

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAITE DOS SANTOS RIBEIRO

GEOESTATÍSTICA UTILIZADA NO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DE  
FLORESTAS DE PRODUÇÃO DE *Pinus taeda* L.

CURITIBA

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MAITE DOS SANTOS RIBEIRO

GEOESTATÍSTICA UTILIZADA NO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DE  
FLORESTAS DE PRODUÇÃO DE *Pinus taeda* L.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração em Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Co-orientador: Prof. Dr. Henrique S.Koehler

CURITIBA

2014

Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR  
Ficha catalográfica elaborada por Denis Uezu – CRB 1720/PR

Ribeiro, Maite dos Santos

Geoestatística utilizada no planejamento estratégico de florestas de produção de *Pinus taeda* L. / Maite dos Santos Ribeiro. – 2015  
83 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Coorientador: Prof. Dr. Henrique S. Koehler

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 02/04/2015.

Área de concentração: Manejo Florestal

1. Produtividade florestal. 2. *Pinus taeda*. 3. Mapeamento florestal. 4. Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Koehler, Henrique Soares. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.6



Universidade Federal do Paraná  
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

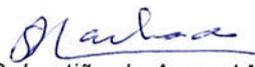
**PARECER**

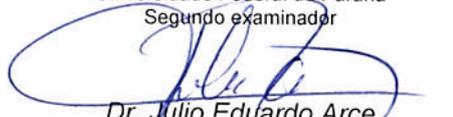
Defesa nº. 1114

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) mestrando(a) *Maite dos Santos Ribeiro* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**GEOESTATÍSTICA UTILIZADA NO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DE FLORESTAS DE PRODUÇÃO DE *Pinus taeda* L.**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Mestre* em Engenharia Florestal, área de concentração em MANEJO FLORESTAL.

  
Dr. Saulo Henrique Weber  
PUC/PR

Primeiro examinador

  
Dr. Sebastião do Amaral Machado  
Universidade Federal do Paraná  
Segundo examinador

  
Dr. Julio Eduardo Arce  
Universidade Federal do Paraná  
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 02 de abril de 2015.

  
Antonio Carlos Batista  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

“Acreditar não significa estar livre de momentos difíceis, mas ter a força para enfrentá-los sabendo que não estamos sozinhos.”

Papa Francisco

À Deus por tudo que Ele fez e faz por mim diariamente.

Aos meus pais, Osni e Angela pelo amor, apoio e,  
por todos os valores que me ensinaram.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida, por todas as oportunidades e por tudo que Ele tem feito na minha vida!

A minha família que é meu alicerce e base de valores. Meu pai Osni, pelos “paitrocínios”, pelo carinho e amor, pelos constantes incentivos e por acreditar no meu potencial. A minha mãe Angela pelo amor incondicional, pelos telefonemas nos dias mais difíceis, pelo constante apoio e incentivos e por acreditar no meu potencial. Ao meu irmão Rodrigo, minha irmã Camila e meu “cunhadinho” Claudio pelo carinho e amor e pelos momentos de descontração. Obrigada Família amo muito vocês.

Ao meu companheiro Marlon que torna meus dias mais leves, que segue ao meu lado acompanhando meu crescimento e torcendo pelo meu sucesso: obrigada pelo amor, incentivo diário, constante bom humor e paciência. Amo você, Meu Anjo!

Ao meu orientador e amigo Professor Julio Arce, pela incansável paciência, pelo voto de confiança, constante otimismo, pelo exemplo de profissional e de pessoa, e sem dúvida pelos inúmeros “*help desk*”. Muchas gracias.

Ao Edgar Krast pela paciência e incansável ajuda nas resoluções dos problemas.

Ao Prof. Henrique Koehler pela “barriga de aluguel”, confiança e conselhos.

A todos os professores da pós-graduação em Engenharia Florestal, em especial Prof. Sebastião do Amaral e Prof. Afonso Figueiredo Filho pela amizade formada.

A professora Aline Marques Genú pela prontidão em me receber e ajudar com a Geoestatística, e professor Luciano Farinha pelas dicas e pronto atendimento.

Aos meus amigos e companheiros que estiveram do meu lado nessa caminhada que mesmo com suas vidas atribuladas sempre acharam tempo pra me ajudar, em especial ao Tomaz, Marcos, Victor Hugo, Marisa, Linamara, Valéria e Leíse.

Aos amigos de laboratório e de café, pelos momentos de descontração e longas conversas: Rafaela, Emanuel, Allan, Ana Paula, Angelo, Rogério, Rodrigo, Sintia, Pompeu, Aurélio e tantos outros que um dia sentaram à mesa redonda nos intervalos.

A empresa Remasa Reflorestadora nas pessoas do Alceu Gugelmin, Gilson Geronasso e Edson Serpe, pelo fornecimento dos dados.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro.

Ao Reinaldo e Davi da secretaria e a tantos outros colegas de pós-graduação que de alguma forma contribuíram para a conclusão dessa caminhada.

A todos MUITO OBRIGADO!

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	8
LISTA DE FIGURAS .....	9
RESUMO GERAL .....	10
GENERAL ABSTRACT .....	11
I. INTRODUÇÃO GERAL .....	12
II. OBJETIVO GERAL .....	13
CAPÍTULO I: O ESTADO DA ARTE .....	14
1. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
1.1. GÊNERO PINUS E O SETOR FLORESTAL.....	14
1.2. PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO FLORESTAL .....	16
1.3. SILVICULTURA DE PRECISÃO E RELAÇÕES ESPACIAIS .....	18
1.4. CLASSIFICAÇÃO DA PRODUTIVIDADE FLORESTAL .....	21
1.5. GEOESTATÍSTICA .....	23
1.5.1. SEMIVARIOGRAMA .....	25
1.5.2. KRIGAGEM.....	29
1.6. GEOESTATÍSTICA NA ÁREA FLORESTAL.....	31
2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	34
CAPÍTULO II: ANÁLISE ESPACIAL DE ÍNDICE DE SÍTIO EM <i>Pinus taeda</i> L PARA DETERMINAÇÃO DE UNIDADES DE MANEJO NO CENTRO SUL DO PARANÁ. ....	44
RESUMO.....	44
ABSTRACT .....	45
1. INTRODUÇÃO.....	46
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	48
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
4. CONCLUSÕES .....	64
5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	65
CAPÍTULO III: COMPARAÇÃO ECONÔMICA DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO FLORESTAL DAS UNIDADES DE MANEJO OBTIDAS A PARTIR DO MODELO TRADICIONAL VERSUS MODELO ESPACIAL EM <i>Pinus Taeda</i> L. NO CENTRO SUL DO PARANÁ. ....	68
RESUMO.....	68
ABSTRACT .....	69

1. INTRODUÇÃO .....	70
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	72
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	77
4. CONCLUSÃO .....	81
5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	82

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: MODELOS DE VARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA ÍNDICE DE SÍTIO DE <i>Pinus taeda</i> NA REGIÃO DE BITURUNA E GENERAL CARNEIRO – PR.....	51
TABELA 2: ESTATÍSTICA DESCRITIVA DE ÍNDICE DE SÍTIO DE <i>PINUS TAEDA</i> L. NA REGIÃO CENTRO SUL DO ESTADO DO PARANÁ.....	53
TABELA 3: TESTES DE NORMALIDADE REALIZADOS COM DADOS DE ÍNDICE DE SÍTIO DE <i>PINUS TAEDA</i> L. NA REGIÃO CENTRO SUL DO PARANÁ.....	53
TABELA 4: PARÂMETROS DOS SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA ÍNDICE DE SÍTIO DE <i>PINUS TAEDA</i> L. NO CENTRO SUL DO PARANÁ.....	55
TABELA 5: COMPARAÇÃO DOS VALORES REAIS E ESTIMADOS PELA KRIGAGEM PARA ÍNDICE DE SÍTIO DE <i>PINUS TAEDA</i> GERADOS PELA VALIDAÇÃO CRUZADA.....	60
TABELA 6: COMPARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁREAS EM CLASSES DE SÍTIO NOS TALHÕES INICIAIS COM OS GERADOS PELA KRIGAGEM.....	62
TABELA 7: COMPARAÇÃO DO VPL EM PORCENTAGEM DA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DOS TALHÕES TRADICIONAIS COM OS DA KRIGAGEM PARA DOIS CENÁRIOS.....	77
TABELA 8: COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO EM PORCENTAGEM DA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DOS TALHÕES TRADICIONAIS COM OS DA KRIGAGEM EM DOIS CENÁRIOS.....	78
TABELA 9: COMPARAÇÃO DO VPL EM PORCENTAGEM DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DOS TALHÕES TRADICIONAIS COM OS DA KRIGAGEM EM QUATRO ANÁLISES ECONÔMICAS.....	78
TABELA 10: COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO EM PORCENTAGEM DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DOS TALHÕES TRADICIONAIS COM OS DA KRIGAGEM PARA QUATRO ANÁLISES ECONÔMICAS.....	79

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL COM EFEITO PEPITA .....	27
FIGURA 2: EXEMPLO DE MODELOS DE SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS. ....	28
FIGURA 3: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	49
FIGURA 4: LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS NA ÁREA DE ESTUDO. ....	50
FIGURA 5: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA (A) E BOX PLOT (B) DAS AMOSTRAS DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA <i>PINUS TAEDA</i> . ....	54
FIGURA 6: MODELO ESFÉRICO DE SEMIVARIOGRAMA AJUSTADO PARA ÍNDICE DE SÍTIO EM <i>PINUS TAEDA</i> DO CENTRO SUL DO PARANÁ. ....	56
FIGURA 7: AVALIAÇÃO DA ANISOTROPIA (A) E DA ESTRUTURA ESPACIAL (B) EM DIFERENTES DIREÇÕES PARA ÍNDICE DE SÍTIO EM <i>PINUS TAEDA</i> NO CENTRO SUL DO PARANÁ. ....	58
FIGURA 8: COMPARAÇÃO DOS VALORES REAIS E ESTIMADOS PELA KRIGAGEM PARA ÍNDICE DE SÍTIO DE <i>PINUS TAEDA</i> GERADOS PELA VALIDAÇÃO CRUZADA. ....	59
FIGURA 9: COMPARAÇÃO DO HISTOGRAMA REAL E ESTIMADO PELA KRIGAGEM PARA ÍNDICE DE SÍTIO EM <i>PINUS TAEDA</i> NO CENTRO SUL DO PARANÁ. ....	61
FIGURA 10: MAPA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ÍNDICE DE SÍTIO EM <i>PINUS TAEDA</i> COM VALORES GERADOS PELA KRIGAGEM ORDINÁRIA, NO CENTRO SUL DO PARANÁ. ....	62
FIGURA 11: CLASSIFICAÇÃO DE ÍNDICE DE SÍTIO GERADO PELA KRIGAGEM PARA TALHÕES AMOSTRADOS E NÃO AMOSTRADOS DE <i>PINUS TAEDA</i> NO CENTRO SUL DO PARANÁ. ....	63
FIGURA 12: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. ....	73
FIGURA 13: TALHÕES DE ÍNDICES DE SÍTIO UTILIZADOS PARA COMPARAÇÃO DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO. ....	74

## RESUMO GERAL

Os cenários que a economia vem praticando pressionam os manejadores a terem maior assertividade e precisão nas suas tomadas de decisões e a buscar soluções que otimizem as operações florestais e reduzam as ineficiências e retrabalhos. Uma alternativa é a utilização da silvicultura de precisão. Ela requer um adequado aproveitamento do uso do solo, o que necessariamente implica na utilização de cada espaço (zona) conforme a sua capacidade de sustentação, manejo e produtividade econômica. Sob essa ótica o planejamento estratégico deve ter uma abordagem de gerenciamento localizada que se baseia na utilização de dados geoespaciais. O objetivo geral desse estudo foi aliar as relações espaciais de *Pinus taeda* com o planejamento estratégico, visando uma classificação da produtividade sob a ótica da geoestatística. O estudo foi desenvolvido em um povoamento de área aproximada de 2.111 hectares de *Pinus taeda* L. de diversas idades, localizado na região centro sul do estado do Paraná. Ao total foram utilizadas 402 parcelas de IFC. Cada parcela teve um índice de sítio associado, calculado pela Hdom e Idade, até a idade de referência de 15 anos. A partir desses dados ajustou-se um semivariograma e gerou-se um mapa de classificação de sítio pela krigagem ordinária. De posse dessa classificação de sítio sob a ótica espacial houve o retalhamento. Finalmente os talhões iniciais e os talhões gerados pela krigagem tiveram seus planejamentos estratégicos otimizado e comum comparados em Valor Presente Líquido (VPL). Essa dissertação contemplou três capítulos. O primeiro tratou do estado da arte com uma revisão da literatura sobre os temas. O segundo objetivou utilizar as relações espaciais/geoestatística de índice de sítio na determinação de unidades de manejo de Pinus. O terceiro comparou o planejamento estratégico otimizado e comum, pelo Valor Presente Líquido (VPL) dos talhões iniciais com os gerados pela krigagem, além de perceber qual a contribuição da classificação de produtividade sob a ótica da geoestatística no planejamento estratégico.

Palavras-chave: Krigagem, talhonamento, índice de sítio, valor presente líquido.

## GENERAL ABSTRACT

The scenarios that the economy has been practicing pressure on managers to have greater assertiveness and precision in their decision-making and to seek solutions that optimize forest operations and reduce inefficiencies and rework. An alternative is the use of precision forestry. It requires an appropriate use of land use, which necessarily implies the use of each space (zone) as its carrying capacity, management and economic productivity. Under this view strategic planning should have a management approach that located based on the use of geospatial data. The general objective of this study was to combine the spatial relationships of *Pinus taeda* with strategic planning, aiming at a classification of productivity from the perspective of geostatistics. The study was conducted in an area of approximately 2,111 hectares settlement of *Pinus taeda* L. of different ages, located in the center-southern region of Paraná. In total 402 plots of were used. Each plot had an associated site index, calculated by dominant height and Age, until the age of 15 years reference. From this data set a semivariogram and generated up a site classification map by ordinary kriging. Armed with this site classification in the space optics was the stand redivision. And finally the initial stands and stands generated by kriging had their optimized and common strategic planning compared in Net Present Value (NPV). This dissertation included three chapters. The first dealt with the state of the art with a literature review on the topics. The second aimed to use spatial relations/geostatistics site index in determining Pinus management units. The third compared the optimized and common strategic planning, the Net Present Value (NPV) of the initial stands with those generated by kriging, and realize the contribution of productivity rating from the perspective of geostatistics in strategic planning.

Keywords: Kriging, stand division, site index, net present value.

## I. INTRODUÇÃO GERAL

O atual panorama florestal não deixa dúvidas de que os manejadores terão que adotar novas técnicas para obterem rendimento a partir de suas florestas. Com o crescente aumento do custo de produção – aumento de salários, impostos, combustível, preço da terra, fertilizantes, entre outros fatores – e o inexpressivo aumento dos preços de venda e da produtividade, o negócio florestal se configura numa ótica de incertezas e ameaças frente à economia mundial e as crises acabam surgindo no setor.

Os cenários que a economia vem praticando pressionam os manejadores a terem maior assertividade e precisão nas suas tomadas de decisões e a buscar soluções que otimizem as operações florestais e reduzam as ineficiências e retrabalhos.

Toda a evolução do conceito de floresta produtiva, o abastecimento das indústrias com matéria prima em quantidade e qualidade adequada e as inúmeras variáveis que foram sendo incorporadas ao processo, exigiram das empresas práticas mais refinadas de planejamento que promovam redução dos custos de produção e aumento dos níveis de produtividade. Logicamente sob essa nova ótica o planejamento tem que observar as relações espaciais que acontecem na floresta.

Frente ao exposto surge a silvicultura de precisão, que busca responder as perguntas dos manejadores nas tomadas de decisões assertivas por meio de uma abordagem de gerenciamento localizada que se baseia na utilização de dados geoespaciais. A aposta atual vai além da tradicional silvicultura de precisão porque alia à essas técnicas a utilização de ferramentas matemáticas.

Sabe-se que a prática da Silvicultura moderna e de precisão requer um adequado aproveitamento do uso do solo, o que necessariamente implica na utilização de cada espaço (zona) conforme a sua capacidade de sustentação, manejo e produtividade econômica, levando em consideração além do solo todos os fatores ambientais que influenciam sua manutenção. Como resposta surge à utilização das relações espaciais aliada com as ferramentas matemáticas, que pode oferecer a cada local um manejo coerente e ótimo.

## II. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente estudo é aliar as relações espaciais de *Pinus taeda* com o planejamento estratégico, visando uma classificação da produtividade sob a ótica da geoestatística.

Como objetivos específicos têm-se:

- Analisar as relações espaciais de índice de sítio pelo ajuste de um semivariograma experimental;
- Classificar índice de sítio, calculado a partir da altura dominante e idade, por meio do mapeamento gerado pela krigagem;
- Definir talhões a partir dos dados espaciais de índice de sítio;
- Comparar os cenários de planejamento estratégico que maximizam o Valor Presente Líquido (VPL) dos talhões iniciais com aqueles gerados pela krigagem.

## CAPÍTULO I: O ESTADO DA ARTE

### 1. REVISÃO DE LITERATURA

#### 1.1. GÊNERO PINUS E O SETOR FLORESTAL

No Brasil, a cultura do *Pinus* ganhou força nas décadas de '60 a '80 com os incentivos fiscais. Os plantios iniciaram-se com pouca tecnologia, sementes sem controle de origem, vindas de matrizes de baixa qualidade, o que resultava em povoamentos desuniformes, principalmente nos fuste e ramos, apesar do vigor da alta produção de biomassa lenhosa (BOGNOLA, 2007).

Ao longo dos anos os plantios de *Pinus* concentraram-se principalmente no sul do país, locais que já possuíam uma vocação madeireira com a extração do Pinheiro do Paraná (*Araucaria angustifolia*) e outras madeiras nobres, além de que o sul do Brasil é o local que tem as melhores condições edafoclimáticas para esse gênero (KOHLE, 2013). Segundo Coelho (2010), o gênero *Pinus* surgiu como uma alternativa, diminuindo a pressão de exploração das florestas nativas, gerando matéria prima florestal de forma renovável e com sustentabilidade. O estado do Paraná lidera o plantio de florestas de *Pinus* com 662.296 ha de *Pinus* plantados, seguido por Santa Catarina, Rio Grande do Sul e São Paulo (ABRAF, 2013).

Schimizu (2010) comenta que dentre as diversas espécies usualmente plantadas na região Sul do Brasil, as do gênero *Pinus* merecem destaque, e particularmente a espécie *Pinus taeda* L., que reúne uma série de características desejáveis em seu plantio, manejo e utilização futura da madeira, dentre as quais se destaca a rusticidade, rápido crescimento, resistência a geadas e múltiplos usos de sua madeira.

Essas características alavancaram a oferta de toras desta madeira e o consequente consumo nas mais variadas utilizações. O sistema de manejo mais utilizado para *Pinus* visa a produção de madeira para múltiplos usos, geralmente priorizando a produção de toras de grandes dimensões para emprego em processamento mecânico (serraria e laminação), mas também

para celulose e energia, representando uma importante alternativa para a produção de matéria-prima da indústria florestal brasileira (WOLLF, 2012).

O *Pinus taeda* é uma das espécies do gênero de maior desenvolvimento na região sul, alcançando incrementos médios anuais (IMA) superiores aos  $40\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$  aos 18 anos de idade e níveis de produtividade entre os maiores do mundo para a espécie (FERREIRA, 2005).

Segundo ABRAF (2013) a área de plantio no Brasil atingiu 7,6 milhões de hectares em 2013, crescimento de 2,8% em relação a 2012. O gênero *Pinus* fica com 20,7% desse total. O consumo *in natura* para uso industrial de madeira de *Pinus* foi de 40,75 milhões de metros cúbicos em 2013.

O Brasil após a crise financeira de 2008/2009 surge como um exemplo de mercado emergente com desaceleração de crescimento, pois o PIB cresceu somente 2,3% em 2013, resultado abaixo das economias da América Latina e do Caribe. Esse resultado supera 2012, mas converte-se no terceiro ano de fraco crescimento econômico (IBÁ, 2014).

Em 2013, a média do Risco Brasil, que mede a diferença entre os juros pagos pelos títulos norte-americanos e brasileiros, aumentou 11% em relação a média de 2012, atingindo o patamar de 205 pontos, o que significa uma deterioração na expectativa dos investidores internacionais em relação ao País (ABRAF, 2013).

Apesar da Comissão Econômica para a América Latina e Caribe (CEPAL) projetar que a América Latina experimentaria em 2014 uma aceleração do crescimento econômico, a mesma instituição apontou que as expectativas de desempenho da economia brasileira para este ano seriam ainda piores do que a média do triênio 2011-2013. Segundo a CEPAL, desde 2012, o cenário externo vem tomando uma direção danosa ao modelo econômico vigente no Brasil a partir de 2005, calcado no aumento do gasto público e do crédito muito acima do valor do PIB (IBÁ, 2014). Isso trouxe um mercado marcado por baixo crescimento econômico, pressão de preços e deterioração da confiança internacional no Brasil. Frente a este cenário os produtores de florestas têm apostado no aumento da produtividade por meio da otimização da sua cultura.

## 1.2. PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO FLORESTAL

Segundo Buongiorno e Gilless (1987), o manejo de recursos florestais é a arte e a ciência de tomar decisões considerando a empresa, o uso e a conservação dos recursos. E a tomada de decisão, segundo Duerr *et al.* (1982), é constante em todo o processo baseando-se em três informações: meios, fins e valores, ou seja, na predição de como fazer, para que fazer e quanto fazer.

O ciclo de vida longo, as vastas extensões ocupadas pelas florestas e a suscetibilidade às incertezas da natureza e do mercado ao longo desse ciclo tornam, segundo Johnson e Scheurman (1977), o processo de planejamento e de tomada de decisão ainda mais complexo em relação a outros tipos de atividade.

Rocha (2002) comenta que ao analisar a estrutura organizacional das empresas ao longo de décadas, percebe-se que a sustentabilidade do empreendimento e dos recursos como um todo é foco de suas atividades. E a gestão desses recursos, segundo Rodrigues *et al.* (1997), baseia-se nas intervenções florestais que acontecem em cada unidade de manejo, promovendo mudanças na estrutura da floresta e na geração dos recursos financeiros.

Para Scolforo (1990) muitas são as variáveis a serem consideradas no planejamento, como por exemplo, idade de corte, densidade de plantio, programa de melhoramento, seleção de espécies, compra e venda de terras, e mesmo aquelas questões mais pertinentes ao curto prazo, como dimensionamento de equipe, avaliações econômicas das várias atividades da floresta, sistema de exploração e transporte, dentre muitas outras.

Weintraub e Cholaky (1991) relatam que para garantir a sustentabilidade da floresta é necessário um longo horizonte de planejamento que considere uma gama de opções de manejo para cada unidade. Neste caso, o responsável pelo manejo necessita ter uma visão global de planejamento florestal, utilizando-se de modelos matemáticos que possibilitem a previsão da produção e de como gerenciar toda essa gama de informações visando à otimização do processo (SCOLFORO, 1998).

Sendo assim, planejar a produção significa definir os objetivos pretendidos e prever a produção total, incluindo todas as intervenções a serem realizadas no povoamento, como desbastes, podas e corte final (OLIVEIRA 1995).

Sanquetta (1996) diz que no intuito de prever o crescimento de uma floresta e de verificar as consequências de interferências, pode-se utilizar um sistema de equações matemáticas (modelos de simulação). E, segundo Johnson *et al.* (1977) a aplicação de modelos de simulação representativos de modelos reais, torna as decisões de planejamento mais eficientes do que aquelas baseadas apenas na experiência. A quantidade de fatores que devem ser considerados no planejamento dessas atividades torna necessária a aplicação de técnicas matemáticas na resolução de problemas como prática a Pesquisa Operacional (ARCE, 2000).

Gomide (2009) comenta que a dedicação por processos de modelagem de dados tem transformado o cenário florestal ao longo das décadas. Essa atitude foi inspirada na necessidade de informações mais apuradas sobre a gestão do negócio florestal, onde muitas ferramentas foram desenvolvidas com a finalidade de acelerar os processos de tomada de decisão. O ponto inicial dessa trajetória foi marcado a partir do desenvolvimento do algoritmo Simplex, na década de 40, por Dantzig, que abriu caminho para métodos mais sofisticados de programação. Como resposta, esses métodos de planejamento florestal desenvolvidos, encontravam as melhores combinações de opções de manejo para um conjunto de talhões, sendo este analisado como parte de um amplo sistema.

Porém Mello (2004) comenta que a dinâmica de vida das florestas sofre muitas mudanças devido a fatores que constantemente mudam no espaço e no tempo. Fatores inerentes ao solo, ao clima e à própria planta, influenciam acentuadamente esta dinâmica, além das ações antrópicas (adubação, melhoramento genético, poda, dentre outros). E para subsidiar as ações do manejo e do planejamento florestal com informações precisas e menor custo essa dinâmica deve ser acompanhada por meio de técnicas de amostragem, que sejam eficientes na representação do estado atual e temporal da floresta.

Segundo Vigolo (2008), a realidade em que os modelos estão inseridos deve ser expressa da forma mais exata possível para que os cenários simulados sejam eficientes e aplicáveis.

Para dar suporte à tomada de decisão frente essa mudança dinâmica foi que o planejamento espacial surgiu, tentando incorporar o SIG ao planejamento florestal. Segundo Gomide (2009), o planejamento espacial auxilia na tomada de decisão mais consciente sobre os aspectos ecológicos do ecossistema identificando e expondo componentes da paisagem.

A diferença entre o planejamento florestal tradicional e o espacial, segundo Baskent e Keles (2005), é o fato de como analisar o talhão dentro da floresta, sendo este apenas uma unidade de produção desconectada dos demais talhões no primeiro caso e já no segundo este passa a ser observado segundo seu tamanho, forma e distribuição na floresta.

Gomide (2009) comenta que um grupo de pesquisadores trabalhou a questão de modelagem da paisagem e não apenas a distribuição espacial na sua pura análise. Entretanto Öhman (2001) diz que a possibilidade de surgir problemas não lineares, tornando impraticável o uso da programação linear, foi a maior dificuldade encontrada ao se trabalhar o espaço.

Seppelt e Voinov (2004) falam que três pontos vão interferir na complexidade dos modelos de otimização de planejamento espacial: o número de variáveis, o tamanho da área em estudo e número de processos espaciais que se interagem. Dessa maneira as chances de sucesso na otimização ficam reduzidas, porque na medida em que aumentam as relações espaciais entre as variáveis à complexidade do problema aumenta.

### **1.3. SILVICULTURA DE PRECISÃO E RELAÇÕES ESPACIAIS**

Silvicultura de precisão é uma prática na qual se utiliza tecnologia de informação baseada no princípio da variabilidade do solo e clima. Tem por objetivo a redução de custos de produção, diminuição de impactos ambientais pelo uso racional de insumos agrícolas e aumento da produtividade. Ela se baseia em um método de gerenciamento das atividades silviculturais que

analisa as relações espaciais presentes e utiliza de todas as formas de geotecnologias.

A silvicultura de precisão representa um novo modelo de gerenciamento, alicerçado no conhecimento *a priori* e na inclusão da variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção e da própria produtividade, que possibilita intervenções localizadas na floresta (MENEZES *et al.*, 2009).

Brandelero *et al.* (2007) falam que 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.

Marques (2006) comenta que nos empreendimentos florestais, a busca pela eficiência no planejamento e na gestão florestal envolve práticas de condução dos povoamentos que exigem o conhecimento das características das espécies cultivadas e do local onde se desenvolvem. No entanto, segundo Pelissari (2012) os métodos tradicionais utilizados para descrever o desenvolvimento das florestas utilizam uma medida de tendência central, geralmente a média, além de uma medida de dispersão, como a variância, sem considerar as relações existentes entre as observações vizinhas. Assim, à medida que cresce a necessidade por informações mais detalhadas na condução do empreendimento florestal, consolida-se também a utilização dos preceitos da silvicultura de precisão (RIBEIRO, 2002).

Um conceito chave na compreensão e análise das relações espaciais é a dependência espacial. Ela considera a primeira lei da geografia de Tobler (1970) onde diz que “todas as coisas são parecidas, no entanto, coisas mais próximas se parecem mais que coisas mais distantes”, ou seja, independente do tipo de ocorrência, sejam naturais ou sociais, apresentam entre si uma relação que depende da distância. Consequentemente as inferências estatísticas tradicionais nesse tipo de dados não serão tão eficientes quanto no caso de amostras independentes do mesmo tamanho além de levarem a uma perda do poder explicativo (DRUCK *et al.*, 2004).

Na estatística clássica a variabilidade de uma determinada variável em torno da média é aleatória e independente da posição espacial dos valores

amostrados. Porém vários estudos mostram que há uma dependência espacial nos atributos de solo e de outras características das plantas (TRANGMAR *et al.*, 1985; FIETZ, 1998; GONÇALVES, 1995; VIERA *et al.*, 1983; VIEIRA *et al.*, 1997; HOCK *et al.* 1993; GUNARSSON, 1996; MELLO, 2004; MONTES *et al.*, 2006; BOGNOLA *et al.*, 2007; e PALMER *et al.*, 2010). Consequentemente os valores em locais mais próximos entre si são mais semelhantes, até um determinado limite, que aqueles tomados a maiores distâncias.

Então assumindo as hipóteses exigidas pela estatística clássica o valor mensurado é em parte explicado por uma média e em parte pela variação ao acaso, onde os desvios dos valores em torno da média são assumidos como sendo independentes e com distribuição normal de média zero e variância  $\sigma^2$ , ou seja, a média aritmética dos dados é adotada como um bom estimador dos valores da população. A partir daí a média é tomada para estimar a variável em questão nos locais não amostrados. Porém se os valores não assumirem essas hipóteses o uso único e exclusivo dessa estatística estaria violando os conceitos básicos da análise de variância, surgindo à necessidade de uma técnica complementar para retratar fielmente os efeitos da variável em estudo (ORTIZ, 2003).

Vários autores afirmam que os avanços tecnológicos na identificação dos fatores que limitam a produtividade demonstram à importância de se medir essas relações espaciais e temporais das variáveis que afetam o rendimento dos povoamentos florestais, por meio da combinação dos sistemas de informações geográficas e métodos geoestatísticos, visando à máxima produtividade (ORTIZ *et al.*, 2006; RUFINO *et al.*, 2006; BOGNOLA *et al.*, 2008).

Mello (2004) dizia que uma característica marcante em área reflorestada é a sua aparente homogeneidade, contudo, é frequente a observação de variações significativas ao longo do plantio. Estas variações se devem a vários fatores como solo, topografia, práticas silviculturais e outros. Essa variabilidade espacial pode, muitas vezes, afetar de forma marcante a qualidade das estimativas feitas. Desse modo, uma análise criteriosa, visando conhecer o comportamento espacial das características em questão, é de fundamental importância na escolha de um método estatístico que otimize recurso sem perda de precisão no processo de estimativa.

Sendo assim surge a geoestatística, que objetiva mensurar as propriedades e relações considerando a localização espacial do fenômeno em estudo, ou seja, permite estudar, explorar e modelar fenômenos geográficos por meio de um modelo inferencial que considera explicitamente as relações espaciais presentes no fenômeno.

#### **1.4. CLASSIFICAÇÃO DA PRODUTIVIDADE FLORESTAL**

A classificação das terras florestais quanto ao seu potencial de produtividade é um importante elemento, tanto para o manejador, como para o administrador da empresa florestal, já que o índice que expressa essa produtividade é uma variável requerida nos modelos de predição presente e futura do crescimento e da produção (SCOLFORO e MACHADO, 1988).

Nesse sentido, a determinação da qualidade de sítio, isto é da sua capacidade produtiva, constitui um dos primeiros e mais importantes passos para se conseguir um planejamento adequado e garantir o sucesso do empreendimento florestal (OLIVEIRA, 1998).

Alemdag (1991) comenta que para o desenvolvimento de planos manejos, é necessário verificar o potencial produtivo de cada unidade de manejo, de modo que o crescimento e a produção florestal possam ser prognosticados.

Portanto o conhecimento da qualidade de sítio para cada unidade do terreno a ser manejada e de sua classificação quanto à sua capacidade produtiva é um importante critério para o moderno manejo florestal (OLIVEIRA, 1998).

Os métodos para determinação da qualidade do sítio, ou seja, para estimar a produtividade florestal, podem ser divididos em diretos e indiretos. A capacidade produtiva pode ser mensurada diretamente pelo crescimento da floresta em si, ou por meio de estimativa, a partir de atributos do local que expressam a sua produtividade (RENNIE, 1963; CARMEAN, 1975; SCOLFORO e MACHADO, 1988; GONÇALVES, 1990 E OLIVEIRA, 1998).

Dentre os diversos métodos é unanime a utilização do índice de sítio baseado na relação altura dominante e idade das árvores, uma vez que a altura dominante reflete os fatores do meio e não é afetada pelas intervenções

silviculturais (RENNIE, 1963; BRUM, 1979; MACHADO, 1981; CLUTER, *et al.*, 1983; BORDERS e BAILEY, 1985; CAMPOS, 1985; BATISTA e COUTO, 1986; OLIVEIRA 1998). Scolforo e Machado (1988), comentam que este procedimento será usado até o dia em que os vários fatores que interferem na produtividade possam ser expressos em uma medida igualmente simples e que possa ser mensurada quantitativamente.

Bognola (2007) comenta que diversos trabalhos que correlacionam unidades de solos com qualidade de sítio – na maioria das vezes, representada pelo Índice de sítio –, revelam uma grande variação do mesmo dentro de cada unidade de mapeamento. Em muitos casos, os valores médios dos índices de sítio obtidos foram similares entre diferentes unidades pedológicas. Outras vezes, para uma mesma classe de solo, podem-se ter índices de sítios diferenciados. No entanto, é preciso identificar as classes de solos, no mínimo até o quarto nível do sistema brasileiro de classificação, ou até sexto níveis, pois aí poderão estar as explicações para as diferentes produções de uma espécie florestal e para a melhor definição de sítios florestais.

Entretanto essa determinação das classes de solos é muito complexa e onerosa, fugindo da realidade de muitas empresas florestais, que de certa forma utilizam o índice de sítio obtido somente da altura dominante por se tratar de uma estimativa simples e prática.

Dessa forma o mapeamento da classificação da produtividade pelo índice de sítio, obtido a partir da altura dominante, utiliza métodos tradicionais de estatística usados para inventário florestal, onde possuem uma medida central (média) e uma medida de dispersão (variância), sem levar em consideração, as possíveis correlações entre observações vizinhas. Portanto, eles não exploram suficientemente as relações que possam existir entre as unidades amostrais.

Nesse contexto alguns trabalhos mais recentes sugerem a utilização da geoestatística na classificação de sítio como é o caso de HOCK, *et al.*, 1993; ORTIZ, 2003; MELLO, 2004; BOGNOLA, 2007 e PALMER *et al.*, 2010.

Os métodos de geoestatística podem melhor avaliar a estrutura de dependência espacial entre as características dendrometrias da espécie em estudo com as variáveis do meio físico, no sentido de se obter resultados que sejam capazes de explorar adequadamente as relações espaciais existentes

entre os dados, ou seja, a geoestatística e um método estatístico que explora adequadamente as relações existentes entre as unidades amostrais.

Acessar a variabilidade da análise espacial do índice de sítio faz da geoestatística uma possível ferramenta na classificação de sítios das espécies florestais.

## 1.5. GEOESTATÍSTICA

Faraco *et al.* (2008), comentam que a geoestatística, ou estatística espacial, é baseada no estudo de uma função espacial numérica que varia de um local para outro com continuidade e cujos valores são relacionados com a posição espacial que ocupam, o que permite a estimativa de uma determinada variável em locais não amostrados e a aplicação em mapeamentos, planejamentos de amostragens e modelagens (GOMES *et al.*, 2007).

A geoestatística iniciou-se com Krige em 1951, quando observou que as variâncias de dados de mineração de ouro obtidas por meio da abordagem clássica de amostragem, não faziam sentido se não considerasse as distâncias entre as amostras. A partir daí surgiu a Teoria das Variáveis Regionalizadas de Matheron (1963), definida como uma função espacial numérica variável de um local para outro, com certa continuidade, onde sua variação não pode ser representada por uma função matemática simples.

Essa teoria pressupõe que a variação de uma variável qualquer pode ser expressa pela soma de três componentes: a) uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência; b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; e c) um ruído aleatório ou erro residual (BURROUGH *et al.*, 1994).

Mello (2004) comenta que se  $x$  representa uma posição em uma, duas ou três dimensões, então o valor da variável  $Z$ , em  $x$ , é dado por:

$$Z(x_i) = M(x) + \mathcal{E}'_x + \mathcal{E}_i \quad (1)$$

Onde:

$M(x)$  é uma função determinística que descreve a componente estrutural;

$Z$  em  $x$ ;  $\mathcal{E}'_x$  é um termo estocástico, que varia localmente e depende espacialmente de  $M(x)$ ;

$\mathcal{E}_i$  é um ruído aleatório não correlacionado, com distribuição normal média zero e variância  $\sigma^2$ . A geoestatística atua no  $\mathcal{E}'_x$ .

Oliveira (1991) comenta que existem duas propostas estatística para modelar populações do tipo  $\{Z_x: x \in \mathfrak{R} \subset \mathbb{R}^2\}$ :

- i. Considere  $\{Z_x: x \in \mathfrak{R} \subset \mathbb{R}^2\}$  como uma população no sentido da teoria clássica da amostragem, ou seja, as unidades amostrais são independentes. Desta forma, não toma vantagem de considerar a estrutura de dependência que possivelmente possa existir naquela população;
- ii. Considere  $\{Z_x: x \in \mathfrak{R} \subset \mathbb{R}^2\}$  como uma amostra retirada de uma superpopulação, que é uma “população” de populações do tipo  $\{Z_x: x \in \mathfrak{R} \subset \mathbb{R}^2\}$ . Nesta situação a geoestatística necessita de supostos para ser válida (a hipótese intrínseca), porém, ela considera a correlação espacial entre os dados.

Segundo Vieira (2000), a geoestatística está alicerçada na hipótese intrínseca que requer apenas a estacionaridade do variograma. Uma variável regionalizada é intrínseca em dois casos:

- i. Existir a esperança matemática para a variável regionalizada e ela não depender da posição  $x$ :

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

- ii. 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  $h$ :

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

Segundo Ribeiro Junior (1995), por ser a menos restritiva e requerer apenas a existência de estacionariedade do variograma, sem nenhuma restrição quanto à existência de variância finita – como, por exemplo, na

estacionaridade de 2ª ordem – esta hipótese é a mais frequentemente admitida em Geoestatística.

### 1.5.1. SEMIVARIOGRAMA

O método geoestatístico utilizado para determinar a presença da correlação espacial, segundo Duarte (2000) é o semivariograma ou simplesmente variograma.

Variograma é uma função intrínseca que reflete a estrutura do fenômeno estudado, medindo as relações estatísticas- pelas covariâncias- que existem entre as amostras espaçadas de sucessivos valores de  $h$ . É uma função que é crescente com  $h$  até atingir um determinado valor de  $h$ , valor conhecido como amplitude ou Alcance, a partir do qual a função não apresenta dependência espacial.

Ribeiro Junior (1995) comenta que o semivariograma representa uma função de semivariâncias em relação às respectivas distâncias. A semivariância é definida como a metade das variâncias de diferenças entre observações de uma variável aleatória  $Z$ , separadas por uma distância  $h$ . Assim é esperado que observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias ou seja, é que  $\gamma(h)$  aumente com a distância  $h$ .

Segundo Journel e Huijbregts (1978), a função variograma, denominada de  $2\gamma(h)$ , é a esperança matemática do quadrado da diferença entre pares de pontos separados por uma distância ( $h$ ):

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x) - Z(x + h)]^2\} \quad (4)$$

A metade da função variograma é chamada de semivariograma. A semivariância é estimada pela média aritmética das diferenças ao quadrado entre pares de valores experimentais, em todos os pontos separados pela distancia  $h$ .

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x + h)]^2 \quad (5)$$

Onde  $\hat{\gamma}(h)$  é a semivariância estimada para cada distancia ( $h$ ),  $N(h)$  é o número de pares de pontos separados por uma distancia  $h$ ,  $Z(x)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $x$  e  $Z(x+h)$  é o valor no ponto  $x+h$ .

A função semivariograma permite gerar o gráfico da semivariância em função da distancia ( $h$ ), chamado de semivariograma experimental, que permite interpretar a continuidade espacial da variável regionalizada.

O semivariograma fundamenta-se na Teoria das Funções Aleatórias (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989), que apresenta a estimativa experimental dessas estatísticas. Para um local  $x$  o valor da variável é representado por  $Z(x)$ , onde  $x$  é o vetor  $(x,y)$  e  $Z(x+h)$  representa o valor da mesma variável para alguma distancia  $h$  (ou “lag”), em qualquer direção. O semivariograma resume a continuidade espacial para todos os pareamentos (comparação de dois valores) e para todos os  $h$  significativos.

Guimarães (2004) comenta que se analisarmos a expressão da função semivariância, imagina-se que quanto mais próximos estiverem os pontos amostrados, maior será a semelhança entre eles e, portanto, menor a semivariância; e quanto mais distantes estiverem os pontos amostrados menor será a semelhança e, conseqüentemente, maior a dispersão (variância). Na teoria temos que para a distância  $h=0$  a semivariância  $\gamma(0) = 0$  e, a semivariância  $\gamma(h)$  cresce com o incremento de  $h$ , até atingir um valor constante para  $\gamma(h)$  que corresponde às variações aleatórias, ou seja, variações que não são justificadas pela semelhança de um ponto com outro.

À distância  $h$  a partir da qual  $\gamma(h)$  se torna aproximadamente constante é chamada de alcance (*range*) da dependência espacial ( $a$ ) sendo que as medições realizadas a distâncias maiores que alcance, tem distribuição espacial aleatória e, portanto, são independentes entre si. O valor de  $\gamma(h)$  constante é chamado de patamar (C) (GUIMARÃES, 2004).

Segundo o mesmo autor a utilização de dados amostrais na estimativa da semivariância e na construção do semivariograma, revela que, frequentemente, para  $h = 0$  a semivariância  $\gamma(0)$  difere de zero. A impossibilidade de se fazer reamostragem exatamente sobre um ponto já amostrado (nestes casos pode ocorrer variações a distâncias menores do que a menor distância de amostragem) e erros como erros de amostragem, erros de análise de laboratório, etc., são justificativas dessa descontinuidade na

origem. Quando  $\gamma(0) \neq 0$ , surge um novo termo no semivariograma chamado de efeito pepita ( $C_0$ ) e, neste caso, o patamar é dado por:  $C_0 + C$ .

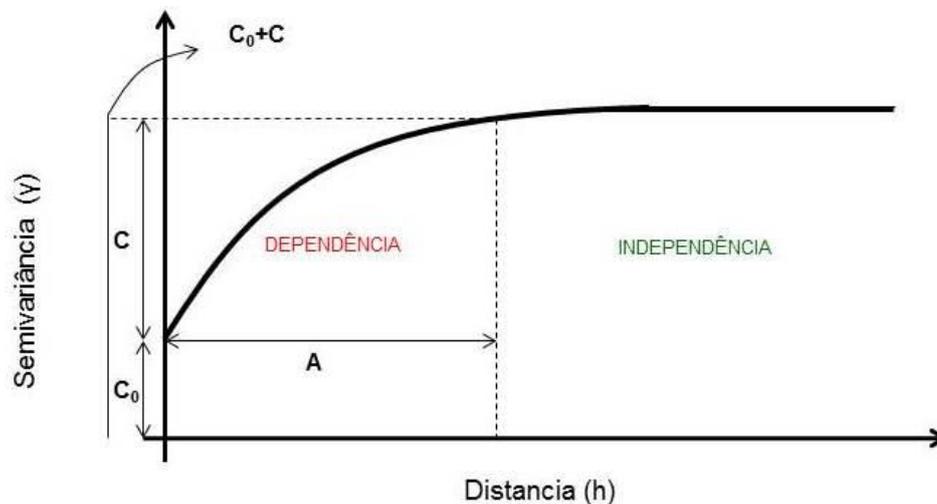


FIGURA 1 - SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL COM EFEITO PEPITA.

A dependência espacial das amostras é representada pelo alcance ( $A$ ) definido pela distância ( $h$ ) em que a semivariância  $\gamma(h)$  se torna praticamente constante. Este alcance ( $A$ ) caracteriza o raio de abrangência da dependência espacial da amostra. A partir da distância correspondente ao alcance, onde a dependência espacial não existe, pode-se dizer que a distribuição espacial acontece aleatoriamente, e uma amostra não exerce influência sobre a outra (VIEIRA, 1997; ANDRADE *et al.*, 2005; MACHADO *et al.*, 2007).

O patamar ( $C'$ ) determina a variabilidade máxima entre os pares de valores, isto é, a variância dos dados, e conseqüentemente, covariância nula e é a ordenada correspondente a abscissa ( $a$ ), chamada alcance. O Efeito Pepita ( $C_0$ ), representa a descontinuidade do semivariograma quando  $h=0$  e a Contribuição ( $C$ ) representa a diferença entre o patamar e o efeito pepita (ANDRIOTTI, 2003).

O semivariograma é a parte central da Geoestatística segundo McBratney e Webster (1986), capaz de descrever a estrutura de dependência espacial, além de ser o ponto chave na determinação do preditor geoestatístico (krigagem). Assim, é importante escolher o modelo apropriado na estimativa do semivariograma devido aos valores que cada modelo apresenta para o efeito pepita, variância e alcance, os quais são parâmetros críticos na krigagem (TRANGMAR *et al.*, 1985).

Journel e Huijbregts (1978) comentam que é a partir do semivariograma que o pesquisador é capaz de definir o modelo que melhor descreve o comportamento dos dados no espaço. Vários métodos de ajuste segundo Mello (2004) foram e estão sendo estudados, com objetivo de retirar e/ou atenuar o caráter de subjetividade até então presente pelo ajuste visual ("sentimento/experiência do pesquisador"). Dentre eles destacam-se Métodos dos Quadrados Mínimos Ordinários, Ponderados e o Método da Máxima Verossimilhança.

Para verificar a qualidade do ajuste do semivariograma aos dados experimentais Vieira *et al.* (1983); Hock *et al.* (1993) e outros autores sugerem o método de ajuste por tentativa e erro (ajuste a critério do observador) associado à avaliação do modelo pela técnica de validação cruzada ou autovalidação ("jack-Knifing"). Macbratney e Webster (1986) sugerem o método do Critério de Informação de Akaike (AIC) para avaliar o modelo. Já Pannatier (1996) sugere a utilização da "Indicação da Qualidade do Ajuste" (IGF).

A condição para o ajuste de modelos a dados experimentais é que ele represente a tendência de  $\gamma(h)$  em relação à  $h$  e que o modelo tenha positividade definida condicional. De maneira geral, um modelo é positivamente condicional se  $\gamma(h) \geq 0$  e  $\gamma(-h) = \gamma(h)$ , qualquer que seja  $h$  (GUIMARÃES, 2004).

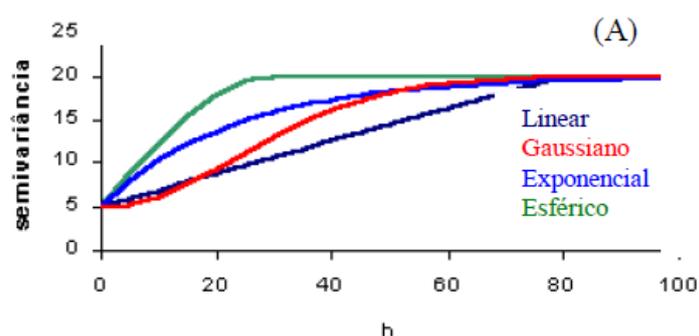


FIGURA 2: EXEMPLO DE MODELOS DE SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS.

FONTE: GUIMARÃES 2004

Vários são os modelos utilizados no ajuste do semivariograma. Dentre eles destacam-se o Modelo Esférico, Gaussiano, Exponencial e Linear, exemplificados na FIGURA 2.

Segundo Zimback (2001), na análise estrutural do semivariograma, além do efeito pepita ( $C_0$ ), do patamar ( $C$ ) e do alcance ( $a$ ), outros parâmetros são

importantes e podem ser utilizados para posterior análise. Um exemplo é o alcance efetivo, que para alguns modelos como o esférico e linear é igual ao alcance ( $a$ ), mas para outros, como o gaussiano e exponencial, o alcance efetivo representa  $3x(a)$  e  $1,7x(a)$ , respectivamente, devido ao longo espaço de curvatura da curva (GUERRA, 1988), sendo interpretado em unidades de distancia (metro, quilômetros) de alcance. Outro parâmetro importante é a proporção espacial  $C/(C+C_0)$ , que determina quanto da variância espacial esta presente na variância total da amostra, podendo ocorrer variância espacial nula (0,00), fraca (0,00 - 0,25), moderada (0,25 - 0,75) e forte ( $> 0,75$ ). Segundo Guimarães (2004) a relação entre  $C/(C+C_0)$ , nos dá uma ideia do grau de dependência espacial da variável, sendo que quanto mais próximo de 1, maior a dependência espacial.

#### 1.5.2. KRIGAGEM

Na maioria das vezes, segundo Ortiz (2003) o interesse da análise geoestatística não se limita na obtenção de um modelo de dependência espacial e sim na visualização do comportamento da variável na região por meio de um mapa de isolinhas ou de superfície. Frente ao exposto surge a necessidade de um interpolador para determinação da característica em questão em locais não amostrados, como por exemplo, a Krigagem.

Landim (2006) descreveu a Krigagem como um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma. Trata-se, em último caso, de um método de estimativa por médias móveis. Ela utiliza uma serie de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada, a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço (LANDIM, 1998).

A krigagem difere de outros métodos de interpolação devido aos pesos associados às diferentes amostras, levando em consideração as amostras vizinhas (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2007). Vários autores comentam que a krigagem tem capacidade de produzir melhores estimativas em termos de interpolação, porque esta embasada em duas premissas: não-tendenciosidade do estimador

e variância mínima das estimativas (WEBSTER e OLIVER, 1980; ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 2000; THOMPSON, 1992) o que conseqüentemente, segundo Corá e Beraldo (2006), proporciona maior confiabilidade na estimativa de valores em pontos sem amostragem e maior precisão na elaboração de mapas. Conforme descrito por Isaaks e Srivastava (1989) existem vários tipos de krigagem: krigagem pontual, ordinária, universal, por blocos e outras.

A krigagem ordinária utiliza um estimador linear não viciado com mínima variância (“*BLUE-Best Linear Unbiased Estimator*”) para interpolação do atributo medido em posições não amostradas (Isaaks e Srivastava, 1989). Linear porque suas estimativas são feitas por combinações lineares; Unbiased (sem viés) porque o erro de estimativa esperado é nulo; e best porque seu objetivo é minimizar a variância destes erros de estimativas (INOUE, *et al.*, 1999). O estimador é uma combinação linear que é uma média móvel e leva em conta a estrutura de variabilidade encontrada para aquela variável (medida), expressa pelo semivariograma (ou, equivalentemente, função de autocorrelação) e pela localização dos valores conhecidos (LAMPARELLI, *et al.*, 2001). Pontos próximos da posição a ser interpolada levam maiores pesos que os mais distantes (ORTIZ, 2003).

De acordo com Silva Junior 2001 o método da krigagem ordinária se distingue dos demais tipos por seu objetivo de minimizar a variância dos erros. Os ponderadores de dados na krigagem são proporcionais às “distancias estatísticas”, significando que, além de ponderar pelas distancias euclidianas entre o ponto a ser estimado e os demais pontos conhecidos, incorporam também a estrutura de variabilidade da região de estimação, ou seja, as distâncias consideradas não são somente a distancia entre o ponto a ser predito e os vizinhos, mas também a distancia entre vizinhos. Dessa forma vizinhos agrupados têm importância individual relativamente menor do que aqueles isolados (RIBEIRO JUNIOR, 1995).

Segundo Zimback (2001), como toda a subjetividade e variabilidade de resultados nos cálculos dos parâmetros do variograma, e importante que se tenha um meio para checar se o modelo ajustado é satisfatório ou não (DAVID, 1988), bem como para validar o plano de Krigagem antes do seu uso na construção de mapas. Na comparação entre métodos de interpolação são

utilizados alguns critérios, entre eles o coeficiente de correlação entre os valores observados e estimados obtidos pela validação cruzada proposto por Leenaers *et al.* (1990).

A partir do mapa resultante da krigagem podem-se tomar decisões importantes, por exemplo, em uma floresta com manejo de multiprodutos, um zoneamento detalhado da produtividade pode reformular os talhões originais, gerando unidades de manejo diferenciadas, que anteriormente eram tratadas como uma média geral.

Segundo Mello (2004) é usual a adoção de um valor médio, suposto representativo, obtido de uma amostra (conjunto de parcelas), para caracterizar o estado atual e temporal da variável de interesse dentro da floresta (ou talhão). Essa variabilidade espacial pode, muitas vezes, afetar de forma marcante a qualidade das estimativas feitas pelo inventário. Desse modo, uma análise criteriosa visando conhecer o comportamento espacial de uma determinada característica dendrométrica e de fundamental importância na escolha de um método estatístico que otimize recurso sem perda de precisão no processo de estimativa.

Sendo assim o mapeamento da variabilidade espacial da variável de interesse, no caso índice de sítio, obtido pela krigagem, permite o gerenciamento por zonas de manejo, de forma diferenciada, ou seja, utilizando taxa variável, favorecendo a otimização da produtividade maximizando os benefícios e reduzindo os custos.

## **1.6. GEOESTATÍSTICA NA ÁREA FLORESTAL**

Segundo Bognola (2007) países como Austrália, Estados Unidos, França e Holanda, dentre outros, tem mudado a abordagem tradicional de estudo dos recursos naturais, adotando modelos quantitativos, técnicas de predição espacial, determinação de precisão e incertezas de atributos e integração de dados em sistema de informações geográficas (SIG).

Baskent e Keles (2005) fizeram uma revisão do planejamento florestal espacial e Brandelero *et al.* (2007) descreveram a silvicultura de precisão, incluindo as ferramentas geoestatísticas, como uma nova tecnologia para o desenvolvimento florestal.

Os autores Cohen, Spies e Bradshaw (1990) e Wulder *et al.* (1996), procuraram caracterizar a estrutura de copa de coníferas a partir de imagens de satélite e parâmetros biofísicos, tais como índice de área foliar e área basal. Eles concluíram ter sido possível usar métodos geoestatísticos de krigagem para mapeamento da altura dominante e área basal na área estudada. Esses autores associaram técnicas de geoestatística com sensoriamento remoto assim como Vettorazi e Ferraz (2000); Becker (2001); Mcgaughey (2001) e Ribeiro (2002), que apresentaram as possibilidades de gerenciamento florestal a partir da utilização de análises espaciais e geoprocessamento.

Osborne (1942) e Matérn (1960), caracterizaram a continuidade espacial de volumes de madeira obtidos de amostras sistemáticas pela função exponencial. Mcbratney *et al.* (1986), comentam que as técnicas quantitativas de predição espacial em levantamentos de solos são geralmente derivadas da geoestatística e de métodos estatísticos modernos. Samra *et al.* (1989) modelaram o crescimento de altura para *Melia azedarach* na Índia fazendo uso de técnicas da geoestatística.

Thompson (1992) mostrou a importância da krigagem em estudos ecológicos, utilizando informações de uma área amostrada para prever determinada característica em toda a região. A determinação do grau de dependência espacial e a krigagem de blocos para mapear, foi utilizada por Biondi *et al.* (1994) em área basal de *Pinus ponderosa*. Hock *et al.* (1993) utilizaram ajuste do modelo linear de semivariograma e krigagem para classificação de sítios de *Pinus radiata* em Nova Zelândia. Igualmente em estudos com *Pinus radiata* na Nova Zelândia Kimberley *et al.* (2005) e Palmer *et al.* (2010) utilizaram-se da geoestatística.

Outras aplicações da geoestatística na área florestal foram na estimativa de volume total de madeira num povoamento de *Pinus sylvestris*, *Picea abies* e árvores decíduas (GUNNARSON *et al.*, 1998), no monitoramento de mudanças na produtividade e nutrição de florestas comerciais na Nova Zelândia (PAYN *et al.*, 1999) e, no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de Eucalipto e atributos do solo e relevo (ORTIZ, 2003).

Diversos trabalhos foram publicados a partir dos estudos de Mello (2004) com a geoestatística aplicada ao inventário florestal e Bognola (2007) na

determinação de unidades de manejo para *Pinus taeda* L. no planalto norte catarinense, com base em características do meio físico.

Utilizando a geoestatística Wojciechowski (2006) estudou as características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual; Zas *et al.* (2007) descreveram a distribuição espacial da resistência de *Pinus pinaster* à *Armillaria ostoyae* em condições de campo; Castro (2008) fez um zoneamento agroclimático para cultura do Pinus no estado do Espírito Santo; e Oda-Souza (2009) utilizou a geoestatística para modelagem de quatro formações florestais do estado de São Paulo.

Amaral (2010) usou ferramentas geoestatísticas na caracterização do solo e da vegetação em floresta ombrófila mista e Lima *et al.* (2010) estudaram atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do Eucalipto.

Estudos mais recentes utilizaram da geoestatística na dinâmica e correlação espacial dos atributos químicos do solo e do desenvolvimento de *Tectona grandis* L.f. em povoamento homogêneo (PELLISSARI, 2012); no desenvolvimento de modelos regionais para altura de *Pinus radiata* (WATT *et al.*, 2013); na modelagem da distribuição de carbono do solo e biomassa de herbáceas em sistema silvopastoril (CORREIA, 2013); no estudo da variabilidade de espécies nativas e fragmentos do cerrado brasileiro no estado de São Paulo (NEVES, 2013); e na espacialização do volume de madeira no cerrado *sensu strictu* em Minas Gerais (SILVA, 2014).

## 2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2013: Ano base 2012**. Brasília: 2013.

ALEMDAG, I. S. National site-index and height-growth curves for white spruce growing in natural stands in Canada. **Canadian Journal of Forest Research**, v.21, n.10, p. 1466-1474, 1991.

AMARAL, L.P. **Geoestatística na caracterização do solo e da vegetação em floresta ombrófila mista**. 154f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava – PR, 2010.

ANDRADE, A. R. S.; GUERRINI, I. A.; GARCIA, C. J. B.; KATEZ, I.; GUERRA, H. O. C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. **Ciência Agrotecnológica**. vol. 29, n. 2, p. 322-329, 2005.

ARCE, J.E. **Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte**. Curitiba, 2000. 121p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

ASSUMPÇÃO, R. A. B.; URIBE-OPAZO, M. A.; GODOY, E.; JOHANN, J. A. Uso da krigagem indicatriz na avaliação da probabilidade da produtividade de soja segundo os padrões regional, estadual e nacional. **Acta Scientiarum: Agronomy**, vol. 29, p. 165-171, 2007.

BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial forest planning: A review. **Ecological Modeling**, Netherlands, v.188, p.29, 2005.

BATISTA, J.L.F. e COUTO, H.T.Z. Escolha de modelos matemáticos para construção de curvas de índice de sítio para florestas implantadas de *Eucalyptus* sp. no Estado de São Paulo. **IPEF**. Piracicaba, v.32, p.25-35, 1986.

BECKER, G. Precision Forestry in Central Europe: new perspectives for a classical management concept. In: INTERNATIONAL PRECISION FORESTRY COOPERATIVE SYMPOSIUM, 1., Seattle, 2001. **Proceedings**. Seattle: University of Washington College of Forest Resources, 2001. P.7-9.

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

BOGNOLA, I. A. **Unidades de Manejo para *Pinus taeda* L. no Planalto Norte Catarinense, com Base em Características do Meio Físico**. Curitiba, 2007. 180p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

- BOGNOLA, I.A.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J.; SILVA, E.A.A.; LINGNAU, C.; HIGA, A.R. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L.. **Revista Floresta**. Curitiba, PR, v.38, n.2, 2007.
- BORDERS, B. E. e BAILEY, R. L. Stand density in slash and loblolly pine plantations. **PMRC Research Paper**, 1985.
- BRANDELERO, C.; ANTUNES, M. U. F.; GIOTTO, E. Silvicultura de precisão: nova tecnologia para o desenvolvimento florestal. **Ambiência**. Guarapuava, PR, v.3, n.2, p.269-281, 2007.
- BRUM, E.T. **Relações entre a altura dominante e fatores de sitio em povoamentos de *Pinus elliottii*, na região de Ponte Alfa do Norte, SC**. Curitiba, 1979. 190p. Dissertação Mestrado – Universidade Federal do Paraná.
- BUONGIORNO, J.; GILLES, J.K. **Forest management and economics. A primer in quantitative methods**. 285p. Macmillan Publishing Company. New York, 1987.
- BURROUGH, P. A.; BOUMA, J.; YATES, S. R. **The state of the art in pedometrics**. Geoderma, Amsterdam, v.62, n.1/3, p.311-326, 1994.
- CAMPOS, J.C.C. Equações para calcular índice de local e incremento da altura em plantações puras de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v.9, n.1, p.1-9, 1985.
- CASTRO, F.S. **Zoneamento Agroclimático para a cultura do Pinus no Estado do Espírito Santo**. 123f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre – ES, 2008.
- CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York, John Willey e Sons, 1983.
- COELHO, V. C. M. **Avaliação do manejo da produção econômica de madeira de *Pinus taeda* L.com características qualitativas superiores**. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- COHEN, W.B.; SPIES, T.A.; BRADSHAW, G.A. Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure. **Remote Sensing of Environment**, v.34, n.3, p.167-178, 1990.

CORÁ, J. E.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, vol.26, n.2, p.374-387, 2006.

CORREIA, M.D. **Modelagem geoestatística da distribuição de carbono do solo e biomassa de herbáceas em sistema silvopastoril**. Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife – PE, 2013.

DAVID, M. Handbook of applied advanced geostatistical ore sererve estimation. New York: **Elsevier**, 1988. 216p.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M.; CAMARGO, E. C. G.; FELGUEIRAS, C. A.; CRUZ, O. G.; CORREA, V. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: Embrapa, 2004. 209p.

DUARTE, J.B. **Sobre o emprego e a análise estatística do delineamento em blocos aumentados no melhoramento genético vegetal**. Piracicaba, 2000. 292p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

DUERR, W. A.; TEEGUARDEN, D. E.; CHRISTIANSEN, N. B.; GUTTENBERG, S. **Forest Resource Management: Decision-Making Principles and Cases**. Corvallis: O.S.U. Book Stores, p.612, 1982.

FARACO M.A.; URIBE-OPAZO, M.A.; SILVA, E.A.; JOHANN J.A.; BORSSOI, J.A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v.32, n.2, p.463-476, 2008.

FERREIRA, R. A. **Análise genética e seleção em testes dialélicos de *Pinus taeda* L.** 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

FIETZ, C. R. **Variabilidade espacial do armazenamento de água no solo visando o manejo da irrigação por aspersão**. 1998. Tese (Doutorado em Irrigação) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. ESALQ/USP, Piracicaba.

GOMES, N. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; FARIA, M. A.; OLIVEIRA, P. M. de. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 435-443, 2007.

GOMIDE, L. R. **Planejamento Florestal Espacial**. Curitiba, 2009. p. 256. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

GONÇALVES, J. L. M. **Recomendações de adubação para Eucalyptus, Pinus e espécies típicas da Mata Atlântica**. ESALQ/USP. Documentos Florestais, v.15, p.1-23, 1995.

GUERRA, P.A.G. **Geoestatística Operacional**. Brasília: DNPM, 1988. 145p.

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

GUNNARSON, F. On the potential of krigagem for forest management planning. **Scandinaviam Journal of Forest Research**, v.13, n.2, p.237-245,1998.

HÖCK, B.K.; PAYN, T.W.;SHIRLEY, J. Using a geographic information system and geostatistics to estimate site index of *Pinus radiata* for Kaingaroa forest. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.23, p.264-277, 1993.

IBÁ. **Indústria brasileira de árvores 2014**. Brasília: 2014.

INOUE, N.; XAVIER, S.R.; ROMANEL, C. **Análise geoestatística do subsolo da usina nuclear de Angra 2**. In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO DA AMÉRICA LATINA - GIS BRASIL 99, 5., Salvador, 1999. Anais. Salvador, 1999.

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

JOHNSON, D.R.; GRAYSON, A.J.; BRADLEY, R.T. **Planeamento florestal**. Lisboa: Fundação Galouste Gulbenkian, 1977. 788p.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMANN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives – discussion and synthesis. **Forest Science Monograph**, USA, v.18, n.1, p.1-31, 1977.

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

KIMBERLEY, M.; WEST, G.; DEAN, M.; KNOWLES, L. The 300 index – a volume productivity index for radiate pine. New Zeland. **NZ Journal of Forestry.**, 2005.

KOHLER, S. V. **Evolução do afilamento do tronco e do sortimento em plantios de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

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

LANDIM P.M.B. 2006. Sobre Geoestatística e mapas. **Terrae Didactica**, v.2,n.1, p.19-33.

LEENAERS, H.; OHX, J. P.; BURROUGH, P. **Comparison spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution.** *Catena*, v. 17, 1990. p.535-550.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S. SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de tributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**. vol.34, n.1, p. 127-136, 2010.

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**. vol.31, n.3, pp. 591-599. 2007.

MACHADO, S. A. **Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus taeda* na região central do Estado do Paraná.** 1981.

MARQUES, M. M. G. **Geoestatística aplicada na análise biométrica dos montados de sobreiro e azinheira.** 163 f. 2006. Dissertação (Mestrado em Georrecursos) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa – Portugal.

MATÉRN, B. **Spatial variation: stochastic models and their application to some problems in forest surveys and other sampling investigations.** Stockholm: Skogsforsknings Institut, 1960. 144p. (Skogsforsknings Institut. Meddelanden fran Statens Skogsforsknings Institut, v.49, n.5)

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

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

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

MCGAUGHEY, R.J., Using data-driven visual simulations to support forest operations planning. In: Proceedings of the First International Precision Forestry Cooperative Symposium; June 17-20, 2001, Seattle, WA. Seattle, WA: University of Washington, **College of Forest Resources**. 173-179. 2001

MELLO, J. M. **Geoestatística Aplicada ao Inventário Florestal**. Piracicaba, 2004. 122p. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz – Universidade de São Paulo.

MONTES, F.; HERNANDEZ, M.; CALAMA, R.; CANELLAS, I. Extended length rotation to integrate timber and pine nut production with the conservation of structural diversity in a *Pinus pinea* (L.) forest. **EDP Sciences**. p.773-781, 2006.

NEVES, D.A. **Geoestatística aplicada ao estudo da variabilidade de espécies nativas em fragmentos do cerrado brasileiro no estado de São Paulo**. 172f. Tese (Doutorado) – Universidade da Coruña, Coruña, 2013.

ODA-SOUZA, M. **Modelagem geoestatística em quatro formações florestais do Estado de São Paulo**. 100f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba – SP, 2009.

ÖHMAN, K. **Forest Planning with Consideration to Spatial Relationships**. Ultuna, 2001. 32f. Thesis. Swedish University of Agricultural Science.

OLIVEIRA, E. B. de; OLIVEIRA, Y. M. M. de; AHRENS, S.; MACHADO, S. A. Classificação de sítios para povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. no Sul do Brasil. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Colombo, n. 37, p. 5-18, jul./dez. 1998.

OLIVEIRA, E.B. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de *Pinus taeda* L., com critérios quantitativos para a avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. Curitiba, 1995, 134p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

ORTIZ, J. L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**. 220 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba – São Paulo.

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

OSBORNE, J.G. Sampling errors of systematic and random surveys of cover-type areas. **Journal Statistics Association**, v.37, p.256-264, 1942.

PALMER, D. J.; WATT, M. S.; KIMBERLEY, M. O.; HÖCK, B. K.; PAYN, T. W.; LOWE, D. J. Mapping and explaining the productivity of *Pinus radiata* in New Zealand. **NZ Journal of Forestry**. New Zealand, v.55 n.1, p.15-21, 2010.

PANNATIER, Y. **Variowin – Software for spatial data analysis in 2D**. New York: Springer-Verlag, 1996. 90 p.

PAYN, T.W.; HILL, R.B.; HOCK, B.K.; SKINNER, M.F.; THORN, A.J.; RIJKSE, W.C. Potential for the use of GIS and spatial analysis techniques as tools for monitoring changes in forest productivity and nutrition, a New Zealand example. **Forest Ecology and Management**, v.122, n.1/2, p.187-196, 1999.

PELISSARI, A.L. **Silvicultura de precisão aplicada ao desenvolvimento de *Tectona grandis* na região sul do Estado de Mato Grosso**. 88f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2012.

RENNIE, P. J. Methods of assessing forest site capacity. **Commonwealth Forest Review**, v.42, n.114, p.306-317, 1963.

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

RIBEIRO, C. A. A. S. Floresta de Precisão. In: MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. Viçosa: UFV, 2002. p. 311-335.

RIBEIRO, C.A.A.S. et al. Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Amazônia Legal. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO CENTRO-OESTE, 2., 2002, Campo Grande. **Anais**. Campo Grande: 2002.

ROCHA, D. X. **Otimização do planejamento da manutenção preventiva em sistemas complexos, com foco na cadeia de suprimento**. Florianópolis, 2002. 84f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.

RODRIGUEZ, L.C.E.; BUENO, A.R.S.; RODRIGUES, F. Rotações de eucaliptos mais longas: análise volumétrica e econômica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.51, p.15-28, 1997.

RUFINO, T. M. C.; THIERSCH, C. R.; FERREIRA, S. O.; KANEGAE JUNIOR, H.; FAIS, D. Uso da Geoestatística no estudo da relação entre variáveis dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e atributos do solo. **Ambiência**, v. 2, n. 1, p. 83- 93, 2006.

SADY JÚNIOR MARTINS DA COSTA DE MENEZES, S.J.M.C.; SEDIYAMA, G.C.; SOARES, V.P.; GLERIANI, J.M.; RIBEIRO, C.A.A.S; ANDRADE, R.G. Floresta de precisão: determinação da evapotranspiração regional em plantio de eucalipto utilizando o algoritmo sebal e o sensor orbital tm-landsat 5. **SBIAgro - 7o Congresso Brasileiro de Agroinformática**, 2009. Disponível: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/34988/1/T043.pdf> Acesso: 13/09/2014.

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

SANQUETTA, C.R. **Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal**. Curitiba: FUPEF, 1996. (Série Didática nº 08).

SCHIMIZU, J. Y., **Pinus na Silvicultura Brasileira**, Embrapa Florestas. Disponível: [http://ambientes.ambientebrasil.com.br/florestal/artigos/pinus\\_na\\_silvicultura\\_brasileira.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/florestal/artigos/pinus_na_silvicultura_brasileira.html) Acesso em 20/09/2014.

SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. A. Curvas de índice de sitio para plantações de *Pinus elliottii* no estado do Paraná e Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v.23, n.1-2, p.140-158, 1988.

SCOLFORO, J.R.S. **Manejo Florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 438p.

SCOLFORO, J.R.S. **Sistema integrado para predição e análise presente e futura de crescimento e produção, com otimização de remuneração de capitais, para *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. Curitiba, 1990. p.290. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

SEPPELT, R.; VOINOV, A. Landscape Optimization: Applications of a Spatial Ecosystem Model. P.301-326. In:CONSTANZA, R.; VOINOV, A. (Eds.) **Landscape Simulation Modeling a Spatially Explicit, Dynamic Approach**. Springer. 2004. 330p.

SILVA, S.T. **Espacialização do volume de madeira no Cerrado *Sensu Strictu* em Minas Gerais**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2014.

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

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to special studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45-94, 1985.

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, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um latossolo roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.1-17, 1997.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. **Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties**. Hilgardia, Berkeley, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAES, R.S.; ALVAREZ V, V.H.; SCHAESER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em Ciências do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. cap.1, p.1-54.

VIGOLO, D. Z. **Planejamento estratégico otimizado para plantios de *Eucalyptus* spp.** Curitiba, 2008. p.135. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.

WATT, P.; MEREDITH, A.; YANG, C.; WATT, M. Development of regional models of *Pinus radiata* height from GIS spatial data supported with supplementary satellite imagery. **New Zealand Journal of Forestry Science**, 43:11, 2013.

WEINTRAUB, A.; CHOLAKY, A. A hierarchical approach to forest planning. **Forest Science**, USA, v.37, n.2, p.439-460, 1991.

WOJCIECHOWSKI, J. C. **Geoestatística Aplicado ao Estudo das Características Físico-Químicas do Solo em Áreas de Floresta Estacional Decidual**. Dissertação de Mestrado, UFSM, 2006.

WOLFF II, N. I. **Modelagem do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L.** 62f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, 2012.

WULDER, M.; LAVIGNE, M.; FRANKLIN, S. High spatial resolution optical image texture for improved estimation of forest stand leaf area index. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.22, n.4, p.441-449, 1996.

ZAS,R.; SOLLA, A.; SAMPEDRO, L. Variography and kriging allow screening *Pinus pinaster* resistant to *Armillaria ostoyae* in field conditions. **Forestry** 80, 201-209, 2007.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise especial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001.114p. Tese (livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

## **CAPÍTULO II: ANÁLISE ESPACIAL DE ÍNDICE DE SÍTIO EM *Pinus taeda* L PARA DETERMINAÇÃO DE UNIDADES DE MANEJO NO CENTRO SUL DO PARANÁ.**

### **RESUMO**

Os cenários que a economia vem praticando pressionam os manejadores a terem maior assertividade e precisão nas suas tomadas de decisões e a buscar soluções que otimizem as operações florestais e reduzam as ineficiências e retrabalhos. Uma alternativa é a utilização da geoestatística. Ela explora adequadamente as relações existentes entre as unidades amostrais com base em sua localização, diferente dos métodos estatísticos tradicionais que utilizam média e variância para descrever determinado fenômeno, sem levar em consideração as possíveis correlações entre as observações vizinhas. Dessa forma esse estudo teve como objetivo utilizar as relações espaciais de índice de sítio na determinação de unidades de manejo de *Pinus*. O estudo foi desenvolvido em um povoamento de *Pinus taeda* L. de diversas idades, com 2.111 hectares, localizado na região centro-sul do Paraná. Ao todo foram utilizadas 402 parcelas. O Índice de Sítio foi calculado pela altura dominante e idade até a idade de referência de 15 anos. Inicialmente os dados foram submetidos à estatística descritiva simples e depois se ajustou 4 modelos de semivariogramas no programa GS+. Finalmente fez-se a interpolação e espacialização dos dados, pela krigagem ordinária, gerando um mapa de classificação de sítios sob a ótica espacial, que definiu novos talhões. A krigagem foi validada pela validação cruzada. A partir do retalhamento o cadastro florestal foi atualizado. Os resultados mostraram que o índice de sítio possui dependência espacial. O modelo escolhido foi o esférico. A correlação entre os valores reais e estimados produziu um coeficiente de regressão (coeficiente angular) de 1,068 com erro padrão de 0,070m, e o coeficiente linear de -1,45, condições essas ótimas para as estimativas. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) encontrado foi de 0,373, considerado para o caso como satisfatório. Sendo assim fica evidente que a krigagem do índice de sítio é uma ferramenta que pode ser utilizada na determinação de unidades de manejo, principalmente para locais não amostrados, caso dos plantios jovens.

Palavras-chave: geoestatística, krigagem, dependência espacial, talhonamento.

## ABSTRACT

The scenarios that the economy has been practicing pressure the managers to have greater assertiveness and precision in their decision-making and to seek solutions that optimize forest operations and reduce inefficiencies and rework. An alternative is the use of geostatistics. It adequately explores the relationship between the sampling units based on their location, unlike traditional statistical methods using mean and variance to describe certain phenomenon, regardless of the possible correlations between neighboring observations. Thus this study aimed to use the spatial relationships of site index in determining *Pinus* management units. The study was carried out in a *Pinus taeda* L. stand of various ages, with 2,111 hectares, located in the center-southern region of Paraná. In all, 402 plots were used. The site index was calculated by the dominant height and age until the reference age of 15 years. Initially, data were submitted to simple descriptive statistics and then 4 semivariogram models are adjustment in the GS + program. Finally it was make interpolation and spatial distribution of data, by ordinary kriging, generating sites classification map under the spatial point of were, which set new stand compartments. Kriging was validated by cross-validation. From the stands redivision forest database has been updated. The results showed that the site index has spatial dependence. The model chosen was the spherical. The correlation between actual and estimated values produced a regression coefficient (slope) of 1.068 with a standard error of 0,070m, and the linear coefficient of -1.45, these optimal conditions for the estimates. The coefficient of determination ( $r^2$ ) was found to be 0.373, considered for the case as satisfactory. Thus it is evident that the kriging site index is a tool that can be used in the determination of management units, mainly for non-sampled locations, for young plantations.

Keywords: geostatistics, kriging, spatial dependence, stands division.

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Bognola (2007) a região sul do Brasil apresenta um quadro ecológico de nítidos e variados contrastes fisiográficos, constituindo-se um mosaico de ambientes com diferenciações de clima, solos, vegetação natural e usos.

A atividade de reflorestamento, mais especificamente o plantio de *Pinus*, está como qualquer outra atividade agrícola, intimamente relacionada com os componentes ecológicos: solo-clima, organismos e sócioeconomia, que mantêm uma estreita dinâmica de inter-relações de dependência (RIGATTO *et al.*, 2005).

Dessa forma a avaliação da qualidade do ambiente torna-se fundamental na formulação de propostas de regimes de manejo mais adequados para o planejamento de uso sustentado das terras, e nas predições sobre o potencial produtivo de uma dada espécie em determinado local. Além disso, as empresas florestais necessitam aumentar a produtividade das suas essências para viabilizar o agronegócio bem como de dados de suas produtividades bem antes da realização dos cortes (BOGNOLA, 2007).

Scolforo e Machado (1988) comentam que a classificação das terras florestais quanto ao seu potencial de produtividade é um importante elemento, tanto para o manejador, como para o administrador da empresa florestal, já que o índice que expressa esta produtividade é uma variável requerida nos modelos de predição presente e futura do crescimento e da produção. A importância desta classificação é, entretanto, muito mais ampla, podendo ser à base da estratificação dos povoamentos florestais, tanto para fins de inventário como para fins de exploração, ainda clarificando as possibilidades e riscos para o manejo das florestas, sendo, portanto, uma variável a ser considerada em planejamentos local, regional, de curto ou longo prazo.

Em muitos casos, numa mesma classe de solo os valores médios dos índices de sitio obtidos podem ser diferenciados. Bognola (2007) comenta que é preciso identificar as classes de solos, no mínimo até o quarto nível do sistema brasileiro de classificação, pois aí poderão estar às explicações para as diferentes produções de uma espécie florestal e para a melhor definição de sítios florestais.

Scolforo (1997) enfatiza que a estimativa da qualidade de sítio mediante a “classificação multifatorial de sítio” é seguramente o procedimento de classificação da produtividade mais eficiente, porque se faz o uso de estatística multivariada, a qual possibilita interpretar um conjunto de vários fatores ao mesmo tempo. Identificar se precipitação, umidade relativa, temperatura, profundidade do solo, macro e micronutrientes, dentre outros, explicam com a mesma intensidade ou não a qualidade do sítio.

Entretanto a obtenção de todas essas variáveis torna-se um processo oneroso e distante da realidade de muitas empresas do setor florestal, além de sua complexidade na aplicação da multivariada não tem sido muito utilizada pelos pesquisadores e técnicos de forma geral.

Dessa forma dentre os vários métodos que possibilitam expressar a capacidade produtiva, segundo Scolforo e Machado (1988) é unânime a utilização do índice de sítio baseado na altura média das árvores dominantes, pois se trata de uma metodologia mais prática que apresenta eficiência na estimativa do potencial de produtividade relativa aos locais, visto que essa variável não é afetada pelos tratamentos silviculturais, além de ser uma variável facilmente obtida pelas amostragens tradicionais do inventário florestal.

Por outro lado, o atual panorama florestal tem exigido dos manejadores uma mudança da abordagem tradicional, adotando técnicas da silvicultura de precisão pela integração de dados com um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Conforme destaca Barbosa (1997), uma das características importantes dos SIG é representar a informação espacial numericamente modelando-a por estatística espacial (geoestatística).

E se os manejadores pudessem aliar às parcelas de inventário da amostragem tradicional uma informação espacial de sítio? E se por meio da análise espacial do sítio, expressa pelo índice de sítio os manejadores pudessem determinar mapas de classificação de sítios e partir dele redefinir suas unidades de manejo? A modelagem espacial do índice sítio permite a descrição quantitativa da variabilidade do sítio e a estimativa não tendenciosa da variância mínima de valores de sítio em locais não amostrados, além de balizar classes de sítios pela geração de mapas, podendo subdividir talhões que anteriormente possuíam uma média geral.

Oliveira (1998) já comentava que o conhecimento da qualidade de sítio para cada unidade do terreno a ser manejada e de sua classificação quanto à sua capacidade produtiva é um importante critério para o moderno manejo florestal.

Os métodos tradicionais de estatística usados para inventário florestal utilizam-se de uma medida central (média) e uma de dispersão (variância) para descrever o índice de sítio, sem levar em consideração, as possíveis correlações entre observações vizinhas. Portanto, eles não exploram suficientemente as relações que possam existir entre as unidades amostrais. Já os métodos de geoestatística podem melhor avaliar a estrutura de dependência espacial entre as características dendrometrias da espécie em estudo com as variáveis do meio físico, no sentido de se obter resultados que sejam capazes de explorar adequadamente as relações espaciais existentes entre os dados, ou seja, a geoestatística e um método estatístico que explora as relações existentes entre as unidades amostrais.

Acessar essa variabilidade por meio da análise espacial do índice de sítio faz da geoestatística uma eficiente ferramenta na classificação de sítios das espécies florestais.

Dessa forma esse capítulo teve como objetivo utilizar as relações espaciais/geoestatística de índice de sítio na determinação de unidades de manejo de *Pinus*.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi desenvolvido em um povoamento de área aproximada de 2.111 hectares de *Pinus taeda* L. de diversas idades, localizado parte no município de Bituruna e parte no município de General Carneiro, região centro sul do estado do Paraná. Apresenta coordenada central UTM, zona 22 sul de latitude 445.008 e longitude 7.089.916, com uma altitude média de 985 metros (FIGURA 3).

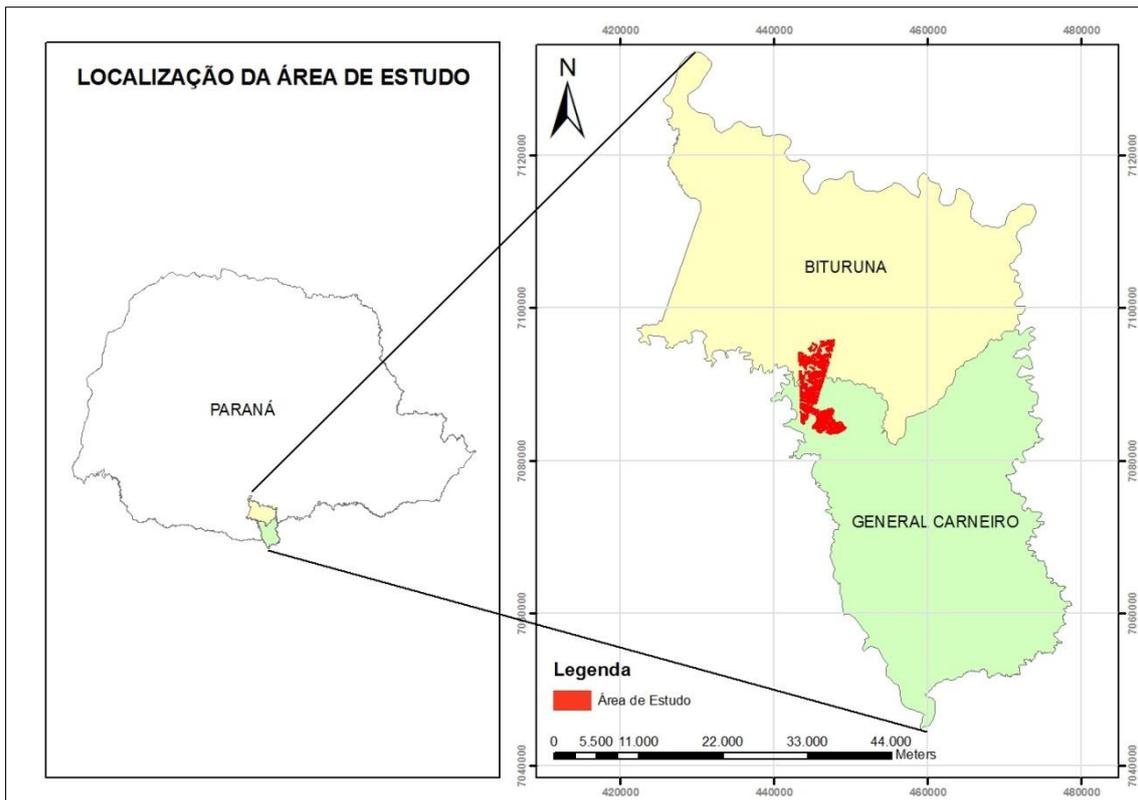


FIGURA 3: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

O clima dominante é do tipo Cfb, segundo Köppen, ou subtropical úmido mesotérmico caracterizado por verão fresco e inverno rigoroso com geadas severas e frequentes, concentradas nos meses de março a setembro. Não apresenta estação seca característica e tem temperaturas médias nos meses mais quentes inferiores a 22°C e nos meses mais frios com médias abaixo de 18°C. O regime de chuvas é irregular, com diminuição no período de inverno e maior intensidade no verão. A precipitação média anual é de 1.600 a 1.770 mm. Quanto à umidade relativa do ar, predominam índices médios entre 80% e 85%.

A área está localizada no terceiro planalto do Paraná, também chamado de planalto de Guarapuava, é a mais extensa das unidades de relevo do estado e também é representado por rochas da Bacia do Paraná. O Relevo predominante é ondulado e os solos predominantes são os Cambissolos e Argissolos.

Os dados foram coletados a partir de parcelas de inventário florestal contínuo (IFC) de 600 m<sup>2</sup> em povoamentos de *Pinus taeda* com idades de 5 a 10 anos e de 13 a 15 anos em função da qualidade do sítio.

Ao todo foram utilizadas 402 parcelas distribuídas conforme FIGURA 4.

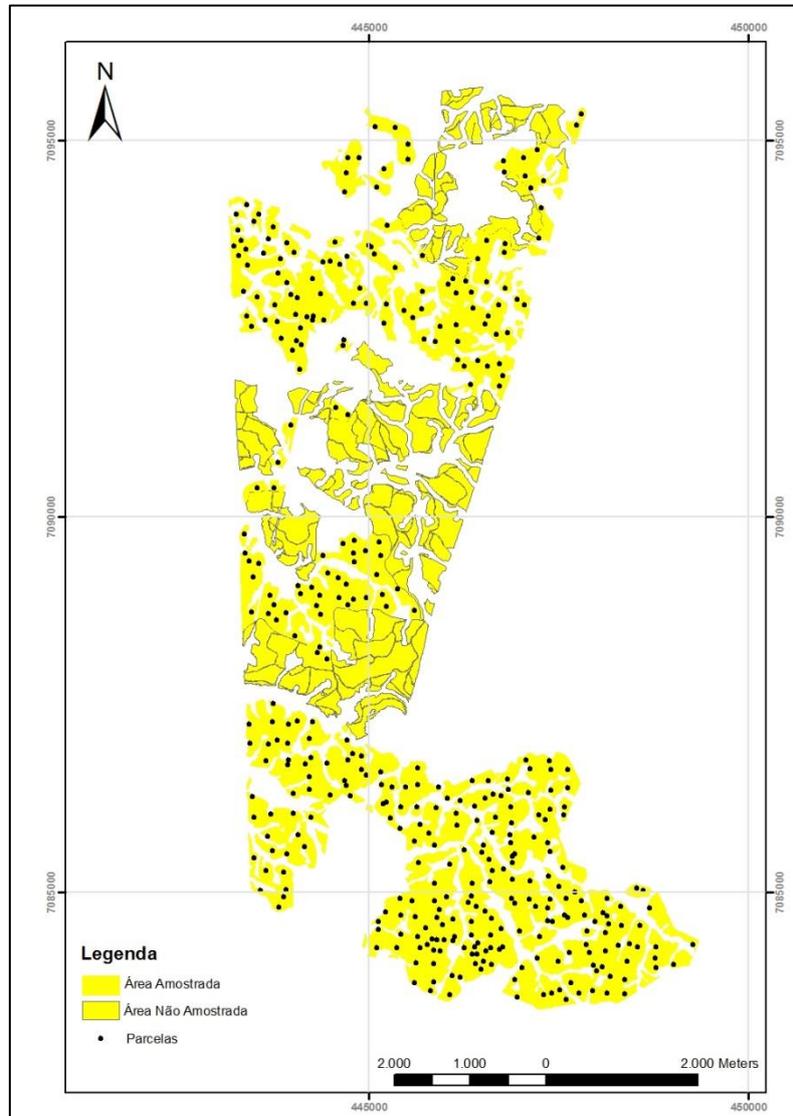


FIGURA 4: LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS NA ÁREA DE ESTUDO.

A variável utilizada para caracterizar a qualidade do sítio de cada povoamento foi o Índice de Sítio (IS). A determinação da altura dominante (HDOM), que está relacionada com a capacidade produtiva de sítios florestais, foi obtida pelo método de Assmann (1961) que considera a altura dominante como a média da altura das cem árvores de maior DAP em um hectare.

Como as idades de medições nos povoamentos variaram, todas as alturas dominantes foram projetadas para 15 anos de idade pela equação disponível no software “SISPINUS” (OLIVEIRA, 1995), dada por:

$$IS = HDOM(e^{4,6433\{[(1/i)^{0,56}] - 0,2195\}})$$

Onde:

Inicialmente os dados foram submetidos à estatística descritiva simples, com a determinação de medidas de posição (média e mediana) e dispersão (variância, desvio padrão, valores máximos e mínimos, etc.) e forma (curtose, coeficientes de simetria e gráfico de probabilidade normal), pelo programa estatístico GS+ 10.0 e submetidos a vários testes de normalidade, ao nível de 5%. Este tipo de análise, embora desconsidere a estrutura da dependência espacial, é importante porque permite a identificação de dados atípicos que podem exercer alguma influência nas análises geoestatísticas.

Para descrever e modelar os padrões espaciais da variável de interesse, nesse caso Índice de Sítio (IS) de *Pinus taeda*, foi utilizado a geoestatística com o ajuste do semivariograma no programa GS+ 10.0 versão demonstração. Foram testados 4 modelos de semivariogramas (TABELA 1). Nos semivariogramas o melhor modelo foi escolhido com base na menor soma de quadrados dos resíduos (SQR) e maior coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>).

TABELA 1: MODELOS DE VARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA ÍNDICE DE SÍTIO DE *Pinus taeda* NA REGIÃO DE BITURUNA E GENERAL CARNEIRO – PR.

MODELO	EXPRESSÃO
Esférico	$\gamma(h) = C_0 + C \left[ \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{h}{A} \right) - \left( \frac{1}{2} \right) \left( \frac{h}{A} \right)^3 \right]$
Exponencial	$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-h/A})$
Gaussiano	$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-h^2/A^2})$
Linear	$\gamma(h) = C_0 + p(h)^A$

Segundo GUIMARÃES 2004 o programa GS+, aplica a metodologia dos mínimos quadrados para os ajustes dos modelos e utiliza como critérios para seleção do modelo o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a soma de quadrados de resíduos (SQR), por meio de combinações dos parâmetros do modelo, minimizando esta soma de quadrados de resíduos.

A anisotropia, ou seja, a existência de uma variação que não é a mesma em todas as direções (GUEDES *et al.*, 2008), foi verificada na execução dos semivariogramas nas direções 0, 45, 90 e 135 graus e se necessário corrigida para obtenção de um semivariograma isotrópico.

Após o ajuste dos modelos foi obtido o grau de dependência espacial (GDE%), que representa a proporção ocupada pelo efeito pepita ( $C_0$ ) dentro do patamar ( $C' = C + C_0$ ). Segundo Cambardella *et al.* (1994), quanto mais próximo de um for essa relação menor é a dependência espacial, classificada como:

- a) Variável com forte dependência espacial – se o efeito pepita for menor ou igual a 25% do patamar;
- b) Variável com moderada dependência espacial – se o efeito pepita representar entre 25% e 75% do patamar;
- c) Variável com fraca dependência espacial – se a relação entre efeito pepita e patamar estiver entre 75% e 100%;
- d) Variável independente espacialmente – se a relação entre efeito pepita e patamar for igual a 100%, neste caso temos o semivariograma com efeito pepita puro.

De posse do melhor modelo de semivariograma fez-se a predição em locais não amostrados, ou seja, a interpolação e espacialização dos dados, com o método krigagem ordinária, sendo que a análise exploratória dos dados e a cartografia elaborada foram realizadas no *software* SIG – ArcView 9.1 com as extensões *Geostatistical* e *Spatial Analyst*.

As estimativas da variável principal Índice de Sítio, calculadas pela krigagem, foram avaliadas por determinação dos erros cometidos no processo de estimação por meio da validação cruzada.

Finalizando o processo, a partir do mapa de classificação de sítios gerado pela krigagem fez-se a atualização do cadastro florestal, atribuindo a cada talhão um índice de sítio. Considerou-se unidades de manejo somente os

talhões com área superior a 1 hectare. Para os talhões iniciais atribuiu-se o nome de “TRADICIONAL” e para os gerados pela krigagem de “KRIGAGEM”.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na TABELA 2 são apresentados os resultados da estatística descritiva. Verificou-se pelos testes de normalidade que a variável índice de sítio apresentou certa normalidade.

TABELA 2: ESTATÍSTICA DESCRITIVA DE ÍNDICE DE SÍTIO DE *Pinus taeda* L. NA REGIÃO CENTRO SUL DO ESTADO DO PARANÁ.

Momento	Índice de Sítio
Média	21,26
Mediana	21,34
Desvio padrão	1,62
Curtose	2,23
Assimetria	-0,36
CV (%)	7,6%

Os testes de normalidade avaliam a hipótese nula, ou seja, de que as amostras provêm de uma população com distribuição normal, possuindo distribuição unimodal, em geral simétrica.

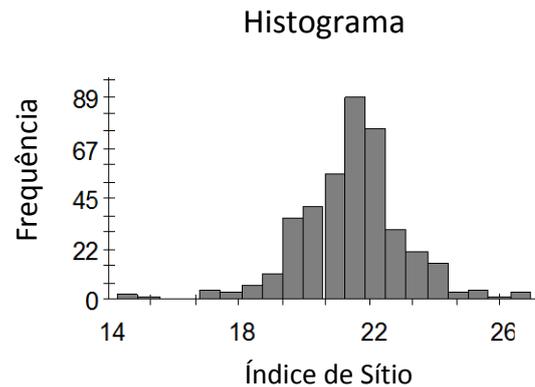
TABELA 3: TESTES DE NORMALIDADE REALIZADOS COM DADOS DE ÍNDICE DE SÍTIO DE *Pinus taeda* L. NA REGIÃO CENTRO SUL DO PARANÁ.

Teste	Valor	Vcrit	p-valor
Kolmogorov-Smirnov (D)	0,06629	0,04457	p < .01
Cramér-von Mises (W2)	0,4978	0,12584	p < .01
Kuiper (V)	0,12664	0,07393	p < .01
Watson (U2)	0,48883	0,11586	p < .01
Lilliefors (D)	0,06629	0,04419	p < .01
Shapiro-Wilk (W)	0,96952	-	0.00000

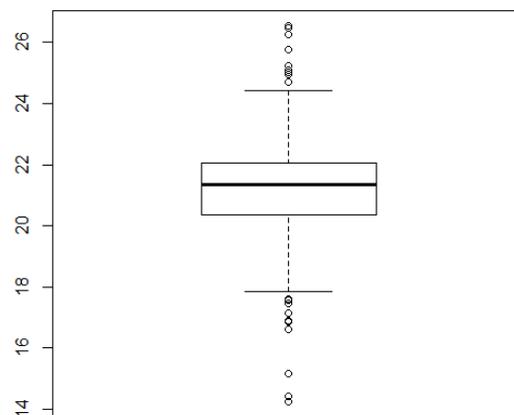
A simetria da distribuição também é fornecida pela semelhança da média e mediana. Segundo Cressie (1993), toda inferência geoestatística linear tem se desenvolvido sob o fundamento da modelagem estocástica de que os dados tenham distribuição normal. Porém deve-se observar, segundo Mello (2004), que a geoestatística não exige a normalidade dos dados para ser

aplicada. Sua existência somente melhora algumas propriedades estatísticas como a máxima verossimilhança, e garantem a continuidade espacial, que é fortemente afetada na sua ausência (CRESSIE, 1993).

FIGURA 5: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA (a) E BOX PLOT (b) DAS AMOSTRAS DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA *Pinus taeda*.



(a)



(b)

A análise dos dados também foi importante para observação de *outliers*. Estes valores segundo Diggle e Ribeiro Junior (2007) podem distorcer a variância do ruído (efeito-pepita), provocando falsa existência da correlação espacial. Diante do exposto, os valores “candidatos” a discrepantes foram removidos da base de dados para uma coerente análise espacial de ajuste do semivariograma.

Pela análise do semivariograma pode-se observar que a variável índice de sitio apresenta-se arranjada espacialmente podendo ter um ajuste espacial. Na TABELA 3 encontram-se os resultados dos ajustes do semivariogramas.

TABELA 4: PARÂMETROS DOS SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA ÍNDICE DE SÍTIO DE *Pinus taeda* L. NO CENTRO SUL DO PARANÁ.

Modelo	Efeito Pepita (Co)	Patamar (Co+C)	Alcance (A(m))	GDE (%)	r <sup>2</sup>	SQR
Linear	1,4616	4,1381	5.791	35%	0,7030	3,98
Esférico	1,0680	3,7360	5.330	29%	0,7760	3,00
Exponencial	1,1000	4,8530	12.690	23%	0,7330	3,57
Gaussiano	1,4630	3,8950	5.075	38%	0,7950	2,74

Onde: Efeito pepita (Co)= *Nugget*; patamar (Co+C)= *Sill*; alcance (A) = *range*; GDE = grau de dependência espacial; r<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; SQR = soma de quadrado dos resíduos.

Em qualquer um dos modelos observou-se a presença de dependência espacial para a variável índice de sitio, com grau de dependência espacial classificado como forte a moderado, mostrando que a krigagem pode ser um potencial otimizador na classificação de sitio, concordando com os resultados encontrados por Hock *et al.* (1993), Gunnarsson *et al.* (1998), Ortiz (2003), Mello (2004), Montes *et al.* (2006), Bognola *et al.* (2007) e Palmer *et al.* (2010).

Exemplificando o modelo esférico, significa que para a variável índice de sitio o efeito pepita corresponde a 29% do patamar, ou seja, 71% da variabilidade foi explicada pela correlação espacial. Segundo Vieira (1997) e (1998), quanto menor a proporção do efeito pepita para o patamar (GE%), 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.

Biondi *et al.* (1994), estudando o comportamento espacial do diâmetro altura do peito e da área basal de *Pinus ponderosa* tiveram o ajuste com o modelo Gaussiano. Gunnarsson *et al.*, (1998) ajustou o modelo esférico no semivariograma e krigagem para índice de sitio em *Pinus sylvestris*. Pelissari (2012) estudando a influência espacial dos atributos químicos do solo em *Tectona grandis* também encontrou melhor ajuste nos modelos Gaussiano e Esférico. Segundo Yamamoto e Landim (2013) os modelos esférico, exponencial e gaussiano explicam a maioria dos fenômenos espaciais e a

modelagem de um semivariograma é um processo que envolve várias tentativas e no qual a experiência pesa muito. Landim (2006), também comenta que o modelo esférico equivale à distribuição normal da estatística clássica. Ortiz (2003) encontrou 13 modelos de semivariograma com melhor ajuste no esférico e 11 no gaussiano.

O modelo Gaussiano teve o melhor ajuste em relação aos parâmetros  $R^2$  e SQR. Entretanto o modelo esférico também apresentou um ajuste adequado. Guimarães (2004) e Yamamoto e Landim (2013) comentam que em muitos casos a sensibilidade de quem está trabalhando com os dados e o conhecimento sobre a variável é de fundamental importância na opção do modelo de semivariograma. Às vezes é preferível selecionar um modelo com  $R^2$  um pouco menor ou SQR um pouco maior que o sugerido pelo programa, mas que represente melhor os dados. De maneira geral, quanto mais simples puder ser o modelo ajustado, melhor, e também não se deve dar importância excessiva a pequenas flutuações.

O modelo Gaussiano é um modelo transitivo, muitas vezes usado para modelar fenômenos extremamente contínuos (ISAACS, SRIVASTAVA, 1989). Almeida (2013) comenta que o modelo teórico Gaussiano atinge a mesma proporção do patamar que o modelo Exponencial, que é de 95%, aproximadamente. Este modelo se caracteriza por apresentar um comportamento parabólico próximo à origem (ANDRIOTTI, 2003).

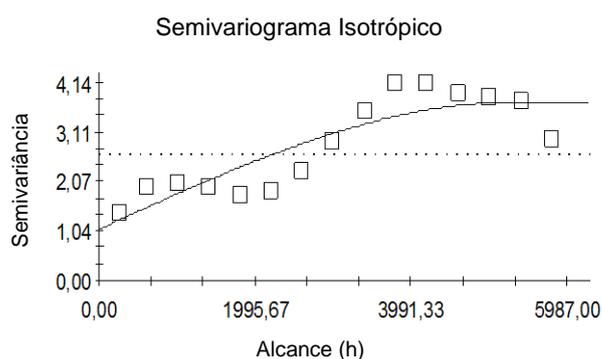


FIGURA 6: AJUSTE DO SEMIVARIOGRAMA NO MODELO ESFÉRICO PARA ÍNDICE DE SÍTIO EM *Pinus taeda* DO CENTRO SUL DO PARANÁ.

De acordo com alguns autores dos quais pode se destacar Trangmar *et al.* (1987) e Salviano (1996) o modelo esférico é o mais adequado para

descrever o comportamento de atributos de plantas e de solos. Segundo Andriotti (2003) o modelo esférico é o único dos modelos que atinge verdadeiramente o patamar e tem um pequeno efeito pepita comparado ao valor do patamar.

Devido ao exposto e pelos valores de  $R^2$  e SQR entre os modelos gaussiano e esférico serem muito próximos, escolheu-se o modelo esférico para modelar a krigagem.

O alcance espacial médio de 5.000 m para a definição de classes de índices de sitio revela que para distâncias superiores a este valor, os dados devem ser tratados como independentes. Este resultado sugere que para a variável índice de sitio as parcelas de inventario florestal tratadas de forma espacial, podem ser distanciadas umas das outras até esta distância. Mello (2004) comenta que a presença de dependência espacial contraria a exigência dos tradicionais livros estatísticos e de inventário florestal para determinação do número de parcelas (amostras) a serem plotadas, porque eles se baseiam na variação das características e exigem que as mesmas tenham distribuição normal e sejam independentes.

Segundo Coelho (2005), alcances longos possibilitam uma amostragem mais espaçada e oferecem segundo Landim (2006) e Corá *et al.* (2004) maior qualidade da estimativa de dados interpolados para produção de mapas. Bognola (2007) classificando sítios de *Pinus taeda* integrando a co-krigagem com estatística multivariada de atributos do solo, encontrou alcances teóricos de 7.112 metros.

O efeito pepita (nugget – Co) também chamado de variância aleatória reflete a incerteza em pequenas distancias, principalmente por falta de conhecimento da distribuição espacial da variável em estudo (Yamamoto e Landim, 2013). Hock, *et al.* (1993), utilizando a geoestatística para estimar índice de sitio em *Pinus radiata* e Montes, *et al.* (2006), estudando krigagem como predição para índice de sitio e idade de *Pinus pinea* encontram valores superiores de *nugget* do que o observado nesse estudo. Porém Mello (2004) estudando a dependência espacial para características dendrométricas de *Eucalyptus grandis* encontrou valores de efeito pepita menores e concluiu que estes são considerados elevados, vindo de encontro com o que Aubry e

Debouzie (2001), ao concluírem que o efeito pepita é alto em estudos que envolvam variáveis ecológicas.

A magnitude do efeito pepita é importante na krigagem, pois, quanto maior for à diferença do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma, maior a continuidade do fenômeno e a confiança que se pode ter na estimativa e menor a variância da estimativa (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989).

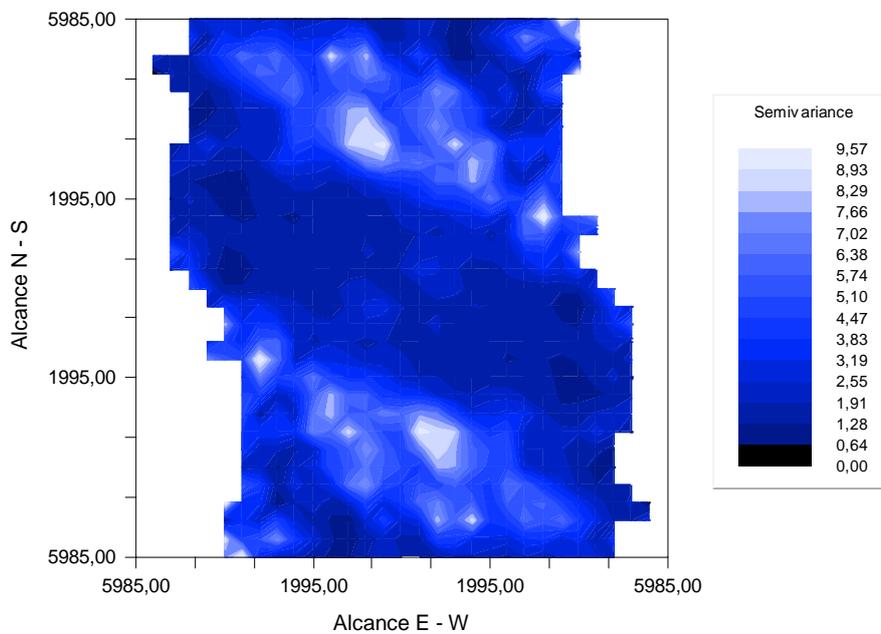
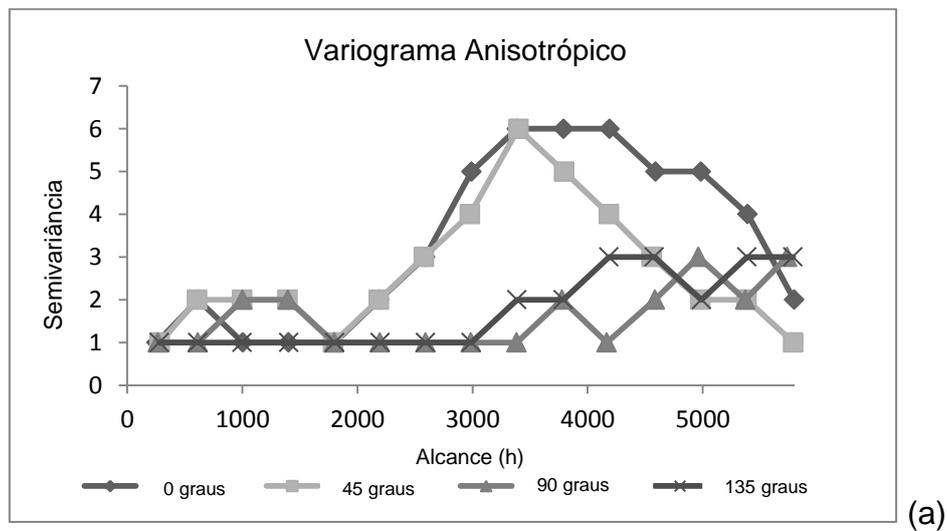


FIGURA 7: AVALIAÇÃO DA ANISOTROPIA (A) E DA ESTRUTURA ESPACIAL (B) EM DIFERENTES DIREÇÕES PARA ÍNDICE DE SÍTIO EM *Pinus taeda* NO CENTRO SUL DO PARANÁ.

No ajuste dos modelos foi considerada a presença da anisotropia modelando o semivariograma em quatro direções. Yamamoto e Landim (2013) comentam que ao detectar presença de anisotropia elas devem ser corrigidas para um modelo com parâmetros comuns (efeito pepita, variância espacial e amplitude) em todas as direções.

A FIGURA 7 demonstra que os semivariogramas são semelhantes em todas as direções e por isso a anisotropia não foi corrigida e, portanto utilizou-se o semivariograma isotrópico para estimativa do índice de sitio nos locais não amostrados, com o uso da krigagem ordinária.

Os resultados da análise na validação cruzada dos dados de índice de sitio conhecidos *versus* estimados estão plotados na FIGURA 8. A correlação entre os atuais valores e os estimados produziu um coeficiente de regressão (coeficiente angular) de 1,068 com erro padrão de 0,070m indicando que este é estatisticamente igual a 1, e o coeficiente linear de -1,45 que estatisticamente pode ser considerado próximo a zero, condições essas ótimas para as estimativas. O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,373 é considerável relativamente baixo, mas devido ao grande número de observações e sabendo-se que este coeficiente é altamente influenciado pelo número de pares podemos considera-lo como satisfatório.

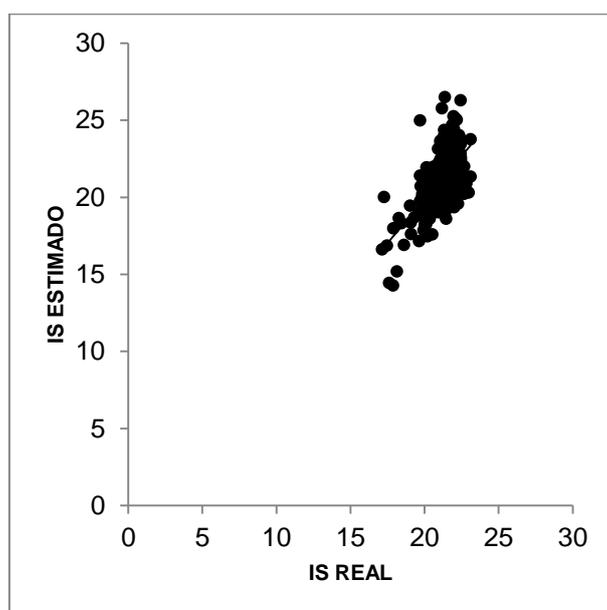


FIGURA 8: COMPARAÇÃO DOS VALORES REAIS E ESTIMADOS PELA KRIGAGEM PARA ÍNDICE DE SÍTIO DE *Pinus taeda* GERADOS PELA VALIDAÇÃO CRUZADA.

Segundo Hock *et al.* (1993) com a técnica da suavização das superfícies pela krigagem é de se esperar que para índices de sítios mais baixos haja uma superestimação e para índices mais altos uma subestimação. No entanto o procedimento de estimativa é global e a diferença média esperada deve ser muito próxima à zero, vindo de encontro com os resultados encontrados conforme TABELA 5.

Segundo Andriotti (2002), quanto mais próximo de zero for o valor médio das diferenças obtidas pela validação cruzada melhor é a estimativa.

Analisando em uma mesma escala a distribuição de frequência dos valores reais e estimados observa-se que após a krigagem os valores ficaram concentrados próximos à média, superestimando sítios baixos encontrados inicialmente e subestimando sítios altos. Ressalta-se que a amplitude foi reduzida e o método da krigagem suaviza a distribuição.

TABELA 5: COMPARAÇÃO DOS VALORES REAIS E ESTIMADOS PELA KRIGAGEM PARA ÍNDICE DE SÍTIO DE *Pinus taeda* GERADOS PELA VALIDAÇÃO CRUZADA.

	IS real (m)	IS estimado (m)	Módulo da Diferença (m)
Média	21,254	21,244	0,01
Desvio Padrão	1,61	0,88	0,72
Mínimo	14,26	17,14	2,88
Máximo	26,49	23,11	3,38

Com o semivariograma tem-se a medida do grau de dependência espacial entre valores e é uma medida da variabilidade em relação à distância. A krigagem usa essas informações para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto e a variância da krigagem é independente dos valores dos pontos usados para obter os estimadores e mede somente a configuração espacial dos dados, ou seja, a krigagem não dá garantia de que o mapa obtido tenha o mesmo histograma, a mesma variância e o mesmo semivariograma dos dados originais, pois se trata, pela própria natureza do método, de um mapa com valores suavizados, sendo a suavização inversamente proporcional à densidade dos pontos amostrados.

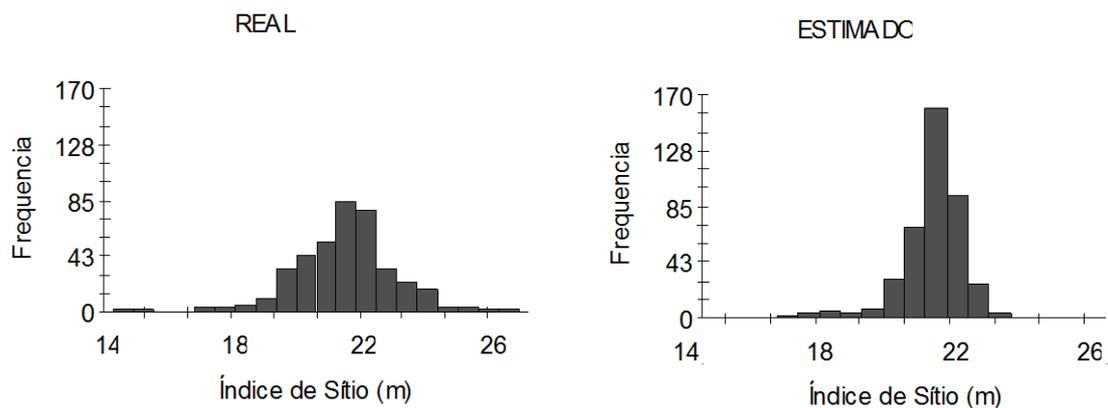


FIGURA 9: COMPARAÇÃO DO HISTOGRAMA REAL E ESTIMADO PELA KRIGAGEM PARA ÍNDICE DE SÍTIO EM *Pinus taeda* NO CENTRO SUL DO PARANÁ.

Com os resultados alcançados pelo ajuste do modelo esférico, foi possível obter uma malha de pontos interpolados que permitiu visualizar o comportamento do índice de sítio, a partir da krigagem ordinária. Esse recurso foi muito importante para se definir a espacialização de cinco zonas de sítios para *Pinus taeda* (FIGURA 10).

Pela krigagem as áreas de *Pinus taeda* obtiveram um novo formato de divisão no cadastro, ou seja, aconteceu um retalhonamento. Dessa forma muitos talhões que anterior a krigagem tinham uma média geral de índice de sítio, pós krigagem tiveram subdivisões por classes de sítio e conseqüentemente poderão sofrer diferentes manejos pela otimização.

Hock *et al.* (1993) sugeriu no seu trabalho, que depois da krigagem deve haver uma validação em campo dos resultados, dessa forma, principalmente os locais com alto valores de sítios devem ser validados em campo. Um fator importante a ser considerado é que para maior confiança no ajuste recomenda-se que uma equação de Índice de sítio específica seja ajustada para área.

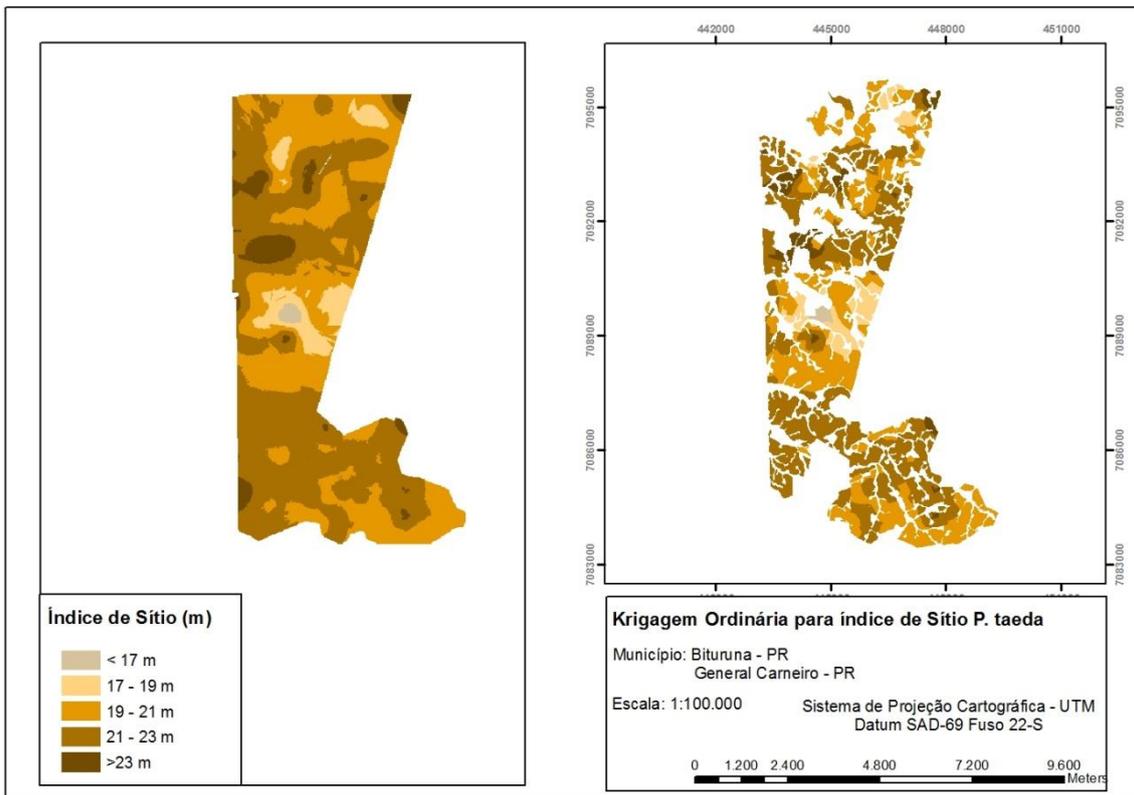


FIGURA 10: MAPA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ÍNDICE DE SÍTIO EM *Pinus taeda* COM VALORES GERADOS PELA KRIGAGEM ORDINÁRIA, NO CENTRO SUL DO PARANÁ.

O retalhamento efetuado após a krigagem demonstrou que a distribuição em área nas classes de índice de sítio de 17 a 19 e 19 a 21 aumentaram expressivamente (TABELA 6).

TABELA 6: COMPARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁREAS EM CLASSES DE SÍTIO NOS TALHÕES INICIAIS COM OS GERADOS PELA KRIGAGEM.

Classe IS	Área (ha)		
	Tradicional	Krigagem	Diferença
< 17	23,3	15,5	-34%
17 a 19	46,6	149,1	220%
19 a 21	522,4	797,3	53%
21 a 23	1.396,1	1.051,2	-25%
> 23	123,0	98,2	-20%
IS ponderado	21,4	21,0	

No planejamento da produção de plantios novos é comum a utilização de um índice de sítio médio. Nesse contexto a krigagem mostrou-se muito eficiente porque definiu para cada local não amostrado, um índice de sítio, ou seja, cada unidade de manejo teve seu respectivo valor de IS, independentemente de ter medições de inventário florestal.

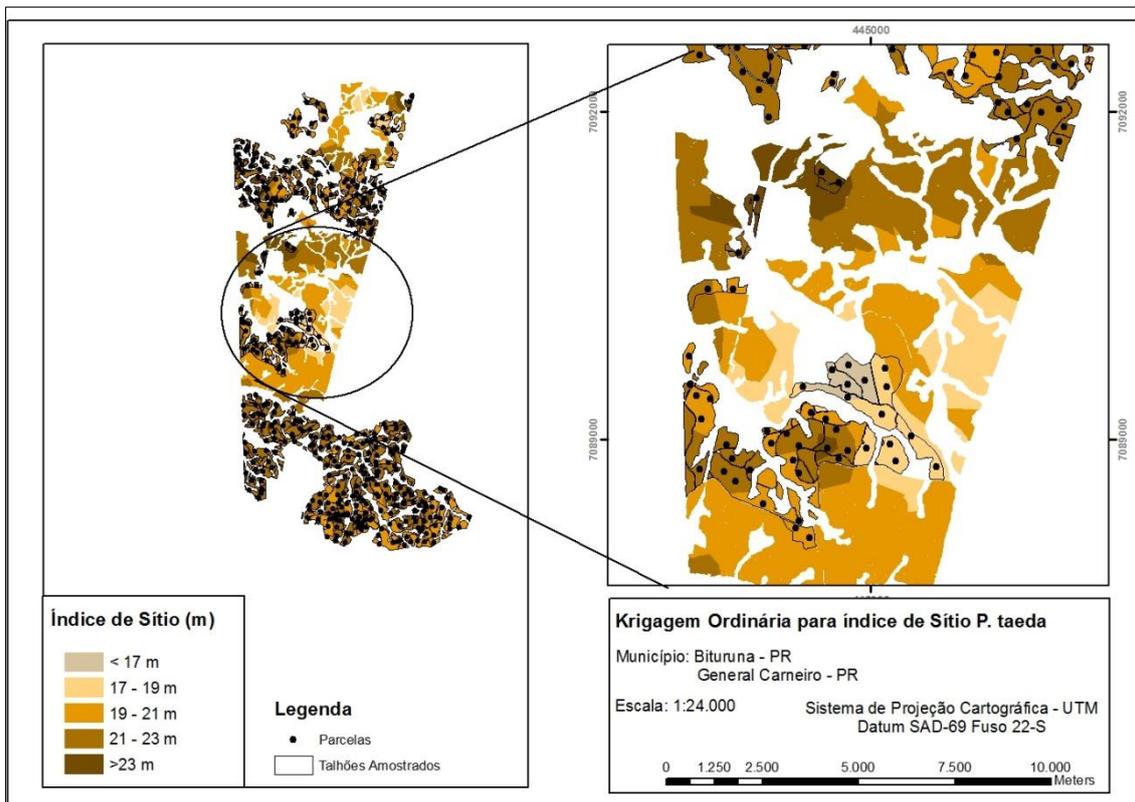


FIGURA 11: CLASSIFICAÇÃO DE ÍNDICE DE SÍTIO GERADO PELA KRIGAGEM PARA TALHÕES AMOSTRADOS E NÃO AMOSTRADOS DE *Pinus taeda* NO CENTRO SUL DO PARANÁ.

Os talhões tradicionais possuíam uma área média de 10,25 hectares. Com o retalhamento da krigagem a área passou para 7,72 hectares.

Talhões com área muito grande tem toda sua extensão tratada com uma média de variáveis dendrométricas. Sob a ótica da silvicultura de precisão espera-se que com a diminuição da área do talhão para valores operacionais, cada talhão possa ser tratado como independente, tenha menor variação nas suas variáveis dendrométricas e um manejo adequado com a realidade de cada local.

Bognola (2007) comenta que a importância da estimativa volumétrica e do Índice de Sítio de forma mais precisa numa empresa se deve a diversas razões. Dentre elas, destacam-se aquelas ligadas ao Setor de Planejamento e Colheita Florestal. Neste caso, a definição destas “Unidades de Manejo” baseada numa “Silvicultura de Precisão” pode, em muitos casos, contribuir de forma adequada para tal propósito.

#### **4. CONCLUSÕES**

Para a área de estudo conclui-se que:

- O índice de sítio possui dependência espacial, podendo utilizar a krigagem como uma ferramenta no mapeamento e classificação de sítios.
- A estrutura de dependência espacial é semelhante em todas as direções pressupondo, portanto uma continuidade espacial.
- O alcance médio foi de 5.000 metros, mostrando que as parcelas de inventário plotadas em distâncias inferiores ao alcance não devem ser tratadas como independentes em se tratando de IS.
- A krigagem mostrou-se um interpolador otimizador na classificação de sítio em locais não amostrados, como é o caso dos plantios jovens de *Pinus taeda*.
- O mapeamento de classes de sítios pela krigagem ordinária mostrou-se uma técnica simples, prática e baixo custo.

## 5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AUBRY, P.; DEBOUZIE, D. Estimation of the mean from a two-dimensional sample: The geostatistical model-based approach. **Ecology**, Tempe, v.82, n.5, p.1484-1494, 2001.

BARBOSA, C.C.F. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento**. São Jose dos Campos: INPE, 1997, 152p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto).

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

BOGNOLA, I. A. **Unidades de Manejo para *Pinus taeda* L. no Planalto Norte Catarinense, com Base em Características do Meio Físico**. Curitiba, 2007. 180p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

BOGNOLA, I.A.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J.; SILVA, E.A.A.; LINGNAU, C.; HIGA, A.R. Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L.. **Revista Floresta**. Curitiba, PR, v.38, n.2, 2007.

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**, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

COELHO, A. M. **Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 60p. 2005.

CORA, 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**. vol.28, n.6, p. 1013-1021, 2004.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: Wiley, 1993. 900p.

DIGGLE, P.J.; RIBEIRO JUNIOR, P.J. **Model-based geostatistics**. New York: Springer, 2007. 228p.

GUEDES, L. P. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A.; SOUZA, E. G. de. Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2217- 2226, 2008.

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

GUNNARSON, F. On the potential of krigagem for forest management planning. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v.13, n.2, p.237-245,1998.

HÖCK, B.K.; PAYN, T.W.;SHIRLEY, J. Using a geographic information system and geostatistics to estimate site index of *Pinus radiata* for Kaingaroa forest. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.23, p.264-277, 1993.

LANDIM P.M.B. 2006. Sobre Geoestatística e mapas. **Terrae Didatica**, v.2,n.1, p.19-33.

MELLO, J. M. **Geoestatística Aplicada ao Inventário Florestal**. Piracicaba, 2004. 122p. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz – Universidade de São Paulo.

MONTES, F.; HERNANDEZ, M.; CALAMA, R.; CANELLAS, I. Extended length rotation to integrate timber and pine nut production with the conservation of structural diversity in a *Pinus pinea* (L.) forest. **EDP Sciences**. p.773-781, 2006.

OLIVEIRA, E.B. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de *Pinus taeda* L., com critérios quantitativos para a avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. Curitiba, 1995, 134p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

ORTIZ, J. L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**. 220 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba – São Paulo.

PALMER, D. J.; WATT, M. S.; KIMBERLEY, M. O.; HÖCK, B. K.; PAYN, T. W.; LOWE, D. J. Mapping and explaining the productivity of *Pinus radiata* in New Zealand. **NZ Journal of Forestry**. New Zeland, v.55 n.1, p.15-21, 2010.

PELISSARI, A.L. **Silvicultura de precisão aplicada ao desenvolvimento de *Tectona grandis* na região sul do Estado de Mato Grosso**. 88f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2012.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATTOS, J. L. M. de. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *P. taeda*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n.5, p. 701-709. 2005.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria Florestal - Módulo: Métodos para classificação de sítios florestais**. UFLA/FAEPE/DCF, Lavras, 1997.

SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. A. Curvas de índice de sitio para plantações de *Pinus elliottii* no estado do Paraná e Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v.23, n.1-2, p.140-158, 1988.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G.; SUDJADI, M. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.668-674, 1987.

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um latossolo roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.1-17, 1997.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1998.

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

### **CAPÍTULO III: COMPARAÇÃO ECONÔMICA DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO FLORESTAL DAS UNIDADES DE MANEJO OBTIDAS A PARTIR DO MODELO TRADICIONAL VERSUS MODELO ESPACIAL EM *Pinus Taeda* L. NO CENTRO SUL DO PARANÁ.**

#### **RESUMO**

O objetivo deste estudo foi comparar o planejamento estratégico otimizado, pela maximização do VPL das unidades de manejo obtidas a partir dos talhões originais de um banco de dados do SIG, chamado de tradicional com as unidades de manejo estruturadas pelo retalhamento oferecido pela krigagem do índice de sítio, chamado de krigagem. O estudo foi desenvolvido em um povoamento de *Pinus taeda* L. de diversas idades, com 2.111 hectares, localizado na região centro-sul do Paraná. Foram comparados às unidades de manejo tradicionais versus krigagem no planejamento estratégico otimizado em dois cenários, o primeiro com as restrições obrigatórias, chamado de cenário livre, e o segundo buscando um fluxo constante da produção ao longo dos anos, (*even flow*), e também no planejamento estratégico comum em quatro análises. A análise 1 teve a comparação do planejamento estratégico dos talhões tradicionais com os da krigagem por classes de sítio, em toda a área, a segunda por classes de sítio somente na área amostrada, ou seja em plantios novos; a terceira por classes de sítio somente dos plantios novos e a quarta análise teve a comparação da validação cruzada das parcelas de inventário pelo índice de sítio real e estimado pela krigagem somente na área amostrada. Para os dois planejamentos foi utilizado um horizonte de planejamento de 30 anos, taxa de atratividade de 10%, e nas áreas não amostradas um índice de sítio padrão de 22 (caso dos talhões tradicionais). Os resultados foram apresentados em porcentagem como referência os talhões tradicionais. No planejamento estratégico otimizado, ambos cenários tiveram uma redução no VPL após o retalhamento da krigagem, em 3,0% e 3,6%. Isso também ocorreu na primeira análise do planejamento comum com 3,8%. Pelas análises 2, 3 e 4 do planejamento comum observou-se que a superioridade do VPL nos

talhões tradicionais resultaram das áreas não amostradas, que tiveram um índice de sitio padrão atribuído. Dessa forma conclui-se que a krigagem ordinária é uma ferramenta para resolução de problemas de planejamento e identificação de unidades de manejo, principalmente porque pode estabelecer critérios para tomada de decisão em locais não amostrados.

Palavras chave: Geoestatística, krigagem, talhamento, Valor Presente Líquido.

## **ABSTRACT**

The aim of this study was to compare the optimized strategic planning, by maximizing the NPV of the management units obtained from the original stands of a GIS database, considered as traditional with the management units structured by stands redivision possibility by kriging index site, called kriging. The study was carried out in a *Pinus taeda* L. stand of various ages, with 2,111 hectares, located in the central-south region of Paraná. There were compared to traditional management units versus kriging in optimized strategic planning in two scenarios, the first with the mandatory restrictions, called free scene, and the second seeking a balance of production over the years, (even flow), and also in common strategic planning in four analyzes. The first analysis was the comparison of the strategic planning of traditional stands with the kriging site classes throughout the area; the second for site classes only in the sampled area, in new plantings; the third are by site classes only new plantations and the fourth analysis was the comparison of cross-validation of inventory plots the actual site index and estimated by kriging only in the sampled area. For both plans was used a planning horizon of 30 years, attractivity rate of 10%, and in areas not sampled a standard site index 22 (for traditional plots). The results were presented in percentage as reference the traditional stands. In the optimized strategic planning, both scenarios had a reduction on the NPV after stands redivision by kriging in 3.0% and 3.6%. This also occurred in the first analysis of common planning with 3.8%. For analysis 2, 3 and 4 of common design, it was observed that the superiority of the NAV resulted in traditional stands non-inspected areas, which have a standard site index assigned. Thus it is concluded that the ordinary kriging is a tool for solving problems of planning and identification of management units, mainly because it can establish criteria for decision-making in non-sampled locations.

Keywords: geostatistics, kriging, stand division, net present value.

## 1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente os manejadores florestais utilizam técnicas matemáticas para tomada de decisão. Esses modelos empregados oferecem as melhores alternativas de manejo para um conjunto de talhões, otimizando a produção da floresta conforme o objetivo desejado, porém englobando uma ampla área. Assim os talhões são analisados sob uma ótica geral como se fossem uma floresta homogênea. Sabe-se que ao analisarmos o ótimo para um todo ocorre falhas na estrutura da floresta e na operacionalização do manejo, e suas respostas nem sempre são aplicáveis na prática.

Mello (2004) já dizia que uma característica marcante em área reflorestada é a sua aparente homogeneidade, contudo, é frequente a observação de variações significativas ao longo do plantio. Estas variações se devem a vários fatores como solo, topografia, práticas silviculturais e outros. É usual a adoção de um valor médio, suposto representativo, obtido de uma amostra (conjunto de parcelas), para caracterizar o estado atual e temporal da variável de interesse dentro da floresta. Essa variabilidade espacial pode, muitas vezes, afetar de forma marcante a qualidade das estimativas feitas. Desse modo, uma análise criteriosa, visando conhecer o comportamento espacial das características em questão, é de fundamental importância na escolha de um método estatístico que otimize recurso sem perda de precisão no processo de estimativa.

Toda a evolução do conceito de floresta produtiva, o abastecimento das indústrias com matéria prima em quantidade e qualidade adequada e as inúmeras variáveis que foram sendo incorporadas ao processo, exigiram das empresas práticas mais refinadas de planejamento que promovam redução dos custos de produção e aumento dos níveis de produtividade. Logicamente sob essa nova ótica o planejamento tem que observar as relações espaciais que acontecem na floresta.

Sabe-se que a prática da Silvicultura moderna e de precisão requer um adequado aproveitamento do uso do solo, o que necessariamente implica na utilização de talhão conforme a sua capacidade de sustentação, manejo e

produtividade econômica, levando em consideração além do solo todos os fatores ambientais que influenciam sua manutenção.

Na visão de Hartshorne (1978) o conceito de zonalidade é utilizado em operadores de análise espacial, cujas restrições espaciais são definidas por áreas, onde uma área-unidade (*unit-area*) é uma partição do espaço geográfico, definida em função do objeto de estudo e da escala de trabalho, que apresenta características individuais próprias. Estas áreas-unidades seriam a base de um sistema de classificação e organização do espaço. A partir da decomposição do espaço em áreas-unidade, podem-se relacionar para cada uma destas partições, as correspondentes características físico-bióticas que a individualizam em relação a todas as demais componentes do espaço.

O uso de técnicas avançadas de estatísticas multivariadas e geoestatísticas, por exemplo, podem ser aplicadas nesse contexto, considerando em seu escopo, a racionalização dos recursos florestais, de modo a permitir a perpetuação da maximização do potencial produtivo, levando em consideração o meio biótico e abiótico e suas inter-relações. Sob essa ótica a predição da capacidade produtiva não se baseia em atributos isolados, mas na influência desse conjunto de fatores, ou seja, as variáveis são analisadas em conjunto e correlacionadas com diferentes ambientes (BOGNOLA 2007).

Segundo Silva (2007) os sistemas de informações geográficas (SIG) são considerados os instrumentos computacionais do geoprocessamento e pode ser conceituado também, como um conjunto de ferramentas que permite a coleta, o armazenamento, a recuperação, a transformação e apresentação dos dados do mundo real para determinados objetivos específicos, que geralmente oferece apoio à tomada de decisão. O tratamento de informações geográficas espaciais é hoje um requisito necessário para controlar e ordenar a ocupação das unidades físicas do meio ambiente.

Porém para um aproveitamento ótimo do uso do solo que potencialize a produção é necessário à incorporação de um número maior de variáveis em nível de talhão, oferecendo ao problema mais restrições, podendo ocorrer uma não linearidade e tornando impraticável a resolução com a programação linear.

Johnson e Wichern (1998) comentam que a complexidade inerente aos fatores ecológicos, o elevado número de dados e seus inter-relacionamentos, a

complexidade de sítios e de fatores ambientais, dentre outras características inerentes às espécies florestais, têm impedido o sucesso de aplicação dos procedimentos de sumarização e classificação de dados. Dessa forma justifica-se, o uso de técnicas avançadas de estatísticas, como a geoestatística por exemplo.

Possivelmente fazendo-se a classificação da produtividade na área observando as relações espaciais previamente ao processamento com ferramentas matemáticas, as unidades de manejo que antes eram tratadas com uma média de produtividade serão analisadas sem a inserção de inúmeras variáveis ao problema, facilitando a aplicação das ferramentas matemáticas e oferecendo a cada talhão um manejo coerente e ótimo,

Dessa forma espera-se que com a classificação da produtividade observando as relações espaciais, utilizada como uma ferramenta que antecede e operacionaliza o uso das ferramentas matemáticas já existentes, ofereça aos manejadores um valor econômico coerente além de manter a linearidade dos problemas matemáticos sem a inserção de inúmeras variáveis e restrições.

Sendo assim esse capítulo objetiva comparar o planejamento estratégico otimizado das unidades de manejo obtidas a partir do modelo tradicional *versus* espacial, pela análise do valor presente líquido (VPL) e verificar qual a contribuição da classificação de produtividade sob a ótica da geoestatística no planejamento estratégico.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi desenvolvido em um povoamento de área aproximada de 2.111 hectares de *Pinus taeda* L. com idades de 1 a 10 anos e 13 a 15 anos, localizado parte no município de Bituruna e parte no município de General Carneiro, região centro sul do estado do Paraná. Apresenta coordenada central UTM, zona 22 sul de latitude 445.008 e longitude 7.089.916, com uma altitude média de 985 metros (FIGURA 12).

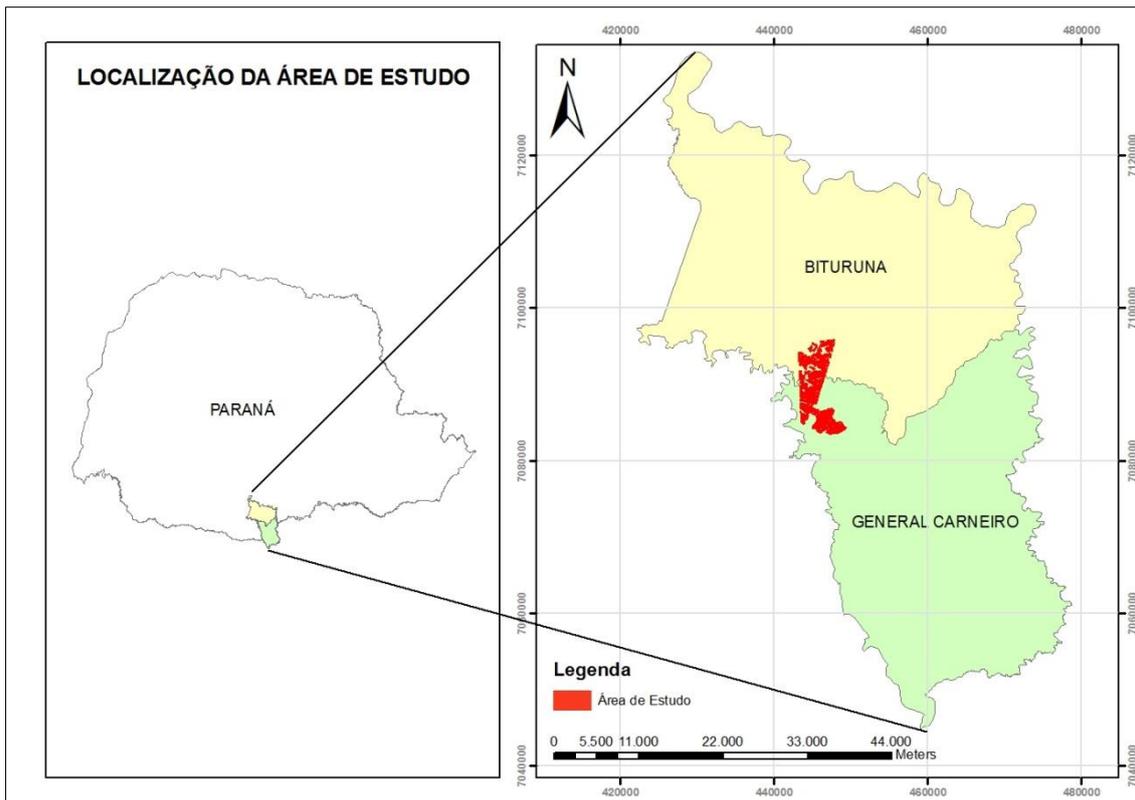


FIGURA 12: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

O clima dominante é do tipo Cfb, segundo Köppen, ou subtropical úmido mesotérmico caracterizado por verão fresco e inverno rigoroso com geadas severas e frequentes, concentradas nos meses de março a setembro. Não apresenta estação seca característica e tem temperaturas médias nos meses mais quentes inferiores a 22°C e nos meses mais frios com médias abaixo de 18°C. O regime de chuvas é irregular, com diminuição no período de inverno e maior intensidade no verão. A precipitação média anual é de 1.600 a 1.770 mm. Quanto à umidade relativa do ar, predominam índices médios entre 80% e 85%.

A área está localizada no terceiro planalto do Paraná, também chamado de planalto de Guarapuava, é a mais extensa das unidades de relevo do estado e também é representado por rochas da Bacia do Paraná. O Relevo predominante é ondulado e os solos predominantes são os Cambissolos e Argissolos.

O banco de dados para planejamento estratégico foi elaborado a partir dos talhões do SIG já existente, chamados a partir de então como

“TRADICIONAL”, e a partir do retalhonamento gerado pela krigagem do índice de sítio, chamados de “KRIGAGEM” (FIGURA 13).

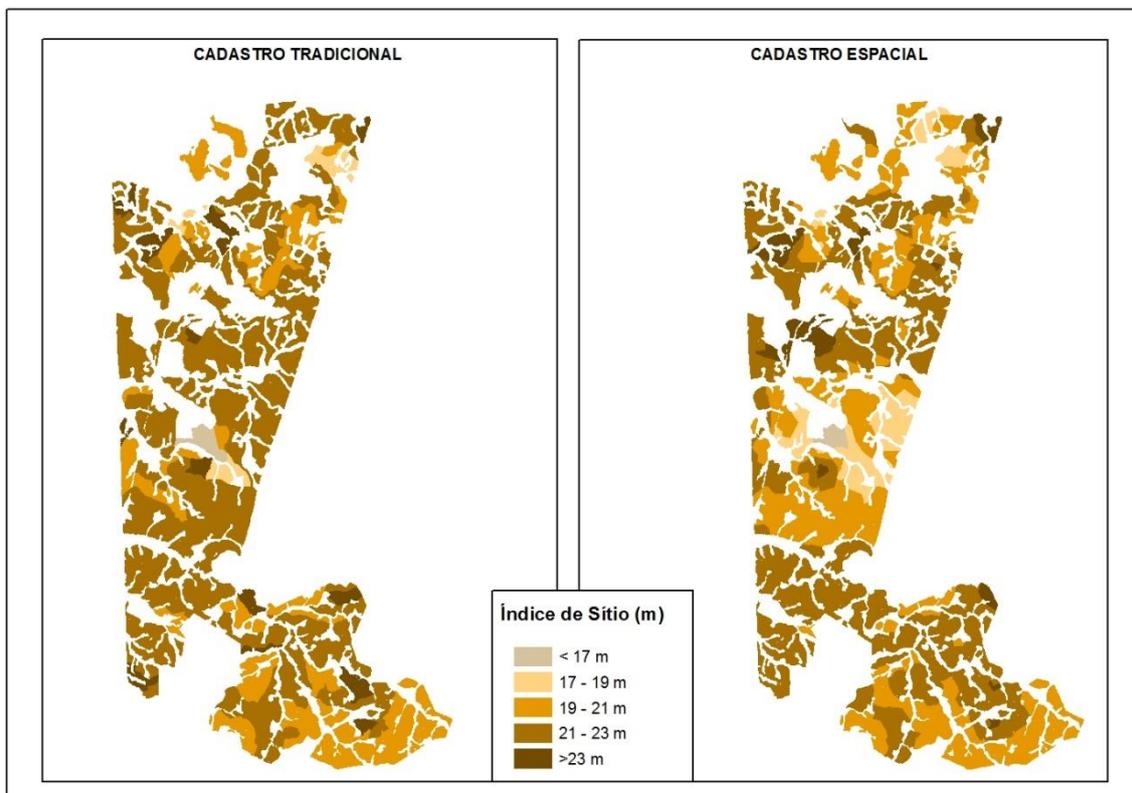


FIGURA 13: TALHÕES DE ÍNDICES DE SÍTIO UTILIZADOS PARA COMPARAÇÃO DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO.

Os talhões Krigagem surgiram a partir da krigagem ordinária do índice de sítio. As variáveis dendrométricas foram as mesmas para os dois tipos de talhões mudando apenas o índice de sítio, que no tradicional foi obtido pela altura dominante e na krigagem pelo mapeamento da classificação de sítio sob ótica espacial.

O talhão tradicional é subdividido em 206 unidades de manejo (talhões) e o krigagem por 283 talhões. Os talhões após a krigagem não sofreram agrupamento. De cada talhão foram cadastradas diversas informações que descreviam suas principais características, tais como: região na qual o talhão se localiza; tipo de propriedade (própria ou fomento); área do talhão (área de efetivo plantio); índice de sítio (que variou nos dois tipos de talhões); ano de plantio; densidade de plantio (árvores/ha) e sobrevivência (%) (que permaneceram inalterados para os dois talhões). Resumindo todas as variáveis dendrométricas permaneceram inalterados para os dois talhões, variando

somente o índice de sítio para que se pudesse observar a contribuição do retalhamento com a classificação de sítio da krigagem.

Os dois tipos de talhões foram comparados pela maximização do VPL em dois planejamentos estratégicos, o comum e o otimizado.

Os custos de produção foram os mesmo para os talhões tradicionais e da krigagem. Os custos de reforma foram calculados em R\$/ha, assim como as manutenções; já os custos dos desbastes e do corte raso foram determinados conforme a produção, ou seja, em unidade monetária por metro cúbico (R\$/m<sup>3</sup>).

Como o manejo desse povoamento é destinado ao regime de multiprodutos os produtos utilizados são descritos na Tabela .

TABELA 7: PRODUTOS FLORESTAIS UTILIZADOS NAS ANÁLISES DE PLANEJAMENTO ESTRATÉGICOS.

SORTIMENTO	DIAMETRO (cm)	COMPRIMENTO (m)
Laminação	>35	2,65
Serraria Grossa	25 a 35	2,65
Serraria	15 a 25	2,65
Celulose	8 a 15	1,4

No planejamento estratégico otimizado foi utilizado diversas opções de manejo, para dois cenários. O primeiro cenário somente com as restrições obrigatórias, chamado de cenário livre (CENÁRIO 1), e o segundo buscando um fluxo constante da produção ao longo dos anos (CENÁRIO 2).

A função objetivo utilizada foi a maximização do Valor Presente Líquido (VPL). O planejamento foi rodado no software OpTimber-LP, o qual permite simular, formular e resolver diversos cenários de planejamento florestal; utiliza o modelo de programação linear do “tipo I” para as simulações (OPTIMBER, 2011).

Para o planejamento estratégico comum, utilizou-se um único manejo para cada talhão, composto por dois desbastes, o primeiro aos 10 e o segundo aos 15 anos, e corte raso aos 20 anos. Esse regime manteve-se inalterado para os dois tipos de talhões. As simulações foram geradas pelo programa SISPINUS (OLIVEIRA, 1995) e o fluxo de caixa foi elaborado no Excel.

Diversos autores utilizaram o SISPINUS para prognose de volume em estudos florestais. Dentre eles destacam-se Berger *et al.* (2011) em seu estudo do Efeito do custo da terra na rentabilidade Florestal: um estudo de caso para Santa Catarina, Bargas (2012) estudando a carga tributária de empresas florestais produtoras de madeira de *Pinus* spp.: Um estudo de caso e Mello, A. A. (2004) no planejamento de uma empresa florestal visando à maximização dos lucros e manutenção do estoque do carbono. A produção esperada por sortimento via SISPINUS é semelhante à encontrada por Folmann (2011) no seu estudo de Viabilidade econômica de plantios de *Pinus taeda* em duas mesorregiões do estado do Paraná no caso do regime de uso múltiplo.

Foram comparadas quatro análises no planejamento comum sendo elas:

- Análise 1: comparação do planejamento estratégico dos talhões tradicionais com os da krigagem por classes de sítio, em toda a área;
- Análise 2: comparação do planejamento estratégico dos talhões tradicionais com os da krigagem por classes de sítio somente na área amostrada, ou seja sem plantios novos;
- Análise 3: comparação do planejamento estratégico dos talhões tradicionais com os da krigagem por classes de sítio somente nas áreas não amostradas (talhões com idades inferiores a 4 anos);
- Análise 4: comparação da validação cruzada das parcelas de inventário pelo índice de sítio real e estimado pela krigagem, que conseqüentemente é somente na área amostrada.

Para os dois planejamentos, o comum e otimizado, utilizou-se um horizonte de planejamento de 30 anos, taxa de atratividade de 10%, e nas áreas não amostradas um índice de sítio padrão de 22 (caso do talhão tradicional).

Como o objetivo desse estudo foi verificar a contribuição do retalhamento gerado pela Krigagem no Planejamento estratégico e não avaliar os VPL em termos quantitativos, todos os resultados foram apresentados em porcentagem tendo como referencia os talhões tradicionais.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em todos os cenários do planejamento estratégico otimizado e comum os resultados de VPL foram maiores que zero. Rezende; Oliveira (2001) comenta que a análise econômica de um investimento envolve o uso de técnicas e critérios de avaliação que comparam os custos e as receitas inerentes ao projeto, visando decidir se ele deve ou não ser implementado e; o projeto é considerado viável economicamente se o VPL for maior que zero (SILVA; FONTES, 2005). Dessa forma no caso desse estudo, em ambos os cadastros utilizados pra análise econômica, houve viabilidade econômica para a área.

A viabilidade econômica dessa área demonstrou que dentro das condições existentes para ambos os cadastros (tradicional e krigagem) o investimento teve retorno superior à taxa de atratividade estabelecida de 10%. Dossa *et al.* (2002) em empresas florestais paranaenses e catarinenses, verificaram a viabilidade econômica da produção de Pinus com TIR de 11% ao ano quando comparada à taxa mínima de atratividade de 6% considerada pelos autores.

No planejamento estratégico otimizado, ambos cenários tiveram uma redução do VPL após o retalhamento gerado pela krigagem (TABELA 7), na margem de 3,0% para cenário livre e 3,6% para o cenário que buscou o fluxo constante de produção.

TABELA 7: COMPARAÇÃO DO VPL EM PORCENTAGEM DA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DOS TALHÕES TRADICIONAIS COM OS DA KRIGAGEM PARA DOIS CENÁRIOS.

TALHÕES	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
Tradicionais	100,0%	100,0%
Krigagem	97,0%	96,4%
Incremento	-3,0%	-3,6%

Tratando-se de volume para o cenário livre a produção dos talhões da krigagem foi superior aos tradicionais em 1,8%. Entretanto no cenário de fluxo constante houve uma queda na produção dos talhões da krigagem em 2,8%

(TABELA 8). Apesar da produção dos talhões tradicionais no cenário 1 ter sido inferior o seu VPL foi maior que os da krigagem. Isso aconteceu porque a otimização buscava a maximização do VPL e não da produção e o otimizador encontrou a melhor solução para maximizar VPL.

TABELA 8: COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO EM PORCENTAGEM DA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DOS TALHÕES TRADICIONAIS COM OS DA KRIGAGEM EM DOIS CENÁRIOS.

TALHÕES	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
Tradicionais	100,0%	100,0%
Krigagem	101,8%	97,2%
Incremento	1,8%	-2,8%

Os resultados do planejamento estratégico otimizado são semelhantes aos encontrados para o planejamento comum. Analisando a Tabela 9 observa-se que o VPL dos talhões gerados pela krigagem, considerando toda a área de estudo (Análise 1), foi inferior em 3,8%, ou seja o VPL dos talhões tradicionais valem 3,8% a mais que os da krigagem.

TABELA 9: COMPARAÇÃO DO VPL EM PORCENTAGEM DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DOS TALHÕES TRADICIONAIS COM OS DA KRIGAGEM EM QUATRO ANÁLISES ECONÔMICAS.

TALHÕES	ANÁLISE 1	ANÁLISE 2	ANÁLISE 3	ANÁLISE 4
Tradicionais	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Krigagem	96,2%	100,3%	79,6%	100,2%
Incremento	-3,8%	0,3%	-20,4%	0,2%

Nas análises 2 e 4 observa-se uma leve superioridade do VPL nos talhões da krigagem, em 0,3% e 0,2% respectivamente. Esperava-se que essas duas análises fossem semelhantes porque uma utiliza a classe de sítio média da unidade de manejo e a outra utiliza um índice de sítio específico obtido a partir das amostras.

Elas demonstram que a superioridade do VPL nos talhões tradicionais da análise 1 são contribuição dos plantios jovens, onde se atribuiu um índice de sítio médio. Essa prática é muito comum nas empresas florestais durante as avaliações de ativos dos plantios que ainda não foram amostrados. Entretanto ao observar somente a contribuição dessa prática (Análise 3), verifica-se que

ela superestimou em 20,4% o VPL dos talhões tradicionais em relação aos obtidos pela krigagem.

Bargas (2012) no seu estudo da carga tributária de empresas florestais produtoras de madeira de *Pinus* spp.: Um estudo de caso, também considerou para todos os cenários um índice de sítio médio, sendo este o de maior representatividade dentro dos compartimentos florestais da empresa analisada.

Existem poucos estudos na literatura que discutem a classificação de sítios em locais que ainda não foram amostrados pelo inventário florestal contínuo, que na maioria dos casos as medições começam aos 4 anos no *Pinus*.

Uma alternativa é o que Scolforo e Machado (1988) fizeram nos seus estudos de curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina, utilizando amplitude de idade de 1 a 29 anos, tendo como variável de entrada somente a idade. Entretanto os próprios autores comentam da importância da análise criteriosa nesses casos, principalmente do gráfico de resíduo que pode apresentar tendências de superestimação ou subestimação, fato esse que pode ser melhorado com a inserção de uma nova variável, além de que houve a necessidade de medições contínuas mesmo em plantios jovens para ajustar uma equação.

Outra técnica mais moderna é a utilizada por Munhoz (2011) em seu estudo de caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* através da análise de tronco. Nele a autora gera curvas de sítio pela altura dominante e idade variando de 1 a 10 anos.

TABELA 10: COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO EM PORCENTAGEM DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DOS TALHÕES TRADICIONAIS COM OS DA KRIGAGEM PARA QUATRO ANÁLISES ECONÔMICAS.

TALHÕES	ANÁLISE 1	ANÁLISE 2	ANÁLISE 3	ANÁLISE 4
Tradicionais	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Krigagem	95,4%	100,2%	86,6%	99,9%
Incremento	-4,6%	0,2%	-13,4%	-0,1%

Em ambos os casos necessita-se de grandes amplitudes de idades, tempo, técnicos habilitados para efetuar ajuste e investimento elevado. Isso justifica a prática das empresas de adotar um índice de sítio médio

representativo da área para locais que ainda não tiveram medição do inventário contínuo.

Se analisarmos a produção os resultados são semelhantes à análise financeira, onde a atribuição do índice de sítio médio para plantios novos gerou 13,4% volume a mais nos talhões tradicionais comparados com os gerados pela krigagem, conseqüentemente a receita da venda desse volume acrescido é que gerou um VPL superior dos talhões tradicionais.

Praticamente não se observa diferença na produção para as análises que consideram apenas as áreas amostradas, no caso da análise 2 e 4.

Os talhões obtidos pela krigagem permitem a descrição quantitativa da variabilidade espacial do índice de sítio em uma estimativa não tendenciosa da variância mínima de valores para locais não amostrados. Conseqüentemente acessar essa variabilidade faz da geoestatística uma ferramenta de suporte para tomada de decisão no planejamento estratégico, porque com esse interpolador pode-se determinar índice de sítio para locais não amostrados.

Ao atribuir índice de sítio médio para áreas não amostradas nesse estudo observa-se uma tendência de superestimação do VPL, possivelmente porque ao tratar uma área heterogênea como homogênea pode-se gerar erros na prognose da área. Mesmo que o índice de sítio médio adotado fosse menor, por exemplo, de 21, ocorreria à superestimação do volume e conseqüentemente da receita (VPL) ao verificar as classes de frequência das observações dos talhões da krigagem comparados com os tradicionais.

Dessa forma ao aplicar o interpolador da krigagem ordinária no índice de sítio, gerando mapas de classificação, os erros de prognose diminuem e conseqüentemente a receita atribuída no fluxo de caixa da avaliação do ativo será mais próxima ao real.

Na área de estudo 34% da área total não foi amostrada, ou seja, 718 ha foram tratados com um único índice de sítio. Em áreas onde essa porcentagem é maior possivelmente o VPL poderá afetar de forma considerável o planejamento estratégico e avaliação dos ativos. Sendo assim essa prática de atribuição do índice médio representativo para áreas não amostradas deve ser utilizada com muita cautela na avaliação de ativos florestais, principalmente quando a área não inventariada for representativa.

Recomenda-se então para elaboração de planejamento estratégico e avaliação de ativos a utilização da geoestatística na determinação de índice de sítio em locais não amostrados.

#### **4. CONCLUSÃO**

Para a área de estudo:

- Verifica-se que ao retalhonar a área pela krigagem do índice de sítio o Valor Presente Líquido é menor.
- A superioridade do VPL nos talhões originais (tradicionais) refere-se à técnica de atribuir um índice de sítio médio para áreas não amostradas, caso dos plantios jovens de *Pinus Taeda*.
- A krigagem ordinária demonstrou ser uma importante ferramenta na resolução de problemas de planejamento e identificação de unidades de manejo, principalmente porque estabelece critérios para tomada de decisão em locais não amostrados.

## 5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- BARGAS, L. S. **Carga tributária de empresas florestais produtoras de madeira de *Pinus spp.*: um estudo de caso.** Irati, 2012. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO.
- BERGER, R.; SANTOS, A. J.; TIMOFEICZYK JÚNIOR, R.; BITTENCOURT, A. M.; SOUZA, V. S.; EISFELD, C. L. O efeito do custo da terra na rentabilidade florestal: um estudo de caso para Santa Catarina. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 41, n. 3, p. 599-610, jul./set. 2011.
- BOGNOLA, I. A. **Unidades de Manejo para *Pinus taeda* L. no Planalto Norte Catarinense, com Base em Características do Meio Físico.** Curitiba, 2007. p.180. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.
- DOSSA, D.; SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; RODIGHIERI, H. R. **Produção e rentabilidade de *Pinus* em empresas florestais.** Colombo, 2002.
- FOLMANN, W. T. **Viabilidade econômica de plantios de *Pinus taeda* L. em duas mesorregiões do estado do Paraná.** Irati, 2011. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO.
- HARTSHORNE, R. **Propósitos e Natureza da Geografia.** São Paulo, HUCITEC/EDUSP, 1978.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis.** 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 816p.
- MELLO, A. A. **Planejamento de uma empresa florestal visando à maximização dos lucros e manutenção do estoque do carbono.** Curitiba, 2004. Universidade Federal do Paraná.
- MELLO, J. M. **Geoestatística Aplicada ao Inventário Florestal.** Piracicaba, 2004. p.122. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz – Universidade de São Paulo.
- MUNHOZ, J. S. B. **Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil através de análise de tronco.** Piracicaba, 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- OPTIMBER Otimização e Informática. FlorExel versão 3.8.68 para Windows 2010. Brasil, PR, 2011.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. **Análise Econômica e Social de Projetos Florestais**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 389 p.

SILVA, M. L.; FONTES, A. A. **Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET)**. *Árvore*, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 931 - 936. 2005.

SILVA, W. A. **Modelagem matemática aplicada no planejamento da agricultura irrigada, utilizando informações georreferenciadas**. Seropédica, 2007. p.111. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.