficiente de assimetria de 1,8649 o que representa uma leve distribuição assimétrica.

Com relação aos coeficientes de curtose, que é o grau de achatamento da curva de distribuição, as variáveis DAP e volume apresentaram distribuição mais alta (afunilada) característica da distribuição leptocúrtica e assim, há maior concentração dos dados em torno da média, já a variável Altura apresentou distribuição mais "achatada" que a distribuição normal, denominada distribuição platicúrtica, o que indica maior dispersão dos dados.

5.1.3. Análise de Tendência

Ao serem observados os gráficos de tendência, observa-se boa distribuição dos dados no espaço, não sendo observadas tendenciosidades na amostragem tanto nas direções Norte e Sul (latitude), como na Leste e Oeste (Longitude), conforme demonstrado nas figuras 13 e 14.

A importância desta análise está no fato de que a existência de tendenciosidade nos dados inviabiliza o uso dos mesmos em uma análise geoestatística, pela não concordância com as hipóteses estacionárias (MELLO, 2004). Starks e Fang (1982) mostram que a presença de tendência afeta fortemente o semivariograma, podendo conduzir a conclusões totalmente falsas. Logo, de acordo com os resultados, pode-se constatar que há condições para a aplicação das análises, permitindo o desenvolvimento da análise da estrutura de dependência espacial.

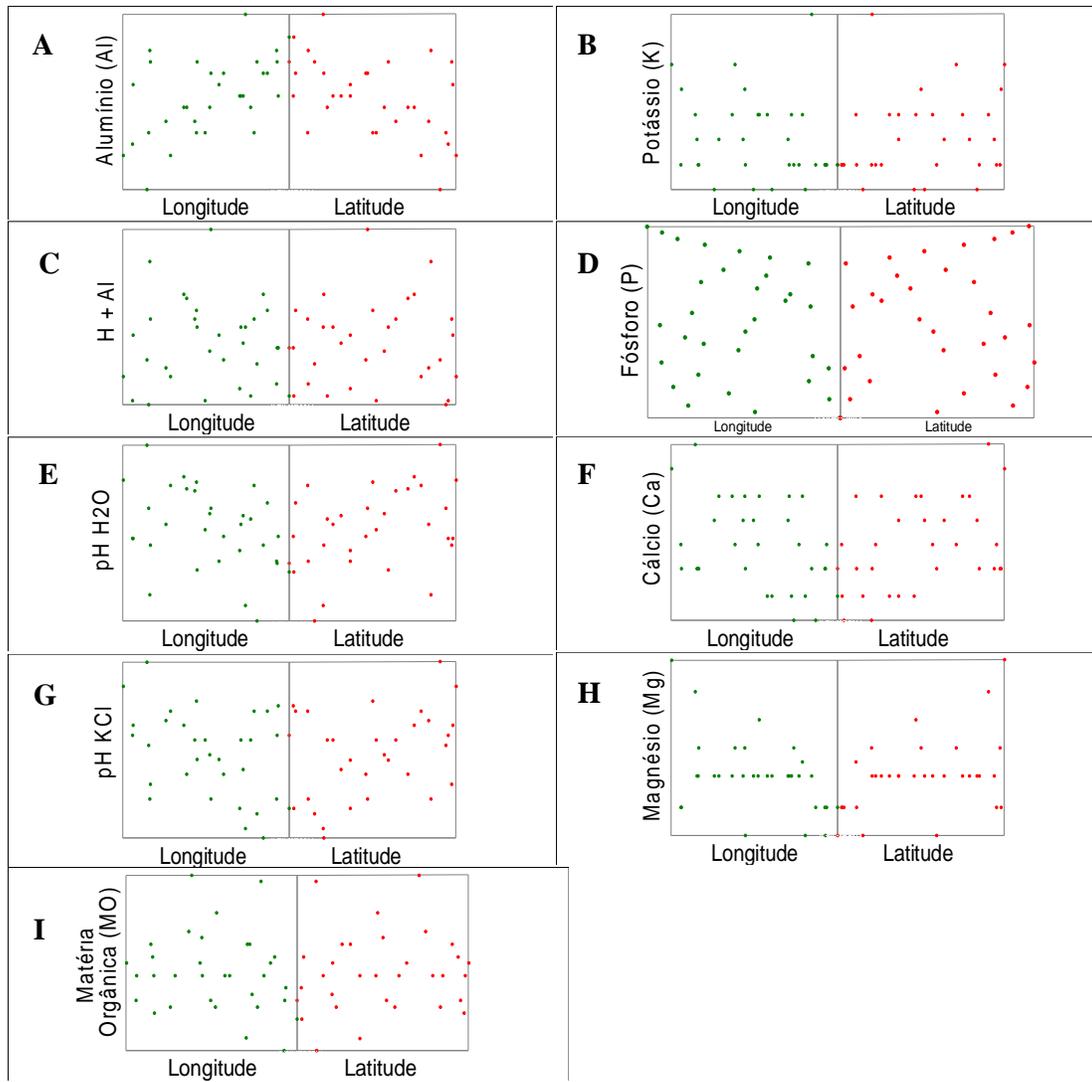


Figura 13. Gráficos de tendência dos dados relativos às variáveis químicas do solo em profundidade de 0-20 cm. A) Alumínio; B) Potássio; C) H + Al; D) Fósforo; E) pH H₂O; F) Cálcio; G) pH KCl; H) Magnésio; I) Matéria Orgânica.

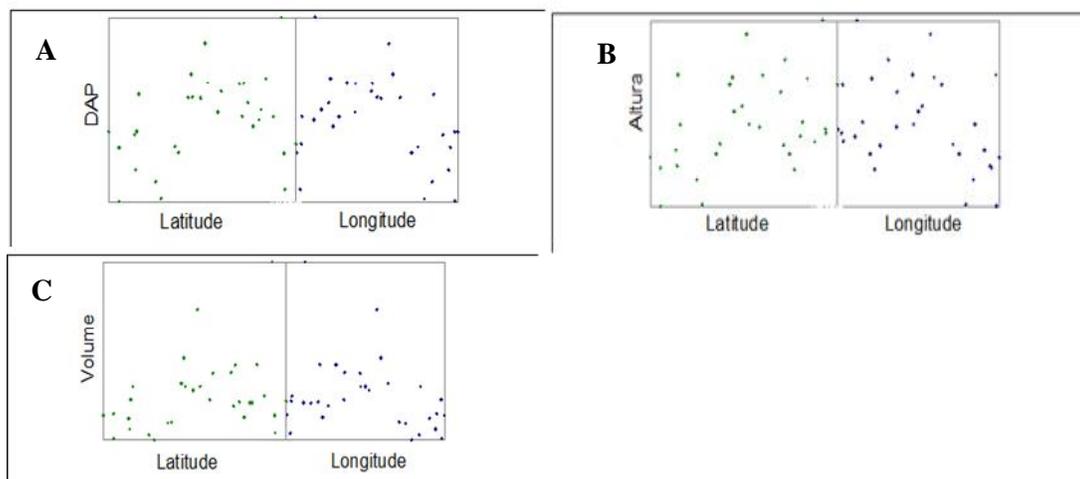


Figura 14. Gráficos de tendência dos dados relativos às variáveis dendrométricas de um plantio de *Tectona grandis* L. f., município de Abaetetuba-PA. A) DAP; B) Altura e C) Volume.

5.2. Análise Geoestatística

5.2.1. Semivariograma Experimental

O semivariograma experimental é ajustado à curva que proporciona a máxima correlação possível com os pontos plotados. A análise variográfica mostrou que as variáveis químicas do solo K, Ca, Mg, M.O e pH em H₂O (Figura 15) apresentaram-se estruturadas espacialmente, bem como as variáveis dendrométricas DAP, Altura e Volume (Figura 16), indicando existir uma função estrutural, com semivariância de comportamento modelável. No caso da existência da estrutura espacializada, sugere-se considerar a componente espacial. Assim, as variáveis devem ser tratadas de forma dependente e não independente, como preconiza a estatística clássica. Portanto, há um modelo espacial que modela essa estrutura.

Não foi observada concentração de valores em posições específicas da área, tampouco ocorreu sentido preferencial na distribuição dos dados. Tal fato é um bom indicativo de que a distribuição espacial das variáveis, nesta área, é aleatória e isotrópica (CAMBARDELLA et al., 1994). Já em relação aos semivariogramas experimentais das variáveis P, Al, H+Al e pH em KCl (Figura 15) não apresentaram

dependência espacial entre os pontos amostrados, revelando uma variação que se ajustou ao modelo efeito pepita puro. Com isso se pressupõe, que ocorreu independência espacial entre as amostras ou, grande variação espacial não detectada pela escala de amostragem adotada, assim o ajuste dos dados experimentais a um modelo teórico é comprometido devido à ausência da dependência espacial. Para estes dados, têm-se uma distribuição completamente aleatória, não tendo sob o ponto de vista geoestatístico, uma função que descreva sua variação no espaço.

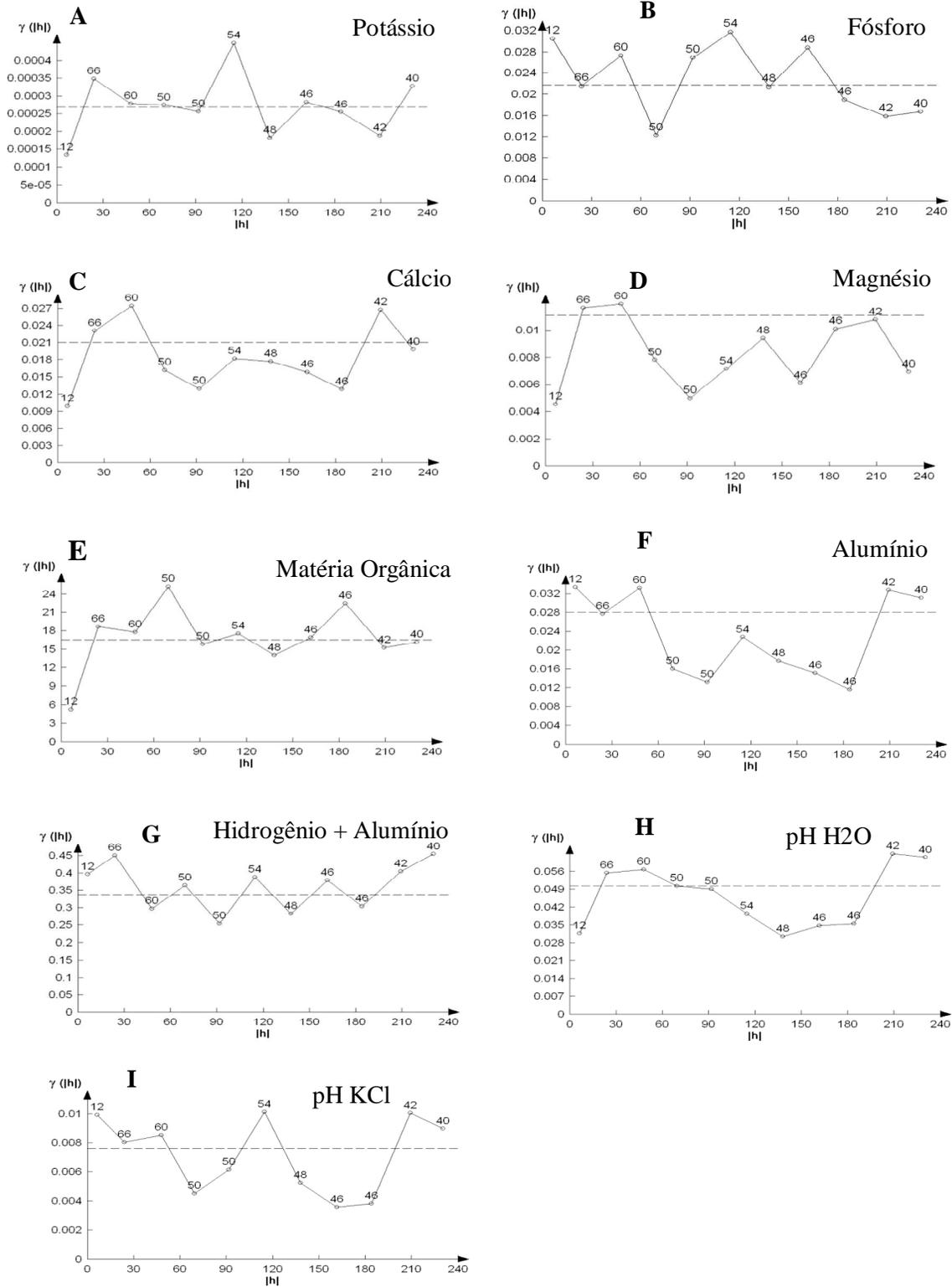


Figura 15. Semivariogramas experimentais das variáveis químicas do solo em profundidade de 0-20 cm A) Potássio B) Fósforo, C) Cálcio, D) Magnésio, E) Matéria Orgânica, F) Alumínio, G) Hidrogênio +Alumínio, H) pH H₂O, I) pH KCl.

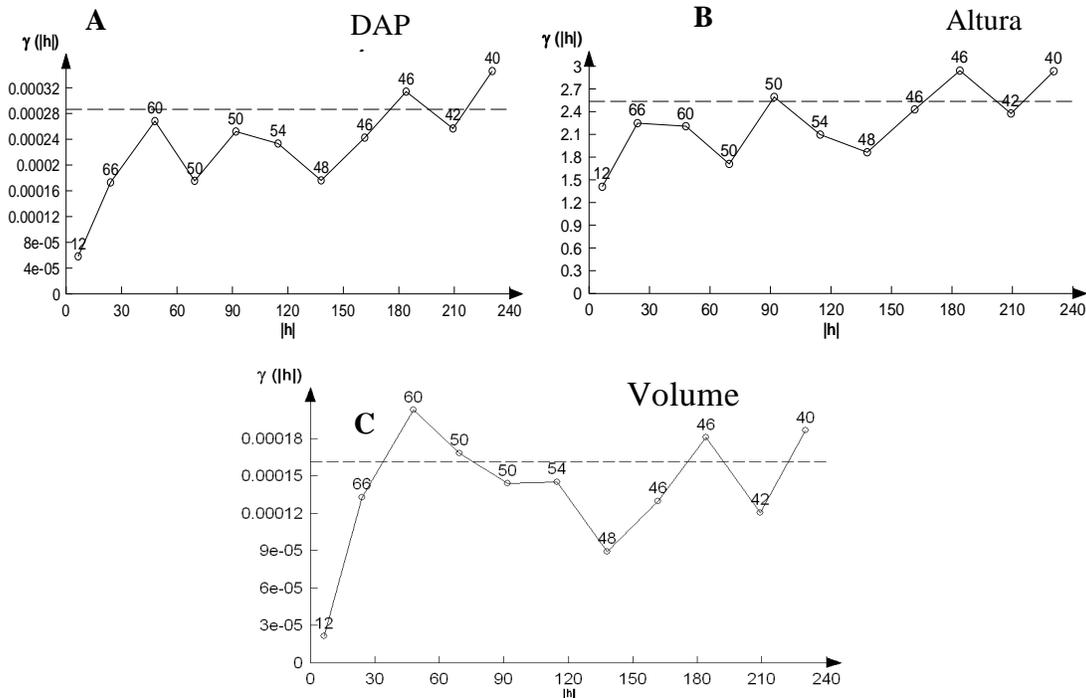


Figura 16. Semivariogramas experimentais das variáveis dendrométricas de um plantio de *Tectona grandis* L. f., município de Abaetetuba-PA. A) DAP; B) Altura e C) Volume.

5.2.2. Modelos Ajustados

Visualmente, todos os modelos teóricos avaliados no presente estudo tiveram desempenho semelhante. Assim, qualquer um deles pode ter um bom desempenho no processo de krigagem. Especificamente, ao se analisar as curvas geradas para o modelo esférico, exponencial e gaussiano verificou-se similaridade entre as mesmas. Porém esta é uma avaliação subjetiva, logo, o uso de critérios quantitativos como a validação cruzada foi aplicada para seleção do melhor modelo, onde buscou-se como parâmetro de decisão o erro de estimativa com média reduzida igual a zero e variância reduzida unitária. Os resultados da validação cruzada dos modelos ajustados estão demonstrados no Anexo I.

Ripple (1994) considera que o efeito pepita relativo fornece a noção de influência do comportamento aleatório, quando $E < 0,15$ o componente aleatório apresenta-se pequeno, para o intervalo de $0,15 < E < 0,30$ o componente aleatório é importante e $E > 0,30$ o componente aleatório é significativo na investigação das variáveis regionalizadas. No presente trabalho é observado que o efeito pepita relativo

(E) para as amostragens de K, Ca, Mg, e M.O. apresenta o componente aleatório pequeno e para as variáveis P e pH em H₂O apresenta componente aleatório significativo.

Os modelos de semivariogramas teóricos ajustados para os dados revelaram, segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), uma forte dependência espacial na área experimental uma vez que os valores do efeito pepita foram quase sempre menores que 25 % do patamar. Tomando o Cálcio como exemplo verificou-se que o efeito pepita correspondeu a 2% do patamar, isto quer dizer então que 98% da variabilidade dos teores de cálcio no solo é explicada pela correlação espacial (Tabela 3).

Para a variável pH em H₂O verifica-se um grau de dependência espacial moderada (Tabela 3), com o efeito pepita corresponde a 45% do patamar, ou seja, apenas 55% da variabilidade foi explicada pela correlação espacial.

Tabela 3 - Parâmetros dos semivariogramas das variáveis estudadas e ajustados aos modelos selecionados; índice do efeito pepita relativo $E = C_0/C_1$, razão $K = C_0/ C_0 + C_1$.

Variáveis Químicas do Solo	Parâmetros			Modelo	$E = \frac{C_0}{C_1}$	$k = \frac{C_0}{C_0 + C_1}$	$GDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1}\right) \times 100$	Grau de Dependência Espacial
	C_0	C_1	a (m)					
K	0,0000351	0,00023	32,8	Exponencial	0,15	0,13	13%	Forte
Ca	0,000435	0,0207	31,2	Exponencial	0,02	0,02	2%	Forte
Mg	0,000399	0,0106	14,9	Gaussiano	0,04	0,04	4%	Forte
M.O.	0,85	15,7754	17,6	Gaussiano	0,05	0,05	5%	Forte
pH em H ₂ O	0,018	0,03286	16,8	Gaussiano	0,55	0,35	35%	Moderada

C_0 : Efeito pepita; C_1 : Contribuição do modelo; a (m): Alcance; $C_0 + C_1$: Patamar; E : Efeito pepita relativo; K : Razão entre efeito pepita e o patamar; GDE : Grau de dependência espacial.

O modelo mais adequado para explicar a estrutura da variabilidade espacial do K nas amostras de solo foi o exponencial (Figura 17 A), apresentando um raio de 32,8 m (alcance), que representa uma área de 3.380 m², abrangendo cerca de 450 árvores de *Tectona grandis* L. f., apresentando uma razão k de 0,13, significando uma forte correlação com o espaço com somente 13% de aleatoriedade, uma vez que o efeito pepita corresponde a 13% do patamar, indicando assim que 87% da variabilidade é explicada pela correlação espacial.

A Figura 17 B mostra o semivariograma do Cálcio. Nota-se que o cálcio apresentou dependência espacial que pode ser descrita pelo modelo exponencial com

alcance de 31,2 m, ou seja, amostras do cálcio selecionadas à distâncias inferiores a 31,2 m são correlacionadas entre si. O efeito pepita apresentou valor de 0,00435 e a contribuição de 0,00207. A relação entre o efeito pepita e o patamar de 2 % indicou que 98% da variabilidade dos teores de cálcio no solo é explicada pela correlação espacial.

Magnésio e Matéria Orgânica (Figura 17C e 17D) se ajustaram ao modelo gaussiano, apresentando alcances de 14,9 e 17,6 m, respectivamente. A aleatoriedade variou de 4% a 5% (Tabela 2), mostrando-se como variáveis fortemente correlacionadas com o espaço.

Em relação ao semivariograma do pH em H₂O (Figura 17 E), o modelo que melhor explicou sua estrutura da variabilidade espacial nas amostras de solo foi o gaussiano, apresentando um raio de 16,8 m (alcance), que representa uma área de 887 m², abrangendo cerca de 119 árvores de *Tectona grandis* L. f. apresentando uma razão *k* de 0,35, indicando que 65% da variabilidade do pH do solo da área de estudo é devida à sua correlação com o espaço (Tabela 3).

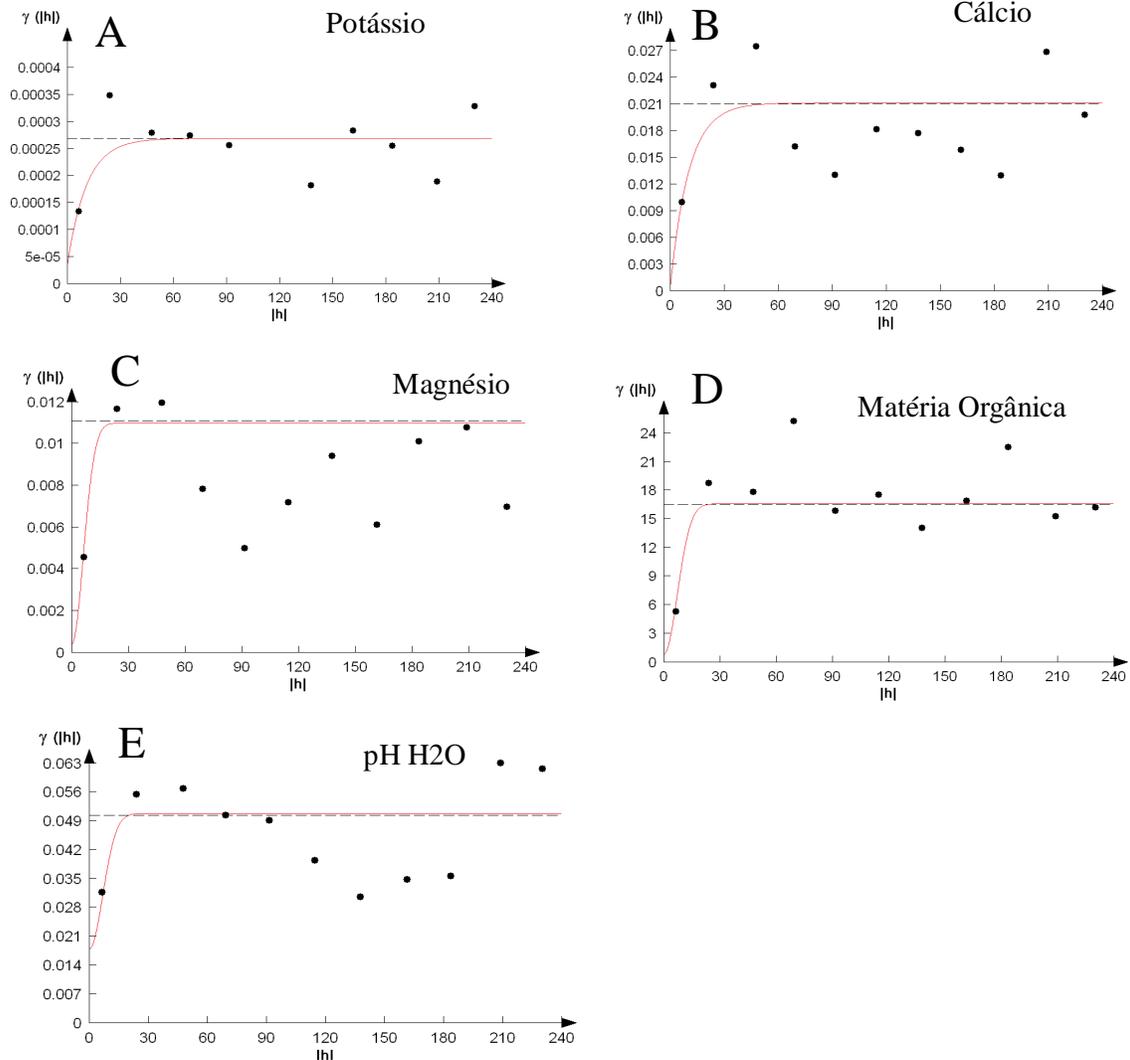


Figura 17. Semivariogramas ajustados para as variáveis químicas do solo em profundidade de 0-20 cm. A) Potássio, B) Cálcio, C) Magnésio, D) Matéria Orgânica, E) pH H₂O

Os modelos de semivariogramas teóricos ajustados para os dados dendrométricos revelaram, segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), forte dependência espacial na área experimental para as variáveis volume e DAP, uma vez que os valores do efeito pepita foram menores que 25 % do patamar. Para a variável altura observa-se um grau de dependência espacial moderado, mostrando que 28% da variabilidade é aleatório e 72% é atribuída a correlação espacial (Tabela 4).

Tabela 4. Parâmetros dos semivariogramas das variáveis dendrométricas estudadas e ajustados aos modelos selecionados; índice do efeito pepita relativo $E = C_0/C_1$, razão $K = C_0 / (C_0 + C_1)$.

Variáveis Dendrométricas	Parâmetros			Modelo	$E = \frac{C_0}{C_1}$	$k = \frac{C_0}{C_0 + C_1}$	$GDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1}\right) \times 100$	Grau de Dependência Espacial
	C_0	C_1	a (m)					
DAP	0,000048	0,00024	48	Gaussiano	0,2	0,17	17%	Forte
Altura	0,727827	1,82	38,392	Exponencial	0,4	0,28	28%	Moderada
Volume	0	0,00016	29,968	Gaussiano	0	0	0%	Forte

C_0 : Efeito pepita; C_1 : Contribuição do modelo; a (m): Alcance; $C_0 + C_1$: Patamar; E : Efeito pepita relativo; K : Razão entre efeito pepita e o patamar; GDE : Grau de dependência espacial.

O modelo mais adequado para explicar a estrutura da variabilidade espacial do DAP foi o exponencial (Figura 18 A), apresentando um raio de 48 m (alcance), que representa uma área de 7.238 m², abrangendo cerca de 965 árvores de *Tectona grandis* L. f., apresentando uma razão k de 0,17, indicando que 83% da variabilidade do DAP das plantas na área de estudo é devida à sua correlação espacial (Tabela 4).

A Figura 18 B mostra o semivariograma da altura. Nota-se que a altura apresentou dependência espacial que pode ser descrita pelo modelo exponencial com alcance de 38,392 m, ou seja, alturas selecionadas à distâncias inferiores a 38,392 m são correlacionadas entre si. O efeito pepita apresentou valor de 0,00435 e a contribuição de 0,727827, indicando que 72% da variabilidade da altura das plantas é explicada pela correlação espacial.

A Figura 18 C mostra o semivariograma do volume. Notou-se que esta variável apresentou dependência espacial que ajustou-se ao modelo gaussiano com efeito pepita 0, o que significa que toda a variabilidade existente está correlacionada com o espaço. Estes resultados mostram que as estimativas de teores de volume, considerando a componente espacial proporcionarão otimização no processo de krigagem.

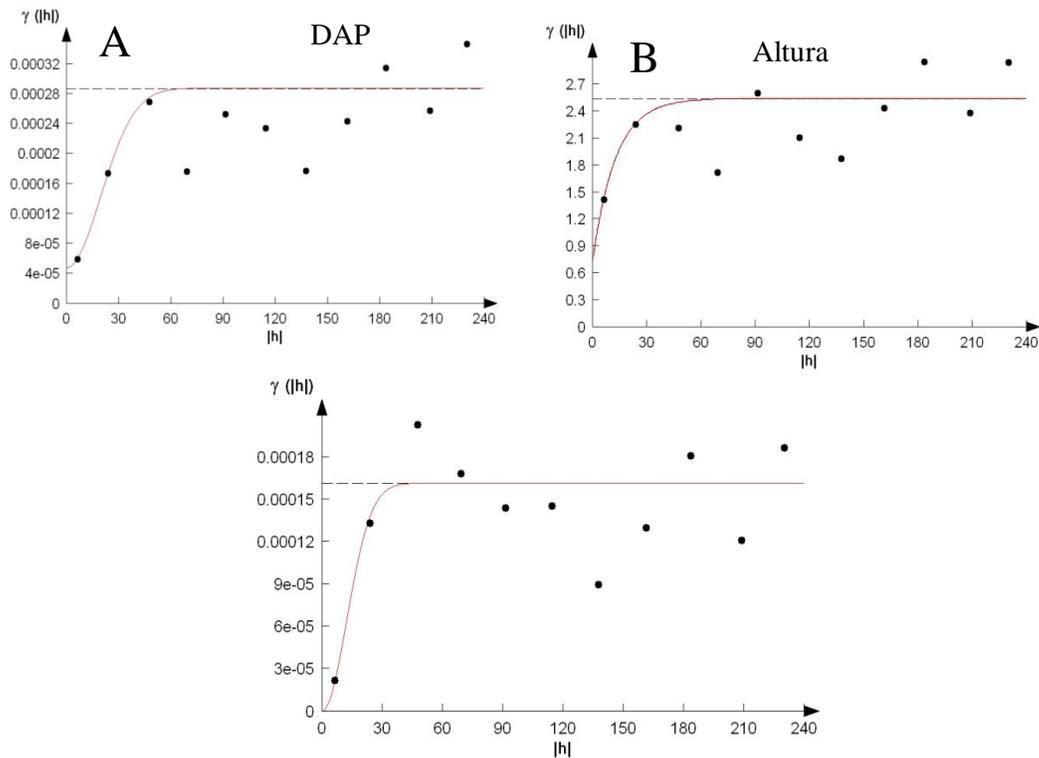


Figura 18. Semivariogramas ajustados para as variáveis dendrométricas de um plantio de *Tectona grandis* L. f., município de Abaetetuba- PA. A) DAP, B) Altura, C) Volume

5.2.3 Mapas de Predição e Incerteza dos Atributos Químicos do Solo

Através dos dados dos semivariogramas ajustados foi realizada a krigagem ordinária para realizar as interpolações necessárias para a construção dos mapas da distribuição espacial dos atributos químicos do solo, bem como os mapas de incerteza quantificando o erro para cada região na superfície criada. Pelos mapas temáticos das variáveis de solo (Figuras 19 a 23), pode-se observar a variabilidade espacial das variáveis químicas dos solos de acordo com a quantidade presente no solo, permitindo assim efetuar recomendação de adubação.

Os valores de concentração do potássio variaram entre 0,01 e 0,08 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, podendo-se observar, no entanto, que a maior distribuição do nutriente na área está no intervalo de 0,01 a 0,05 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e pequenas manchas com teores entre 0,05 e 0,08 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Figura 19 A). Essa amplitude dos níveis de potássio, de acordo com Cravo

et al. (2007), é considerada baixa para os solos do estado do Pará, pois situa-se com valores inferiores a $0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o que implica segundo Barroso et al. (2005) na redução do crescimento das árvores de teca, uma vez que provoca clorose e pontos necróticos na folhas mais velhas, comprometendo assim a abertura dos estômatos, podendo ocorrer menor assimilação de CO_2 nos cloroplastos, diminuindo consequentemente a taxa fotossintética.

(A)



(B)

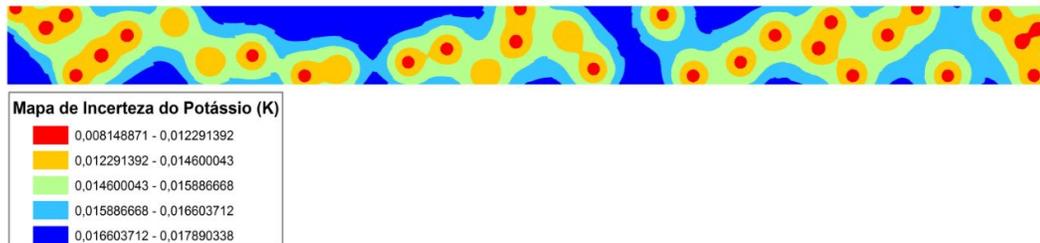


Figura 19. Mapa de previsão dos teores de potássio (A) e mapa de incerteza do potássio (B).

Os valores de concentração do cálcio variaram entre $0,08$ e $0,66 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, podendo-se observar, no entanto, que a maior distribuição do nutriente na área está no intervalo de $0,08$ a $0,35 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, uma região representativa no intervalo de $0,35$ a $0,50 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e pequenas manchas com teores entre $0,50$ e $0,66 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 20 A). Essa amplitude dos níveis de cálcio, de acordo com Cravo et al. (2007), é considerada baixa para os solos do estado do Pará pois situa-se com valores inferiores a $1,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o que implica segundo Krishnapillay (2000) no raquitismo das árvores de teca, devido à atuação direta do cálcio no crescimento meristemático das plantas.

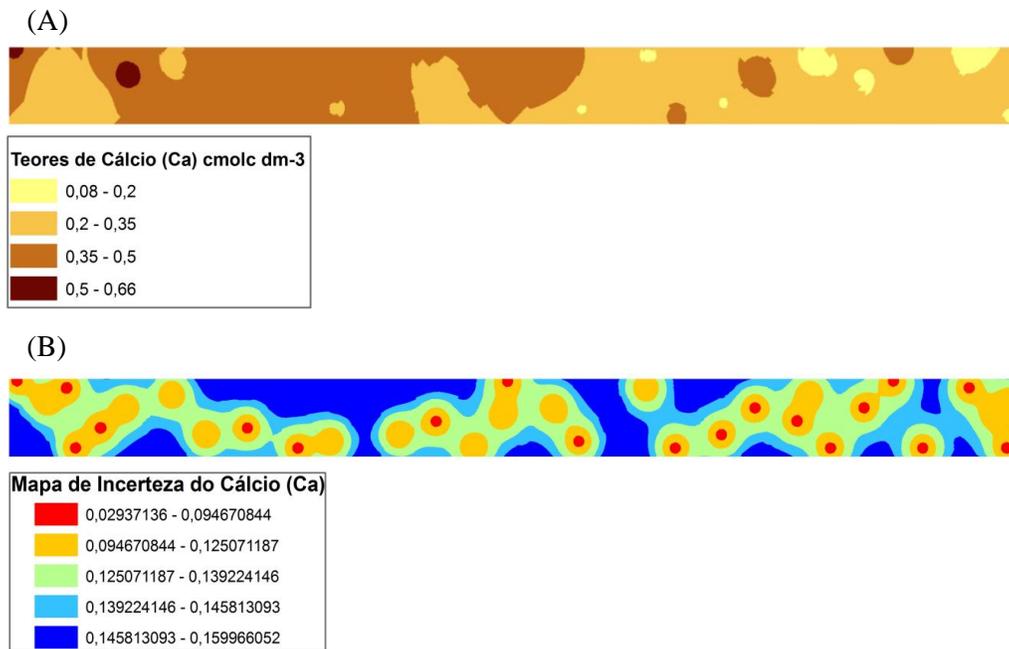


Figura 20. Mapa de predição dos teores de cálcio (A) e mapa de incerteza do cálcio (B).

Os valores de concentração do magnésio variaram entre 0,08 e 0,58 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, podendo-se observar, no entanto, que a maior distribuição do nutriente na área está no intervalo de 0,08 a 0,23 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e pequenas manchas com teores entre 0,23 e 0,58 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Figura 21 A). Essa amplitude dos níveis de magnésio, de acordo com Cravo et al. 2007, é considerada baixa para os solos do estado do Pará no intervalo de 0,23 a 0,50 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e considerada média, na pequena região que varia de 0,50 a 0,58 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. O magnésio é parte integrante da molécula da clorofila, e por isso está diretamente ligado ao metabolismo energético das plantas; segundo Barroso et al. (2005) em estudo com teca, avaliou-se a partir da deficiência de magnésio folhas mais velhas com uma ligeira clorose, evidenciando manchas foliares. Os sintomas descritos são semelhantes aos citados por Malavolta et al. (1997), no qual a clorose observada é decorrente da redução no teor de clorofila.

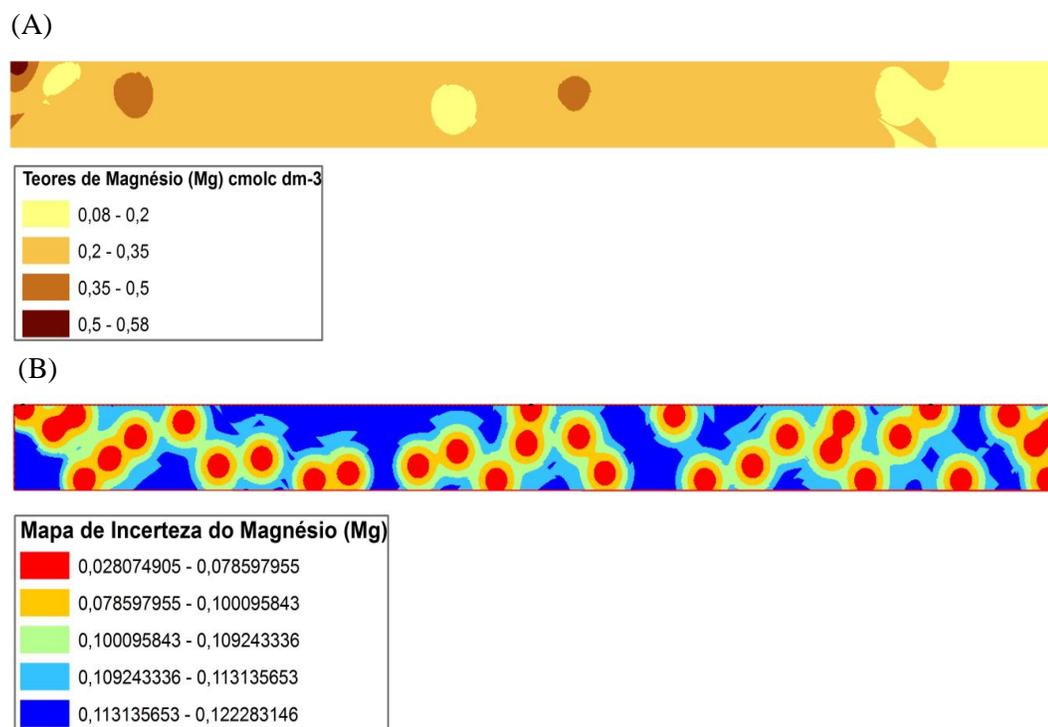
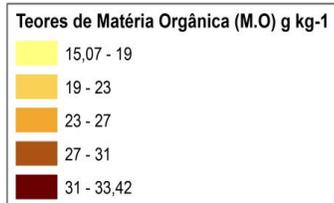


Figura 21. Mapa de predição dos teores de magnésio (A) e mapa de incerteza do magnésio (B).

Os valores de concentração da Matéria Orgânica variaram entre 15,07 e 33,42 g kg⁻¹, podendo-se observar, no entanto, que a maior distribuição da matéria orgânica na área está no intervalo de 15,07 a 26,85 g kg⁻¹ e pequenas manchas com teores entre 26,85 e 33,42 g kg⁻¹ (Figura 22 A). Essa amplitude dos níveis de Matéria Orgânica, de acordo com Ribeiro et al (1999), é considerada baixa no intervalo situado entre 15,07 a 20 g kg⁻¹ e média entre 20,01 e 33,42 g kg⁻¹. A matéria orgânica exerce uma influência muito grande sobre as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e, em consequência, sobre a eficiência nutricional, pois aumenta a capacidade de retenção de água e cátions, o que tem acentuada importância para solos tropicais, ou seja, todos os nutrientes citados anteriormente estão intimamente ligados aos teores de matéria orgânica presente no solo, o que implica em sugerir a introdução de fontes alternativas de matéria orgânica para suprir as carências evidenciadas em regiões com baixos teores de nutrientes.

(A)



(B)

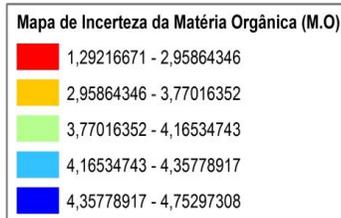
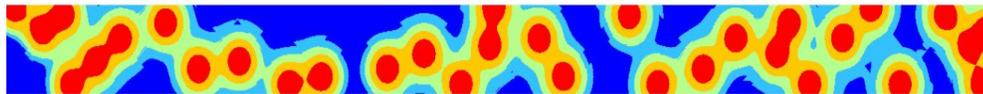
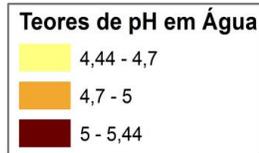


Figura 22. Mapa de predição dos teores de matéria orgânica (A) e mapa de incerteza da matéria orgânica (B).

Os valores de concentração do pH em água variaram entre 4,44 e 5,44 , podendo-se observar, no entanto, que a maior distribuição do nutriente na área está no intervalo de 4,44 a 4,95 e pequenas manchas com teores entre 4,95 e 5,44 (Figura 23 A) . Essa amplitude dos níveis de pH , de acordo com Ribeiro et al (1999), é considerada baixa no intervalo situado entre 4,44 a 5,44 , caracterizando solos de acidez elevada. Diversos trabalhos relacionados ao tema relatam que 75% dos solos da Amazônia são considerados de alta acidez, condicionando-os à necessidade de calagem quando se deseja obter melhores produtividades (CRAVO et al,2007) . O baixo pH, isoladamente, pode ser responsável por prejuízos diretos ao desenvolvimento das plantas em decorrência do excesso de H⁺ na solução do solo . O pH, indiretamente, influencia o desenvolvimento por interferir na disponibilidade de nutrientes no solo.

(A)



(B)

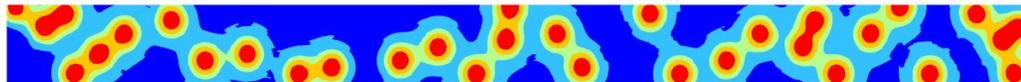


Figura 23. Mapa de predição dos teores de pH em água (A) e mapa de incerteza do pH em água (B)

5.2.4 Mapas de Predição e Incerteza dos Atributos Dendrométricos

Através dos dados dos semivariogramas ajustados foi realizada a krigagem ordinária para realizar as interpolações necessárias para a construção dos mapas da distribuição espacial dos atributos dendrométricos, bem como os mapas de incerteza quantificando o erro para cada região na superfície criada. Pelos mapas temáticos das variáveis dendrométricas (Figuras 24 a 26), pode-se observar a variabilidade espacial de acordo com sua distribuição na área.

Os valores de DAP variaram entre 0,039 e 0,11 metros no talhão estudado (Figura 24 A), alcançando um valor médio de 0,07 metros. Tais resultados diferem dos encontrados por Tonini, Costa e Schwengber (2009) quando avaliaram um plantio de *Tectona grandis* em Roraima com idade de 7 anos, encontrando média de DAP no valor de 0,09 metros, estando superior ao encontrado na área de estudo. Diversos autores,

entre eles, KEIDING (1985) e MACEDO et al., (2005), citam que as árvores de teca podem chegar até 1 metro de diâmetro sob condições favoráveis.

(A)



(B)



Figura 24. Mapa de predição do DAP (A) e mapa de incerteza do DAP (B).

Os valores de altura variaram entre 4,03 e 10,66 metros na área experimental (Figura 25 A), com média de 7 metros, valor este abaixo do encontrado por Tonini, Costa e Schwengber (2009) em um plantio de 7 anos de *Tectona grandis* no estado de Roraima, onde evidenciou um valor de 11,92 metros. Segundo Drescher (2004) e Alcantara (2009), em condições favoráveis, as árvores de teca podem alcançar alturas de até 40 metros.

(A)



(B)

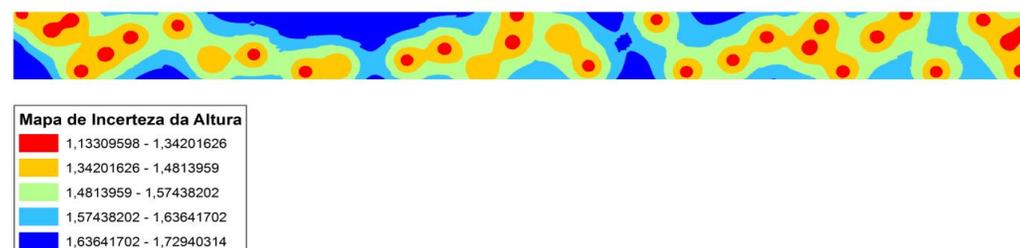
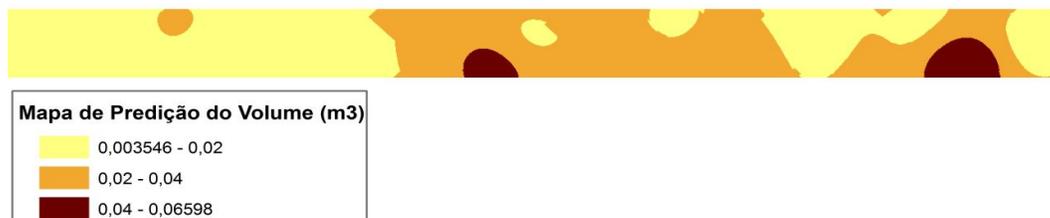


Figura 25. Mapa de predição da Altura (A) e mapa de incerteza da Altura (B).

O volume das árvores de *Tectona grandis* L. f. variaram entre $0,0035\text{m}^3$ e $0,066\text{m}^3$ (Figura 26 A), com média de $0,0193\text{ m}^3$ por parcela, sendo que Tonini, Costa e Schwengber (2009) evidenciaram em plantio de *Tectona grandis* em Roraima com 7 anos de idade, uma média de volume no valor de $0,031\text{m}^3$, o que mostra que os resultados evidenciados neste estudo estão bastante abaixo dos encontrados pelo referido autor.

(A)



(B)

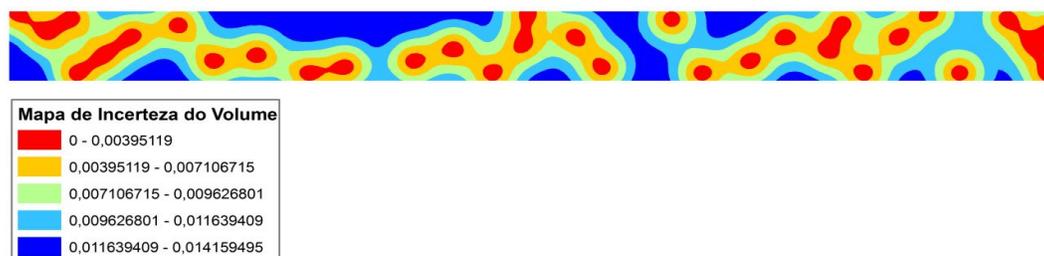


Figura 26. Mapa de predição do Volume (A) e mapa de incerteza do Volume (B)

5.3. Relação entre os Atributos Químicos do Solo e Atributos Dendrométricos em plantio de *Tectona grandis* L. f.

Observa-se uma grande amplitude nos atributos químicos estudados (Figura 27 A). Esta grande amplitude revela os problemas que podem ocorrer quando se usa a média dos valores para o manejo da fertilidade. Em alguns locais da área, a aplicação de fertilizante será inferior à dosagem necessária; em outros, a aplicação será condizente com as necessidades e, em outros, poderá haver aplicação excessiva.

Vale ressaltar que no povoamento de *Tectona grandis* L.F. não houve nenhuma prática de manejo como poda, desbaste, espaçamento adequado ou adubação desde que o povoamento foi estabelecido. Este trabalho ressalta a importância de se ter um manejo adequado, visto que geralmente o objetivo de um reflorestamento de teca é comercial, logo, se preza por uma uniformidade das variáveis dendrométricas, reduzindo custos e

resíduos na hora do beneficiamento da madeira e conseqüentemente aumentando-se o rendimento.

Para a altura, o mapa apresentou comportamento semelhante ao do DAP (Figura 27 B), as maiores alturas e DAP concentraram-se em uma faixa do talhão, o que ressalta a correlação entre DAP e altura dessa espécie; conseqüentemente o volume foi maior nessa faixa do talhão.

As regiões onde encontramos os maiores índices de DAP, altura e volume, foram as regiões que apresentaram menores teores de K, Ca, Mg, MO e pH mais ácido, o que pode sugerir que nestas regiões houve uma maior absorção de nutrientes pela teca e que isto acarretou seu maior desenvolvimento.

(A)



(B)



Classificação das Variáveis

	Valores baixos
	Valores Médios
	Valores Altos

Figura 27. Relação entre mapas de predição dos atributos químicos do solo (A) e dos dados dendrométricos (B).

Diversos autores (CHAVES; FONSECA, 1991 ; BARRA,1996 ; RIBEIRO, 2006; TONINI; COSTA; SCHWENGBER, 2009) informam que a teca é uma espécie calcícola e que apresenta melhor desenvolvimento com solos tendendo a neutralidade. Através da análise dos mapas de predição, verificamos uma notória semelhança na disposição das manchas do cálcio e do pH; nas regiões de pH mais ácidos tem-se a menor concentração de cálcio e nas regiões de pH mais alcalinos verificamos a maior concentração de cálcio, associados a estes teores está o desenvolvimento da teca na quadra selecionada, pois as regiões que apresentam os teores baixos de cálcio e pH mais ácido são as que possuem maior desenvolvimento, evidenciando o fato já mencionado de que nestas regiões houve a maior absorção de nutrientes.

A análise de correlação entre os mapas de variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e dendrométricos da área de estudo (Tabela 5), mostraram fracas correlações negativas entre os mesmos, o que isso pode ser justificado pela baixa fertilidade do solo. Resultado semelhante foi encontrado por Rufino, et al. (2006), em estudo realizado em plantios de eucalipto com 0,8 e 1,5 anos, respectivamente, foi verificado que o solo de ambos os plantios eram limitantes em quase todos os nutrientes, fato que não permitiu evidenciar a correlação da produtividade com algumas variáveis do solo isoladamente.

Tabela 5. Matriz de correlação entre os mapas dos atributos químicos do solo e dos atributos dendrométricos.

	K	Ca	Mg	M. O	pH H ₂ O	DAP	H	Vol
K	1,00000	0,24646	0,33770	0,50815	0,37538	-0,06637	-0,07552	-0,10733
Ca	0,24646	1,00000	0,56507	0,39332	0,80202	-0,39850	-0,43946	-0,40072
Mg	0,33770	0,56507	1,00000	0,27706	0,47241	-0,19682	-0,32669	-0,31819
M. O	0,50815	0,39332	0,27706	1,00000	0,53201	-0,12250	-0,15261	-0,25928
pH H ₂ O	0,37538	0,80202	0,47241	0,53201	1,00000	-0,36712	-0,28284	-0,29884
DAP	-0,06637	-0,39850	-0,19682	-0,12250	-0,36712	1,00000	0,88520	0,90786
H	-0,07552	-0,43946	-0,32669	-0,15261	-0,28284	0,88520	1,00000	0,85903
Vol	-0,10733	-0,40072	-0,31819	-0,25928	-0,29884	0,90786	0,85903	1,00000

K - Potássio; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio; M.O - Matéria Orgânica; DAP - Diâmetro a altura do peito; H - Altura e V - Volume.

Os baixos valores da fertilidade do solo podem estar diretamente relacionados ao fato de que na área não houve adubação de cobertura durante desenvolvimento do plantio, e sendo a Teca uma espécie que necessita de uma quantidade considerável de nutrientes, esta não apresentou um bom desenvolvimento silvicultural.

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho propiciou analisar a distribuição espacial dos atributos químicos do solo e dendrométricos avaliados em um plantio de *Tectona grandis*, podendo verificar o potencial produtivo de maneira heterogênea, de maneira que o crescimento e a os dados de produtividade puderam ser prognosticados.

Dentre as variáveis analisadas, os atributos químicos do solo: K, Ca, Mg, e Matéria Orgânica e os atributos dendrométricos DAP e Volume apresentam estrutura de dependência espacial forte, isto mostra que as estimativas destas variáveis considerando a componente espacial, independente do procedimento de amostragem trará otimização nas estimativas. Enquanto que, as variáveis pH em água e Altura apresentam estrutura de dependência espacial moderada, existindo caráter de continuidade espacial destas variáveis, porém com menor precisão nas estimativas em relação as que possuem forte dependência espacial.

As variáveis Al, H+Al e pH em KCl apresentaram efeito pepita puro, não sendo possível encontrar um ajuste de modelo teórico de semivariograma, indicando, portanto, a ausência total de dependência espacial para estas variáveis no solo da área experimental, neste caso a estatística clássica seria uma alternativa viável para sua representação;

As áreas com menores teores de K, Ca, Mg, Matéria Orgânica e pH mais baixo apresentaram um maior desenvolvimento das plantas de *Tectona grandis* L.f., o que é atribuído ao fato de que nestas áreas ocorreu maior absorção de nutrientes pela plantas.

A baixa correlação encontrada é devida à baixa qualidade do solo, o qual é limitante em quase todos os nutrientes, fato que não permitiu evidenciar a correlação entre os atributos químicos do solo e os atributos dendrométricos do plantio de *Tectona grandis* L. f.

REFERÊNCIAS

- ABIMCI, Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente **Estudo Setorial 2008**. Curitiba: ABIMCI, 2008.
- ABRAF, Associação Brasileira de Produtores de Floresta Plantadas. **Anuário Estatístico da ABRAF**: Ano base 2008. Brasília-DF: ABRAF, 2009. 120 p.
- ABRAF, Associação Brasileira de Produtores de Floresta Plantadas. **Anuário Estatístico da ABRAF**: Ano Base 2010. Brasília-DF: ABRAF, 2011. 130 p.
- ALCÂNTARA, B. K. Caracterização da diversidade genética de Teca (*Tectona grandis*) de diferentes procedências usando marcadores microssatélites. 2009. 93 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo: Ed. Unisinos, 2003. 165 p.
- ANGELI, A. *Tectona grandis* (Teca). **Departamento de Ciências Florestais - ESALQ/USP**. Atualizado em 05/5/2003. Disponível em: http://www.ipef.br/identificacao/tectona_grandis.asp. Acesso em: 20 de nov. de 2011.
- BARRA, O. S. V. Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L. f., *Bombacopsis quinatum* (jacq.) Dungand Y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. 1996. 147 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Conservação) - Centro Agrônomico Tropical de Investigacion Y Ensenanza, Turrialba, 1996.
- BARROSO, D. G.; FIGUEIREDO, F. A. M. M. A.; PEREIRA, R. C.; MENDONÇA, A. V. R.; SILVA, L. C. Diagnóstico de deficiências de macronutrientes em mudas de teca. **R. Árvore**, Viçosa, MG, v.29, n.5, p.671-679, ago., 2005.
- BEHLING, M. Nutrição, Partição de biomassa e crescimento de povoamentos de teca em Tangará da Serra - MT. 2009. 176 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- BRAGA, F. A. Uso da análise discriminante na identificação de características ambientais determinantes da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto. 1997. 65 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- BRANDELERO C.; ANTUNES, M; GIOTTO, E. Silvicultura de precisão: nova tecnologia para o desenvolvimento florestal. **R. Ambiência**, Guarapuvua, PR, v.3, n.2, p.269-281, Maio/Ago., 2007.

CAMARGO, E. C. G. Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (SPRING). 1997. 124 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- INPE, São José dos Campos, 1997.

CAMBARDELLA, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T.B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p.1501-1511, Sept/Oct. 1994.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 08, p. 1151-1159, Ago. 2002.

CARVALHO, M. S. **Manual de reflorestamento**. Belém, PA: Sagrada Família, 2006. 115 p.

CASTRO, F. da S. Zoneamento agroclimático para a cultura do Pinus no Estado do Espírito Santo. 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal)- Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

CHAVES, E.; FONSECA, W. **Tectona grandis L.f.**: Especie de arbol de uso multiple en America Central. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 1991. 47 p.

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

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n.6, p. 1013-1021, Nov/Dez. 2004.

CORDERO, L. D. F.; KANNINEN, M. **Hacia el manejo intensivo de la teca (*Tectona grandis*) en Centroamérica**. 2003. 10 p. Disponível em: <www.una.ac.cr/inis/docs/teca/temas/PerezyKanninen1.pdf>. Acesso em: 17 Nov. 2011.

CRAVO, M. S da.; BRASIL, E. M. Recomendação de adubação e calagem para os solos. In: CRAVO, M. S da.; VIÉGAS, I. de J. M.; BRASIL, E. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. p.262.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley ; Sons, 1993.

DELGADO, L. G. M.; GOMES, J. E.; ARAUJO, H. B. Análise do sistema de produção de teca (*Tectona grandis* L.f.) no Brasil. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, SP, n. 1, fev. 2008.

DOURADO NETO, D. Variabilidade espacial das alturas de chuva e irrigação e de potenciais da solução do solo. 1989. 180 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

DRESCHER, R. Crescimento e produção de *Tectona grandis* LINN f., em povoamentos jovens de duas regiões do Estado de Mato Grosso – Brasil. 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

DUARTE, J. B. Sobre o emprego e a análise estatística do delineamento em blocos aumentados no melhoramento genético vegetal. 2000. 293 p. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – ESALQ-USP, Piracicaba, 2000.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Notícias de teca** (*Tectona grandis*). Atualizado em 16/08/2007. Disponível em: <<http://www.cpafac.embrapa.br/noticias/teca.htm>>. Acesso em: 04 dez. 2011.

ENGLUND, E.; SPARKS, A. **Geo-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software)**. Las Vegas: U.S. Environmental Protection Agency, 1988. v. 1.

FIGUEIREDO, E. O. **Reflorestamento com teca** (*Tectona grandis*) **no Acre**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2001. 28 p. (Embrapa Acre. Documentos, 65).

FIGUEIREDO, E. O. **Teca** (*Tectona grandis* L.f.): produção de mudas tipo toco. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2005. 22 p. (Embrapa Acre. Documentos, 101).

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, L. C.; BARBOSA, L. K. F.; **Teca** (*Tectona grandis* L.f.): Principais perguntas do futuro empreendedor florestal. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2005, 89 p. (Embrapa Acre. Documentos, 97).

FINGER, Z; FINGER, F. A.; DRESCHER, R. **Teca** (*Tectona grandis* L.f.): plante esta idéia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL, 1., 2001, Santa Maria, RS. **Anais...**Santa Maria: UFSM, 2001. 1 CD-ROM.

GALLOWAY, G.; UGALDE, L.; VÁSQUEZ, W. Importance of density reductions in tropical plantations: Experiences in Central America. **Forests, Trees and Livelihoods**, Aboyné, v.11, n.3, p.217-232, 2001.

GANDAH, M.; STEIN, A.; BROUWER, J.; BOUMA, J. Dynamics of spatial variability of millet growth and yields at three sites in Niger, west Africa and implications for precision agriculture research. **Agricultural Systems**, Amsterdam, NL, v. 63, n. 2, p. 123-140, jan. 2000.

GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação. 1997. 118 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

GONÇALVES, J. L. M.; SILVA, P. H. M. **Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies nativas.** [2. ed. atual.]. Piracicaba: IPEF, 2005.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation.** Oxford: Oxford University Press, 1997.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 78 p. v. 1.

HAKAMADA, R. E.; STAPE, J. L. **Logística das Atividades de Silvicultura de Precisão na Aracruz Celulose** (Regional de São Mateus-ES). Estágio Profissionalizante em Engenharia Florestal. ESALQ/USP, 2004.

HAWKINS, D. M.; CRESSIE, N. Robust kriging - a proposal. **Mathematical Geology**, Alberta, CA, v.16, n.1, p.3-19, 1984.

HUIJBREGTS, C. J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: DAVIS, J. C.; McCULLAGH, M. J. (Ed.). **Display and analysis of spatial data.** New York: John Wiley, 1975. p. 38-53.

IDESP. Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará. **Estatística Municipal:** Abaetetuba. Belém: IDESP, 2011.

ISSAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **A Introduction to applied geostatistics.** Oxford: University Press, 1989. 561 p.

KEIDING, H. Teak: *Tectona grandis* In: LINN, F. **Series of Technical Notes.** Humlebaek: Danida Forest Seed Centre, 1985. 21 p.

KIM, Y. C. **Advanced geostatistics for highly skewed data.** Arizona: Department of Mining and Geological Engineering, The University of Arizona, 1988. p.128.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy**, Johannesburg, v. 52, p.119-139, 1951.

KRISHNAPILLAY, B. Silvicultura y ordenación de plantaciones de teca. **Unasyva**, n. 51, v. 201, p. 14-21, 2000.

LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão:** fundamentos e aplicações. Guaíba: Agropecuária, 2001. 118p.

LANDIM, P. M. B. **Análise Estatística de Dados Geológicos.** Rio Claro: Editora UNESP, 1997.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. **Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. Rio Claro: IGCE/UNESP, 2002. Disponível em: < <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html> >. Acesso em: 25 de out. de 2011.

LITTLE, T.M. ; HILLS, F.J. **Agricultural experimentation**. New York, John Wiley ; Sons, 1978. 350p.

LORENZI, H. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003. 368 p.

LUNZ, A. M.; PERES FILHO, O.; CARDOSO, J. E. F.; SILVA, J. L. S. Monitoramento de *Sinoxylon conigerum* (Gerstäcker, 1885) (Coleoptera: Bostrichidae) em Madeira de Teca (*Tectona grandis* L. f.) no Estado do Pará. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2010. 7 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado Técnico, 224).

MACEDO, R. L. G.; GOMES, J. E.; VENTURIN, N.; SALGADO, B. G. Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L.f (Teca) em diferentes espaçamentos no município de Paracatu, MG. **Revista Cerne**, Lavras, v.11 n.1 Jan./Mar. 2005.

MACHADO, L. O.; LANA, A. M. Q.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.3, p.591-599, Mai./Jun. 2007.

MAGALHÃES, A. F. J. **Importância da Análise Química de solo**. Bahia: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2008.

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

MATHERON, G. **Les Variables Régionalisées et leur Estimation**. Paris: Masson et Cie, Éditeurs, 1965.

MALAVOLTA, E; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. DE. **Avaliação do Estado Nutricional de Plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fosfato, 1997. 319 p.

MALDONADO, G.; LOUPPE, D. Desafios para la teca em Cote d'Ivoire. **Unasylla**, Roma, v.51, n.201, p.36-44, 2000.

MALINOVSKI, R. A. Otimização da distância de extração de madeira com Forwarder. 2007. 94 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrárias, Botucatu, SP, 2007.

MELLO, J. M. Geoestatística aplicada ao inventário florestal. 2004. 110 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais, Silvicultura e Manejo Florestal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 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, v.24, n.1, p.55 - 62, Mar., 2000.

MINATEL, R.; STAPE, J. L. **Avaliação da Qualidade Operacional das Atividades de Silvicultura da Aracruz Celulose em São Mateus – ES**. Estágio Vivencial em Engenharia Florestal – ESALQ/USP. Piracicaba, 2005.

MOLIN, J. P. **Agricultura de Precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: O autor, 2003. 83 p.

NEMER, T. C. Dinâmica da população de *Eschweleira odora* (POEPP) MIERS (MATAMATA-BRANCO) durante três anos após a exploração seletiva de uma floresta de terra firme, Moju-PA-Brasil. 2003. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)- Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, 2003.

NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. **Applied Linear Statistical Models**. USA: 3rd ed. Homewood, R. D. Irwin, 1990. 1181 p

NOVAES FILHO, J. P. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, p. 91-100, 2007.

ORTIZ, J. L. Silvicultura de Precisão: relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e relevo. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. Piracicaba, 2004. Anais... Piracicaba, 2004

ORTIZ, J. L.; VETTORAZZI, C. A.; COUTO, H. T. Z; GONÇALVES, J. L. M. Relações espaciais entre o potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.72, p.67-79, dez. 2006.

PALLETT, R. N.; SALE, G. Operational gain: measuring the capture of genetic gain. **Southern African Forestry Journal**, Pretoria, SA , n.195, p.33-8, out. 2002.

PANNATIER, Y. **VarioWin**: Software for spatial data analysis in 2D. New York: Springer-Verlag, 1996.

PANDEY, D.; BROWN, C. La teca: una visión global. **Unasyuva**, Roma, v.51, n.201, p. 1-18, 2000.

PASSOS, C. A. M.; BUFULIN, L.; GONÇALVES, M. R. Avaliação silvicultural de *Tectona grandis* L.f. em Cáceres – MT. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v.16, n.2, p.225-232, abr. 2006.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**, 14 ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477 p.

PIRES, C. A. F.; STRIEDER, A. J. Modelagem geoestatística de dados geofísicos, aplicada a pesquisa de Au no prospecto Volta Grande (Complexo intrusivo Lavras do Sul, RS, Brasil). **Geomática**, Santa Maria, v.1, n.1, p. 43-55, mar. 2006.

QUEIROZ, J. C. B. Use of geostatistics to quantify the risk of contamination by heavy metals in the port Santana-Amapá. 2003. 200 p. Tese (Doutorado em...)- Universidade Estadual Paulista. Instituto de Ciências Exatas, Rio Claro, São Paulo. 2003.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V. V. H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa, MG: editora, 1999. 359 p.

RIBEIRO, F. A.; MACEDO, R. L. G; VENTURIM, N.; Morais, V. M.; GOMES, J. E.; YOSHITAMI JUNIOR, M. Efeitos da adubação de plantio sobre o estabelecimento de mudas de *Tectona grandis* L.f. (TECA). **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, SP, v. 07, 2006.

RIPPLE, W. J. **The GIS applications book: examples in natural resources**. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, 380 p.

ROBERTSON, G. P. **GS⁺: Geostatistics for the environmental sciences – GS⁺ User's Guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.

ROCHA, R. B.; VIEIRA, A. H.; SPINELLI, V. M.; VIEIRA, J. R. Caracterização de fatores que afetam a germinação de teca (*Tectona grandis*): temperatura e escarificação. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.2, p.205-212, jul. 2011.

RUFINO, C. M. T.; THIERSCH, R. C.; FERREIRA, O. S.; JUNIOR, K. H.; FAIS, D. O uso da geoestatística no Estudo da Relação entre Variáveis Dendométricas de Povoamento de Eucalyptus sp. e atributos do solo. **Revista Ambiência**, Guarapuava-PR, v.2, n.1, p.83-93,2006.

SANCHEZ, R.B.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T. ; SOUZA, Z.M. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 09, n. 04, p.489-495, Out./Dez. 2005.

SILVA JUNIOR, R. L. Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com mapas de produtividade. 2001. 132 p. Tese (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SOARES, N. S.; SILVA, F. L. da; SILVA, M. L. da; SILVA JÚNIOR, A. G. da; LÍRIO, V. S. Viabilidade da implantação de um contrato de comercialização futura da madeira de reflorestamento no Brasil. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.2, p.307-314, mar/abr. 2007.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: Editora IST Press, 2000.

STAPE, J. L. **Improvements and Quality Control of Silviculture Operations in Brazil**. Silvotecna, 19. CORMA, Concepción, Chile. 2004.

STARKS, T. H.; FANG, J. H. **The effect of drift on the experimental semivariogram**. Mathematical Geology, v. 14, n. 04, p.09-319, 1982.

TAYLOR, S. E.; MCDONALD, T. P.; FULTON, J. P.; SHAW, J. N.; CORLEY, F. W.; BRODBECK, C. J. **Precision forestry in the southeast U.S.** In: INTERNATIONAL PRECISION FORESTRY SYMPOSIUM, 3., 2006, South Africa Proceedings. 2006. p. 397-414.

TEWARI, D. N. **Monograph on Teak (*Tectona grandis* Linn. F.)**. Dehra Dun – India: International Book Distributors., 1999. 478 p.

TOBLER, W. R. **Cellular Geography**. In: Gale, S.; Olsson, G. ed. Philosophy in Geography. Dordrecht, The Netherlands: D. Reidel, 1979. p. 279-386.

TONINI, H.; COSTA, M. C. G.; SCHWENGBER, L. A. M. Crescimento de teca (*Tectona Grandis*) em Reflorestamento na Amazônia Setentrional. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n 59, p.05-14, jul./dez. 2009.

TROPICAL FLORA – Empresa de produção de mudas e reflorestadora. Atualizado em 12/07/2008. Disponível em: <http://www.tropicalflora.com.br/tropicalflora/pt/index.php>. Acesso em: 09 dez. 2011.

TSUKAMOTO FILHO, A. A.; SILVA, M. L.; COUTO, L.; MULLER; M. D. Análise econômica de um plantio de teca submetido a desbastes. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.27, n.4, p.487-494, 2003.

UGALDE, L. ; PÉREZ, O. **Mean annual volume increment of selected industrial forest**. FAO, working paper FP/1. Atualizado em 18/09/2001. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 22 set.2011.

VEIT, L. F. Plante seu fundo de aposentadoria. **Revista Silvicultura**, São Paulo, v. 17, n. 68, p. 20-22, 1996.

VETTORAZZI, C. A. ; FERRAZ, S. F. B. **Silvicultura de precisão: uma nova perspectiva para o gerenciamento de atividades florestais**. In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P.; QUEIROZ, D. M. Agricultura de precisão. Viçosa: Editora UFV, 2000. p.65-75.

VIEIRA, A. H; MARTINS, E.P; PEQUENO, P.L. L; LOCATELLI, M. Aspectos silviculturais da teca em Rondônia. Porto Velho/RO: Embrapa CPAF – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Documentos 68), p.8, agosto, 2002

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2000. p.1-54.

VIEIRA, S. R. **Curso de Geoestatística aplicada à ciência, fitotecnia e entomologia**. Jaboticabal: UNESP-FCAV, 1997. 77p.

VIEIRA, S. R. **Curso de atualização em conservação do solo: uso de geoestatística**. Campinas: Seção de Conservação do Solo, Instituto Agrônomo de Campinas, 1995. 2v.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. **Spatial variability of field-measured infiltration rate**. Soil Science Society of America Journal, v.45, n.6, p.1040-1048, 1981.

VRECHI, A. **Silvicultura de Precisão: Oportunidade de Ganhos em Operações Silviculturais**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP. Piracicaba, 2008, 87p.

ZIMBACK, C. R. L. **Geoestatística**. Curso de Extensão Universitária Botucatu: UNESP, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2003. 25 p. Apostila.

ANEXO
ANEXO I
VALIDAÇÃO CRUZADA - POTÁSSIO

Source ID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd Error	NormValue
1	0,06	0,032421	-0,027579	0,018015	-1,530886	-1,229859
2	0,05	0,022842	-0,027158	0,016691	-1,627126	-1,67594
3	0,04	0,024911	-0,015089	0,016986	-0,888335	-0,724514
4	0,02	0,040539	0,020539	0,016015	1,282459	1,229859
5	0,04	0,027817	-0,012183	0,017732	-0,687072	-0,445097
6	0,02	0,021805	0,001805	0,016834	0,107224	0,039176
7	0,02	0,029235	0,009235	0,017287	0,534223	0,445097
8	0,02	0,031508	0,011508	0,016327	0,704841	0,626099
9	0,05	0,033221	-0,016779	0,015893	-1,055753	-0,946782
10	0,02	0,02	0	0,016287	0	-0,11777
11	0,04	0,021717	-0,018283	0,016578	-1,102869	-1,077516
12	0,04	0,025585	-0,014415	0,016882	-0,853884	-0,626099
13	0,02	0,028308	0,008308	0,017168	0,483918	0,36013
14	0,01	0,038892	0,028892	0,016782	1,721558	2,153875
15	0,01	0,036544	0,026544	0,016245	1,633981	1,67594
16	0,02	0,021704	0,001704	0,015191	0,11218	0,11777
17	0,02	0,034407	0,014407	0,017087	0,843195	0,724514
18	0,02	0,034384	0,014384	0,016061	0,895606	0,946782
19	0,03	0,029494	-0,000506	0,016019	-0,031563	-0,27769
20	0,03	0,029541	-0,000459	0,017424	-0,026335	-0,197099
21	0,01	0,030617	0,020617	0,017136	1,203092	1,077516
22	0,03	0,037602	0,007602	0,017506	0,43425	0,27769
23	0,04	0,02701	-0,01299	0,017216	-0,754541	-0,53341
24	0,06	0,032033	-0,027967	0,01723	-1,623209	-1,417797
25	0,01	0,034853	0,024853	0,017313	1,435496	1,417797
26	0,02	0,034763	0,014763	0,01714	0,861325	0,830511
27	0,04	0,03783	-0,00217	0,01707	-0,1271	-0,36013
28	0,04	0,023844	-0,016156	0,016944	-0,953536	-0,830511
29	0,03	0,031501	0,001501	0,017394	0,086276	-0,039176
30	0,08	0,017856	-0,062144	0,016912	-3,674583	-2,153875
31	0,02	0,032275	0,012275	0,017428	0,704318	0,53341
32	0,02	0,023579	0,003579	0,017068	0,209716	0,197099

VALIDAÇÃO CRUZADA - CÁLCIO

Source ID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd Error	Norm Value
1	0,58	0,272248	-0,307752	0,160745	-1,914531	-1,417797
2	0,49	0,364812	-0,125188	0,148614	-0,84237	-0,724514
3	0,49	0,184927	-0,305073	0,151565	-2,012822	-1,67594
4	0,33	0,342333	0,012333	0,141944	0,086886	0,11777
5	0,16	0,34635	0,18635	0,158519	1,175573	0,946782
6	0,08	0,284702	0,204702	0,150264	1,362282	1,077516
7	0,25	0,476108	0,226108	0,154406	1,46437	1,417797
8	0,08	0,314972	0,234972	0,145125	1,619097	2,153875
9	0,25	0,381123	0,131123	0,140344	0,934298	0,53341
10	0,25	0,225521	-0,024479	0,143578	-0,170492	-0,27769
11	0,66	0,287001	-0,372999	0,14755	-2,527943	-2,153875
12	0,49	0,311788	-0,178212	0,150569	-1,183591	-1,077516
13	0,49	0,238471	-0,251529	0,153158	-1,642285	-1,229859
14	0,16	0,303474	0,143474	0,149663	0,958646	0,626099
15	0,41	0,386778	-0,023222	0,144466	-0,160741	-0,197099
16	0,33	0,213226	-0,116774	0,133497	-0,874736	-0,830511
17	0,25	0,372665	0,122665	0,152291	0,805465	0,445097
18	0,33	0,219389	-0,110611	0,142465	-0,776404	-0,626099
19	0,25	0,391035	0,141035	0,142015	0,993099	0,724514
20	0,49	0,382016	-0,107984	0,155536	-0,69427	-0,53341
21	0,41	0,418136	0,008136	0,152924	0,053202	0,039176
22	0,41	0,331841	-0,078159	0,15625	-0,50022	-0,36013
23	0,16	0,369439	0,209439	0,153562	1,363872	1,229859
24	0,33	0,428362	0,098362	0,153477	0,640891	0,36013
25	0,16	0,397308	0,237308	0,154535	1,535627	1,67594
26	0,25	0,340567	0,090567	0,152687	0,593153	0,27769
27	0,49	0,398801	-0,091199	0,151985	-0,600051	-0,445097
28	0,33	0,355967	0,025967	0,151246	0,171686	0,197099
29	0,41	0,26852	-0,14148	0,155376	-0,910568	-0,946782
30	0,25	0,230912	-0,019088	0,150968	-0,126438	-0,11777
31	0,25	0,245194	-0,004806	0,155859	-0,030833	-0,039176
32	0,16	0,328483	0,168483	0,15382	1,095324	0,830511

VALIDAÇÃO CRUZADA - MAGNÉSIO

Source_ID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd_Error	Norm Value
1	0,58	0,220927	-0,359073	0,121888	-2,945925	-2,153875
2	0,33	0,248496	-0,081504	0,11254	-0,724217	-0,830511
3	0,29	0,18912	-0,10088	0,11317	-0,8914	-0,946782
4	0,16	0,314626	0,154626	0,110057	1,404966	1,417797
5	0,25	0,28194	0,03194	0,114931	0,277907	0,53341
6	0,16	0,157546	-0,002454	0,11364	-0,021596	-0,27769
7	0,25	0,296934	0,046934	0,11505	0,407942	0,830511
8	0,33	0,23021	-0,09979	0,111662	-0,893685	-1,077516
9	0,16	0,310377	0,150377	0,112441	1,337382	1,229859
10	0,08	0,16	0,08	0,111729	0,716017	1,077516
11	0,49	0,228557	-0,261443	0,116079	-2,252289	-1,67594
12	0,41	0,265495	-0,144505	0,114909	-1,257559	-1,417797
13	0,25	0,269052	0,019052	0,117569	0,162051	0,11777
14	0,08	0,255262	0,175262	0,115006	1,523936	1,67594
15	0,25	0,264796	0,014796	0,112476	0,131545	-0,039176
16	0,16	0,147157	-0,012843	0,106742	-0,120316	-0,445097
17	0,08	0,269849	0,189849	0,117057	1,62185	2,153875
18	0,25	0,2404	-0,0096	0,112866	-0,085059	-0,36013
19	0,25	0,296119	0,046119	0,113432	0,406577	0,724514
20	0,25	0,26966	0,01966	0,117318	0,167583	0,197099
21	0,25	0,296488	0,046488	0,114979	0,404318	0,626099
22	0,25	0,225635	-0,024365	0,117242	-0,207816	-0,53341
23	0,25	0,25	0	0,117149	0	-0,197099
24	0,33	0,208791	-0,121209	0,116641	-1,039166	-1,229859
25	0,25	0,298863	0,048863	0,114921	0,425186	0,946782
26	0,33	0,26872	-0,06128	0,117183	-0,522939	-0,724514
27	0,25	0,271645	0,021645	0,116617	0,185607	0,27769
28	0,25	0,26098	0,01098	0,113354	0,096862	-0,11777
29	0,25	0,281902	0,031902	0,114911	0,277623	0,445097
30	0,25	0,202816	-0,047184	0,113428	-0,41598	-0,626099
31	0,16	0,183697	0,023697	0,113434	0,20891	0,36013
32	0,16	0,178275	0,018275	0,117883	0,155028	0,039176

VALIDAÇÃO CRUZADA – MATÉRIA ORGÂNICA

Source ID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd Error	Norm Value
1	24,25	20,776737	-3,473263	4,721578	-0,735615	-0,724514
2	26,87	22,970938	-3,899062	4,328798	-0,900726	-0,946782
3	32,77	21,640146	-11,129854	4,386101	-2,537528	-2,153875
4	20,31	23,229423	2,919423	4,156142	0,702436	0,53341
5	22,94	24,21593	1,27593	4,47429	0,285169	0,11777
6	24,9	21,906013	-2,993987	4,406266	-0,679484	-0,626099
7	22,94	24,210373	1,270373	4,477686	0,283712	0,039176
8	20,97	24,395627	3,425627	4,261958	0,803768	0,626099
9	22,94	21,790591	-1,149409	4,185087	-0,274644	-0,27769
10	20,31	21,664258	1,354258	4,134136	0,327579	0,36013
11	26,21	22,275325	-3,934675	4,43981	-0,886226	-0,830511
12	29,49	21,856305	-7,633695	4,455714	-1,713237	-1,417797
13	26,21	20,930561	-5,279439	4,562854	-1,157047	-1,229859
14	22,94	23,044285	0,104285	4,45892	0,023388	-0,11777
15	20,31	24,556775	4,246775	4,315861	0,983992	0,946782
16	21,63	21,440348	-0,189652	3,90309	-0,04859	-0,197099
17	22,94	24,3912	1,4512	4,525245	0,32069	0,27769
18	19,66	23,613929	3,953929	4,279603	0,923901	0,724514
19	24,9	22,383465	-2,516535	4,297666	-0,585559	-0,445097
20	22,94	25,624176	2,684176	4,556682	0,589064	0,445097
21	19,66	24,834162	5,174162	4,465644	1,15866	1,417797
22	24,25	25,667639	1,417639	4,548737	0,311655	0,197099
23	26,21	21,353559	-4,856441	4,537839	-1,07021	-1,077516
24	33,42	24,649365	-8,770635	4,490486	-1,953159	-1,67594
25	22,94	23,344978	0,404978	4,460309	0,090796	-0,039176
26	19	23,81366	4,81366	4,5175	1,065558	1,077516
27	27,52	25,704029	-1,815971	4,486567	-0,404757	-0,36013
28	19,66	24,397486	4,737486	4,404275	1,075656	1,229859
29	16,38	25,549624	9,169624	4,468725	2,051955	1,67594
30	24,25	21,648904	-2,601096	4,406643	-0,590267	-0,53341
31	15,07	24,212863	9,142863	4,421664	2,067743	2,153875
32	18,35	22,624496	4,274496	4,55122	0,939198	0,830511

VALIDAÇÃO CRUZADA – pH em Água

Source ID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd Error	Norm Value
1	5,24	4,895831	-0,344169	0,261307	-1,317108	-1,417797
2	5,23	4,985368	-0,244632	0,241528	-1,012854	-0,946782
3	5,21	4,766932	-0,443068	0,243138	-1,822289	-1,67594
4	4,91	5,000316	0,090316	0,236892	0,381255	0,27769
5	4,78	4,973746	0,193746	0,247247	0,783615	0,830511
6	5,11	4,807409	-0,302591	0,243911	-1,240581	-1,229859
7	4,59	5,195222	0,605222	0,247433	2,446001	2,153875
8	4,53	4,93714	0,40714	0,239666	1,698778	1,417797
9	4,91	5,015819	0,105819	0,241434	0,438292	0,445097
10	4,77	4,918433	0,148433	0,243177	0,61039	0,724514
11	5,44	4,902805	-0,537195	0,248782	-2,1593	-2,153875
12	5,08	4,942681	-0,137319	0,246864	-0,556253	-0,724514
13	4,99	4,863884	-0,126116	0,252514	-0,499441	-0,445097
14	4,44	4,891106	0,451106	0,247027	1,826141	1,67594
15	4,96	5,043734	0,083734	0,241206	0,347149	0,197099
16	4,92	4,883079	-0,036921	0,230974	-0,159851	-0,039176
17	4,73	5,096322	0,366322	0,251281	1,457815	1,229859
18	5,02	4,752279	-0,267721	0,241814	-1,107134	-1,077516
19	5,08	4,970569	-0,109431	0,242585	-0,451106	-0,27769
20	5,21	5,003567	-0,206433	0,252172	-0,81862	-0,830511
21	4,99	5,112869	0,122869	0,247128	0,497187	0,626099
22	5,18	5,05013	-0,12987	0,25194	-0,51548	-0,53341
23	5,04	4,907779	-0,132221	0,251621	-0,525474	-0,626099
24	5,19	5,102274	-0,087726	0,250243	-0,350565	-0,197099
25	4,92	4,976697	0,056697	0,246964	0,229577	0,11777
26	4,87	5,090357	0,220357	0,251356	0,876674	1,077516
27	5,26	5,144546	-0,115454	0,25014	-0,461557	-0,36013
28	5,05	5,013771	-0,036229	0,243669	-0,148681	0,039176
29	4,84	4,961806	0,121806	0,247119	0,492903	0,53341
30	4,87	4,813894	-0,056106	0,243778	-0,230153	-0,11777
31	4,78	4,878164	0,098164	0,2441	0,402146	0,36013
32	4,72	4,927766	0,207766	0,252459	0,822971	0,946782

VALIDAÇÃO CRUZADA – DAP

Source ID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd Error	NormValue
1	0,067348	0,04374	-0,023608	0,01523	-1,550079	-1,229859
2	0,081299	0,081422	0,000123	0,013439	0,009133	0,11777
3	0,072205	0,081029	0,008824	0,014385	0,613373	0,626099
4	0,061229	0,045566	-0,015663	0,011654	-1,344068	-1,077516
5	0,075385	0,083719	0,008334	0,017529	0,475471	0,445097
6	0,073346	0,060942	-0,012404	0,013611	-0,911368	-0,724514
7	0,082407	0,059115	-0,023292	0,014394	-1,618141	-1,67594
8	0,078812	0,07141	-0,007402	0,012436	-0,595207	-0,53341
9	0,039275	0,064615	0,02534	0,01031	2,457835	2,153875
10	0,058747	0,053554	-0,005193	0,011773	-0,441124	-0,27769
11	0,066083	0,063731	-0,002352	0,011761	-0,199988	-0,039176
12	0,087125	0,080989	-0,006136	0,013168	-0,466002	-0,36013
13	0,073418	0,077995	0,004577	0,013025	0,35141	0,36013
14	0,076237	0,083086	0,006849	0,012543	0,546047	0,53341
15	0,080831	0,090612	0,009781	0,011366	0,860583	0,946782
16	0,043951	0,064723	0,020772	0,009528	2,1801	1,67594
17	0,090571	0,090726	0,000155	0,012983	0,011903	0,197099
18	0,069599	0,080535	0,010936	0,010763	1,016031	1,229859
19	0,051709	0,065172	0,013463	0,010253	1,31301	1,417797
20	0,04032	0,053531	0,013211	0,013949	0,947103	1,077516
21	0,047205	0,057727	0,010522	0,013824	0,76115	0,830511
22	0,080965	0,079812	-0,001153	0,014476	-0,079626	0,039176
23	0,086882	0,079345	-0,007537	0,013326	-0,565572	-0,445097
24	0,059108	0,067889	0,008781	0,013567	0,647257	0,724514
25	0,083518	0,084889	0,001371	0,015054	0,091093	0,27769
26	0,067384	0,046863	-0,020521	0,013205	-1,554113	-1,417797
27	0,061377	0,051859	-0,009518	0,012836	-0,741506	-0,626099
28	0,102859	0,085219	-0,01764	0,013763	-1,28172	-0,946782
29	0,086816	0,083699	-0,003117	0,01532	-0,203436	-0,11777
30	0,088959	0,076015	-0,012944	0,014019	-0,923322	-0,830511
31	0,113361	0,071973	-0,041388	0,017026	-2,430843	-2,153875
32	0,062464	0,05706	-0,005404	0,014027	-0,385245	-0,197099

VALIDAÇÃO CRUZADA - ALTURA

Source ID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd Error	NormValue
1	5,791667	5,81482	0,023153	1,755901	0,013186	-0,197099
2	7,42	8,161092	0,741092	1,630837	0,454424	0,36013
3	6,533333	7,540589	1,007256	1,656186	0,608178	0,830511
4	5,411765	5,654182	0,242417	1,569702	0,154435	-0,039176
5	6,864706	7,855937	0,991231	1,729043	0,573283	0,724514
6	6,333333	7,579438	1,246105	1,63851	0,760511	1,229859
7	6,941176	5,348917	-1,592259	1,683035	-0,946064	-0,946782
8	5,905882	6,78093	0,875048	1,595952	0,548292	0,53341
9	4,030769	6,121234	2,090465	1,552581	1,346446	2,153875
10	6,790909	7,019982	0,229073	1,606112	0,142626	-0,11777
11	6,033333	5,955152	-0,078181	1,609136	-0,048586	-0,36013
12	6,941176	7,853557	0,912381	1,643775	0,555052	0,626099
13	6,192857	7,232589	1,039732	1,670002	0,622593	0,946782
14	7,044444	7,462035	0,417591	1,632463	0,255804	0,11777
15	7,606667	8,312943	0,706276	1,58541	0,445485	0,27769
16	6,642857	7,449006	0,806149	1,502097	0,536683	0,445097
17	8,635294	8,326962	-0,308332	1,664535	-0,185236	-0,445097
18	5,34	7,120618	1,780618	1,571218	1,133272	1,67594
19	5,477778	6,626814	1,149036	1,567843	0,732877	1,077516
20	4,105556	5,889529	1,783973	1,695382	1,052254	1,417797
21	4,994118	5,588175	0,594057	1,669164	0,355901	0,197099
22	8,364706	7,884322	-0,480384	1,704772	-0,281788	-0,626099
23	9,270588	6,728153	-2,542435	1,675892	-1,517064	-1,417797
24	6,25625	6,611363	0,355113	1,681541	0,211183	0,039176
25	8,725	7,322763	-1,402237	1,688088	-0,830666	-0,830511
26	8,71875	5,225849	-3,492901	1,671284	-2,08995	-2,153875
27	5,909091	5,884072	-0,025019	1,666002	-0,015017	-0,27769
28	10,18	8,015924	-2,164076	1,650188	-1,311412	-1,229859
29	8,106667	7,735816	-0,370851	1,694758	-0,218822	-0,53341
30	8,586667	6,815097	-1,77157	1,647313	-1,07543	-1,077516
31	10,6625	7,252162	-3,410338	1,696839	-2,009818	-1,67594
32	8,376923	7,369031	-1,007892	1,664405	-0,605557	-0,724514

VALIDAÇÃO CRUZADA - VOLUME

Source ID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd_Error	Norm Value
1	0,012048	0,007964	-0,004084	0,013093	-0,311893	-0,53341
2	0,022411	0,022881	0,00047	0,011636	0,040409	-0,039176
3	0,016674	0,024821	0,008147	0,012639	0,644582	0,830511
4	0,012525	0,006205	-0,00632	0,009853	-0,641432	-0,830511
5	0,017815	0,024308	0,006493	0,014035	0,462649	0,53341
6	0,019197	0,019626	0,000429	0,012369	0,034646	-0,11777
7	0,022499	0,007964	-0,014535	0,013207	-1,100592	-1,417797
8	0,017094	0,014908	-0,002186	0,010867	-0,20114	-0,27769
9	0,003966	0,01327	0,009304	0,008891	1,046501	2,153875
10	0,01206	0,007937	-0,004123	0,009374	-0,439817	-0,724514
11	0,010973	0,01167	0,000697	0,011247	0,061954	0,039176
12	0,022554	0,02413	0,001576	0,012379	0,127313	0,11777
13	0,015604	0,021646	0,006042	0,012541	0,481788	0,724514
14	0,016776	0,026906	0,01013	0,01216	0,833071	1,077516
15	0,021046	0,030466	0,00942	0,01084	0,868962	1,417797
16	0,005962	0,013644	0,007682	0,007685	0,999566	1,67594
17	0,032451	0,02992	-0,002531	0,012287	-0,206012	-0,36013
18	0,011545	0,01993	0,008385	0,010009	0,837693	1,229859
19	0,007249	0,014324	0,007075	0,009507	0,744178	0,946782
20	0,003546	0,009668	0,006122	0,013086	0,467857	0,626099
21	0,005296	0,010674	0,005378	0,012754	0,42166	0,445097
22	0,023549	0,026713	0,003164	0,013111	0,241333	0,27769
23	0,029817	0,019539	-0,010278	0,012662	-0,811748	-1,077516
24	0,009687	0,014088	0,004401	0,012231	0,359823	0,36013
25	0,027129	0,022373	-0,004756	0,012981	-0,3664	-0,626099
26	0,017778	0,006346	-0,011432	0,011814	-0,967724	-1,229859
27	0,009377	0,009654	0,000277	0,01194	0,023171	-0,197099
28	0,049412	0,026017	-0,023395	0,012619	-1,85402	-1,67594
29	0,027194	0,023845	-0,003349	0,01342	-0,249548	-0,445097
30	0,030058	0,021782	-0,008276	0,012671	-0,65313	-0,946782
31	0,06598	0,019151	-0,046829	0,013878	-3,374265	-2,153875
32	0,017296	0,01957	0,002274	0,012264	0,18543	0,197099