



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



NATÁLIA DA SILVA LIMA

AMOSTRAS VIRTUAIS NO MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO FLORESTAL

Botucatu

2018

NATÁLIA DA SILVA LIMA

AMOSTRAS VIRTUAIS NO MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO FLORESTAL

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Célia Regina
Lopes Zimback
Coorientador: Prof. Dr. Diego Augusto de
Campos Moraes

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

L732a Lima, Natália da Silva, 1989-
 Amostras virtuais no monitoramento da produção florestal / Natália da Silva Lima. - Botucatu: [s.n.], 2018
 65 p.: grafs. color., ils. color., tabs.

 Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista
 Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018
 Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
 Coorientador: Diego Augusto de Campos Moraes
 Inclui bibliografia

 1. Inventário florestal. 2. Geoestatística. 3. Produtividade florestal. I. Zimback, Célia Regina Lopes. II. Moraes, Diego Augusto de Campos III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AMOSTRAS VIRTUAIS NO MONITORAMENTO DA PRODUÇÃO FLORESTAL

AUTORA: NATÁLIA DA SILVA LIMA

ORIENTADORA: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

COORDENADOR: DIEGO AUGUSTO DE CAMPOS MORAES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. DIEGO AUGUSTO DE CAMPOS MORAES
Depto de Análise e Desenvolvimento de Sistemas / Faculdade Eduvale de Avaré

Prof. Dr. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA
Depto de Solos e Recursos Naturais / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Prof. Dr. OSMAR DELMANTO JUNIOR
Depto de Agronegócios e Agrossistemas / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Botucatu, 23 de fevereiro de 2018

Às meus amados pais,

Pedro e Marli,

dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela possibilidade de lutar pelos meus sonhos sem desanimar perante os desafios, sempre me guiando.

Aos meus amados pais, Pedro e Marli, pelo amor e dedicação, por acreditarem e não medirem esforços para que meus sonhos e objetivos sejam sempre alcançados. Ao meu querido irmão Pedro Vinícius, por dividir todas as alegrias e dificuldades, sempre me dando força.

Ao meu noivo Matheus Augusto, pelo amor, carinho e paciência, por estar continuamente ao meu lado, me incentivando e apoiando.

A minha orientadora Prof.^a Dr^a. Célia Regina Lopes Zimback e ao meu Coorientador Prof. Dr. Diego Augusto de Campos Moraes, pela amizade, acolhimento e ensinamentos, sem os quais não seria possível a concretização deste trabalho!

À Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA – UNESP), campus de Botucatu, à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Energia na Agricultura, pela oportunidade e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

À empresa Eucatex S/A, em especial Nelson e Juliana, pela confiança e disponibilização dos dados usados para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos queridos amigos do Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas (GEPAG), pelo convívio e trocas de experiências.

Aos amigos de Botucatu e de Minas Gerais, pela amizade e incentivo.

Meu muito obrigada!

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

A elevada produtividade do eucalipto ocasiona a necessidade do domínio de técnicas e ferramentas precisas acerca dos povoamentos florestais, como o inventário florestal, procedimento fundamental para o monitoramento da produção que permite o conhecimento do máximo potencial das florestas, além disso, é essencial para o planejamento de atividades de corte, colheita e suprimento de madeira. As técnicas convencionais para o levantamento da produção florestal utilizam-se de métodos tradicionais de estatística (estatística clássica), considerando apenas a adoção de valores médios para a tomada de decisões, não explorando as correlações espaciais que possam existir entre as parcelas amostrais. Então, um tipo de interpolador geoestatístico que permite definir a estrutura de dependência espacial dos dados é a krigagem, que juntamente com a metodologia de amostras virtuais, pode-se tornar uma alternativa viável para obtenção de um variograma com modelagem aceitável. Desta forma, o objetivo geral deste estudo foi empregar a metodologia de amostras virtuais no planejamento da malha amostral do inventário florestal, a fim de possibilitar a determinação de um número de parcelas que possam ser estabelecidas na área para obtenção de produtividade, sem que haja perda de precisão ou aumento de custos. A área de estudo abrange uma área plantada de 287,66 ha, pertencente a empresa Eucatex S/A, localizada em Itatinga, no estado de São Paulo. Os dados dendrométricos de volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) foram obtidos por meio de inventários realizados pela própria empresa, utilizando-se 32 parcelas retangulares permanentes, para os inventários florestais contínuos (IFC) e 32 parcelas retangulares permanentes mais 66 temporárias, para o inventário pré-corte (IPC). Os seguintes passos foram realizados com os dados de IFC para espacialização dos dados originais, no programa ArcGIS: aplicação de uma estatística univariada sobre a variável volume/ha; geração do variograma experimental; ajuste do variograma; validação do modelo teórico; aplicação da krigagem; geração de mapas de produtividade ano a ano. Posteriormente, 47 amostras virtuais foram inseridas na malha amostral dos inventários contínuos, considerando apenas as parcelas permanentes (32 parcelas), sendo que 10 parcelas foram selecionadas previamente para a validação externa; a análise geoestatística se deu com as amostras virtuais mais as amostras permanentes restantes, totalizando 69 parcelas. Comparando-se os métodos, observou-se pela validação cruzada que o erro médio e a correlação entre valores observados e estimados melhoraram adicionando-se amostras virtuais, possibilitando um melhor ajuste do variograma e obtenção de estimativas favoráveis. A comprovação da eficácia da metodologia de inserção das amostras, chamada de validação externa, deu-se pelo cálculo da média do erro médio, que foi igual a 6,8% em volume, em relação ao inventário real. Desta forma, a técnica de inserção de amostras virtuais pode ser utilizada, mostrando-se satisfatória para o planejamento da próxima malha para posteriores análises geoestatísticas, em plantios equidistantes.

Palavras-chave: Inventário florestal. Geoestatística. Produtividade florestal.

ABSTRACT

The high productivity of eucalyptus trees makes it necessary to master accurate techniques and tools for forest, such as the forest inventory, a fundamental procedure for monitoring production that allows the knowledge of the maximum potential of forests, and is essential for planning of harvesting and supply of timber. Conventional techniques for surveying forest production use traditional statistical methods (classical statistics), considering only the adoption of average values for decision making, not exploring the spatial correlations that may exist between the sample plots. So, a kind of geostatistical interpolator that allows defining the structure of spatial dependence of data is kriging, which together with the methodology of virtual samples, can become a viable alternative to obtain a variogram with acceptable modeling. In this way, the aim of this study was to use the methodology of virtual samples in the planning of the sampling of the forest inventory, in order to allow the determination of a number of parcels that can be established in the area to obtain productivity, without losing accuracy or increasing costs. The study area covers a planted area of 287.66 ha, belonging to Eucatex S / A, located in Itatinga, in the state of São Paulo. The volume dendrometric data ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) were obtained through inventories carried out by the company and were estimated in 32 permanent rectangular plots for continuous forest inventories (CFI) and 32 permanent rectangular plots plus 66 temporary plots for the pre-cut inventory (PCI). The following steps were performed with the CFI data for spatialization of the original data in the ArcGIS program: application of an univariate statistic on the variable volume. ha^{-1} ; generation of the experimental variogram; variogram adjustment; validation of the theoretical model; application of kriging; generation of productivity maps year by year. Subsequently, 47 virtual samples were inserted into the sampling network of continuous inventories, considering only the permanent plots (32 plots), 10 plots were previously selected for external validation; the geostatistical analysis occurred with the virtual samples plus the remaining permanent samples, totaling 69 plots. Comparing the methods, it was observed through cross-validation that the mean error and the correlation between observed and estimated values were improved by adding the virtual samples, allowing better adjustment of the variogram and obtaining favorable estimates. The validity of the methodology of insertion of the samples, called external validation, was verified by means of the average error, which was 6.8% in volume, in relation to the original forest inventory. In this way, the technique of insertion of virtual samples can be used, proving to be satisfactory for the planning of the next mesh for later geostatistical analysis, in plantations that have the same age.

Keywords: Forest inventory. Geostatistical. Forest productivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da produtividade do eucalipto no Brasil, 1970-2014.....	26
Figura 2 - Área de árvores plantadas no Brasil.....	26
Figura 3 - Variograma e seus componentes.....	32
Figura 4 - Localização da área de estudo.....	37
Figura 5 - Croqui dos talhões.....	38
Figura 6 - Localização das parcelas amostrais permanentes e temporárias sem escala.....	41
Figura 7 - Variograma da variável volume ($m^3.ha^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2012.....	46
Figura 8 - Variograma da variável volume ($m^3.ha^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2013.....	46
Figura 9 - Variograma da variável volume ($m^3.ha^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2015.....	47
Figura 10 - Variograma da variável volume ($m^3.ha^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2016.....	47
Figura 11 - Mapa de produtividade do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2012 obtido por krigagem ordinária.....	50
Figura 12 - Mapa de produtividade do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2013 obtido por krigagem ordinária.....	51
Figura 13 - Mapa de produtividade do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2016 obtido por krigagem ordinária.....	52
Figura 14 - Variograma da variável volume ($m^3.ha^{-1}$) do Inventário Florestal Pré-corte (IPC) de 2016.....	53
Figura 15 - Variograma da variável volume ($m^3.ha^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2012 com a inserção de amostras virtuais.....	54
Figura 16 - Variograma da variável volume ($m^3.ha^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2013 com a inserção de amostras virtuais.....	54
Figura 17 - Variograma da variável volume ($m^3.ha^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2015 com a inserção de amostras virtuais.....	55
Figura 18 - Variograma da variável volume ($m^3.ha^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2016 com a inserção de amostras virtuais.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva dos valores de volume ($m^3.ha^{-1}$) para os anos de 2012, 2013, 2015 e 2016, referentes aos Inventários Florestais Contínuos (IFC).....	45
Tabela 2 - Estatística descritiva dos valores de volume ($m^3.ha^{-1}$) para o ano de 2016, referente ao Inventário Florestal Pré-corte (IPC).....	45
Tabela 3 - Parâmetros dos variogramas da característica volume ($m^3.ha^{-1}$), referentes aos Inventários Florestais Contínuos nos anos 2012, 2013 e 2016.....	48
Tabela 4 - Estatísticas de validação cruzada para valores de volume ($m^3.ha^{-1}$) dos Inventários Florestais Contínuo (IFC).....	49
Tabela 5 - Parâmetros dos variogramas da característica volume ($m^3.ha^{-1}$), referentes aos Inventários Florestais Contínuos nos anos 2012, 2013, 2015 e 2016 com a inserção de amostras virtuais.....	56
Tabela 6 - Estatísticas de validação cruzada para valores de volume ($m^3.ha^{-1}$) dos Inventários Florestais Contínuos (IFC) com a inserção de amostras virtuais.....	56
Tabela 7 - Estatísticas de validação externa para valores de volume ($m^3.ha^{-1}$) dos Inventários Florestais Contínuos (IFC) com a inserção de amostras virtuais.....	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Área de cada talhão e suas respectivas espécies.....	39
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	25
2.1	Cultura do eucalipto	25
2.2	Inventário Florestal.....	27
2.3	Geoestatística.....	30
2.3.1	Interpolação de dados - Krigagem.....	33
2.3.2	Amostras virtuais.....	35
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1	Caracterização da área de estudo.....	36
3.1.1	Clima.....	36
3.1.2	Formação geológica e geomorfológica.....	36
3.2	Material.....	38
3.2.1	Aquisição do dados.....	38
3.2.2	Programas de computador para processamento de dados.....	39
3.3	Metodologia.....	39
3.3.1	Aquisição dos dados.....	39
3.3.2	Espacialização do dados originais.....	41
3.3.3	Amostras virtuais.....	43
3.3.4	Comparação entre os métodos.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	Inventário florestal tradicional.....	45
4.2	Análise geoestatística dos dados originais.....	46
4.3	Análise geoestatística das amostras virtuais.....	54
4.4	Comparação entre os métodos.....	57
5	CONCLUSÕES.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

O segmento florestal, com destaque para a cultura de eucalipto, tem importante participação econômica no Brasil, sendo que 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no país advém do setor brasileiro de árvores plantadas, representada por uma área total de 7,84 milhões de hectares, para o ano de 2016. Os plantios de eucalipto para este mesmo ano, compreendem 5,67 milhões de hectares e estão localizados sobretudo nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul.

No que se refere a prestação de serviços ambientais, as florestas plantadas colaboram para diminuição do desmatamento da vegetação nativa, protegendo a biodiversidade; preservam o solo; são fontes de energia renovável; recuperam áreas degradadas e auxiliam na redução das emissões de gases causadores do efeito estufa por serem estoques naturais de carbono.

A elevada produtividade do eucalipto requer a necessidade do domínio de técnicas e ferramentas precisas acerca dos povoamentos florestais. Desta forma, o inventário florestal é fundamental para o monitoramento da produção e para o conhecimento do máximo potencial das florestas, além disso, é essencial para o planejamento de atividades de corte, colheita e suprimento de madeira.

A utilização de geotecnologias, como a geoestatística, tem auxiliado no planejamento e nas estimativas das características biofísicas de plantações florestais, visando a rapidez na obtenção dos dados, diminuição dos custos com amostragens e informações com qualidade.

As técnicas convencionais usadas para o levantamento da produção florestal, utilizam-se de métodos tradicionais de estatística, possibilitando apenas a adoção de valores médios para a tomada de decisões, portanto, não exploram as relações que possam existir entre as unidades amostrais. Com isso, a geoestatística passa a ser uma ferramenta eficiente para quando existe continuidade espacial entre os dados.

Outro ponto importante é a relação entre o número de parcelas disponíveis e o número de parcelas úteis para a definição da variável de interesse. Sabe-se da literatura que poucos dados prejudicam o mapeamento contínuo da área e, conseqüentemente, a dependência espacial.

Uma maneira de contornar essa limitação é o emprego do uso de amostras virtuais. Essas amostras são inseridas na malha, não para mascarar os resultados,

mas sim para planejar a próxima malha, garantindo uma economia em relação ao processo de extração e análise de amostras.

O objetivo geral deste estudo foi empregar a metodologia de amostras virtuais no planejamento da malha amostral do inventário florestal, a fim de possibilitar a determinação de um número de parcelas que possam ser estabelecidas na área para obtenção de produtividade, sem que haja perda de precisão ou aumento de custos.

Diante do exposto, os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) avaliar a estrutura de dependência espacial do volume de madeira por hectare;
- b) empregar a geoestatística com o uso da metodologia de amostras virtuais para o planejamento da malha amostral dos inventários florestais contínuos e pré-corte;
- c) verificar se as amostras virtuais podem substituir as parcelas temporárias e otimizar a representação da população;
- d) comparar o método convencional de monitoramento florestal com a utilização de amostras virtuais e geoestatística.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura do eucalipto

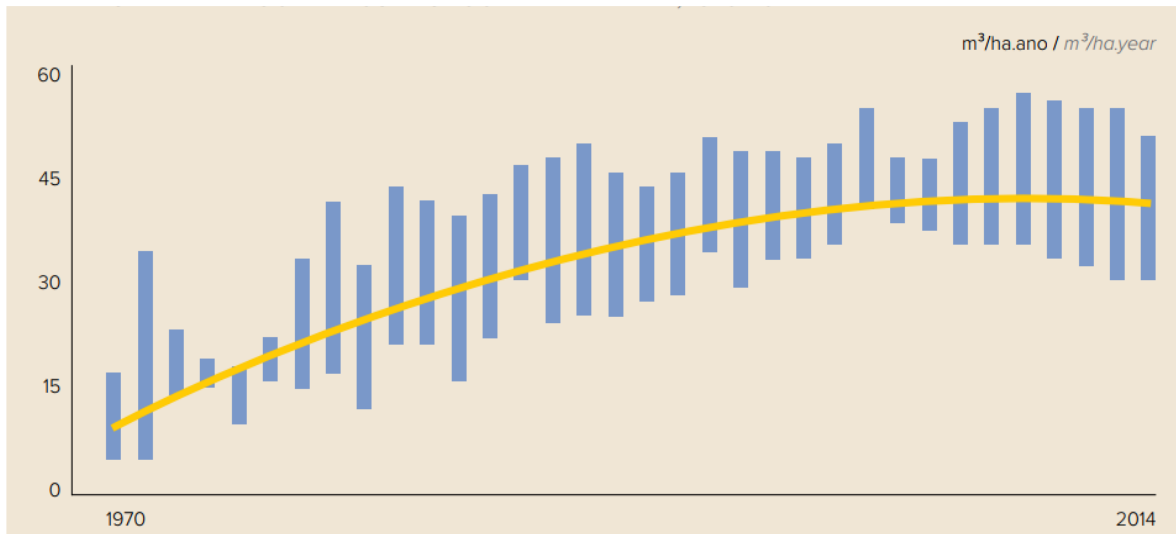
Em 1904, com o intuito de suprir a necessidade de lenha, postes e dormentes, foi introduzido no Brasil o eucalipto. Nas décadas de 60 até meados dos anos 80, o plantio de eucalipto teve crescimento significativo devido aos incentivos fiscais, tornando-se fonte de matéria prima para fábricas de celulose e papel, para produção de carvão vegetal e para indústrias de painéis de madeira reconstituídos (DOSSA et al., 2002).

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae, é originário da Austrália e regiões próximas (ELDRIDGE et al., 1993) e abrange uma grande variabilidade de espécies, entre 500 a 700 já identificadas (BERTOLUCCI; REZENDE; PENCHEL, 1995). De forma geral, apresenta-se como uma espécie vegetal de grande porte que possui rápido crescimento e adaptado às condições climáticas, pedológicas e ecológicas brasileira, possui elevada produção de sementes, facilidade de propagação vegetativa, podendo ser encontrada em diversos tipos de solos e em diversas altitudes (DOSSA et al., 2002)

A escolha da espécie a ser plantada dependerá das condições do local, como clima e solo, além da finalidade ou destinação do uso da madeira. O plantio deve ocorrer em períodos chuvosos ou em épocas secas, desde que se faça a irrigação (SANTOS; PIRES; PEREIRA, 2008). As atividades de colheita e arraste da madeira dos talhões até as estradas para serem transportadas, podem ser feitas através de diferentes combinações de máquinas especializadas, o que vai depender do terreno e das condições financeiras (WILCKEN et al, 2008). Quanto ao ciclo de corte, pode variar entre 5 e 7 anos, dependendo da finalidade para o qual foi plantado, podendo chegar a 15 anos para serraria (CASTANHO FILHO; OLIVETTE, 2017).

Intensivas pesquisas acerca do desenvolvimento das florestas resultaram em um aumento de quatro vezes na produtividade da madeira (volume por hectare) no Brasil entre 1970 e 2014, segundo o Relatório anual da Indústria Brasileira de Árvores-IBA (2015), conforme Figura 1. As altas taxas de crescimento dependem de resultados de programas de melhoramento genético (RESENDE et al., 2012), além de práticas silviculturais, incluindo preparação do solo, fertilização, espaçamento e controle de plantas daninhas (GONÇALVES et al., 2013).

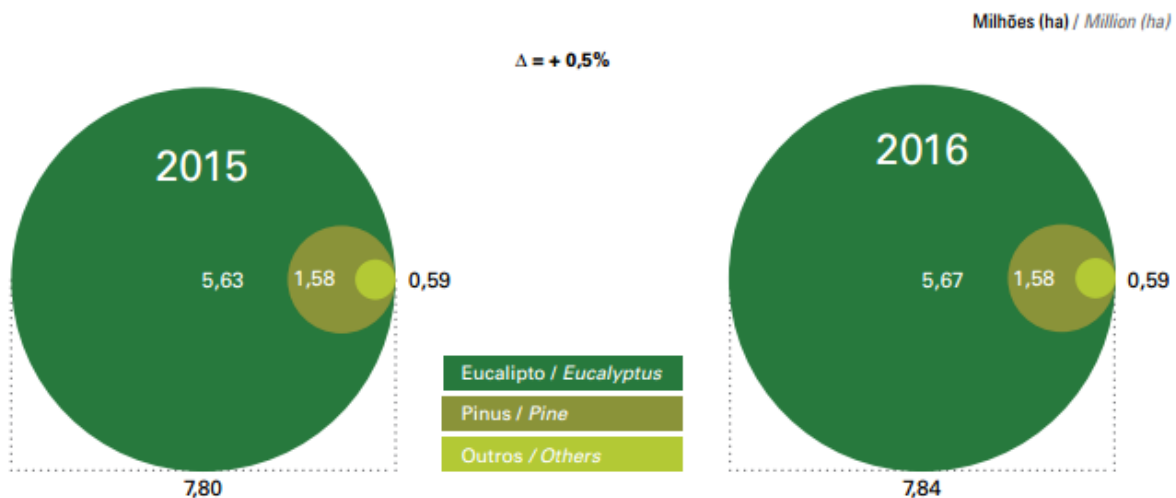
Figura 1 - Evolução da produtividade do eucalipto no Brasil, 1970-2014



Fonte: IBA (2015).

De acordo com Paludzyszyn Filho (2013), o eucalipto é a árvore mais plantada no território nacional (Figura 2), devido ao fato de que as áreas de pesquisa e desenvolvimento geraram, ao longo de décadas, resultados e informações técnicas que proporcionaram produtividades e rentabilidades compatíveis aos das empresas de base florestal. O mesmo autor comenta que diante da ampla disponibilidade de orientações técnicas de como plantar, proteger, conduzir e colher, o produtor sente-se mais destemido para investir na cultura.

Figura 2 - Área de árvores plantadas no Brasil



Fonte: IBA (2017).

O Brasil é um dos países que apresenta a maior contribuição para a construção de uma economia verde. Tal fato ocorre em razão do setor brasileiro de base florestal apresentar a maior produtividade em volume de madeira por unidade de área, ao ano, de suas áreas plantadas, ocupando a liderança do ranking global de produtividade florestal em 2016 que foi de 35,7 m³.ha⁻¹ ao ano e, ainda, apresentar a menor rotação do mundo, que é o período entre o plantio e a colheita das árvores (STAPE et al., 2010; FLORES et al., 2016; IBA, 2017).

Além disso, 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no país advém do setor brasileiro de árvores plantadas, representada por uma área total de 7,84 milhões de hectares para o ano de 2016, sendo que os plantios de eucalipto para este mesmo ano, compreendem 5,67 milhões de hectares (IBA, 2017).

A elevada produtividade do eucalipto em uma rotação reduzida, demonstra que a qualidade do manejo florestal e métodos precisos para avaliá-lo são de suma importância para a sua exploração, para que assim seja possível aliar a crescente demanda por fibras, madeira e energia ao manejo sustentável das florestas.

2.2 Inventário Florestal

O inventário florestal é a ferramenta utilizada para o monitoramento do estoque de madeira ou biomassa nos povoamentos florestais. Para que a gestão e o manejo sejam eficientes é imprescindível o conhecimento dos recursos florestais existentes e o potencial de crescimento de determinada espécie em uma floresta plantada, possibilitando a otimização de todo o processo de exploração da cadeia florestal (ASSIS et al., 2009; ALVARENGA, 2012; ALÓ, 2016;). Hakamada (2012) ressaltou que um sistema de monitoramento que permita identificar a qualidade das operações silviculturais em escala espacial e temporal mostra-se elementar para que o nível atual de produtividade do eucalipto seja mantido ou elevado.

Paivinen et al. (1994) definiram o monitoramento florestal como sendo uma observação periódica de variáveis selecionadas para quantificar suas mudanças ao longo do tempo. Em florestas para fins de exploração madeireira, o inventário pode determinar ou estimar variáveis dendrométricas, ou seja, variáveis referentes às características quantitativas de árvores ou povoamentos (diâmetros, altura, área basal, volume e biomassa) (JORGE, 2013), e/ou produzir estimativas qualitativas dos

recursos florestais, como vitalidade das árvores, qualidade do fuste, entre outros (SCOLFORO; MELLO, 1997).

Geralmente, o inventário de plantios de eucalipto inicia-se entre 12 e 24 meses. O monitoramento pode ser via presencial, por procedimentos de amostragem representativa da população, por meio de observação direta; e/ou via sensoriamento remoto, utilizando-se técnicas e ferramentas por observação não presencial (PAIVININEN et al., 1994; CAMPOS; LEITE, 2006).

Para quantificação de volume de madeira ou outra variável, uma das formas é a instalação de unidades amostrais ou parcelas, quando se trata de áreas muito extensas. Ou seja, o levantamento de dados acontece em parte da população para posteriormente ser extrapolada para a área total. Desta forma, tem-se as estimativas da quantidade e da distribuição de madeira disponível com uma precisão aceitável (LEITE; ANDRADE, 2002).

No inventário florestal busca-se o menor erro para as estimativas, assim como o menor custo possível (MELLO et al., 2006). Porém, em cada ciclo de plantio existem fatores que influenciam o crescimento das árvores e encontrar o melhor método de amostragem torna-se complexo (ALÓ, 2016). Os métodos de amostragem mais usados são o casual simples, o casual estratificado e o sistemático. Esses procedimentos podem ser encontrados em estudos como Husch, Beers e Kershaw Júnior (2003); Soares, Paula Neto e Souza (2006); Scolforo e Mello (2006).

Quanto a abordagem da população no tempo, os inventários podem ser contínuos ou temporários. Os inventários florestais contínuos (IFC) são realizados várias vezes ao longo do tempo, medindo-se as mesmas parcelas de árvores em diversas ocasiões, com o intuito de estimar o crescimento periódico da floresta (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2006). Os inventários temporários acontecem apenas em uma ocasião, como o inventário florestal pré-corte (IPC), no qual se aloca mais parcelas na área para aumentar a intensidade amostral antes do corte, a fim de se obter valores de volumes mais assertivos (GUEDES, 2014).

A execução dos inventários dá-se por meio da teoria da amostragem clássica, cujas variações espaciais de determinada característica são independentes, ou seja, aleatórias (MELLO, 2004; ALVARENGA, 2012).

Na teoria da amostragem, a população é um universo com indivíduos de mesma natureza, que diferem entre si de acordo com uma característica variável entre eles e a amostra é a porção de dada população (SOARES; PAULA NETO; SOUZA,

2006). Assim, as amostras devem ser em número suficiente para representar as características da população que se deseja estimar (BOLFARINE; BUSSAB, 2007).

Nessa teoria de amostragem, ao amostrar determinada região, o valor médio de certa característica é igual ao valor da esperança desta característica em qualquer ponto dentro desta região e o erro de estimativa é correspondente à variância dos dados amostrados (COCHRAN, 1977; TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

Devido ao princípio da casualização, as posições das amostras podem ser ignoradas na abordagem da estatística clássica, que rege o inventário, já que o método pressupõe que as variações de uma característica, de um local para outro, são independentes e aleatórias (DUARTE, 2000; GUEDES, 2014). De forma prática, as posições das parcelas amostrais no campo podem ser ignoradas, já que as variáveis são consideradas independentes e presume-se que não possuem continuidade espacial (KANEAE JUNIOR, 2004).

Para Guedes (2014), a teoria de amostragem clássica fundamenta-se nos seguintes componentes, de acordo com a Equação 1.

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

Onde: $Z(x_i)$ é a variável avaliada, $M(x)$ é uma função determinística que caracteriza a componente estrutural de Z e ε_i é o erro aleatório.

O desejável é que o erro seja aleatório, sem apresentar nenhum comportamento estruturado, sendo assim, a análise dos resíduos é indispensável. A teoria específica, então, apenas o tamanho da variabilidade, por meio do desvio padrão, mas não especifica a estrutura da variabilidade ou a continuidade espacial (MELLO, 2004; GUEDES, 2014; ALÓ, 2016).

Os cálculos para obtenção das variáveis dendrométricas por se utilizarem de métodos tradicionais de estatística, possibilitam apenas a adoção da média e da variância para descrever a variável estudada. Sendo assim, não exploram as correlações que podem existir entre as unidades amostrais (MELLO, 2004; MELLO et al., 2005).

Entretanto, alguns trabalhos abordaram a presença de estrutura de continuidade espacial nas características dendrométricas avaliadas, como em Rufino et al. (2006), Assis et al. (2009), Alvarenga (2012), Guedes et al. (2012), demonstrando que essas relações devem ser consideradas nas análises estatísticas,

utilizando-se de interpoladores geoestatísticos para aumentar a eficiência das estimativas.

A qualidade das estimativas pode ser afetada pela variabilidade espacial dos dados, ou seja, se as correlações não forem consideradas, a precisão desses dados inventariados será distorcida em relação a amplitude do intervalo de confiança da variável, que podem ser superestimados ou subestimados, dependendo da intensidade da correlação (MINGOTI; FIDELIS, 2001; SÉ et al., 2013).

2.3 Geoestatística

A utilização de geotecnologias como ferramenta para estudos de impacto e planejamento ambiental tornou-se cada vez mais usual. Segundo Medeiros (2012), informações que são subsidiadas por técnicas matemáticas e computacionais na análise espacial dos dados, como a geoestatística, apresentam melhor suporte e segurança para a tomada de decisões.

Daniel Krige, em 1951, trabalhava com dados de mineração de ouro em jazidas na África do Sul e, baseando-se em suas observações, visualizou que as variâncias obtidas por meio da amostragem clássica não eram suficientes para explicar o estudo se as distâncias entre as amostras não fossem consideradas e Matheron, posteriormente, desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas. Esta teoria foi chamada de geoestatística e é definida como uma função espacial numérica que varia de um local para outro e apresenta continuidade aparente, cuja variação é complexa (MATHERON, 1963).

A teoria das variáveis regionalizadas presume que cada informação $Z(x_i)$ é modelada como uma variável aleatória e que pode ser expressa pela soma de três componentes: um componente estrutural associado a um valor médio constante ou tendência; um componente aleatório, espacialmente correlacionado; e um erro aleatório. O x representa uma posição (em uma, duas ou três dimensões), o valor da variável Z , em x , é dada pela Equação 2 (BURROUGH, 1987).

$$Z(x_i) = M(x) + \varepsilon'_x + \varepsilon_i \quad (2)$$

Onde: $M(x)$ é uma função determinística que caracteriza a componente estrutural Z em x ; ε'_x é um termo estocástico, que varia localmente e depende espacialmente de

$M(x)$; e ε_i é um ruído aleatório não correlacionado, com distribuição normal, média zero e variância.

Os modelos geoestatísticos pertencem a categoria dos modelos estocásticos, cujos valores coletados são interpretados como originários de processos aleatórios e são capazes de quantificar a incerteza associada ao estimador (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Na geoestatística estuda-se, então, a correlação entre os dados espaciais e sua localização e diferenciação temporal, enquanto que na estatística clássica adota-se a aleatoriedade das variações dos fenômenos (GONÇALVES, 2015). Dentre os diversos problemas operacionais que a geoestatística pode resolver, estão: a definição de quantidade e localização de amostras vizinhas para estimativa de um bloco; distribuição e variabilidade espaciais da variável de interesse; avaliação e mapeamento de incertezas; entre outros (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Guimarães (2004) ressaltou que os fenômenos naturais apresentam-se de maneira recorrente e com certa estruturação nas variações entre vizinhos, expressando que as variações não são aleatórias, dessa forma, apresentam algum grau de dependência espacial. Quando é identificada a continuidade espacial da característica avaliada, a utilização da estatística espacial permite estimativas sem tendência, a menores custos (DINIZ, 2007).

Para identificar a presença da correlação ou o grau de dependência espacial entre amostras, o método aplicado é o variograma (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989), que caracteriza a estrutura de continuidade espacial da característica avaliada, exigindo hipótese de estacionaridade menos restritivas, ou seja, hipótese intrínseca. Caso haja dependência espacial, amostras mais próximas geograficamente terão comportamentos parecidos entre si com relação a uma característica de interesse, àquelas amostras mais distantes entre si (RIBEIRO JÚNIOR, 1995).

A estimativa do grau de dependência espacial entre as amostras é apresentada na Equação 3 (JOURNEL, 1989).

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2N(h)} \right) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

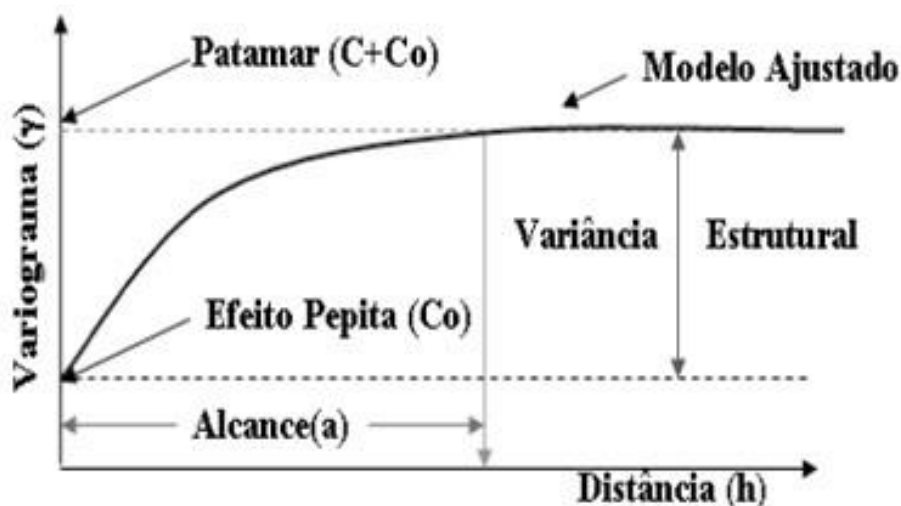
Onde: $\gamma(h)$ é o estimador da variância para cada distância h , $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações e $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são pares de pontos separados por uma distância h .

A função variograma permite a geração do gráfico da variância em função da distância h , chamado de variograma experimental, que permite interpretação da continuidade espacial da variável regionalizada (GUEDES, 2014).

Para características que possuem dependência espacial, presume-se que a diferença entre os valores de $[Z(x_i) - Z(x_i + h)]$ seja crescente com a distância até certo ponto, se estabilizando em um valor chamado de patamar, cujo valor é aproximadamente, igual a variância dos dados. Esta distância é conhecida como alcance e caracteriza o raio de um círculo onde os valores são correlacionados (muito parecidos uns com os outros), ou seja, mostra a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente, sendo que quanto maior o alcance, maior será a homogeneidade entre os pontos amostrados (YAMAMOTO, 2001). O efeito pepita é o valor da variância e representa a variabilidade da característica em estudo em espaçamentos menores do que o amostrado e, quanto menor o seu valor, melhor será o processo de inferência (FARIAS et al., 2003; VIEIRA, 2000). Porém, o efeito pepita pode ser alto em estudos com variáveis ecológicas (AUBRY; DEBOUZIE, 2001).

Na Figura 3, tem-se a representação gráfica de um variograma típico com seus componentes principais: C_0+C_1 (patamar), a (alcance), C_0 (efeito pepita) e C (componente estrutural), segundo Wanderley, Amorim e Carvalho (2012).

Figura 3 - Variograma e seus componentes



Fonte: Wanderley, Amorim e Carvalho (2012).

Os cálculos da geoestatística dependem do modelo de variograma ajustado, portanto, se o modelo teórico ajustado não for o mais adequado, os cálculos posteriores conterão erros que podem afetar as inferências. Os modelos de variograma mais usados são o linear, o esférico, o exponencial e o gaussiano (GUIMARÃES, 2004). Segundo Guedes (2014), é por meio do comportamento do variograma experimental que o pesquisador definirá o modelo teórico que melhor representa o comportamento dos dados.

Posteriormente ao ajuste do variograma, utiliza-se o procedimento de validação cruzada, que é empregado para verificar se o ajuste é aceitável. Tal procedimento define o cálculo do erro experimental (diferença entre valor real e estimado) e de suas estatísticas (erro médio e variância do erro padronizado), (CASTRIGNANÒ, 2011).

Devido às características de correlação espacial das variáveis, tem sido vasta a aplicação da geoestatística, principalmente para efetuar estimativas ou simulações de variáveis em locais não amostrados (LANDIM; STURARO, 2002).

2.3.1 Interpolação de dados - Krigagem

Um dos métodos de interpolação eficaz em inventários florestais é a krigagem, que se fundamenta na interpolação de dados das unidades amostrais para variáveis que possuem dependência espacial. Através da krigagem é possível obter mapas de classes de produtividade para os povoamentos florestais (KANEGAE JÚNIOR, 2004).

A krigagem usa informações a partir do variograma para localizar pesos adequados a serem associados às amostras com valores conhecidos que irão estimar pontos desconhecidos. O que o difere dos demais algoritmos é que além dos valores estimados, o método fornece o erro associado à estimação (LANDIM; STURARO, 2002). Entretanto, segundo Landim (2000), só há sentido lógico em estimar ou interpolar dados pela krigagem, se a variável de interesse possuir continuidade espacial na área estudada.

De acordo com Zimback (2001), as principais características da krigagem incluem: possibilidade de geração de valores maiores ou menores do que os valores amostrados; usar entre todas as unidades amostrais a distância e a geometria; levar em consideração a minimização do erro da variância, ou seja, estimativas sem tendências e com erro mínimo; a partir de uma análise espacial baseada no variograma, determinar os pesos dos valores amostrados.

O interpolador geoestatístico krigagem, segundo Mello et al (2003), é definido pela Equação 4 e pela Equação 5.

$$[A]^{-1} * [b] = [\lambda] \quad (4)$$

Onde: $[A]^{-1}$ é a matriz inversa da variância entre as localidades da vizinhança de um ponto, definida pelo modelo de variograma com base nas variâncias entre as localidades; $[b]$ é a matriz de variância entre as localidades vizinhas (com a variável estimada) e o ponto para o qual a variável será interpolada, também determinado pelo modelo de variograma, com base nas distâncias entre as localidades vizinhas e o ponto a ser interpolado; $[\lambda]$ é a matriz de pesos da krigagem.

$$X_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i * X_i \quad (5)$$

Onde: X_p é a variável interpolada; λ_i é o peso da i -ésima localidade vizinha; X_i é o valor da variável para a i -ésima localidade; n é o número de localidades vizinhas empregadas para interpolação do ponto.

A interpolação por krigagem compreende diversos tipos de estimação: krigagem simples, ordinária, indicativa, universal, cokrigagem, entre outras (OLIVER; WEBSTER, 1990), sendo que a mais utilizada é a krigagem ordinária pelo fato de não exigir conhecimento nem estacionariedade da média dos dados estudados, ou seja, é definida por um algoritmo que considera que os valores de uma variável regionalizada apresentam média constante e desconhecida (ANDRIOTTI, 2005).

Além disso, na krigagem ordinária, a estimativa da variável de interesse em determinado local dependerá somente da distância e do peso de seus vizinhos mais próximos (JOURNEL; HUHUIJBREGTS, 1978), que receberão pesos maiores quanto mais próximos estiverem da posição a ser interpolada.

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

2.3.2 Amostras virtuais

A intensidade amostral sempre é questionada nos estudos geoestatísticos. Mello (2004) sugeriu como estudo, o desenvolvimento de uma metodologia para definição do número de parcelas a serem avaliadas numa floresta com estrutura de continuidade espacial da característica avaliada. Para o monitoramento da produção florestal, as vezes é necessário aumentar a intensidade amostral, adicionando novos custos ao processo de medição, como acontece no inventário pré-corte.

Por isso, a inserção de novas amostras pode-se tornar uma alternativa viável e/ou necessária para a obtenção de um variograma com modelagem aceitável (MORAES, 2015).

Conforme Moraes (2015), a inserção aleatória de amostras virtuais, como contribuição para o planejamento da malha amostral a ser utilizada na análise geoestatística, mostrou-se viável para um conjunto de amostras de alguns atributos do solo. Como resultado, proporcionou a melhora do Índice de Dependência Espacial e da Validação Cruzada desses atributos, que em condição original não apresentaram resultados satisfatórios. No entanto, como a malha é aleatória deve-se levar em conta as restrições presentes em campo, tais como acidentes geográficos ou áreas de acesso restrito.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo pertence à Fazenda Veados e Invernadinha, da empresa Eucatex S/A e localiza-se no município de Itatinga, no estado de São Paulo (Figura 4).

A área experimental está geograficamente localizada entre as latitudes 23°16'03"S e 23°14'51"S e longitudes 48°39'09"W e 48°37'40"W. A área total é de 361,41 hectares, sendo que a área plantada é de 287,66 hectares.

3.1.1 Clima

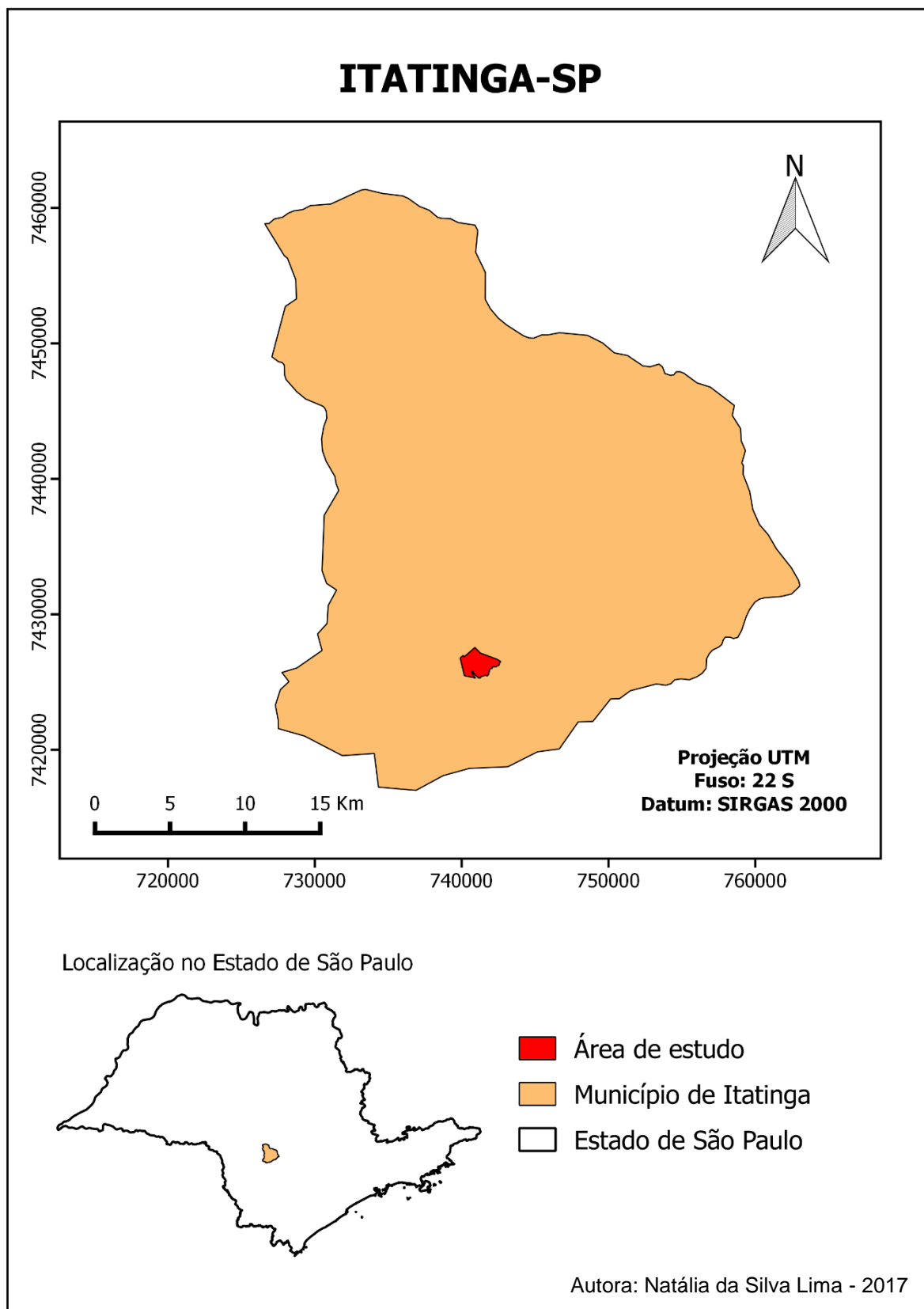
O clima da região, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Cfa, definido como clima temperado quente (mesotérmico) úmido, e a temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C; a precipitação média anual é de aproximadamente, 1400mm; a temperatura média anual é 19,7°C; com altitude de 840 metros (CUNHA, MARTINS, 2009).

3.1.2 Formação Geológica e Geomorfológica

O material geológico do município de Itatinga configura-se pelo predomínio de rochas sedimentares areníticas e rochas magmáticas correspondentes aos derrames basálticos. Outra grande porção está recoberta por depósitos cenozóicos de areias com matriz argilosa. Distinguem-se então, na região do município, as litologias: areníticas da Formação Pirambóia e basálticas da Formação Serra Geral, ambas pertencentes ao Grupo São Bento e depósitos coluviais indiferenciados de espigão e areias com matriz argilosa (LANDIM, 1984).

A região apresenta características do domínio geomorfológico das Cuestas Basálticas, que compreendem escarpas e morros testemunhos, em um relevo que demarca transição entre Depressão Periférica e Planalto Ocidental Paulista, segundo o Plano Municipal de gestão integrada dos resíduos sólidos (ITATINGA, 2014).

Figura 4 - Localização da área de estudo



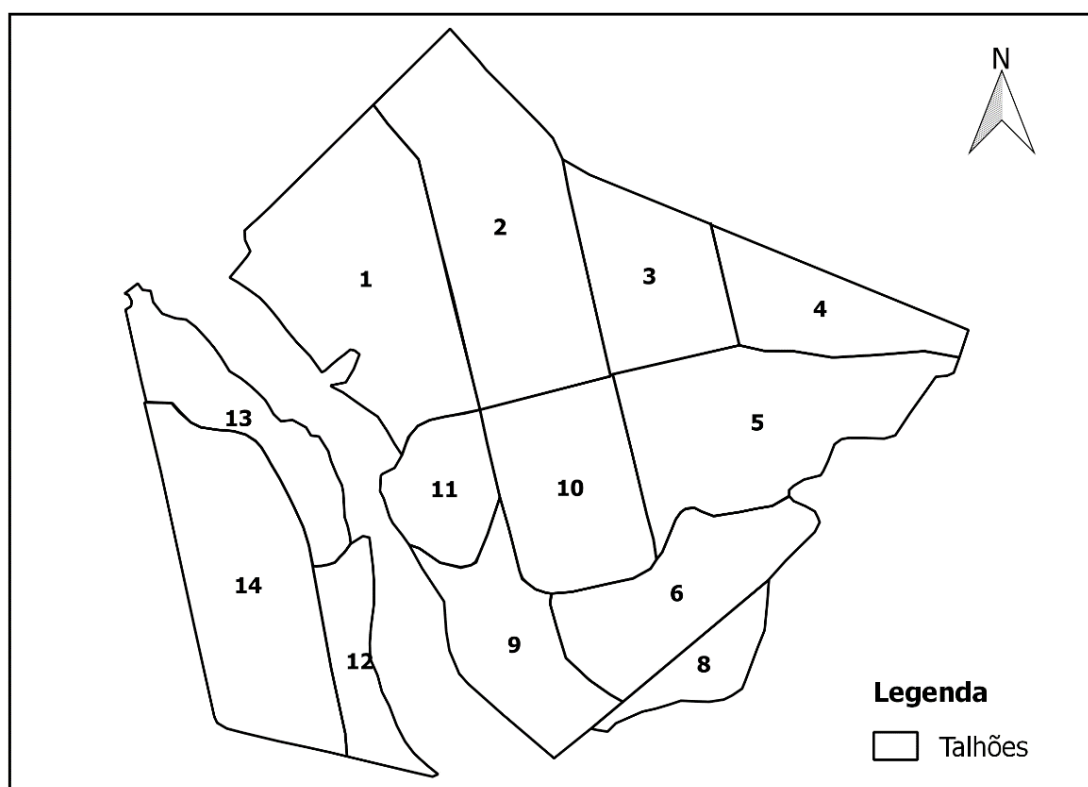
3.2 Material

3.2.1 Aquisição dos dados

Para este estudo, foi selecionado o projeto de 2010 da empresa Eucatex S/A, com data de plantio em 30 de setembro de 2010. A área era composta por 13 talhões de eucalipto, porém na enumeração de identificação dos talhões não existe o talhão 7, por predileção da empresa, conforme Figura 5. O espaçamento do plantio era de 6 metros quadrados (m^2) por planta (3 m entre linhas x 2 m entre plantas), de povoamentos clonais de *Eucalyptus urograndis* (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) e *Eucalyptus platyphylla*.

Foram utilizados no trabalho dados de volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) de inventários obtidos por levantamentos de campo, realizados pela empresa Eucatex S/A. Os inventários florestais contínuos (IFC) iniciaram-se em 2012, data em que o plantio apresentava, aproximadamente, 2 anos de idade e se repetiram nos anos de 2013, 2015 e 2016. Em 2014 não houve o IFC por logística da empresa. Em julho de 2016, 2 meses antes da colheita, ocorreu o inventário florestal pré-corte (IPC).

Figura 5 - Croqui dos talhões



Autora: Natália da Silva Lima - 2017

As áreas de cada talhão com suas respectivas espécies são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Área de cada talhão e suas respectivas espécies

Talhão	Área	Espécie
1	40,59	<i>E. urograndis e E. platyphylla</i>
2	40,69	<i>E. platyphylla</i>
3	20,22	<i>E. urograndis</i>
4	16,22	<i>E. platyphylla</i>
5	33,69	<i>E. urograndis</i>
6	20,90	<i>E. urograndis</i>
8	6,10	<i>E. platyphylla</i>
9	17,79	<i>E. platyphylla</i>
10	23,02	<i>E. urograndis</i>
11	11,40	<i>E. urograndis</i>
12	10,04	<i>E. urograndis</i>
13	15,35	<i>E. urograndis</i>
14	31,65	<i>E. urograndis</i>
Área Total Fazenda	287,66	

3.2.2 Programas de computador para processamento de dados

Para processamento e avaliação dos dados para posterior análise, foram utilizados os programas computacionais: ArcGIS, para a análise geoestatística e QGIS versão 2.14.16, para criação e finalização dos mapas.

3.3 Metodologia

3.3.1 Aquisição dos dados

A execução e obtenção dos dados dos inventários florestais contínuos e pré-corte foram realizados pela empresa Eucatex S/A.

O procedimento de amostragem adotado pela empresa foi a Amostragem Sistemática, com a alocação de parcelas em uma intensidade amostral de 1 parcela a cada 8 hectares para os inventários florestais contínuos (IFC). Para o inventário florestal pré-corte (IPC), aumentou-se a intensidade amostral, sendo 1 parcela para cada 3 hectares.

A partir dos valores de intensidade amostral, a empresa estabeleceu 32 parcelas permanentes na área, com formato retangular, para a realização dos IFC nos anos de 2012, 2013, 2015 e 2016. Antes da colheita dos eucaliptos, a Eucatex acrescentou às 32 parcelas permanentes mais 66 parcelas temporárias, totalizando 98 parcelas para o processamento do IPC.

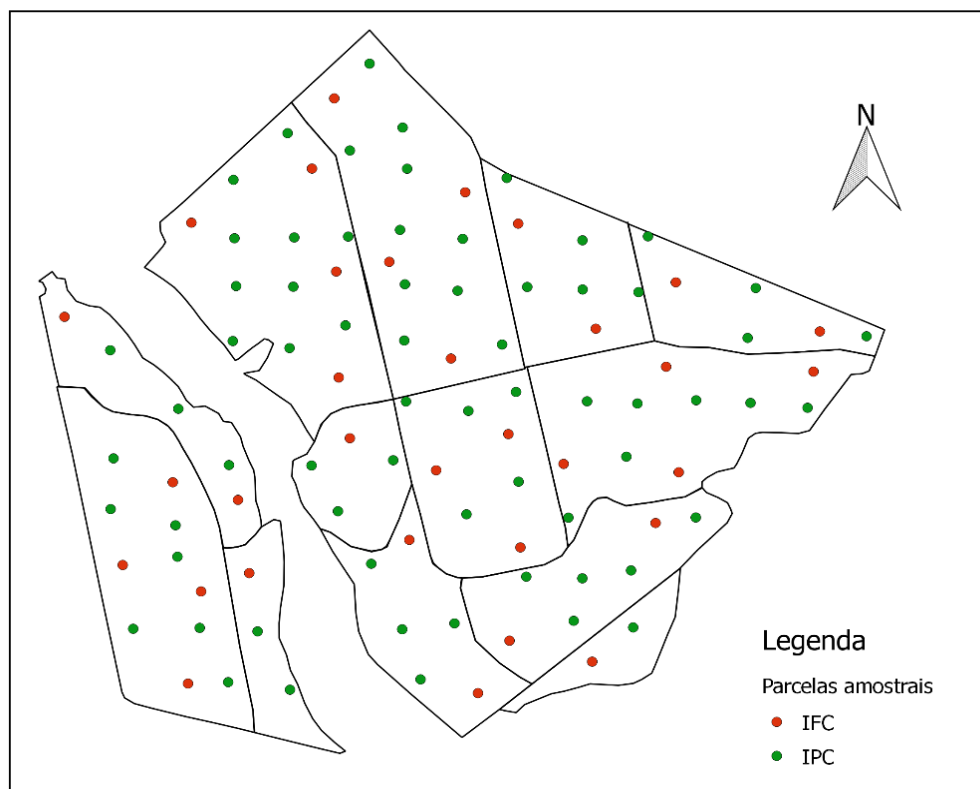
Todas as parcelas foram georreferenciadas para realização do estudo variográfico e elaboração de mapas de produtividade (Figura 6).

A quantificação de volume nos IFC implicou na medição do diâmetro à altura do peito (DAP a 1,30 m do solo) e da altura das árvores em cada parcela permanente, os quais são necessários para o cálculo do volume de madeira. Desta forma, por meio de modelos genéricos ajustados com base nos dados históricos de inventários da empresa foi possível obter estimativas de volume de cada árvore em pé e extrapolar o valor para obtenção do volume por parcela, volume por talhão e volume por hectare, referente a cada ano em que ocorreu o IFC.

Para o IPC realizou-se um novo inventário considerando todas as parcelas, ou seja, as parcelas permanentes mais as parcelas temporárias. Para o seu processamento, a obtenção da variável volume se deu através do ajuste volumétrico realizado a partir do modelo logaritimizado de Schumacher e Hall (1933). Para o ajuste do modelo foram abatidas, em média, 50 árvores no projeto e esse abate, conhecido como cubagem rigorosa, consiste no seccionamento das árvores selecionadas para obtenção do volume por árvore, de forma que seu valor é a soma dos volumes de todas as seções correspondentes à cada árvore.

O que determinou o número de árvores cubadas foi a quantidade de classes diamétricas existentes, ou seja, como o projeto apresentou 5 classes diamétricas, foram cubadas 10 árvores por classe. Posteriormente, para estimativa do estoque volumétrico os valores de volume individuais das árvores foram extrapolados para hectare ($m^3.ha^{-1}$).

Figura 6 - Localização das parcelas amostrais permanentes e temporárias sem escala



Autora: Natália da Silva Lima - 2017

3.3.2 Espacialização dos dados originais

A partir dos dados de inventário florestal, foram realizadas análises geoestatísticas com valores de volume por hectare obtidos dos IFC para os anos de 2012, 2013, 2015 e 2016, e com os valores de volume por hectare obtidos do IPC, em 2016.

Os seguintes passos foram realizados: aplicação de uma estatística univariada sobre a variável volume/ha; geração do variograma experimental; ajuste do variograma; validação do modelo teórico; aplicação da krigagem; geração de mapas de produtividade de 2012, 2013, 2015 e 2016, referentes aos IFC e IPC.

O intuito do estudo variográfico é verificar a existência e o grau de dependência espacial entre as parcelas, com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, que é estimada pela Equação 3, já mencionada (JOURNEL, 1989).

Através do índice proposto por Zimback (2001), foi analisado o grau de dependência espacial utilizando-se o Índice de Dependência Espacial (IDE), cujos

valores indicam: $IDE \leq 25\%$ fraca dependência espacial; $25\% < IDE < 75\%$ moderada dependência espacial; e $IDE \geq 75\%$ forte dependência espacial (Equação 6).

$$IDE = \frac{C}{C + C_0} \times 100 \quad (6)$$

Onde: C é o patamar e $C + C_0$ é o patamar mais o efeito pepita.

Após o ajuste, os variogramas foram submetidos ao procedimento de validação cruzada com o intuito de verificar se a modelagem do variograma foi satisfatória e a krigagem possui caráter não enviesado e mínima variância de estimação. Desta forma, considerou-se o coeficiente de correlação entre os valores observados e estimados, erro médio (EM) (Equação 7) e a variância do erro padronizado (VEP) (Equação 8), proposto por Castrignanò (2011).

$$EM = \frac{1}{N} \sum (z(x_i) - z^*(x_i)) \quad (7)$$

Onde: N é o número de amostras; $z(x_i)$ é o valor observado; $z^*(x_i)$ é o valor estimado. O erro médio deve ter valor próximo de zero e demonstra o grau de não-enviesamento (CASTRIGNANÒ, 2011).

$$VEP = \frac{1}{N} \sum \left(\frac{z(x_i) - z^*(x_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (8)$$

Onde: N é o número de amostras; $z(x_i)$ é o valor observado; $z^*(x_i)$ é o valor estimado.

A variância do erro padronizado expressa a razão entre a variância experimental e teórica, sendo que seu valor deve ser próximo de um (CASTRIGNANÒ, 2011) e deve estar dentro de um intervalo de tolerância (IT) (CHILÈS; DELFINE, 1999), conforme Equação 9.

$$IT = 1 \pm 3 \sqrt{\frac{2}{N}} \quad (9)$$

Onde: N é o número de amostras.

Por fim, realizou-se a krigagem ordinária e, conseqüentemente, a confecção dos mapas finais de produtividade para os anos de 2012, 2013, 2014 e 2016.

3.3.3 Amostras Virtuais

As amostras virtuais foram inseridas na malha amostral dos inventários florestais contínuos nos anos de 2012, 2013, 2015 e 2016, considerando apenas as parcelas permanentes (32 parcelas).

O primeiro passo consistiu na seleção aleatória de um conjunto de amostras reais para ser utilizado para validação externa. Selecionou-se 10 parcelas, o que representa, aproximadamente, 1/3 do total das parcelas permanentes. A seleção aleatória foi realizada com a extensão Hawth's Tools (BEYER, 2004) no ArcGIS 10.1.

Em seguida, elaborou-se polígonos de Thiessen nas 22 parcelas permanentes restantes, também chamadas de amostras reais (2/3 do total), de modo a obter a área de influência de cada amostra real. Após esse passo, realizou-se a inserção aleatória e irregular de 47 amostras virtuais que somadas com as amostras permanentes restantes, totalizaram 69 amostras. Fez-se a sobreposição das 69 amostras aos polígonos de Thiessen para extração dos valores dos parâmetros de volume, seguido da união das amostras reais e virtuais em um único arquivo.

A definição da quantidade de amostras virtuais inseridas baseou-se no número de amostras reais disponíveis, de modo que foi estabelecido um número viável de amostras virtuais que não mascarasse o conjunto de dados reais, ou seja, foram estipuladas 2 amostras virtuais para cada amostra real, aproximadamente.

Com o propósito de validar a inserção das amostras virtuais, aplicou-se a krigagem ordinária para obtenção das espacializações. Com isso, as amostras selecionadas inicialmente para a validação externa (10 amostras) foram sobrepostas à espacialização destes dados e seus valores foram comparados com os valores estimados pela krigagem ordinária. Posteriormente, gerou-se os mapas de produtividade considerando a inserção das amostras virtuais para os anos de 2012, 2013, 2015 e 2016.

A validação externa compreendeu o cálculo do erro médio (EM) (Equação 7).

No inventário florestal pré-corte não foram inseridas amostras virtuais, já que se trata do último inventário antes da colheita das árvores. Sendo assim, o planejamento dessa malha deve ocorrer em momento anterior, ou seja, as parcelas

virtuais foram adicionadas à malha amostral do último inventário contínuo, ocorrido em 2016. Desta forma foi possível verificar se as amostras virtuais poderiam substituir as parcelas temporárias estabelecidas no IPC tradicional.

3.3.4 Comparação entre os métodos

Foram realizadas as seguintes análises entre os métodos:

- a) comparação entre os resultados obtidos pelo variograma e validação cruzada dos valores de volume, considerando a amostragem original e a amostragem com a inserção de amostras virtuais;
- b) comparação do resultado do método de amostras virtuais com dados de validação externa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Inventário florestal tradicional

A estatística descritiva dos dados de volumes ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) para os anos de 2012, 2013, 2015 e 2016 são apresentados na Tabela 1 e 2.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos valores de volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) para os anos de 2012, 2013, 2015 e 2016, referentes aos Inventários Florestais Contínuos (IFC)

IFC	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Variância	CV (%)
2012	35,07	90,74	64,59	13,47	181,57	20,86
2013	115,31	216,20	156,54	23,44	549,21	14,97
2015	178,76	290,03	231,75	32,33	1045,06	13,95
2016	232,86	389,62	303,74	37,77	1426,82	12,44

CV: Coeficiente de variação.

Tabela 2 - Estatística descritiva dos valores de volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) para o ano de 2016, referente ao Inventário Florestal Pré-corte (IPC)

IPC	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Variância	CV (%)
2016	218,71	405,60	315,07	41,03	1683,18	13,06

CV: Coeficiente de variação.

Pelas análises estatísticas foi demonstrado que os valores de volumes estimados pelos inventários apresentaram média variabilidade, verificado pelo coeficiente de variação (CV) dos dados que ficou abaixo dos 30% (GARCIA, 1989). Tal fato pode ser explicado pela característica das espécies plantadas, já que se tratam de plantios clonais, esperando-se que apresentem comportamento uniforme de crescimento (FERRARI; GROSSI; WENDDLING, 2004).

Guedes et al. (2015) encontraram valores semelhantes de CV para dados de volumes, que variaram de 21,44% a 14,20%, também constatando uma considerável homogeneidade dentro dos povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. avaliado, com idade entre 2,7 e 6,8 anos. Além disso, assim como no estudo do mesmo autor, os valores de CV demonstraram uma redução ao longo do tempo, demonstrando diminuição da variabilidade do volume e tendência a estabilização do crescimento das árvores.

4.2 Análise geoestatística dos dados originais

Pela análise variográfica detectou-se que a variável volume apresentou certa estrutura espacial, cujos variogramas são apresentados nas Figura 7, 8, 9 e 10. Mello et al. (2006) ressalta que quando detectada a continuidade espacial em variáveis dendrométricas, a estrutura da dependência espacial deve ser estudada e levada em consideração para que as estimativas que envolvem essas características sejam estimadas com maior precisão.

Figura 7 - Variograma da variável volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2012

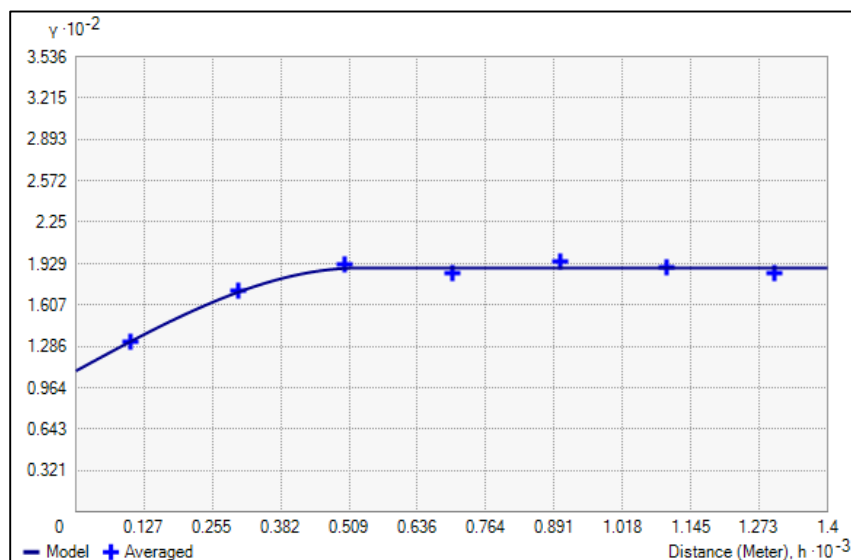


Figura 8 - Variograma da variável volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2013

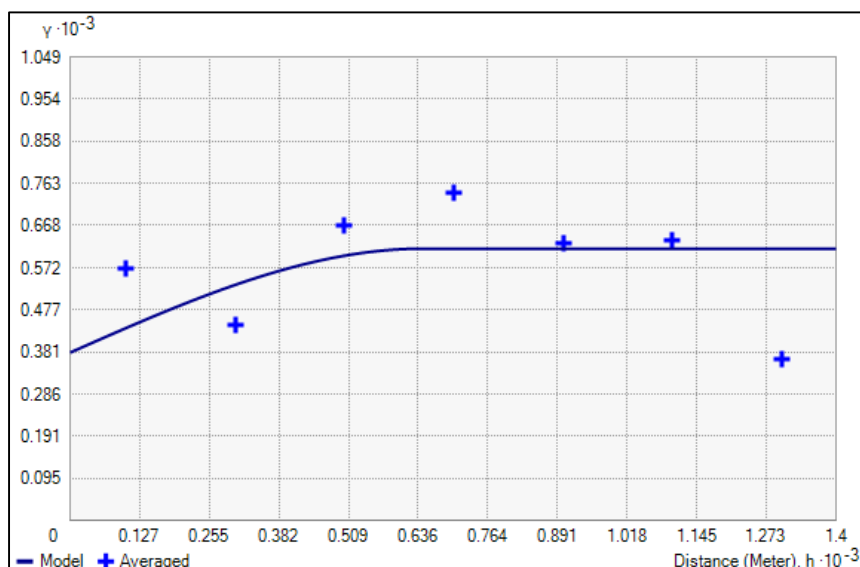


Figura 9 - Variograma da variável volume ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2015

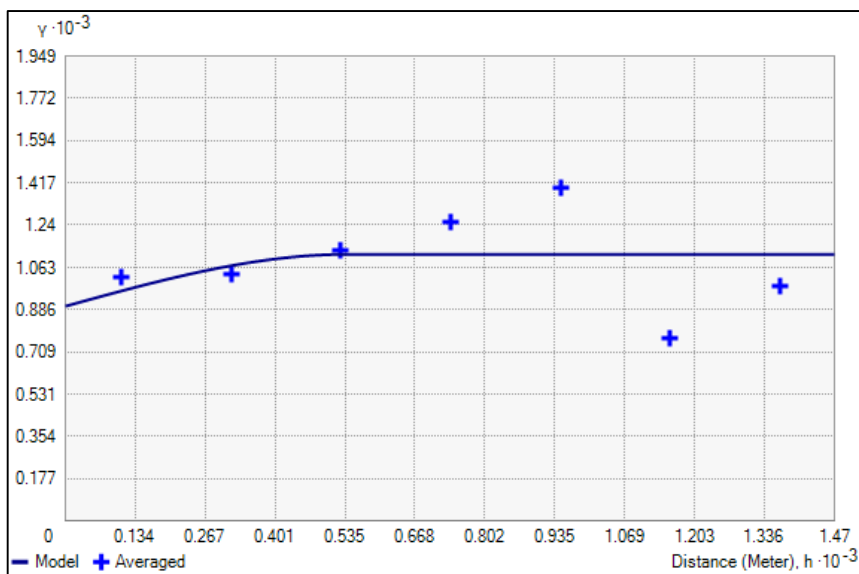
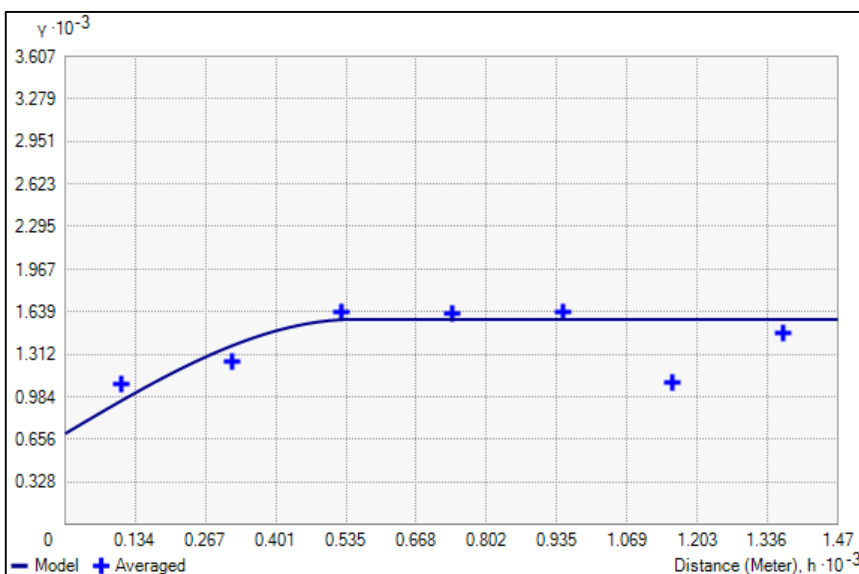


Figura 10 - Variograma da variável volume ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2016



Os variogramas experimentais correspondentes aos IFC de 2012, 2013 e 2016 apresentaram melhor ajuste com o modelo teórico esférico, assim como Reis et al. (2016), trabalhando com dados de área basal e Leal, Matricardi e Miguel (2014) trabalhando com dados de volume (m^3/ha), determinaram que o modelo esférico foi o que apresentou o melhor ajuste para povoamentos de eucalipto amostrados em uma intensidade de 1 parcela amostral para cada 5 ha. Diferentemente do que foi constatado, Mello et al. (2009), Oda-Souza (2010) e Guedes et al. (2015) verificaram

em seus estudos que o modelo teórico que apresentou o melhor desempenho foi o exponencial para algumas variáveis dendrométricas avaliadas, incluindo a variável volume. Tal fato demonstra que além da espécie e da intensidade amostral, outros fatores podem influenciar no comportamento da estrutura espacial (GUEDES et al., 2015), bem como o ajuste do variograma.

Para o ano de 2015 o variograma apresentou uma acentuada descontinuidade na origem, ocasionando uma atribuição de mesmos pesos a todos os pontos da amostragem, caracterizando aleatoriedade e ausência de dependência espacial (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Tal modelo é identificado como efeito pepita puro e refere-se à variação não explicada pela componente espacial, podendo estar relacionada à problemas de amostragem em distâncias menores do que a amostrada, o que significa que pela amostragem realizada não foi possível detectar dependência espacial. Portanto, a análise variográfica não se aplicou e não foi possível usar métodos geoestatísticos de interpolação (YAMAMOTO; LANDIM, 2013), impossibilitando a geração do mapa de produtividade para o ano de 2015.

Comportamento semelhante foi verificado por Mello et al. (2009), que trabalhando com dados de volume de eucalipto com idades de 3 e 4 anos, com intensidade amostral de 1 parcela amostral a cada 10 ha, não detectou dependência espacial e sugeriu que em tal condição o processamento do inventário florestal deve ser feito por meio da estatística clássica.

Os variogramas (Figuras 7, 8, 9 e 10) são do tipo com patamar, de modo que a variância máxima oscila em torno de um valor com o aumento da distância e esse valor é a soma do efeito pepita mais a componente estrutural (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Os valores dos parâmetros do modelo esférico ajustado ao variograma experimental para a característica volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$) nos anos 2012, 2013 e 2016, referentes aos inventário florestais contínuos, encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros dos variogramas da característica volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$), referentes aos Inventários Florestais Contínuos nos anos 2012, 2013 e 2016

Componentes	2012	2013	2016
Efeito Pepita	109,46	380,00	700,00
Alcance	527,84	643,50	550,00
Componente estrutural	79,99	235,14	880,00

Os valores de alcance foram de, aproximadamente, 528 m (em 2012), 644 m (em 2013) e 550 m (em 2016), o que significa que a partir desses valores as amostras não possuem correlação espacial. O alcance do modelo representa a distância máxima cujos volumes apresentam-se espacialmente correlacionados. Observa-se que o maior alcance ocorreu em 2013, demonstrando que nesse ano a floresta pode ter apresentado maior homogeneidade, já que pontos distantes se apresentaram correlacionados.

O desempenho do ajuste foi constatado pela validação cruzada, por meio da determinação do erro médio e da variância do erro padronizado (Tabela 4), além da correlação entre os valores reais e estimados. O Índice de Dependência Espacial (IDE) para o ano de 2012 foi de 42,2%, para 2013 foi de 38,2% e para 2016, 55,7%, indicando moderada dependência espacial para os anos de 2012, 2013 e 2016, segundo classificação de Zimback (2001).

Tabela 4 - Estatísticas de validação cruzada para valores de volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) dos Inventários Florestais Contínuos (IFC)

IFC	Correlação	EM ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$)	VEP	IT
2012	0,16	-0,17	0,95	0,25 – 1,75
2013	0,20	0,37	0,92	0,25 – 1,75
2016	0,09	0,29	0,94	0,25 – 1,75

EM: erro médio; VEP: variância do erro padronizado; IT: intervalo de tolerância.

As estatísticas da validação cruzada demonstraram que os ajustes dos variogramas foram adequados para esta situação devido aos baixos valores de erro médio, que devem ser próximos de zero segundo Castrignanò (2011). Quanto a variância do erro padronizado, os valores encontraram-se dentro do intervalo de tolerância (CHILÈS; DELFINER, 1999).

É possível observar baixos valores de correlação entre os dados observados e estimados, que pode ter ocorrido pelo pequeno número de parcelas temporárias disponíveis e pela disposição destas parcelas na malha amostral estudada. Em alguns talhões há apenas uma ou duas parcelas estabelecidas, o que pode prejudicar a análise geoestatística. Além disso, foram plantadas duas espécies diferentes na área, o que pode ter influenciado o comportamento dos valores estimados.

Com a detecção da dependência espacial e posterior escolha do modelo mais adequado, conseguiu-se gerar mapas correspondentes às características de interesse sem tendência, ou seja, mapas mais precisos com relação ao detalhamento espacial da variável (ASSIS et al., 2009). A espacialização dos volumes (m^3/ha) interpolados por krigagem ordinária para os anos de 2012, 2013 e 2016 são apresentados na Figura 11, 12 e 13.

Figura 11 - Mapa de produtividade do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2012 obtido por krigagem ordinária

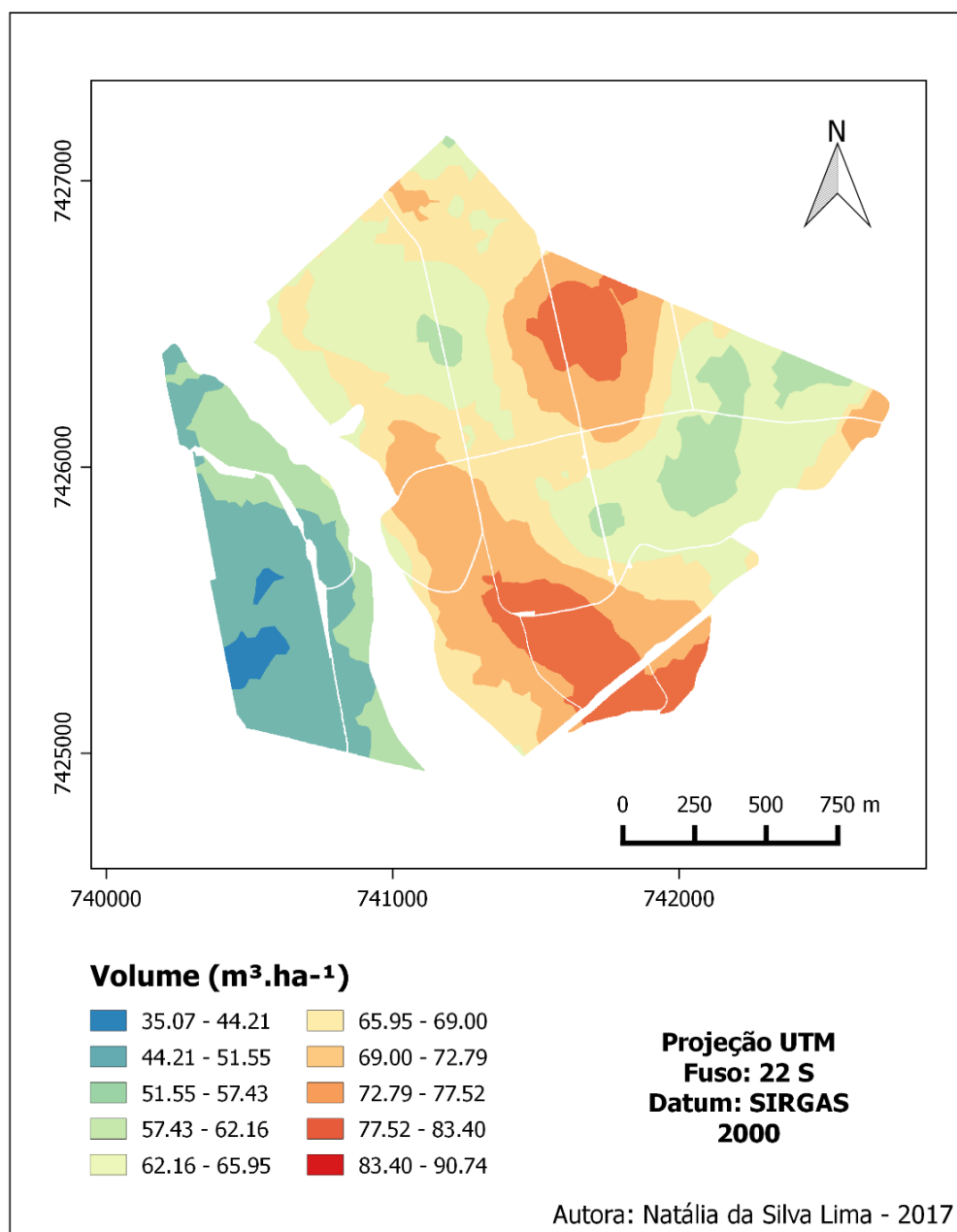


Figura 12 - Mapa de produtividade do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2013 obtido por krigagem ordinária

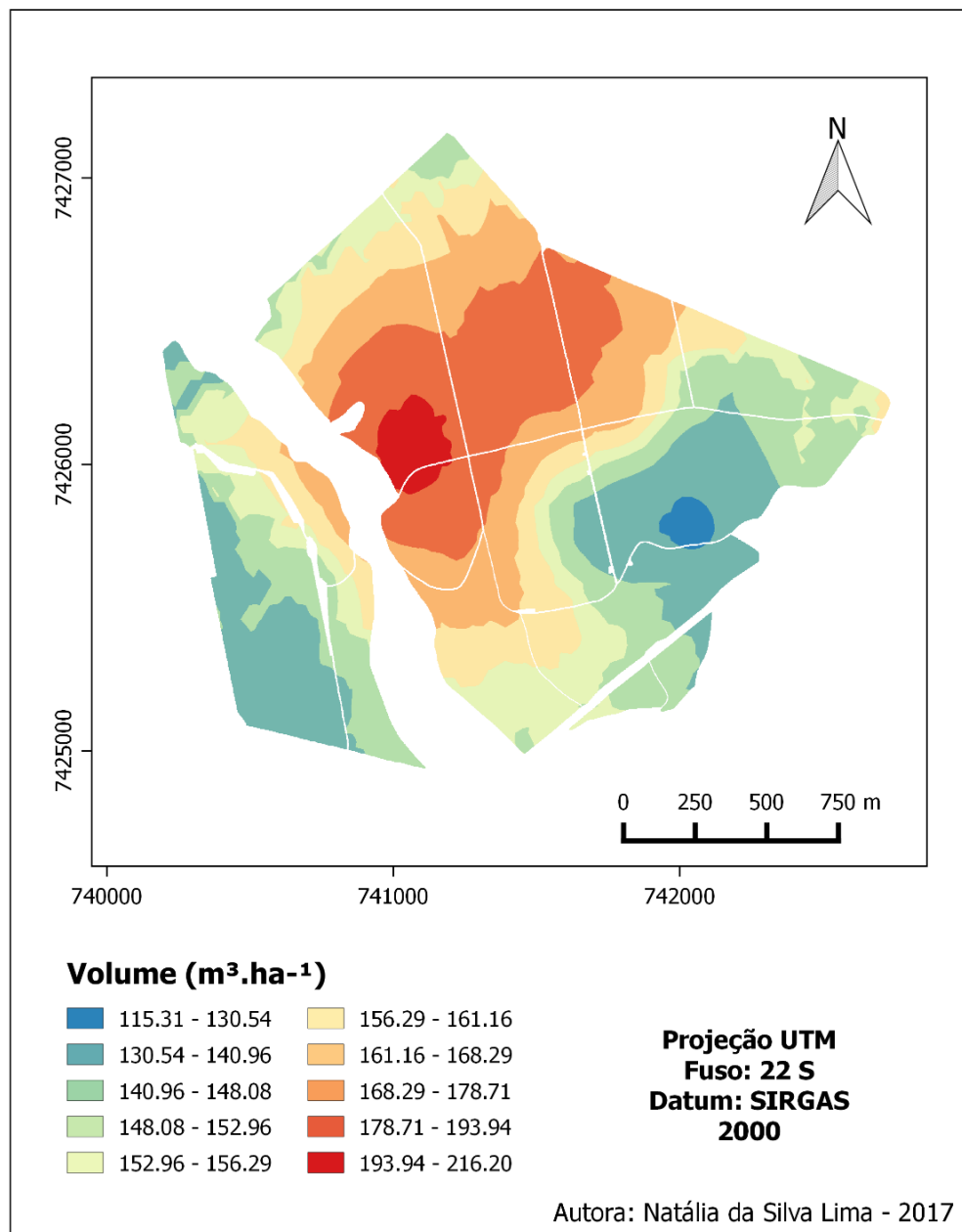
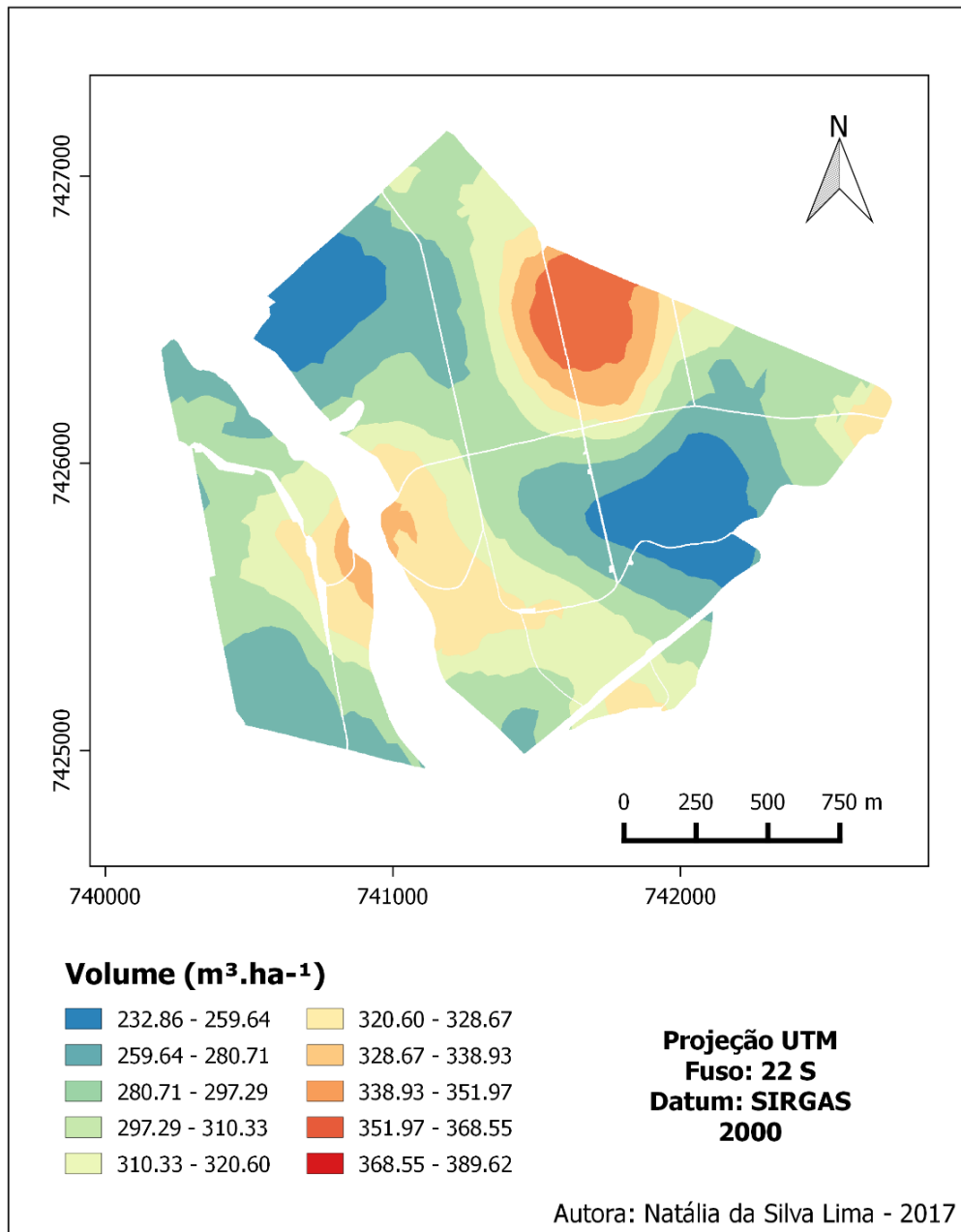


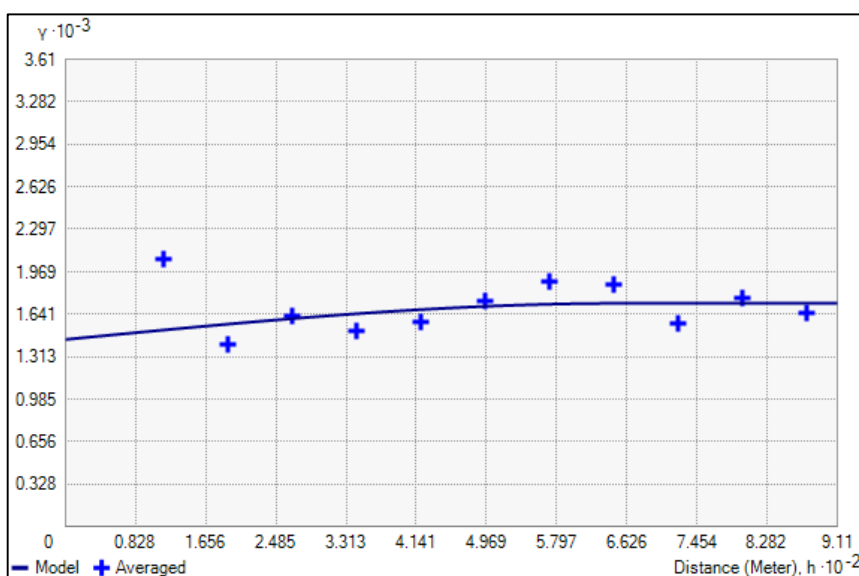
Figura 13 - Mapa de produtividade do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2016 obtido por krigagem ordinária



Comparando-se as espacializações da produtividade (m³.ha⁻¹), é possível identificar áreas de maior e menor potencial produtivo, mesmo em se tratando de um plantio clonal que apresenta certa homogeneidade aparente. Diversos fatores são responsáveis por estas variações como o tipo de solo, topografia, tratamentos silviculturais, entre outros (MELLO, 2004). Observou-se que na parte esquerda da área de estudo encontrou-se os menores valores de volume por hectare.

Para o inventário florestal pré-corte, ocorrido em 26 de julho de 2016, os valores de volumes não tiveram nenhum ajuste variográfico, demonstrando que mesmo aumentando a intensidade amostral em relação ao inventário contínuo, cerca de 1 parcela amostral a cada 3 ha, não houve dependência espacial, conforme identificado no variograma (Figura 14).

Figura 14 - Variograma da variável volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) do Inventário Florestal Pré-corte (IPC) de 2016



A ocorrência do efeito pepita puro pode ter decorrido por número insuficiente de amostras ou por amostragem em local inadequado, não permitindo uma estrutura de continuidade espacial dos dados. Outra possibilidade seria a baixa variabilidade dos dados de volumes, comportamento típico de floresta plantada clonal homogênea.

Conforme analisado no variograma da Figura 14, foram detectados alguns valores de variância (eixo y do gráfico) menores em distâncias (eixo x do gráfico) maiores, prejudicando a dependência espacial, ou seja, pontos distantes apresentaram valores parecidos quando a tendência seria de que pontos próximos geograficamente apresentassem comportamentos parecidos entre si quando comparados à pontos distantes (RIBEIRO JÚNIOR, 1995).

Sendo assim, não foi possível a geração do mapa de produtividade de volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) para o IPC utilizando a malha amostral da empresa de 32 parcelas permanentes mais 66 parcelas temporárias.

4.3 Análise geoestatística das amostras virtuais

Com a inserção das amostras virtuais na malha amostral dos IFC nos anos 2012, 2013, 2015 e 2016, a escolha do modelo teórico mais apropriado para o ajuste do variograma experimental foi o modelo gaussiano. Os variogramas ajustados são apresentados nas Figuras 15, 16, 17 e 18.

Figura 15 - Variograma da variável volume ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2012 com a inserção de amostras virtuais

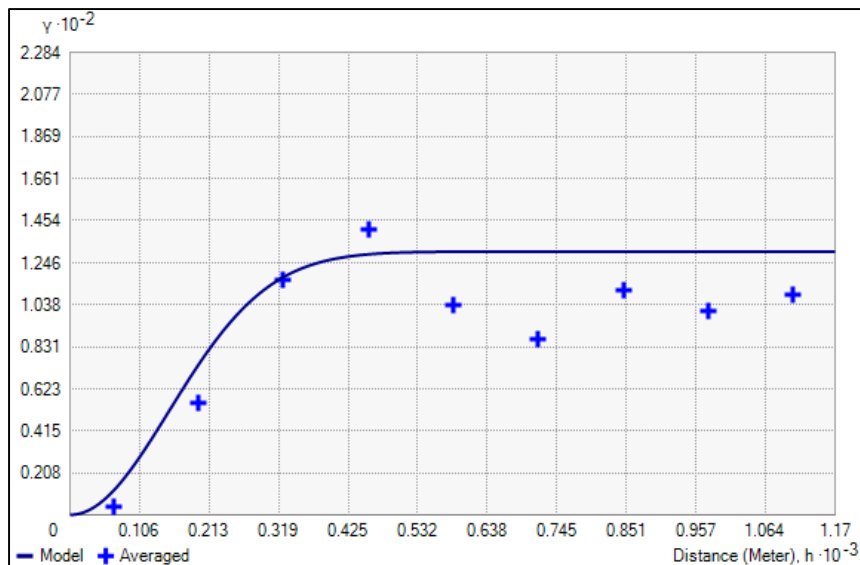


Figura 16 - Variograma da variável volume ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2013 com a inserção de amostras virtuais

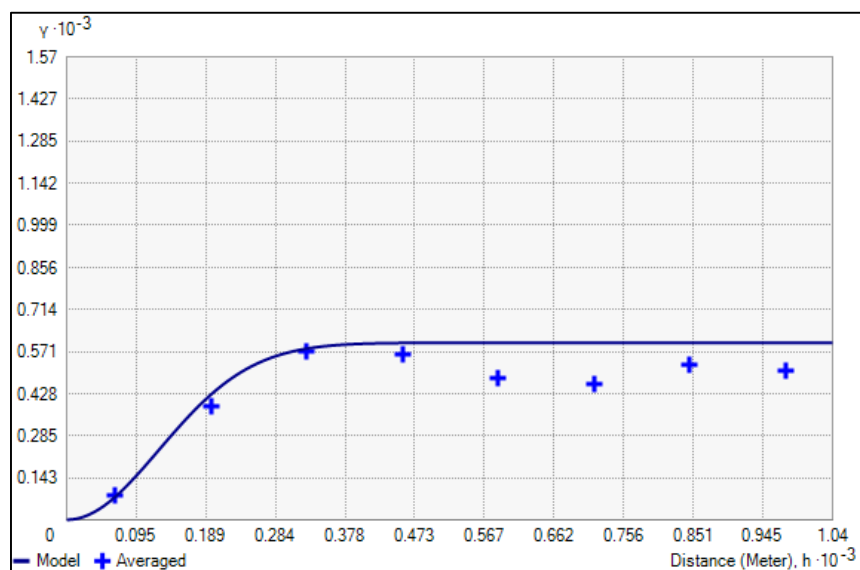


Figura 17 - Variograma da variável volume ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2015 com a inserção de amostras virtuais

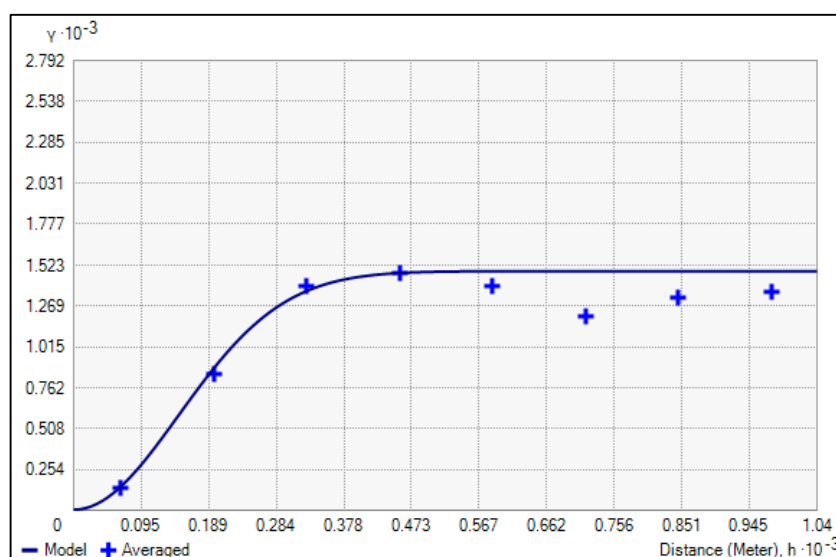
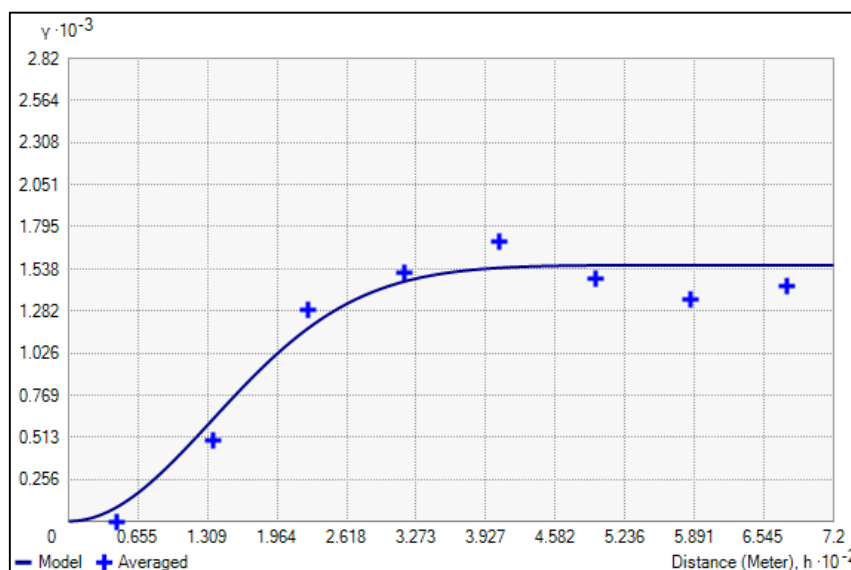


Figura 18 - Variograma da variável volume ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) do Inventário Florestal Contínuo (IFC) de 2016 com a inserção de amostras virtuais



O modelo teórico gaussiano também foi utilizado por Lundgren, Silva e Ferreira (2015) ao trabalhar com dados de volumes individuais de eucalipto com 6 anos de idade, adotando-se o método de amostragem aleatória. Pelissari et al. (2017) também utilizou o mesmo modelo ao ajustar dados experimentais da variável área basal de espécies arbóreas de uma Floresta Tropical Mista.

Os resultados da análise variográfica para os valores de volume ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros dos variogramas da característica volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$), referentes aos Inventários Florestais Contínuos nos anos 2012, 2013, 2015 e 2016 com a inserção de amostras virtuais

Componentes	2012	2013	2015	2016
Efeito Pepita	0,10	1,00	5,00	1,56
Alcance	370,00	306,00	358,00	330,00
Componente estrutural	130,00	600,00	1480,00	1560,00

O maior alcance foi constatado em 2012 e o ano em que se teve a maior variância dos dados foi em 2016, observado pela somatória do efeito pepita mais a componente estrutural.

Para a validação do modelo gaussiano foram usadas as estatísticas de validação cruzada que são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Estatísticas de validação cruzada para valores de volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) dos Inventários Florestais Contínuos (IFC) com a inserção de amostras virtuais

IFC	Correlação	EM ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$)	VEP	IT
2012	0,83	0,38	1,32	0,49 – 1,51
2013	0,72	0,09	3,61	0,49 – 1,51
2015	0,76	0,55	4,54	0,49 – 1,51
2016	0,73	0,93	4,71	0,49 – 1,51

EM: erro médio; VEP: variância do erro padronizado; IT: intervalo de tolerância.

Nota-se que os valores do erro médio variaram entre 0,09 e 0,93, apresentando seu maior valor em 2016. A variância do erro padronizado ficou dentro do intervalo de tolerância apenas no ano de 2012, demonstrando que a variância do ajuste do modelo teórico foi próxima do modelo experimental, visto que o VEP se refere à razão entre a variância dos dados e a variância dos dados ajustados, conforme Castrignanò (2011). Outro aspecto é que o modelo gaussiano é extremamente sensível nas estimativas e o número reduzido de amostras pode ter favorecido valores de variância fora do intervalo de tolerância.

A correlação entre os valores observados e estimados variou entre 0,83 e 0,72, demonstrando alto grau de correlação, de modo que quanto mais perto de 1, maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis (STANTON, 2001).

Os valores de IDE foram de 99,9% em 2012, 99,8% em 2013, 99,7% em 2015, e 99,9% em 2016, indicando forte dependência espacial obtida com a inserção das amostras virtuais em todos os anos.

Como a espacialização dos dados com a inserção das amostras virtuais não é o objetivo da metodologia, não foram apresentados no trabalho os mapas de produtividade gerados pela krigagem, já que as amostras são adicionadas à amostragem original para o planejamento da próxima malha, para então ir a campo, coletar os dados e assim gerar novos mapas pela análise geoestatística posterior. A krigagem é importante para a validação externa, na qual os valores das amostras originais que foram selecionadas (10 amostras) são comparados com os valores estimados (com a inserção das amostras) para o cálculo do erro médio.

A validação da inserção das amostras virtuais se deu através da validação externa que incluiu o cálculo do erro médio (Tabela 7).

Tabela 7 - Estatísticas de validação externa para valores de volume ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) dos Inventários Florestais Contínuos (IFC) com a inserção de amostras virtuais

IFC	EM ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$)
2012	-3,1
2013	-4,9
2015	-5,4
2016	-8,1
Média	-5,375

EM: erro médio.

Os valores de erro médio da validação externa variaram entre -3,1 e -8,1, com média de $-5,357 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, demonstrando por meio do valor negativo que a inserção das amostras ocasionou a subestimação dos valores de volume por hectare. Comparando-se com o inventário real este erro representa um erro amostral de 6,83%, em volume, considerando a área total na rotação estudada (287,66 ha).

4.4 Comparação entre os métodos

Comparando-se os métodos foi possível observar através da validação cruzada dos dados originais que o modelo esférico foi o mais apropriado para o ajuste dos

dados experimentais, diferentemente com a inserção de amostras virtuais, cujo modelo mais apropriado foi o Gaussiano.

Na amostragem original os valores do EM aumentaram com o decorrer dos anos e a correlação entre os dados amostrados e estimados apresentou baixos valores, demonstrando baixa correlação. Ou seja, foi possível ajustar o variograma e gerar os mapas de produtividade, porém a estimativa não foi eficiente.

De maneira geral, com a inserção das amostras virtuais, o EM ficou perto de zero e a correlação foi alta, demonstrando que a partir desta amostragem foi possível ajustar o variograma e obter estimativas favoráveis. Além disso, melhorou o índice de dependência espacial dos dados. Vale ressaltar que com os dados originais não foi possível a análise por meio da geoestatística no ano de 2015, o que foi possível com a inserção das amostras, aumentando-se o número de parcelas disponíveis para o ajuste variográfico.

Para comprovação da eficácia da metodologia de inserção de amostras virtuais, seria necessário a realização de uma validação externa também com a malha amostral dos dados originais. Entretanto, ao retirar 10 parcelas das 32 parcelas permanentes, o variograma não apresentou dependência espacial (efeito pepita puro). Como alternativa, a validação externa deu-se por meio do cálculo da média do erro médio (EM), que foi de $-5,375 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, demonstrando erro não significativo ao acrescentar 47 amostras virtuais às 22 amostras reais já existentes.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) a variável volume por hectare apresenta uma estrutura de dependência espacial para o conjunto de dados analisados;
- b) com base na correlação e erro médio, a inserção de amostras virtuais para o planejamento da próxima malha amostral obteve uma melhora quando comparada à malha amostral original;
- c) as amostras virtuais podem substituir as parcelas temporárias e otimizar a representação da população no inventário florestal pré-corte;
- d) a amostragem original apresentou poucas parcelas por talhão e espécies diferentes em talhões vizinhos, impedindo a análise de validação externa para os dados originais;
- e) a componente espacial deve ser levada em consideração nas análises deste inventário florestal, a fim de proporcionar resultados que podem auxiliar o planejamento e manejo florestal;
- f) a técnica de inserção de amostras virtuais pode ser utilizada, pois daria uma melhor detecção dos erros inerentes na amostragem para o planejamento da próxima malha para posteriores análises geoestatísticas, em plantios equiâneos.

REFERÊNCIAS

ALÓ, L. L. **Uso de componentes de imagens de satélite na modelagem espacial do volume em povoamentos de *Eucalyptus* sp.** 2016. 112 f. Dissertação (Planejamento e Uso e Recursos Renováveis) - Universidade Federal da São Carlos, São Carlos, 2016.

ALVARENGA, L. H. V. **Imagens de alta resolução e geoestatística na estratificação da fisionomia Cerrado para inventários florestais.** 2012. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística.** São Leopoldo, RS: Unisinos, 2005. 165 p.

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

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

BERTOLUCCI, F.; REZENDE, G.; PENCHEL, R. Produção e utilização de híbridos de eucalipto. **Silvicultura**, v. 51, p. 12-16, 1995.

BEYER, H. L. **Hawth's Analysis Tools for ArcGIS.** 2004. Disponível em: <<http://www.spatial ecology.com/htools>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

BOLFARINE, H.; BUSSAB, W. O. **Elementos de amostragem.** São Paulo: Edgard Blücher, 2007. 274 p.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment.** Oxford, Clarendon Press, 1987. 193p.

CAMPOS J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e repostas.** 2. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 470p.

CASTANHO FILHO, E. P.; OLIVETTE, M. P. A. **São Paulo: do desmatamento às novas fronteiras 1980-2015.** São Paulo: Autografia, 2017, 574 p.

CASTRIGNANÒ, A. **Introduction to spatial data processing.** 1. ed. Roma: Aracne, 2011. 108 p.

CERRI, C. E. P. et al. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. **Geoderma**, S.i., v. 2004, n. 123, p.51-68, 08 abr. 2004.

CHILÈS, J.P., DELFINER, P. **Geostatistics: Modeling spatial uncertainty**. New York: Wiley. 1999. 695 pp.

COCHRAN, W. G. **Sampling techniques**. New York: J. Wiley, 1977. 555 p.
DINIZ, F. S.; **Métodos de amostragem e geoestatística aplicados ao inventário florestal**. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

CUNHA, A. R., MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p. 1-11, jan-mar 2009.

DOSSA, D. et al. **Produção e rentabilidade do Eucaliptos em empresas florestais**. Colombo: Comunicado Técnico Embrapa, n. 83, 2002.

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

ELDRIDGE, K. et al. **Eucalypt domestication and breeding**. Oxford: Clarendon, 1993. 228 p.

FARIAS, P. R. S. et al. **Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade em pomares cítricos usando geoestatística**. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010029452003000200013> . Acesso em: 25 ago. 2017.

FERRARI, M. P.; GROSSI, F.; WENDLING, I. **Propagação vegetativa de espécies florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 22 p. 2004.

FLORES, T. B. et al. Eucalyptus no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação. **IPEF**, Piracicaba, p. 448. 2016.

GARCIA, C. H.; Tabelas para classificação do coeficiente de variação. IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais). Circular Técnica, n 171, 1989.

GONÇALVES, A. P. S.; FERREIRA, J. R.; RODRIGUES, A. M. **Metodologias de Sistemas de Informação Geográfica em sistemas de produção florestal: Uma aplicação geoestatística**. 2015. 96 p. Dissertação. (Mestrado em Gestão do território, área de especialização em Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica) – Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade de Nova Lisboa, Lisboa, Portugal, 2015.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**. n. 301, p. 6–27. 2013.

GUEDES, I. C. L. et al. Técnicas geoestatísticas e interpoladores espaciais na estratificação de povoamentos de Eucalyptus sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 541-550, jul./set. 2012.

GUEDES, I. C. L. **Uso de métodos da estatística espacial em biometria e inventário florestal**. 2014. 138f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

GUEDES, I. C. L. et al. Continuidade espacial de características dendrométricas em povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. avaliada ao longo do tempo. **CERNE**, Lavras, v. 21, n. 4, p. 527-534, dez. 2015.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. UFU/ FAMAT. Núcleo de estudos Estatísticos e biométricos. 2004. 48 p. Disponível em: <www.famat.ufu.br/prof/ednaldo/geoest/apgeo1.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2016.

HAKAMADA, R. E. **Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultura em povoamentos clonais de Eucalyptus**. 2012. 114p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

HUSCH, B.; BEERS, T.; KERSHAW JR, J. A. **Forest mensuration**. New Jersey: J. Wiley, 2003. 443p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBA). **Relatório Iba 2015**. São Paulo, 2015. 79 p. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf>. Acesso em: 10 set. 2016.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBA). **Relatório Iba 2017**. São Paulo, 2017. 79 p. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 13 set. 2017.

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

ITATINGA (Município). **Plano Municipal de Gestão Integrada dos resíduos sólidos**. Itatinga, 2014. 67 p.

JORGE, L.A.B. **Dendrometria**. Botucatu: Departamento de Ciência Florestal, FCA – UNESP, 2013.

JOURNEL, A. G. **Fundamentals of geostatistics in five lessons**. Washington: American geophysical union, 1989. 134p.

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

KANEGAE JÚNIOR, H.; **Avaliação de sistemas de inventários sucessivos e dois interpoladores espaciais como instrumento de estratificação de povoamentos clonais de Eucalyptus sp.** 2004. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

LANDIM, P. M. B. Mapa Geológico do estado de São Paulo. **Carta topográfica:** folha Itatinga/Cornélio Procópio. Rio Claro, UNESP. Escala 1:250000. São Paulo, 1984.

LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas.** Texto Didático 02. Departamento de Geologia Aplicada – IGCE, 2000.

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

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

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 26, n.3, p.321-328, 2002.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA J. A. A.; FERREIRA R. L. C. Estimação de volume de madeira de eucalipto por cokrigagem, krigagem e regressão. **Cerne**. Lavras-MG, v. 21, n. 3, p. 243-250, 2015.

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

MEDEIROS, M. C. S. et al. **O uso de técnicas de geoprocessamento e geoestatística como ferramenta para gestão municipal.** Geoambiente On-line, [S.I.], n. 18, p. 01-24 pág., ago. 2012. ISSN 1679-9860. Disponível em: <<http://revistas.jatai.ufg.br/geoambiente/article/view/26034>>. Acesso em: 28 jul. 2016.

MELLO, C. R. et al. **Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas.** 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v27n5/v27n5a17.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2016.

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

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

MELLO, J. M. et al. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 251-260, mai/ago. 2006.

- MELLO, J. M. et al. Continuidade Espacial para características dendrométricas (número de fustes e volume) em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 33, p. 185-194, 2009.
- MINGOTI, S. A.; FIDELIS, M. T. Aplicando a geoestatística no controle estatístico de processos. **Produto & Produção**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 55-70, 2001.
- MORAES, D. A. C.; SARTORI, A. A. C; ZIMBACK, C. R. L. Amostras virtuais no planejamento amostral de atributos do solo de uma bacia hidrográfica. In: II SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 4, 2015, Botucatu. **Anais....** Botucatu: Fepaf, 2015. p. 1 - 5.
- ODA-SOUZA, M.; BATISTA, J. L. F.; RIBEIRO JUNIOR, P. J.; RODRIGUES, R. R. Comparação das estruturas de continuidade espacial em quatro formações florestais do estado de São Paulo. **Revista Floresta**, v. 40, n.3, p. 515-522, 2010.
- OLIVER, M. A., WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. **International Journal of Geographical Information System**, v. 4, n. 3, p. 313-332, 1990.
- PAIVINEN, R. et al. **IUFRO Internacional guidelines for forest monitoring**. Vienna: International Union of Forest Research, 1994. 102 p. (IUFRO world series report, 5.)
- PALUDZYSZYN FILHO, E; SANTOS, P. E. T. **Escolha de cultivares de eucaliptos em função do ambiente e do uso**. Colombo: Comunicado Técnico Embrapa, n. 316, 2013.
- PELLISSARI, A. L. et al. Geostatistical modeling applied to spatiotemporal dynamics of successional tree species groups in a natural Mixed Tropical Forest. **Ecological Indicators**. v. 78, p. 1-8, 2017.
- RESENDE, M. D. V. et al. Genomic selection for growth and wood quality in *Eucalyptus*: capturing the missing heritability and accelerating breeding for complex traits in forest trees. **New Phytologist**. n. 194, p. 116–128. 2012.
- REIS, A. A. et al. Estratificação de um povoamento de eucalipto por interpoladores geoestatísticos e sensoriamento remoto. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 51, n. 10, p. 1751-1761, Out. 2016.
- RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- RUFINO, T. M. C. et al. Uso da Geoestatística no estudo da relação entre variáveis dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e atributos do solo. **Ambiência**, Guarapuava-PR, v. 2, n. 3, p. 83-93, edição especial 1, 2006.

SANTOS, G. P.; PIRES, E. M.; PEREIRA, J. M. M. **Plantio de eucalipto em propriedades rurais**. Viçosa: EPAMIG. Boletim Técnico, n. 89, 2008.

SCOLFORO, J. R.S.; MELLO, J.M. **Inventário Florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 344p.

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

SÉ, D. C. et al. Use of the correlation coefficient between plots in order to improve the accuracy of forest inventories. **Cerne**, Lavras-MG, v.19, n.4, p. 575-580. Oct./Dec. 2013.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. Viçosa: Ed. UFV, 2006. 276 p.

STANTON, J. M. Galton, Pearson, and the peas: A brief history of linear regression for statistics instructors. **Journal of Statistical Education**, v. 9, n. 3, 2001.

STAPE, J. L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**. n. 259, p. 1686-1694. 2010.

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

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciências do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2000.

WANDERLEY, H. S.; AMORIM, R. F. C.; CARVALHO, F. O. Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas. **Revista brasileira de meteorologia**. São Paulo, SP, v. 27, n. 3, p. 347-354, 2012.

WILCKEN, C. F. et al. **Guia prático de manejo de plantações de eucalipto**. Botucatu: FEPAF, 25 p. 2008.

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

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

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e Fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.