

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

GUILHERME FLECK

**INVENTÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DA ATIVIDADE DE  
DESBASTE MECÂNICO EM PLANTIO DE *Pinus taeda* L. POR MEIO DE LINHA  
INTERCEPTADORA ASSOCIADO COM TÉCNICAS DE PREDIÇÃO ESPACIAL**

CURITIBA

2017

GUILHERME FLECK

**INVENTÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DA ATIVIDADE DE  
DESBASTE MECÂNICA EM PLANTIO DE *Pinus taeda* L. POR MEIO DE LINHA  
INTERCEPTADORA ASSOCIADO COM TÉCNICAS DE PREDIÇÃO ESPACIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito para conclusão da disciplina ENGF006 e requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Orientadora: Prof(a). Dra. Ana Paula Dalla Corte.

**CURITIBA**

**2017**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Curso de Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Aos meus pais e aos demais membros de minha família pelo imenso apoio.

A empresa Juliana Florestal Ltda, pela disponibilização de recursos para a coleta dos dados utilizados neste trabalho e pela concessão de informações aqui utilizadas.

Aos meus colegas e amigos que me acompanharam nos mais diversos momentos de tristeza e felicidade que marcaram minha graduação, oferecendo sempre apoio e companheirismo.

A minha orientadora, Professora Dra. Ana Paula Dalla Corte que sempre esteve presente, me auxiliando e me guiando na elaboração deste trabalho.

## RESUMO

A quantificação dos resíduos sólidos oriundos da colheita florestal tem um papel importante no planejamento econômico e estratégico de empresas florestais. Dentre os métodos de quantificação o método da Linha Interceptadora (LIS) se destaca por ser menos onerosa em recursos financeiros, humanos e temporais, além de ser de fácil execução. As técnicas de predição aliadas aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permitem o conhecimento da distribuição de um elemento sobre a superfície de uma área, assim como sua quantificação. Portanto, o objetivo deste trabalho foi quantificar o volume de resíduos sólidos oriundos da atividade de colheita florestal em uma área com plantio comercial de *Pinus taeda* L. que foi aplicado desbaste mecânico seletivo e sistemático. Para a amostragem foi adotado o método da LIS e para a espacialização dos resultados, testou-se duas técnicas de predição, uma determinística e outra estocástica, respectivamente: Inverso das Distâncias (IDW) e Krigagem Ordinária (KO). Os volumes encontrados foram inferiores ao volume simulado para a área de estudos, sendo que método da LIS obteve o resultado mais próximo. Os erros relativos ocorridos para LIS, IDW e KO foram, respectivamente: 12,96%, 13,65%, 14,94%.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização do município de Santa Cecília – SC.....	25
Figura 2: Área de estudos após a atividade de desbaste.....	26
Figura 3:Esquema da linha interceptadora.....	27
Figura 4:Linha amostral aplicada no campo.....	28
Figura 5:Posições das linhas amostrais dentro da área de estudos. ....	29
Figura 6: Modelo esquemático do semivariograma e seus parâmetros .....	32
Figura 7: Aglomeração de resíduos nos rastros das máquinas.....	38
Figura 8: Histogramas e box-plots para a variável volume.....	39
Figura 9: Histogramas e box-plots para os volumes após transformação logarítmica. .....	41
Figura 10: Semivariograma ajustado.....	42
Figura 11: Mapas gerados através do método Krigagem Ordinária (1) e IDW (2). .....	44
Figura 12: Mapa dos erros padrões obtidos através da Krigagem .....	46
Figura 13: Relação entre mensurados e estimados pelo Inverso das Distâncias e Krigagem Ordinária. ....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficientes ajustados .....	35
Tabela 2: Parâmetros estatísticos dos volumes calculados. ....	39
Tabela 3: Parâmetros encontrados na distribuição normal das variáveis volume. ....	40
Tabela 4: Resultados dos testes de normalidade executados para a variável volume.....	40
Tabela 5: Parâmetros encontrados na distribuição normal das variáveis volume após transformação logarítmica. ....	41
Tabela 6: Resultados dos testes de normalidade executados para as variáveis volume após a transformação logarítmica.....	41
Tabela 7: Parâmetros encontrados no semivariograma ajustado .....	42
Tabela 8: Validação cruzada da Krigagem para o número de peças mensuradas. ....	43
Tabela 9: Classes de número de peças estimados assim como suas respectivas proporções em relação a área ocupada.....	45
Tabela 10: Resultados obtidos através dos três métodos adotados para estimar o volume de resíduos juntamente com o valor estimado através de inventário florestal. ....	47

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	11
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	11
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	11
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	12
<b>3.1 Linha Interceptadora (LIS)</b> .....	12
<b>3.2 Métodos de predição espacial</b> .....	17
3.2.1 Inverso das Distâncias .....	17
3.2.2 Krigagem Ordinária .....	19
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	24
<b>4.1 Descrição da área de estudos</b> .....	24
<b>4.2 Coleta dos dados</b> .....	26
4.2.1 Linha Interceptadora (LIS) .....	26
<b>4.3 Análise exploratória dos dados</b> .....	30
<b>4.4 Predições</b> .....	30
4.4.1 Inverso das distâncias .....	31
4.4.2 Krigagem Ordinária .....	31
<b>4.5 Comparações entre as estimativas</b> .....	34
<b>5 RESULTADOS</b> .....	37
<b>5.1 Linhas interceptadoras (LIS)</b> .....	37
<b>5.2 Análise exploratória dos dados</b> .....	38
<b>5.3 Resultados das predições</b> .....	41
<b>5.4 Comparações entre as estimativas de volume</b> .....	47
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	50

<b>7 RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>51</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO 1: Lista de dados coletados nas linhas amostrais .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO 2: Parâmetros obtidos para cada linha amostral.....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO 3: Resultados da validação cruzada para a técnica IDW. ....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO 4: Resultados da validação cruzada da Krigagem Ordinária.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO 5: Mapa resultante da predição pela técnica Inverso das Distâncias. .....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO 6: Mapa resultante da predição pelo método da Krigagem Ordinária. .....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem se discutido muito sobre fontes alternativas de energia que produzam um baixo impacto ambiental, nesse contexto, diversos trabalhos foram voltados para encontrar uma forma de melhor aproveitar os sub-produtos oriundos da indústria e da agropecuária, incluindo recursos florestais, como biomassa para geração de energia.

No setor florestal em geral, o conhecimento da quantidade de resíduos oriundos dos processos industriais e da colheita é de grande importância para o planejamento econômico e estratégico das empresas. Normalmente a mensuração da quantidade de resíduos geradas na extração da madeira em campo é de maior complexidade em relação as estimativas das árvores nos povoamentos florestais.

No entanto, no Brasil os resíduos sólidos provenientes da colheita florestal são pouco explorados e deixados em campo para participarem da ciclagem de nutrientes. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2017), em 2016 o setor florestal brasileiro gerou 33,7 milhões de toneladas de resíduos sólidos nas florestas, incluindo folhas, galhos e cascas, e que destes, 99,7% são mantidos em campo para proteção e nutrição do solo.

Para obter-se informações referentes a quantidade de resíduos florestais presentes em uma área podem ser utilizadas técnicas indiretas ou diretas de medição no campo. Métodos indiretos seriam as estimações proporcionadas pelo processamento dos inventários florestais ou segundo Kerpachev (2017), baseados no número de ramificações e copas de árvores. Já como métodos diretos podem ser citados os mais conhecidos: o método de área fixa, com coleta do peso e/ou volume dos resíduos em uma área conhecida; e o método da Linha Interceptadora, que ao contrário do método de área fixa é de fácil aplicação e pouco oneroso em tempo e recursos.

Aliado ao método da Linha Interceptadora, podem ser utilizadas técnicas de predição que proporcionam uma visão da distribuição espacial dos resíduos, além de possibilitarem divisões espaciais com diferentes classes de produtividade e conseqüentemente cálculo dos valores e sua representatividade ao longo de uma superfície. Portanto, foram testados dois métodos de predição, um determinístico e outro estocástico, respectivamente: Inverso das Distâncias e Krigagem Ordinária.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a metodologia da Linha Interceptadora (LIS) para a quantificação do volume de resíduos lenhosos provenientes da colheita florestal em plantios comerciais.

Estudar a aplicabilidade do interpolador determinístico Inverso das Distâncias e estocástico geoestatística através da Krigagem Ordinária, em paralelo com Linha Interceptadora, para se obter o volume em locais não amostrados e o conhecimento da distribuição espacial destes volumes.

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Estimar o volume de resíduos sólidos através do método LIS.
- b) Realizar estimativas pelos métodos dos Inversos das Distâncias e Krigagem Ordinária.
- c) Análise e comparação da distribuição espacial dos volumes apresentados pelos dois métodos de predição espacial.
- d) Comparação dos volumes obtidos com o encontrado pela empresa por meio do simulador florestal.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Linha Interceptadora (LIS)

A técnica da linha interceptadora ou *Linear Intercept Sampling* (LIS) está vinculada com a “teoria das agulhas de Buffon”, proposta pelo matemático e naturalista francês Geoge-Louis Lecleric no século XVII (WARREN, 1990). O mesmo autor ainda comenta que variações do método de Linhas interceptadoras já eram utilizadas por Canfield (1941) na mensuração da densidade e diversidade de vegetação arbustiva e herbácea, e por Matérn (1964) para a estimação do comprimento total de estradas.

Warren e Olsen (1964) foram os primeiros a aplicar a técnica LIS para a estimação do volume de resíduos dispersos sobre o solo florestal através de uma linha, onde não há a necessidade de coletar os pesos ou comprimentos dos resíduos, a técnica foi aplicada em plantios de *Pinus radiata* D. Don, na Nova Zelândia. Van Wagner (1968) comenta que a técnica LIS proposta por Warren e Olsen (1964) é capaz de estimar volumes com boa precisão e com custos muito inferiores e em menor tempo quando comparado ao método tradicional de estimação do volume de resíduos que compreende em coletar e pesar os resíduos inseridos em determinada área.

Van Wagner (1968) revisou o método proposto por Warren e Olsen (1964) onde uma variação da técnica foi apresentada, juntamente com seu conceito, limitações e aplicações. O mesmo autor ainda conclui que quando se deseja mensurar resíduos com diâmetros pequenos é melhor utilizar outra metodologia.

Van Wagner (1968) comenta ainda sobre os fatores que afetam a acurácia do método, e que, induzem a redução dos erros: os elementos devem ser cilíndricos; devem estar posicionados de forma horizontal em relação ao solo; e os elementos devem estar orientados randomicamente. A fim de minimizar os efeitos de tendências na orientação dos resíduos, o mesmo autor sugere o uso de duas ou mais linhas em diferentes orientações.

No geral, diferentes configurações no design das linhas amostrais foram adotadas além de uma única linha, como por exemplo: entre duas linhas, variando os ângulos, normalmente em formato de “L” (BAILAY, 1970; HAWARD e WARD, 1972; VAN WAGNER, 1968;); três linhas partindo de um mesmo ponto de tal forma que fiquem em forma “Y” (CORROW, 2007); três linhas dispostas em forma de um triângulo equilátero (VAN WAGNER, 1984; VAN WAGNER 1968); quatro o mais linhas formando blocos quadrados (MARTIN, 1976), no entanto outros *designs* de diferentes complexidades podem ser utilizados. Os segmentos dos transectos podem ser arranjados de forma radial, ou seja, todas as linhas amostrais partem de um ponto comum, ou poligonal onde três ou mais linha estão ligadas entre si (AFFLECK, GREGOIRE e VALENTINE, 2005).

Alguns autores chegam ainda a sugerir a realização de sub amostragens em partes das linhas amostrais a fim de mensurar diferentes classes de diâmetros. Desta forma evita-se a sobre-amostragem de pequenos diâmetros (DU CROS e LOPEZ, 2009).

Geralmente os métodos LIS e área fixa são os métodos mais utilizados para se amostrar e estimar informações dos elementos lenhosos mortos de maiores diâmetros que estão sobre o solo florestal (WOLDENDORP, 2002). Desde sua primeira aplicação para a mensuração de material lenhoso disposto sobre o solo florestal, o método foi amplamente utilizado em diversos trabalhos, principalmente por estimar volumes com considerável precisão (VAN WAGNER, 1982), por ser de rápida aplicação (VAN WAGNER 1982), de fácil aplicação (DU CROS e LOPEZ, 2009) e por ser financeiramente mais econômico que outros métodos (VAN WAGNER, 1982).

Uma variação do método LIS foi proposta por Brown (1971), em que foi nomeada de *Planar Intersect Sampling* onde incorpora a altura na amostra, eliminando erros provenientes do ângulo vertical dos resíduos (WOLDENDORP, 2002). Consiste em estimar volumes em superfícies com resíduos florestais sobrepostos de tal maneira que formam conglomerados. Brown (1974) apresentou um manual com o intuito de auxiliar na aplicação do *Planar Intersect Sampling*.

Van Wagner e Wilson (1976) estudaram três formas de mensuração dos diâmetros de resíduos de *Pinus banksiana* Lamb. para a estimação de volume: por meio da mensuração dos diâmetros finais de cada resíduo e posterior aplicação da Fórmula de Smalian, método utilizado por De Vries (1973), Bailey (1970) e Martim (1976); diâmetro na metade do comprimento e posterior aplicação da Fórmula de Huber; e diâmetro interceptado como proposto inicialmente por Warren e Olsen (1964) e Van Wagner (1968). Van Wagner e Wilson (1976) ainda concluem que o método LIS baseado nos diâmetros interceptados é o melhor, entre os métodos testados, para a estimação do volume de resíduos sobre o solo, comentam ainda que foi o método mais rápido de ser aplicado e que quando mensurados os diâmetros nos dois extremos de cada resíduo foi necessário aproximadamente três vezes do tempo e para o diâmetro central foi necessário quase seis vezes do tempo para mensurar os diâmetros interceptados.

Haward e Ward (1972) apontam os aspectos negativos do método LIS: o fato de que cada linha amostral corresponde a uma única unidade amostral, sendo necessária maior quantidade de linhas amostrais para a obtenção de menores erros; a análise estatística é complicada quando cada linha amostral possui um comprimento único; e quanto maior for a área de estudos, o uso de poucas unidades amostrais fazem com que pouca porção do terreno seja amostrada. Os autores procuraram soluções para esses problemas através do uso de amostragem sistemática com três diferentes configurações de linhas amostrais no Estado de Oregon, Estados Unidos. Estudando o método LIS, Pickford e Hazard (1973, apud SANQUETTA, C. R. et al. 2014) também concluem que é necessário uma amostragem de maior intensidade para atingir níveis de precisão mais elevados.

De Vries (1973) apresenta a teoria geral e os conceitos matemáticos envolvidos da técnica LIS, também comenta sobre algumas das aplicações do método na amostragem de resíduos florestais. Van Wagner (1984) comentou os aspectos práticos da técnica de linha interceptadora, tais como: o comprimento das linhas, tamanho amostral, precisão, problemas derivados da distribuição de resíduos, equações específicas para cálculo de volume e peso. Warren (1990) escreveu sobre uma perspectiva histórica da técnica LIS partindo da primeira aplicação para mensuração de resíduos florestais, descrita por Warren e Olsen

(1964). Marshall, Davis e Lemay (2000), escreveram um relatório técnico sobre a teoria na qual o método LIS está baseado, descrevendo suas aplicações na amostragem do material lenhoso que está caído sobre o solo florestal principalmente para o levantamento de volume.

Martim (1976) estudou a eficácia do método LIS para mensuração de resíduos lenhosos oriundos da colheita de florestas de folhosas no Oeste da Virginia, Estados Unidos da América. Wodendorp (2002) realizou um estudo em algumas fisionomias vegetais na Austrália, onde revisou e testou diferentes metodologias de amostragem do material lenhoso morto e com maiores dimensões que se encontrava disposto sobre o solo. Woodall, Heath e Smith (2008) estudando o estoque de carbono fixado em material lenhoso morto dispostos sobre o solo florestal em diversas regiões dos Estados Unidos da América utilizaram o método LIS para amostragem juntamente com fatores de conversão para biomassa e carbono.

Du Cros e Lopez (2009) realizaram um estudo preliminar para a avaliação de resíduos lenhosos para o Inventário Florestal Nacional da França, onde avaliaram a metodologia LIS e amostragem por área fixa, comentam ainda que na Europa, o método LIS é utilizado para quantificar o volume de madeira morta no Inventário Florestal Nacional da Suíça e no Inventário Florestal Nacional da Eslováquia. Outras instituições também aconselham o uso do método LIS para o levantamento do material lenhoso morto que está disposto sobre o solo florestal, como o Ministério de Florestas da Columbia Britânica, Canadá, citado por Marshall, Davis e Lemay (2000), o governo de Alberta, Canadá, também utiliza o método para inventariar o material combustível sobre o solo florestal (ESRD, 2014), no Brasil, o Inventário Florestal Nacional adota o método LIS para a amostragem de necromassa em solos florestais (IFN, 2015).

Corrow (2010) estudou a inclusão da dupla amostragem aplicada ao método LIS a fim de aumentar a precisão das estimativas e/ou reduzir os custos de amostragem, portanto, a autora adotou o comprimento agregado como variável auxiliar para estimar o volume agregado e abundância agregada da necromassa lenhosa sobre o solo de uma florestal experimental em Montana, EUA.

Karpachev et al (2017) comentam que a maior parte dos trabalhos desenvolvidos com a aplicação do LIS são baseadas em áreas onde os resíduos estão distribuídos de forma randômica e que nos últimos anos alguns estudos foram realizados para a mensuração do volume de resíduos concentrados, característicos da colheita do tipo *Cut-to-length* (CTL). Portanto, desenvolveram um estudo para a aplicação da LIS em uma área cortada através do sistema CTL e com presença de aglomerados de resíduos em forma de montes circulares.

No Brasil a aplicação do método LIS para a quantificação do volume de resíduos florestais é recente quando comparado com o histórico exterior. Quando aplicado na área florestal, foi voltada principalmente a mensuração de resíduos florestais provenientes da extração madeireira em florestas nativas, em levantamentos do volume de material lenhoso disperso de forma natural sobre o solo de florestas nativas ou na ecologia, como proposto por Canfield (1941).

Cruz Filho e Silva (2009), por meio de linhas interceptadoras, avaliaram a quantidade de resíduos dispersos sobre o solo de duas áreas localizadas no nordeste do Estado do Pará: uma área com exploração madeireira de baixo impacto e outra não explorada. Ribeiro et al. (2012) estudou o inventário de necromassa existente em um remanescente de Floresta Ombrófila Mista por meio da aplicação do método LIS para amostragem da necromassa caída sobre solo florestal e pelo método de Strand para amostragem da necromassa em pé. Guimarães (2015) desenvolveu um trabalho de levantamento de necromassa em diferentes remanescentes florestais no Estado do Rio de Janeiro a partir de dados coletados para o Inventário Florestal Nacional brasileiro. Fonseca (2017) em sua tese utilizou o método LIS e o método de área fixa para a amostragem de necromassa em um fragmento de Floresta Tropical Úmida no perímetro urbano de Recife, Pernambuco. Santos (2014) estudou os métodos LIS e Krigagem Ordinária para estimar os resíduos lenhosos provenientes da extração madeireira em Floresta Ombrófila Densa no município de Paragominas, Pará.

### 3.2 Métodos de predição espacial

Os métodos de interpolação são divididos em: Determinísticos e Estocásticos (ANDRIOTTI, 2003; DRUK et al, 2004; WEBSTER e OLIVER, 2007). Sendo das interpolações determinísticas a mais aplicada é o Inverso das Distâncias e das interpolações estocásticas é a Krigagem Ordinária (ANDRIOTTI, 2003; DRUK et al, 2004; WEBSTER e OLIVER, 2007).

Interpoladores determinísticos estimam o valor de um ponto na superfície por meio de métodos matemáticos (FILHO; SOARES; FERNANDEZ, 2016), sem a aplicação de qualquer hipótese estatística sobre a variabilidade espacial (DRUK et al., 2004), Interpoladores estocásticos estimam o valor de um ponto na superfície por meio de métodos matemáticas e estatísticos (DRUK et al., 2004; FILHO; SOARES; FERNANDEZ, 2016). Interpoladores determinísticos podem produzir resultados tão confiáveis quanto os produzidos pelos estocásticos, demandando menos conhecimentos específicos necessários nos interpoladores estocásticos (FILHO; SOARES; e FERNANDEZ, 2016)

Segundo Webster e Oliver (2007) interpolação consiste em prever o comportamento nos intervalos que estão entre as amostras. Webster e Oliver (2007) ainda comentam que a maioria das maneiras de se realizar a predição espacial são matemáticas, baseadas na geometria, também considerando a natureza física do fenômeno. Técnicas de interpolação são baseadas no princípio de correlação espacial que assume que objetos próximos são mais similares que os distantes (SETIANDO e TRIANDINI, 2013).

#### 3.2.1 Inverso das Distâncias

O Inverso das Distâncias é uma técnica de interpolação que assume que os pontos próximos entre si são mais semelhantes que os mais distantes (ESRI, 2017). O mesmo autor comenta ainda que para prever o valor de um local não mensurado o Inverso das Distâncias faz uso dos valores mensurados, onde,

conforme a distância de um valor mensurado aumente, este tende a perder significância na predição de um novo valor.

Segundo Santianto e Triandini (2013) equação adotada pelo IDW para estimar os pontos não amostrados é:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^N z_i d_i^{-n}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-n}} \quad (1)$$

Onde: “Z<sub>0</sub>” é a estimativa da variável “Z”; “z<sub>i</sub>” é o valor amostrado; “d<sub>i</sub>” é a distância entre o ponto amostrado e o ponto estimado; “N” é o coeficiente que determina o peso baseado na distância; “n” é o número total de predições para cada validação.

As interpolações geradas são exatas, os valores máximos e mínimos que podem ocorrer na região interpolada obrigatoriamente devem respeitar os encontrados nas amostras (ESRI, 2017).

Segundo Andriotti (2003), a técnica IDW tende a formar contornos concêntricos ao redor dos pontos amostrados e a predição gerada tende a representar os valores coletados nos nas amostras. Ainda cita que é um método puramente matemático que não considera as características físicas da área de estudos, as anisotropias, a variabilidade dos dados, o tamanho e a forma do bloco a avaliar. Porém que dentre os métodos convencionais é o que oferece resultados mais precisos uma vez que considera amostras internas e externas. Webster e Oliver (2007) comentam que uma característica atrativa dessa metodologia é que os pesos relativos diminuem rapidamente conforme as distâncias aumentam, logo, então a interpolação é sensível ao local, e também que como os pesos adotados nunca se zeram não há descontinuidade no processo.

Andriotti (2003) também cita que o método tem como desvantagem os critérios para a escolha dos ponderadores que podem ser definidos sem uma justificativa técnica ou sem ser fundamentada em algum comportamento específico da variável a ser estudada. Os autores Webster e Oliver (2007) também comentam

sobre a desvantagem de que a escolha dos ponderadores é arbitrária e que também não considera a configuração da amostragem.

### 3.2.2 Krigagem Ordinária

O termo Krigagem ou *Kriging* em inglês é uma homenagem a Daniel D. Krige, um engenheiro que trabalhava em minas de ouro na África do Sul. Krige (1951) percebeu que poderia melhorar suas estimações da quantidade de ouro em blocos de mineração se considerasse os valores óbitos em blocos próximos. (Webster e Oliver, 2007). Com base na observação realizada por Krige, Matheron (1963), desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, também conhecida como Geoestatística (MELLO, 2004)

A teoria das variáveis regionalizadas parte do princípio que os dados são considerados variáveis aleatórias e que podem ser representados pela soma de um componente estrutural que está associado a um valor médio constante, um componente aleatório, espacialmente aleatório e a um erro aleatório (MELLO, 2004).

A geoestatística faz uso da Krigagem e da simulação estocástica (LEAL, 2013), portanto baseia-se no conceito probabilístico. O método de interpolação estatístico Krigagem compreende um conjunto de técnicas de estimação e predição de superfícies baseada na modelagem da estrutura de correlação espacial (DRUK et al., 2004). Dos métodos de Krigagem, é seguro dizer que o mais utilizado é a Krigagem Ordinária (ANDRIOTTI, 2003; DRUK et al., 2004; WEBSTER e OLIVER, 2007) devido sua simplicidade e resultados (MELLO e OLIVEIRA, 2015).

Os métodos de estimação linear utilizados na geoestatística fazem mais sentido quando os dados seguem uma distribuição aproximadamente normal (ANDRIOTTI, 2003). Webster e Oliver (2007) comentam que quando a distribuição não segue a normalidade, as inferências realizadas nos dados dão origem a estimativas instáveis e fazem inferências e interpretações menos precisas. Segundo Cressie (1993), citado por Mello (2004), um fundamento comum da

modelagem estocástica é que os dados sigam a distribuição normal, onde toda a inferência geoestatística tem se desenvolvido.

Infelizmente nenhuma técnica de interpolação é a melhor para todos os conjuntos de dados (SETIANTO e TRIANDINI, 2013). Biondi, Mayers e Every (1994) comentam que dentre os métodos de interpolação a Krigagem é o melhor, comentam ainda que a Krigagem permite análise individual dos pontos além de proporcionar a estimativa do erro cometido.

Modelos geoestatísticos não só possuem a capacidade de prever os valores, mas também proporcionam medidas de certeza ou acurácia da predição (ESRI, 2017). A Krigagem fornece uma estimativa de um ponto e junto com essa estimativa é fornecida uma medida de acuracidade dessa estimativa (ANDRIOTTI, 2003).

Andriotti (2003) comenta as seguintes vantagens da geoestatística em relação a outros métodos de interpolação: estudo da variabilidade espacial por meio de variogramas; a suavização (quanto maior for a variabilidade da amostra, menos os valores observados representam a sua vizinhança imediata e maior é a suavização e maior é a incerteza associada), o desagrupamento, estudo da anisotropia, a precisão, e a incerteza.

A Krigagem assume que a distância entre os pontos amostrais reflete correlação espacial que pode ser utilizada para explicar as variações ocorridas na superfície amostral (FILHO; SOARES; FERNANDEZ, 2016; ESRI, 2017). O método ajusta funções matemáticas a um número específico de pontos ou a todos os pontos inclusos dentro de uma determinada área para calcular o valor de saída para cada local (ESRI, 2017). A Krigagem possui vários passos que incluem a análise estática dos dados, análise estrutural, interpolação estatística da superfície (DRUK, et al., 2004) e exploração da variância da superfície (ESRI, 2017).

A Krigagem proporciona a solução para o modelo de estimação baseado em um contínuo modelo de variação espacial autocástica, fazendo o melhor uso do conhecimento existente, assumindo a forma que melhor varia espacialmente no variograma (WEBSTER e OLIVER, 2007).

A Krigagem Ordinária assume que a média estacionária é desconhecida (ESRI, 2017). O método proporciona uma estimativa da variável  $z$  em um ponto não observado baseando-se na média ponderada dos pontos adjacentes dentro de uma determinada área (SETIANTO e TRIANDINI, 2013). Segundo os mesmo autores a estimativa da média ponderada dada para um ponto não amostral é definida por:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad (2)$$

Onde: “ $Z(s_0)$ ” corresponde ao ponto não amostrado; “ $\lambda$ ” são os pesos atribuídos a cada ponto amostrado. A soma total de “ $\lambda$ ” é 1. Os pesos são calculados através da equação de matriz:

$$C = A^{-1} \times b \quad (3)$$

Onde: “ $C$ ” é o peso resultante; “ $A$ ” é uma matriz de semivariâncias entre os pontos amostrado; “ $b$ ” um vetor da estimativa das semivariâncias entre os pontos amostrados e os pontos onde a variável “ $Z$ ” será estimada.

Assim como o IDW, a Krigagem também atribui diferentes pesos para os valores amostrados. Webster e Oliver (2007) comentam que os 4 ou 5 pontos amostrados mais próximos podem contribuir com 80% do peso total e os próximos 10 com praticamente todo o resto e que os pesos também dependem da configuração da amostragem.

Como citado anteriormente, métodos estocásticos exigem prévia análise estrutural (DRUK et al., 2004; ESRI, 2017). Essa análise é realizada através do variograma ou semivariograma (metade do variograma). Segundo Andriotti (2003), variograma é uma função que reflete a estrutura do fenômeno estudado, medindo as relações estatísticas entre as amostras. Santos et al. (2014) comenta que o semivariograma mostra o grau de dependência entre as amostras. Andriotti (2003) comenta que ao executar variogramas em várias direções procura-se identificar a

ocorrência de anisotropias. O mesmo autor define as fórmulas do variograma e semivariograma, respectivamente:

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

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

Onde: “ $2\gamma(h)$ ” e “ $\hat{\gamma}(h)$ ” correspondem ao variograma e semivariograma estimados; “ $n_h$ ” é o número de pares de valores separados entre si por uma magnitude “ $h$ ” na direção desse vetor; “ $Z(x)$ ” é o valor da variável regionalizada no ponto “ $x$ ”; “ $Z(x_i+h)$ ” é o valor no ponto “ $x_i+h$ ”.

Anisotropia ocorre quando os variogramas executados para diferentes direções apresentam comportamentos distintos uma vez que refletem a variabilidade do fenômeno estudado nas diferentes direções (ANDRIOTTI, 2003).

Diversos trabalhos comparando o Inverso das Distâncias com a Krigagem já foram elaborados nos mais diversos campos de pesquisa. Mello et al. (2003) realizaram um estudo de precipitação utilizando os dois métodos de interpolação. Setianto e Triandini (2013) examinaram ambas as metodologias no desenvolvimento de um modelo digital de elevação de terreno. Caram (2007) comparou resultados provenientes de interpolação por Inverso das Distâncias e Krigagem Ordinária. Zimmerman et al. (1999) comparou quatro métodos: Krigagem Universal, Krigagem Ordinária e dois tipos de Inverso da Distância. Dias et al. (2016) avaliou a distribuição espacial do fungo *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. através de diferentes interpoladores espaciais: Inverso das Distâncias, Krigagem Ordinária e Vizinhos Naturais.

Algumas pesquisa fizeram uso da geoestatística em diferentes segmentos do setor florestal. Biondi, Mayers e Every (1994) estudaram modelos de variogramas e Krigagem para verificar a dependência espacial do diâmetro do fuste, área basal e incremento de área basal em floresta com idade avançada. Mello (2004) estudou a aplicabilidade da geoestatística no inventário florestal, seu objeto

de estudo foi um talhão *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Assis (2005) estudou o uso da geoestatística como complemento na estratificação de inventários florestais. Leal (2013) comparou estimativas de volume de um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake obtidas por meio do inventário florestal tradicional e por meio de interpolação geoestatística. Reis et al. (2015) estudaram estratificações do bioma cerrado a partir de imagens Landsat 5 e Krigagem.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Descrição da área de estudos

O presente trabalho foi desenvolvido em um talhão com plantio comercial de *Pinus taeda* L., no município de Santa Cecília, Santa Catarina, Brasil. É uma região marcada pela forte presença do setor madeireiro voltado principalmente para o cultivo de *Pinus sp.* A floresta presente na área de estudos tem como principal objetivo a produção de madeira destinada para laminação e serraria.

Santa Cecília é um município brasileiro situado da mesorregião Serrana Catarinense, nas coordenadas geográficas 50° 26' 45,810" W e 26° 55' 31,220" S. Com clima subtropical do tipo Cfb segundo a classificação climática de Köppen-Greiger. Pluviosidade anual média de 1638 mm. Altitude de 1.100 metros acima do nível do mar. O talhão, alvo do estudo, se encontra nas coordenadas geográficas 50° 26' 33,663" W e 26° 58' 5,961" S, próximo ao limite urbano do município. Está inserido sobre Cambissolos Háplicos (Ca40) e Húmicos (Ca66).

A área de estudo compreende um talhão com 43,05 hectares de plantio comercial de *Pinus taeda* L. com 13 anos de idade, cultivados em um espaçamento de 2,5 x 2,5 metros, totalizando 1.600 árvores por hectare. O talhão está inserido em uma região com relevo plano e com considerável quantidade de terrenos encharcados característicos da região.

No manejo aplicado pela empresa, normalmente são realizados três desbastes, aos 8, 12 e 16 anos, sendo que o corte raso é realizado aos 25 anos de idade. Para a área de estudos o primeiro desbaste foi atrasado. Observa-se que o desbaste é realizado conforme a necessidade da floresta ou decisões estratégicas. Ao longo desse período são realizadas podas onde são retirados todos os galhos das árvores até 7 metros de altura, esses galhos permanecem no campo onde participam da ciclagem de nutrientes.

Figura 1: Localização do município de Santa Cecília – SC.



Fonte: O Autor (2017).

Os dados foram coletados logo após a atividade do primeiro desbaste que foi realizada no talhão. O desbaste realizado é mecanizado, do tipo *Cut-to-length*, com o uso de *Harvesters* e *Forwarders*. A metodologia de desbaste empregada no primeiro desbaste consiste na retirada de 50% das árvores por meio do desbaste seletivo e sistemático, simultaneamente.

Durante o processo de corte realizado pelo *Harvester* as árvores são desgalhadas e seccionadas em dimensões pré-definidas de no mínimo 8 cm de diâmetro na ponta fina do sortimento, o restante da árvore (ponteira, toco, entre outros) permanece no campo como resíduo da colheita.

Figura 2: Área de estudos após a atividade de desbaste



Fonte: O Autor (2017)

## 4.2 Coleta dos dados

### 4.2.1 Linha Interceptadora (LIS)

A metodologia adotada para se estimar a quantidade de resíduos provenientes da colheita florestal dispostos sobre o solo foi o *Linear Intersect Sampling* (LIS) ou linha interceptadora. O método consiste em uma linha amostral de comprimento “L” que cruza uma área contendo vários elementos horizontais e cilíndricos com diferentes comprimentos, diâmetros e orientações. Destes elementos coletam-se apenas os diâmetros no ponto exato onde a linha amostral cruza com o eixo central de cada elemento. Uma vez em que todos os diâmetros interceptados por cada linha amostral são mensurados aplica-se a seguinte fórmula para estimar o volume:

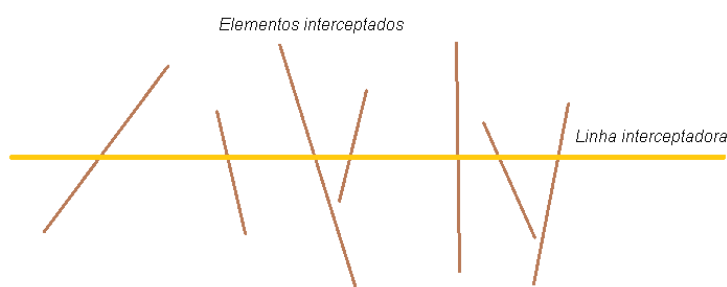
$$V = \frac{\pi^2}{(8 \times L)} \times \sum d^2 \quad (6)$$

Onde: “V” é o volume por unidade de área; “L” é o comprimento da linha; e “d” o diâmetro no ponto de interceptação.

Nota-se que na metodologia original apresentada por Warren e Olsen (1964) não há necessidade de coletar comprimentos dos elementos que cruzarem a linha amostral ou mesmo de anotar sua inclinação. As regras para aplicação do método, definidos por Van Wagner (1968), são:

1. Definir uma linha de comprimento conhecido através da área a ser estudada.
2. Mensurar os diâmetros de todos os elementos lenhosos que atravessarem a linha.
3. Se a linha amostral cruzar o final de algum elemento, apenas deve ser mensurado se o eixo central for cruzado pela linha amostral.
4. Caso a linha intercepte um elemento curvado mais de uma vez, devem ser mensurados todos os diâmetros.
5. Se a linha amostral cruzar exatamente o final do eixo central de um elemento este deve ser mensurado.
6. Ignorar todo elemento cujo eixo central se encontre paralelo à linha amostral.

Figura 3: Esquema da linha interceptadora



Fonte: O Autor (2017)

O método considera que todos os resíduos são cilíndricos, estão posicionados de forma horizontal em relação ao solo e que estão randomicamente orientados. No entanto devido ao sistema de desbaste adotado, os resíduos são

orientados sistematicamente, perpendiculares às sétimas linhas por onde as máquinas passaram.

Devido ao espaçamento adotado no plantio, à metodologia de desbaste adotada e a fim de se reduzir os erros decorrentes da orientação sistemática dos resíduos, adotou-se linhas amostrais com 15 metros de comprimento dispostas transversalmente à fileira de resíduos em um ângulo com cerca de 45 graus, abrangendo assim, áreas com maior concentração de resíduos e áreas com menor concentração. Ao todo ficaram cerca de 7 metros da linha amostral dispostos sobre a área retirada no desbaste sistemático e o restante disposto sobre a área que sofreu desbaste seletivo.

Figura 4: Linha amostral aplicada no campo.



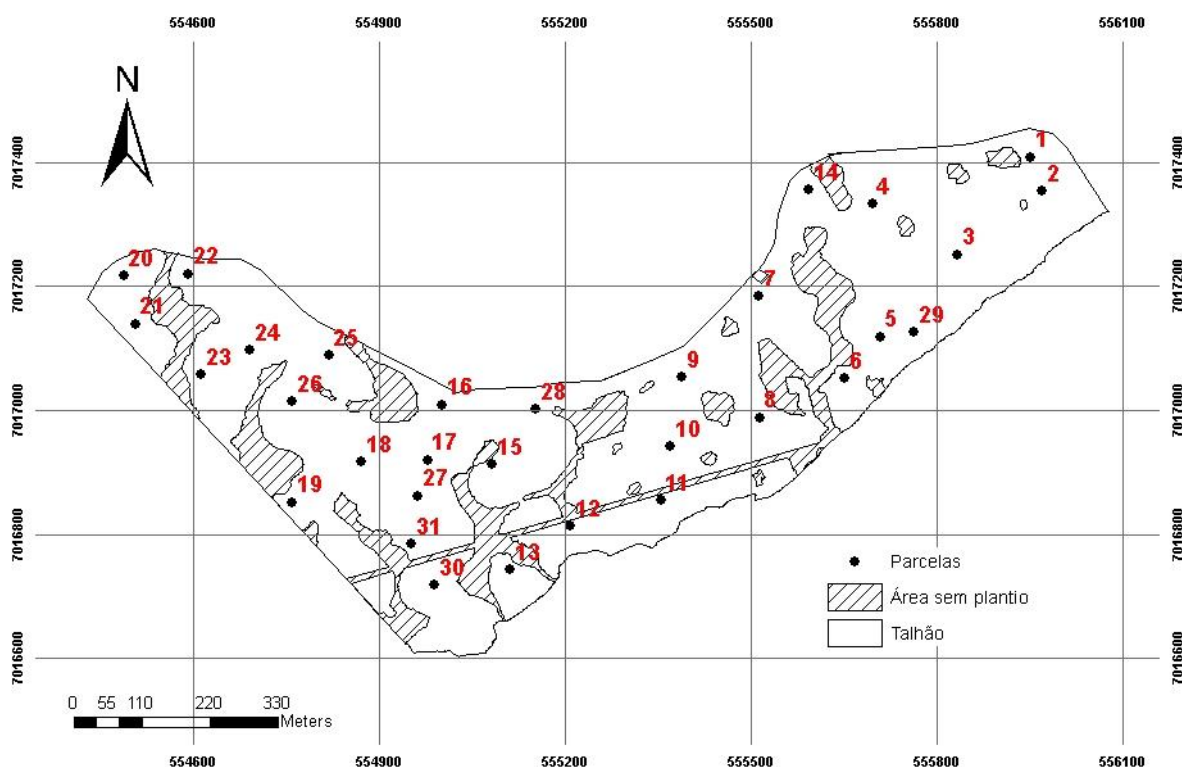
Fonte: O Autor (2017).

A prática de aproveitar os resíduos provenientes da colheita florestal não é muito utilizada entre as empresas que cultivam florestas de *Pinus* no Brasil, e quando os resíduos são aproveitados para fins energéticos normalmente utilizam-se apenas as peças com maiores diâmetros. Portanto, optou-se por mensurar apenas os diâmetros de no mínimo 3 centímetros no sentido em que tocam a linha amostral.

Com o auxílio do *software* ArcGis® foram distribuídas 31 unidades amostrais de forma inteiramente aleatória a fim de evitar interferências humanas na escolha

das áreas. Como é possível visualizar na figura 4, as amostras ficaram bem distribuídas ao longo do talhão. A intensidade de amostral utilizada foi de 1,39 hectares por amostra.

Figura 5: Posições das linhas amostrais dentro da área de estudos.



Fonte: O Autor (2017).

A linha amostral foi constituída por uma fita métrica esticada ao longo da área, os diâmetros foram coletados com o auxílio de um paquímetro. Os dados coletados foram anotados em fichas de campo. A linha amostral foi fixada na linha retirada no desbaste sistemático, mais próxima do ponto sorteado e o sentido de aplicação foi aleatório. Foram mensurados apenas os resíduos lenhosos que não apresentaram estado de decomposição e que foram descartados no processamento realizado pelos *Harvesters*.

### 4.3 Análise exploratória dos dados

As informações coletadas nas linhas interceptadoras foram analisadas a partir do volume para cada linha amostral. Com o auxílio dos *softwares* “Microsoft Excel®” e “R” foram realizadas análises exploratórias dos dados a fim de se diagnosticar o comportamento dos mesmos em relação as suas dispersões e a confiança do levantamento.

Para consolidar a necessidade de transformação das variáveis foram realizados testes de normalidade Kolmogov-Smirnov (KS), Jarque-Bera (JB), Shapiro-Wilk (SW) e análise da assimetria e curtose, que, segundo Andriotti (2003) a curva estará bem ajustada se os valores de assimetria estiverem entre  $\pm 3[\sqrt{(6/n)}]$  e curtose entre  $\pm 6[\sqrt{(6/n)}]$ . A fim de identificar a presença de *outliers*, elementos discrepantes no conjunto de dados que possuem o poder de deslocar a média da mediana podendo aferir erros na estimação, foi utilizado o teste de Grubbs.

### 4.4 Predições

As metodologias de predição adotadas para a variável volume, na elaboração deste trabalho foram: Inverso das Distâncias ou *Inverse Distance Weighted* (IDW) e Krigagem Ordinária (KO), sendo a primeira determinística e a segunda estocástica. As interpolações foram geradas através do *software* ArcMap®. Ambas as metodologias foram comparadas.

Ambos as técnicas utilizaram os valores de volume obtidos para cada unidade amostral pelo método LIS para a execução das interpolações.

#### 4.4.1 Inverso das distâncias

Por ser um método determinístico, para aplicar o método dos Inversos das Distâncias não se faz necessário o uso de dados normalizados, portanto, são utilizados dados sem nenhum tipo de transformação de escala.

Como critério para o estabelecimento da técnica IDW adotou-se a redução dos erros apresentados pelo ArcMap®: *Mean Error* (ME) ou Erro Médio e *Root Mean Square Error* (RMSE) ou Raiz do Erro Quadrático Médio resultante da validação cruzada proporcionada pelo ArcMap®. Os erros indicam se os valores preditos estão próximo ou não dos valores mensurados através das seguintes equações:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Z(s_i) - z(s_i))}{n} \quad (7)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^x (Z(s_1) - z(s_1))^2}{n}} \quad (8)$$

Onde: “n” é o número de valores utilizados; “Z(s<sub>i</sub>)” correspondem aos valores estimados; “z(s<sub>i</sub>)” aos valores mensurados. Quanto mais próximo de zero for o valor de ME melhor será o modelo e quanto menor for o RMSE encontrado melhor será o modelo.

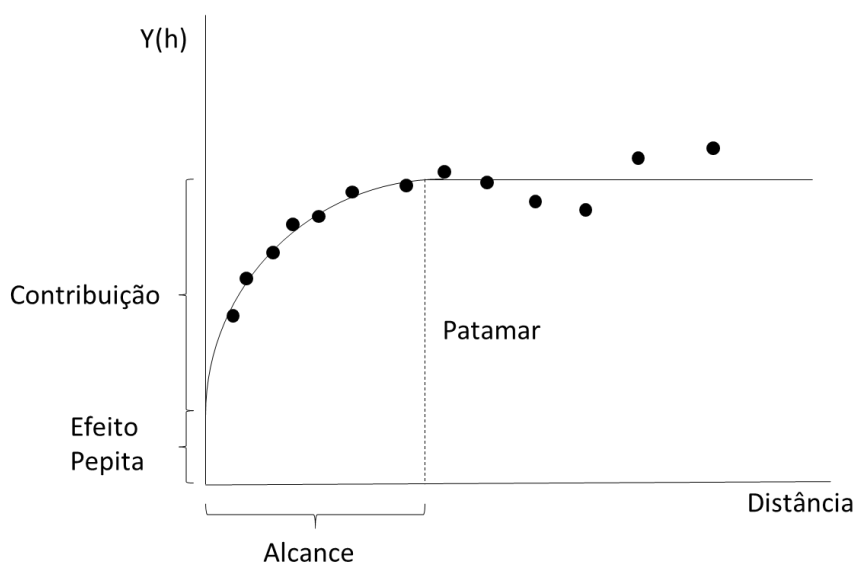
#### 4.4.2 Krigagem Ordinária

O modelo de Krigagem escolhido foi a Krigagem Ordinária (KO) por ser o mais adotado na prática e por considerar que a média estacionária é desconhecida. Por ser um método de predição estocástico é necessário utilizar dados normalizados, uma vez que acarretam na maior acurácia e precisão dos resultados apresentados pela KO.

Devido sua natureza estocástica a Krigagem exige um maior grau de conhecimento específico para sua aplicação quando comparada com o Inverso das Distâncias, no entanto possui a vantagem de apresentar o erro associado ao valor estimado.

É necessário a análise prévia do variograma ou semivariograma em diferentes orientações a fim de identificar a existência de anisotropia. Outra importância para o estudo da análise estrutural é o ajuste de funções matemáticas ou modelo. A definição do modelo que melhor se ajuste ao semivariograma foi realizada por meio do ArcMap®, com ajuste visual. Os parâmetros gerados foram efeito pepita ( $C_0$ ), parcial *sill* ( $C$ ) ou contribuição, distância ( $\theta$ ) e patamar ( $C_0 + C$ ), e através da relação entre a contribuição e o patamar foi obtido o grau de dependência espacial (DE%). Segundo Si et al (2007), citado por Biswas e Si (2013), o efeito pepita, patamar e o alcance ajudam na identificação de autocorrelação e na replicação de amostras revelando padrões dominantes no conjuntos de dados. A Figura 6 apresenta um modelo esquemático do semivariograma:

Figura 6: Modelo esquemático do semivariograma e seus parâmetros



Fonte: O Autor (2016).

O efeito pepita corresponde a uma descontinuidade na origem do variograma, que é geralmente atribuída a erros de amostragem e/ ou analíticos ou mesmo à variabilidade natural do fenômeno estudado (ANDRIOTTI, 2003). O mesmo autor ainda afirma que o efeito pepita representa microrregionalizações que ocorrem em escalas inferiores a da amostragem realizada. Andriotti (2003) ainda comenta que valores de efeito pepita superiores a 30% do patamar são considerados elevados. Portanto menores valores de efeito pepita são considerados desejados no ajuste de semivariogramas.

Como critério de dependência espacial foi adotado a classificação proposta por Cambardella et al. (1994) onde, se o efeito pepita for menor ou igual a 25% do patamar, a variável é considerada com forte dependência espacial, se o valor do efeito pepita se encontrar entre 25% e 75% do patamar a dependência espacial é considerada moderada e se o valor for superior a 75% a dependência espacial é considerada baixa.

Ao realizar a predição o ArcGIS® automaticamente já fornece a validação cruzada dos dados a fim de se verificar a precisão da predição. Na validação cruzada o valor de um ponto amostrado é estimado a partir dos demais valores em seu entorno, após a estimação desse ponto, o valor original retorna e a ação é repetida novamente até que todos os valores da amostra tenham sido estimados (ANDRIOTTI, 2003).

Os resultados da validação cruzada oferecidos pelo ArcGIS®, são *Mean Error* (ME) ou erro médio, *Root Mean Squared Error* (RMSE) ou raiz do erro médio quadrático, *Average Standard Error* (ASE) ou média do erro padrão, *Mean Standardized Error* (MSE) ou erro médio padronizado e *Root Mean Squared Standardized Error* (RMSSE) ou raiz do erro médio quadrático padronizado. Os erros são calculados conforme as fórmulas:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Z(s_i) - z(s_i))}{n} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^x (Z(s_1) - z(s_1))^2}{n}} \quad (8)$$

$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma^2(s_i)}{n}} \quad (9)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Z(s_i) - z(s_i))/\sigma(s_i)}{n} \quad (10)$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^x [(Z(s_1) - z(s_1))/\sigma(s_i)]^2}{n}} \quad (11)$$

Onde: “n” é o número de valores utilizados; “Z(s<sub>i</sub>)” correspondem aos valores estimados; “z(s<sub>i</sub>)” aos valores mensurados; “σ<sup>2</sup>” é a variância do semivariograma; “σ” é o desvio padrão do semivariograma.

Quanto menor for o valor RMSE encontrado, melhor será o modelo. O ME deve estar próximo de zero, pois é a média da diferença entre os valores observados e estimados. Webster e Oliver (2007) comentam que o erro médio possui um fraco diagnóstico pois a Krigagem não detecta imprecisões no semivariograma. O valor do RMSSE deve ser próximo de 1, se o valor for maior que 1 as variáveis estão sendo subestimadas e se for inferior elas estão sendo superestimadas (ESRI, 2017).

#### 4.5 Comparações entre as estimativas

A fim de comparação, adotou-se como correto os valores de volume obtidos por meio da simulação da produção florestal adotada pela empresa. A simulação é realizada através do software “Fsing”, onde o cálculo é realizado por meio da função de afilamento de Prodan, os coeficientes ajustados são apresentados na Tabela 1.

O valor simulado foi de 2.431,89 m<sup>3</sup>. A função de afilamento de Prodan é apresentada abaixo:

$$\frac{d_i}{d_{ap}} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h_t}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h_t}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{h_t}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{h_t}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{h_t}\right)^5 \quad (12)$$

Onde: “d<sub>i</sub>” é o diâmetro tomado na i-ésima altura da árvore; “d<sub>ap</sub>” é o diâmetro tomada a 1,3 m acima do solo; “h<sub>i</sub>” é a altura referente ao “d<sub>i</sub>”; “h<sub>t</sub>” é a altura total; “β<sub>i</sub>” são os coeficientes do modelo.

Os resultados da estimativa pelo método LIS e pelos modelos de predição IDW e Krigagem foram analisados individualmente e então comparados entre si e com o estimado pela empresa.

Tabela 1: Coeficientes ajustados

Coeficiente	Variável Independente	Valor de Ajuste
b0	-	1,2194
b1	h <sub>i</sub> /h <sub>t</sub>	-3,7822
b2	(h <sub>i</sub> /h <sub>t</sub> ) <sup>2</sup>	15,5006
b3	(h <sub>i</sub> /h <sub>t</sub> ) <sup>3</sup>	-34,9487
b4	(h <sub>i</sub> /h <sub>t</sub> ) <sup>4</sup>	35,0047
b5	(h <sub>i</sub> /h <sub>t</sub> ) <sup>5</sup>	-12,9931

Onde h<sub>i</sub> corresponde a altura referente a um diâmetro na altura “i” e h<sub>t</sub> corresponde a altura total.

Fonte: O Autor (2017).



## 5 RESULTADOS

### 5.1 Linhas interceptadoras (LIS)

Foram coletados diâmetros de peças de madeira provenientes de 31 linhas amostrais dispersas dentro da área de estudo. Ao todo foram mensurados 288 diâmetros. A quantidade de peças de madeira inseridas em cada linha da medição variou entre 3 e 18, com média de 9 peças mensuradas por linha. O total de peças inseridas poderia ser maior, no entanto devido ao tráfego das máquinas de colheita e seus elevados pesos, muitas peças foram enterradas ou trituradas. Também houve a aglomeração de resíduos na região central do caminho, formando um conglomerado de resíduos e solo. Vale ressaltar que a quantidade de diâmetros mensurados é diretamente dependente da metodologia adotada para a definição do posicionamento da linha amostral, se a metodologia fosse outra, provavelmente a quantidade de diâmetros inclusos seria diferente. Na Figura 7 é possível visualizar os rastros deixados pelo maquinário e a disposição dos resíduos.

O menor diâmetro mensurado foi de 3,6 cm e o maior 34 cm, já a média existente entre todos os diâmetros mensurados em todas as amostras foi de 7,4 cm. As médias para cada amostra variaram entre 5,62 cm e 11,08 cm. Ao todo foram calculados 31 volumes, que variaram entre 10,46 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> e 167,04 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, com média de 49,17 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.

Figura 7: Aglomeração de resíduos nos rastros das máquinas



Fonte: O Autor (2017)

A estimativa do total de volume de resíduos lenhosos provenientes da atividade de desbaste mecanizado em um cultivo de *Pinus taeda* L. foi dada pela média aritmética dos volumes calculados para cada linha amostral. Aplicando-se a média encontrou-se o valor de  $49,17 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , multiplicando pela área total (43,05 hectares) obteve-se  $2.116,75 \text{ m}^3$  de resíduos no talhão.

Os erros de amostragem absoluto e relativo ocorridos foram  $12,26 \text{ m}^3$  e  $24,93\%$ , respectivamente. O intervalo de confiança da amostragem foi de  $\pm 12,26 \text{ m}^3$ .

## 5.2 Análise exploratória dos dados

A partir da análise exploratória dos dados para os volumes encontrados, encontrou-se um desvio padrão de  $33,42 \text{ m}^3$  e um erro padrão de  $6,00 \text{ m}^3$ . O

coeficiente de variação entrado foi de 67,96%, logo, percebe-se que o conjunto amostral possuem um comportamento heterogêneo (Tabela 2).

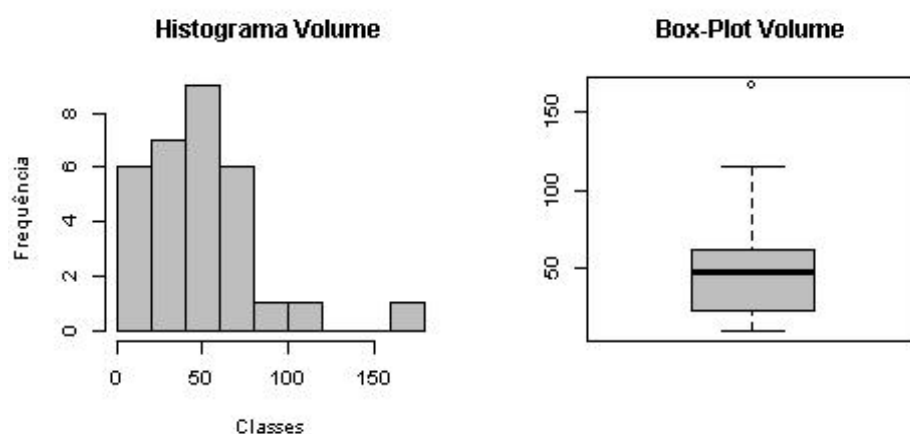
Tabela 2: Parâmetros estatísticos dos volumes calculados.

Variável	Média	Desvio padrão	Erro padrão	CV%	IC
<b>Volume</b>	49,17 m <sup>3</sup>	33,42 m <sup>3</sup>	6,00 m <sup>3</sup>	67,96%	49,17±12,26 m <sup>3</sup>

Onde: CV% é o coeficiente de variação e IC é o intervalo de confiança. Fonte: O Autor (2017).

Ao se analisar visualmente o histograma e o box-plot (Figura 8), percebe-se que a variável volume aparentemente possui distribuição diferente da normal e ainda nota-se a presença de *outliers*. Através do teste de Grubbs, confirmou-se a existência de um *outliers*, representado pelo maior volume estimado (167,04 m<sup>3</sup>), sua presença resultou em uma assimetria positiva, deslocando a média da mediana para a direita. No entanto, pressupõe-se que caso houvesse um aumento na densidade do número de unidades amostrais o conjunto de dados tenderia a normal.

Figura 8: Histogramas e box-plots para a variável volume.



Fonte: O Autor (2017).

É notável que em ambos os casos houve certa assimetria positiva, representada pelos deslocamentos da média e da mediana para a direita (Tabela 3). A assimetria e curtose da variável volume não se enquadraram dentro do limite proposto por Andriotti (2003) devido a presença de valor discrepante, representado pelo maior volume encontrado. Para confirmar a hipótese de não normalidade do conjunto de dados foram realizados os testes de Kolmogorov-Smirnov (KS), Jarque-Bera (JB) e Saphiro-Wilks (SW), conforme apresenta na Tabela 4.

Tabela 3: Parâmetros encontrados na distribuição normal das variáveis volume.

Variável	Média	Mediana	Assimetria	Referência <sub>1</sub>	Curtose	Referência <sub>2</sub>
Volume	49,17 m <sup>3</sup>	47,83 m <sup>3</sup>	1,67	1,32	4,08	2,64

Onde “Referência<sub>1</sub>” e “Referência<sub>2</sub>” correspondem aos limites citados por Andriotti (2003) para assimetria e curtose, respectivamente. Fonte: O Autor (2017)

Tabela 4: Resultados dos testes de normalidade executados para a variável volume.

Variável	KS	Valor-p	JB	Valor-p	SW	Valor-p
Volume	0,13	0,62	26,87	1,46x10 <sup>-06</sup>	0,87	7,1x10 <sup>-4</sup>

Fonte: O Autor (2017)

Nota-se que apenas o teste KS indicou a hipótese de distribuição normal para as duas variáveis (valor-p >0,05), entretanto os testes JB e SW rejeitam a hipótese de distribuição normal (valor-p <0,05). Considerando os resultados apresentados decidiu-se transformar os dados para uma nova escala, onde a distribuição fique mais próxima da normal. A transformação escolhida foi a logarítmica, pois, segundo Andriotti (2003) a transformação logarítmica aumenta as distâncias entre os valores pequenos e reduz as distâncias entre os valores grandes, tornando a distribuição mais próxima da normal, característica desejável para este conjunto de dados. Depois de realizadas as transformações, todos os testes aceitaram a hipótese de que as variáveis seguem a distribuição normal como pode ser visualizado nas Tabelas 5 e 6, no histograma e no box-plot (Figura 9).

Tabela 5: Parâmetros encontrados na distribuição normal das variáveis volume após transformação logarítmica.

Variável	Média	Mediana	CV%	Assimetria	Referência <sub>1</sub>	Curtose	Referência <sub>2</sub>
<b>Volume</b>	3,69	3,87	3,22	-0,04	1,32	-0,84	2,64

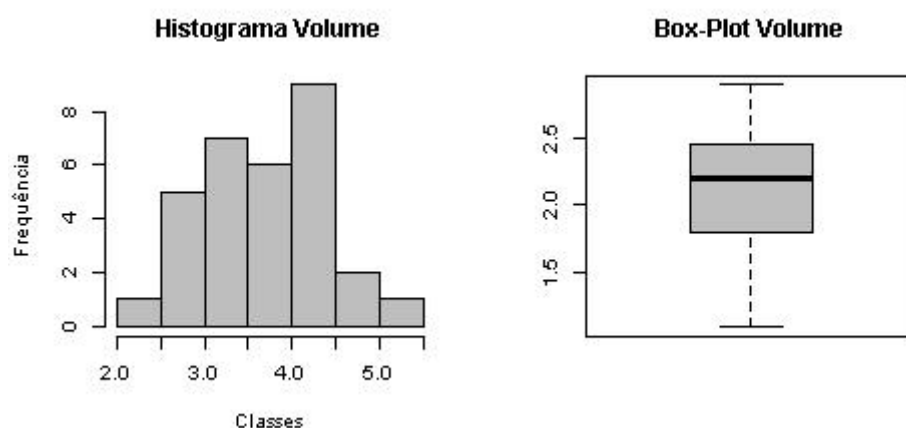
Onde “Referência<sub>1</sub>” e “Referência<sub>2</sub>” correspondem aos limites citados por Andriotti (2003) para assimetria e curtose, respectivamente. Fonte: O Autor (2017)

Tabela 6: Resultados dos testes de normalidade executados para as variáveis volume após a transformação logarítmica.

Variável	KS	Valor-p	JB	Valor-p	SW	Valor-p
<b>Volume</b>	0,12	0,70	0,63	0,73	0,97	0,63

Fonte: O Autor (2017).

Figura 9: Histogramas e box-plots para os volumes após transformação logarítmica.



Fonte: O Autor (2017)

### 5.3 Resultados das previsões

Como critério de avaliação dos métodos IDW, foram utilizados: o erro médio (ME) e o erro médio quadrático (RMSE), obtidos através da validação cruzada fornecida pelo ArcGis®. Para o ME valores mais próximos de zero foram preferíveis e para o RMSE quanto menor o valor encontrado, melhor.

O ajuste da vizinhança  $d$  o IDW que apresentou menores erros foi de no máximo 10 vizinhos e de no mínimo 4 vizinhos em oito setores, o peso atribuído a

cada vizinho foi de 1. A partir dos parâmetros descritos, a predição determinística IDW encontrou um ME de 0,7328 e RMSE de 33,6991. É notável que valores dos erros foram elevados, principalmente o RMSE. No entanto, o conjunto de dados para a variável volume é heterogêneo, como estudado na análise exploratória dos dados. Vale ressaltar que como o método de predição IDW é determinístico não houve a transformação na escala dos dados.

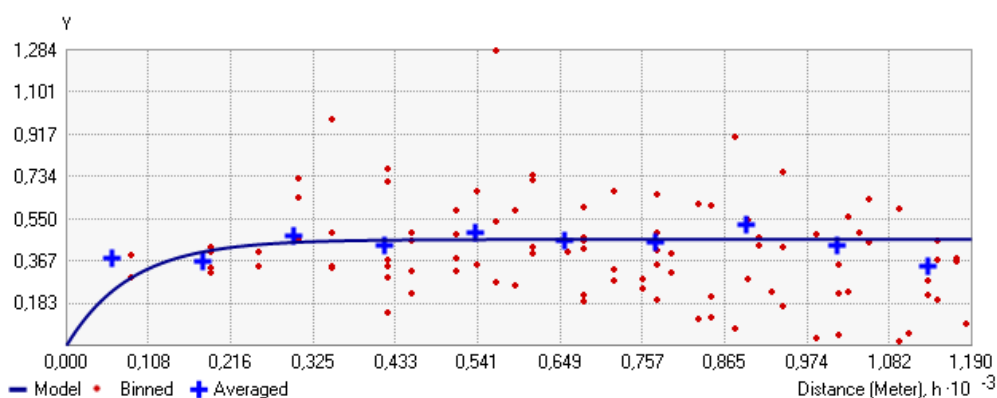
A análise do semivariograma não apontou a tendência de anisotropia, portanto o modelo foi ajustado considerando a isotropia. Para ajuste do modelo foi definido a distância do passo de 1.190 metros, dividido em 10 classes. O modelo de equação que melhor se ajustou ao semivariograma foi o modelo exponencial. Para o ajuste de vizinhança foi estabelecido um número máximo de vizinhos de 5 e mínimo de 2, divididos em 4 seções. Na Tabela 7 se encontram os valores dos parâmetros para o modelo ajustado e na Figura 10 é apresentado o semivariograma ajustado para o conjunto de dados utilizados.

Tabela 7: Parâmetros encontrados no semivariograma ajustado

Modelo	Co	C	Co + C	$\Theta$	DE%
Exponencial	0	0,4605	0,4605	250,7465	100%

Onde: Co corresponde ao efeito pepita; C a contribuição; Co + C ao patamar;  $\Theta$  ao alcance; e DE% ao grau de dependência espacial. Fonte: O Autor (2017)

Figura 10: Semivariograma ajustado



Fonte: O Autor (2017).

Ao analisar a Tabela 7 é notável o valor 0 para efeito pepita, esse valor altamente desejado (ANDRIOTTI, 2003; MELLO, 2004; WEBSTER e OLIVER, 2007). Segundo a classificação de Cambardella et al. (1994) o grau dependência espacial foi enquadrado em um nível alto (>75%), sendo o melhor resultado possível uma vez a dependência espacial é fundamental para a aplicação da geoestatística (Cambardella et al. 1994; Mello 2004; Assis 2005).

O resumo dos erros resultantes da validação cruzada da Krigagem para o número de peças mensuradas se encontra na Tabela 8. No anexo 4 Encontra-se o relatório proveniente da validação cruzada.

Tabela 8: Validação cruzada da Krigagem para o número de peças mensuradas.

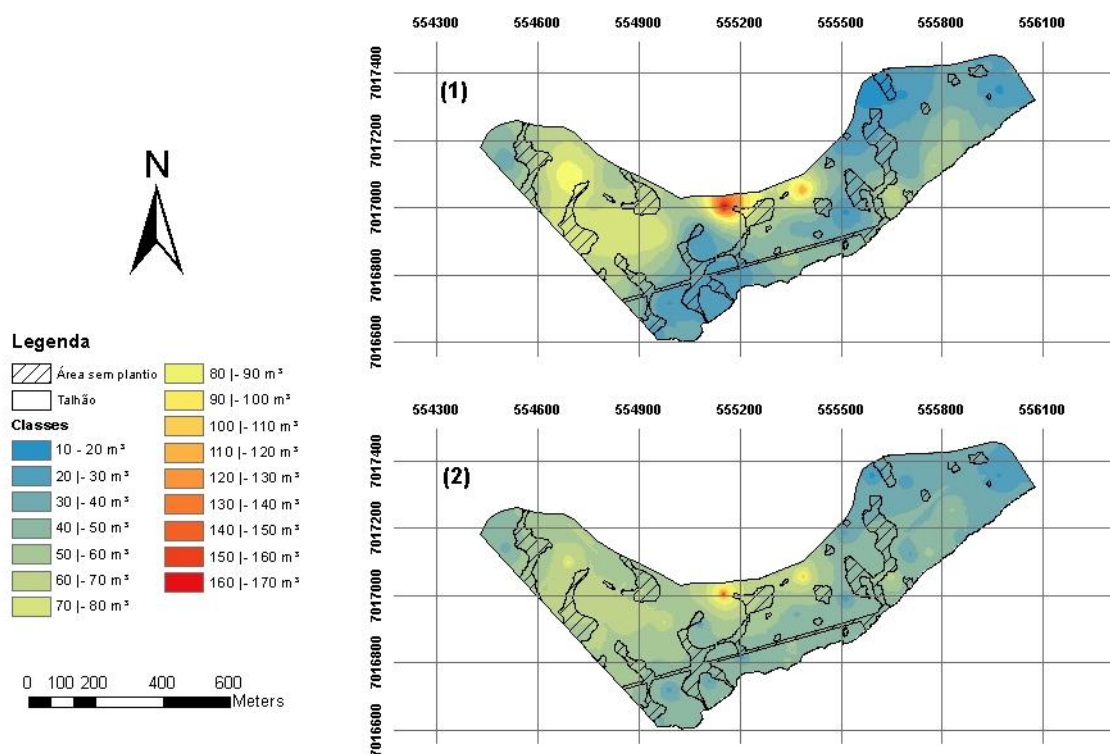
<b>Tipo de Erro</b>	<b>ME</b>	<b>RMSE</b>	<b>MSE</b>	<b>RMSSE</b>	<b>ASE</b>
<b>Valor</b>	0,7062	35,1808	-0,0942	1,1168	38,3424

Onde: “ME” é o erro médio; “RMSE” é o erro médio quadrático; “MSE” é o erro médio padronizado; “RMSSE” é o erro médio quadrático padronizado; e “ASE” é a média do erro padrão. Fonte: O Autor (2017).

Tanto os métodos IDW e Krigagem Ordinária resultaram em erros elevados e que subestimaram os valores que foram calculados pelo método LIS (observa-se RMSE maior que 1). Provavelmente estes erros ocorreram devido a amostras com elevados valores estarem isoladas, não possuindo nenhum vizinho com valores próximos.

Para melhor representação dos mapas provenientes do IDW e da Krigagem, assim como o posterior do volume, foram definidas classes com intervalos de 10 m<sup>3</sup>, representadas pelas mesmas cores a fim de facilitar a visualização e análise dos mapas. Nos mapas gerados, as classes com menores valores foram representadas por tons mais fortes de azul e as classes com maiores valores em tons mais fortes de vermelho (Figura 11).

Figura 11: Mapas gerados através do método Krigagem Ordinária (1) e IDW (2).



Fonte: O Autor (2017)

Ambos os mapas foram visualmente parecidos e seguiram as mesmas tendências da distribuição espacial dos valores. A Tabela 9 apresenta as áreas ocupadas por cada classe para ambas as metodologias e suas devidas proporções em relação à área total. Observa-se que para serem efetuados os cálculos de volume foram utilizados os valores centrais de cada classe.

O mapa gerado através do IDW apresentou menor número de classes de volume, sendo mais suave que o modelo mapa oriundo da Krigagem. O menor número de classes é justificado principalmente pelo peso atribuído às distâncias que foi de 1, onde quanto o maior o peso atribuído maior seria a representatividade das distâncias, tornando o gradiente de valores menos suave, no entanto o uso de um peso superior ao utilizado aumentou consideravelmente os erros provenientes da validação cruzada.

Tabela 9: Classes de número de peças estimados assim como suas respectivas proporções em relação a área ocupada.

Classes	IDW			Krigagem		
	Área (ha)	% Área	Volume (m³)	Área (ha)	% Área	Volume (m³)
10  - 20	-	-	-	0,87	2,01%	13,01
20  - 30	1,81	4,2%	45,18	8,15	18,94%	203,84
30  - 40	8,13	18,89%	284,63	9,11	21,17%	318,95
40  - 50	14,75	34,27%	663,94	7,27	16,9%	327,34
50  - 60	10,56	24,53%	580,76	5,39	12,53%	296,71
60  - 70	6,76	15,71%	439,65	4,89	11,36%	317,79
70  - 80	0,57	1,33%	43,08	5,46	12,69%	409,75
80  - 90	0,25	0,59%	21,61	1,02	2,37%	86,56
90  - 100	0,11	0,26%	10,82	0,32	0,74%	30,34
100  - 110	0,043	0,099%	4,51	0,19	0,44%	20,10
110  - 120	0,027	0,062%	3,07	0,12	0,28%	13,93
120  - 130	0,019	0,044%	2,35	0,11	0,26%	14,09
130  - 140	0,0015	0,003%	0,2	0,071	0,17%	9,65
140  - 150	-	-	-	0,043	0,1%	6,28
150  - 160	-	-	-	0,017	0,039%	2,59
160  - 170	-	-	-	-	-	-

Onde, "CC" corresponde ao centro de classe; e "% Área" corresponde a proporção da área ocupada em relação a área total. Fonte: O Autor (2017).

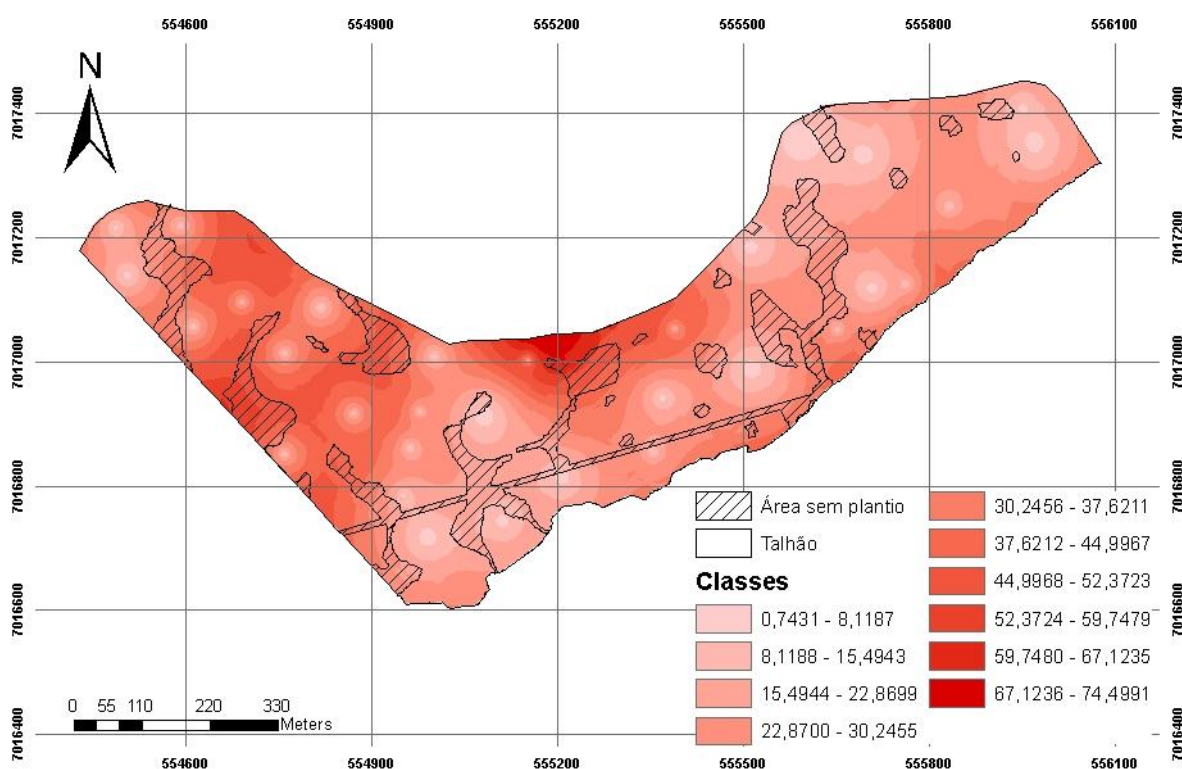
A partir da média ponderada dos volumes encontrados para cada classe foi possível obter as estimativas de volume total e volume por hectare ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) para a área de estudos. Por meio do método dos Inversos das Distâncias foi encontrado um volume total de 2.099,80  $\text{m}^3$  e 48,78  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . Já na predição realizada por meio da Krigagem foram obtidos 2.070,92  $\text{m}^3$  e 48,11  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Analisando os erros ME e RMSE resultantes das interpolações constata-se que o ME derivado da Krigagem foi inferior ao encontrado através do inverso das distâncias ( $0,7062 < 0,7328$ ), entretanto o RMSE foi inferior no método IDW ( $35,1807 < 33,6991$ ). É notável que os valores de RMSE estão bem acima do valor ideal que seria o mais próximo possível de 1. Os elevados erros resultantes das

validações cruzadas sugerem maiores imprecisões em ambos os métodos. A fim de reduzir os erros e aumentar a precisão do levantamento seria necessária a coleta de maior número de amostras uma vez que uma maior superfície da área de estudos seria representada, tornando as predições mais precisas.

. Uma característica interessante da Krigagem é a possibilidade de se conhecer a precisão obtida. Na Figura 12 está inserido o mapa com os erros padrões obtidos por essa técnica, onde os tons mais escuros de vermelho apresentam os maiores erros e os menores erros são representados pelos tons mais claros. Observa-se que a maior incidência de erro se deu onde foram estimados os maiores volumes.

Figura 12: Mapa dos erros padrões obtidos através da Krigagem

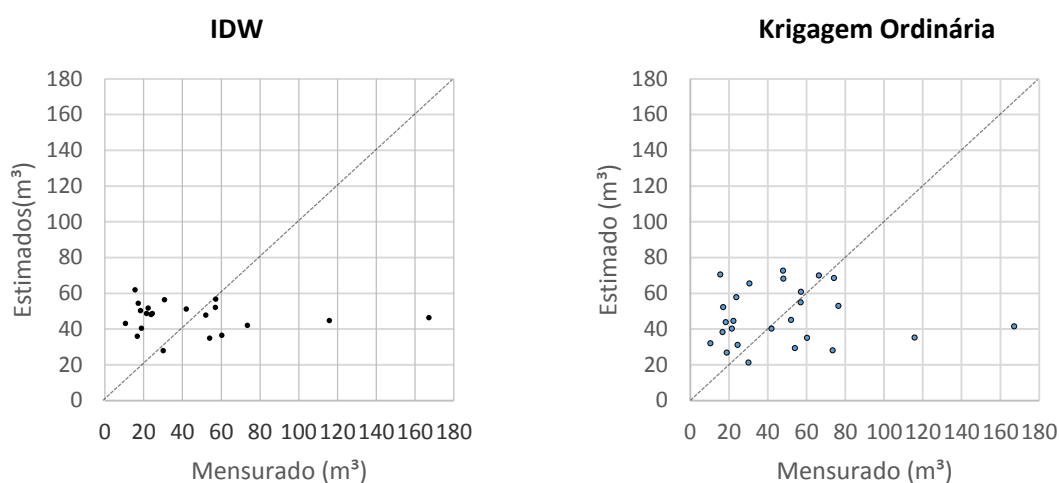


Fonte: O Autor (2017)

A Figura 13 apresenta as diferenças nos valores interpolados e mensurados através de ambas as técnicas. A linha tracejada transversal apresenta os pontos onde as diferenças entre os valores estimados e os reais seriam nulos, portanto,

quanto mais distantes dessa linha, mais imprecisa foi a predição. A Figura 13 é outra maneira de ilustrar graficamente os elevados erros ocorridos, já apresentados pelos erros da validação cruzada. Observa-se a relação entre os valores mensurados e estimados foi maior na Krigagem Ordinária. Os conjuntos de valores utilizados na validação cruzada exportados do ArcGIS® se encontram nos anexos.

Figura 13: Relação entre mensurados e estimados pelo Inverso das Distâncias e Krigagem Ordinária.



Fonte: O Autor (2017)

## 5.4 Comparações entre as estimativas de volume

Os volumes obtidos através dos três enfoques testados estão apresentados na Tabela 10:

Tabela 10: Resultados obtidos através dos três métodos adotados para estimar o volume de resíduos juntamente com o valor estimado através de inventário florestal.

	LIS	IDW	KO	Simulação
<b>Volume (m³.ha⁻¹)</b>	49,17 m³	48,78 m³	48,11 m³	56,49 m³
<b>Volume Total</b>	2.116,75 m³	2.099,80 m³	2.070,92 m³	2.431,89 m³
<b>Teste Qui-quadrado</b>		4,24x10 <sup>-12</sup>	2,29x10 <sup>-13</sup>	1,02x10 <sup>-15</sup>

Onde, LIS significa *Linear Intercept Method* ou Linha Interceptadora, IDW significa Inverso das Distâncias e KO significa Krigagem Ordinária. Fonte: O Autor (2017).

É evidente que os três enfoques apresentaram valores inferiores ao valor estimado através do inventário florestal realizado pela empresa detentora da área de estudos. O valor que se manteve mais próximo foi o estimado apenas pelas médias das linhas interceptadoras e mesmo assim subestimou o resultado do inventário florestal em 315 m<sup>3</sup>. Os erros ocorridos em relação ao inventário florestal foram: 12,96% para o método LIS; 13,65% para o método de predição determinística IDW; e 14,84% para o método de predição estocástica Krigagem Ordinária. Através do teste de qui-quadrado conclui-se que todos os valores apresentam a hipótese nula, onde as variáveis são independentes, portanto apresentam diferenças significativas.

É interessante observar que a metodologia adotada na mensuração apenas considerou os resíduos superficiais, ignorando os resíduos sólidos presentes nas porções inferiores dos aglomerados ou enterrados no solo revirado. Devido ao processamento realizado pelo *Harvester*, sentido da parte inferior do fuste para a copa da árvore, os galhos inferiores e com maiores diâmetros se concentram nas porções inferiores dos aglomerados. Logo, essa pode ser uma explicação para os resultados encontrados serem inferiores à estimativa gerada pela empresa.

Apesar de inferior ao valor simulado, o método LIS apresentou um resultado satisfatório, uma vez que o intervalo de confiança encontrado foi de  $49,17 \pm 12,26$  m<sup>3</sup>, sendo uma alternativa interessante, de rápida e fácil aplicação além de baixo custo, para levantamentos envolvendo resíduos florestais em plantios comerciais. No entanto não é possível de se obter uma ideia da distribuição espacial como é proporcionada pelos métodos de predição.

Deve-se considerar que os interpoladores adotados utilizaram os valores de volume obtidos pela LIS como base para as interpolações. Portanto ao se analisar as diferenças nos volumes encontradas entre os métodos IDW e KO em relação ao volume total obtido pelo LIS encontrou-se uma diferença de 0,8% e 2,16%, respectivamente. Ao se aplicar o teste Qui-quadrado, conclui-se que o volume calculado com base no IDW não apresentou diferença significativa (valor-p 0,71), já a diferença encontrada no KO foi significativa (valor-p 0,31).

Ao aplicar o fator de conversão de 0,680 (SBS, 2006) para se obter o valor de toneladas por hectare torna possível a comparação entre os volumes encontrados no presente trabalho com valores encontrados por outros autores. Os valores após a aplicação do fator de conversão são: 33,43 t.ha<sup>-1</sup> para o método LIS; 33,17 t.ha<sup>-1</sup> para o IDW; e 32,71 t.ha<sup>-1</sup> para a KO.

Rodrigues (2017) ao quantificar a biomassa residual (acículas, ponteira, casca e galhos) após a atividade do primeiro desbaste em plantios de *Pinus taeda* L., no sudoeste do estado do Paraná, com idades entre 7 e 10 anos e espaçamento de 3 m x 2 m, encontrou valores variando entre 26,9 t.ha<sup>-1</sup> e 32,9 t.ha<sup>-1</sup> para resíduos secos em câmara de secagem. Brand et al. (2014) em um estudo realizado após a atividade de primeiro desbaste (12 e 14 anos de idade), segundo desbaste (16 anos de idade) e corte raso (24 anos de idade) em plantios de *Pinus taeda* L. localizados no Planalto Serrano Catarinense quantificou os resíduos (galhos e ponteiros) em 32,88 t.ha<sup>-1</sup>, 35,19 t.ha<sup>-1</sup>, 44,94 t.ha<sup>-1</sup>, 28,04 t.ha<sup>-1</sup> e 67,49 t.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. O autor pesou os resíduos com umidade variando entre 48% e 64%. Ortolan et al. (s. d.), apresentou os pesos de resíduos provenientes do desbaste e corte raso de florestas de *Pinus sp.*, estando entre 20 a 30 t.ha<sup>-1</sup> no desbaste e 30 a 48 t.ha<sup>-1</sup> no corte raso.

Percebe-se que, apesar das diferentes metodologias de quantificação, os valores encontrados não diferem muito com os encontrados por outros autores quando analisadas diferentes florestas com sistemas de manejo e características parecidas com o encontrado na área de estudo.

## 6 CONCLUSÃO

Dos três métodos utilizados o método da Linha Interceptadora foi o que apresentou resultados mais próximos ao obtidos pela empresa, podendo ser uma alternativa menos onerosa de recursos financeiros e tempo para o levantamento de variáveis relacionadas aos resíduos florestais em plantios comerciais.

Os valores encontrados são próximos dos encontrados por outros autores, para florestas com características parecidas com a estudada no presente trabalho, fortificando a precisão e acurácia do método.

Ambos os métodos de predição testados (IDW e Krigagem) apresentaram resultados parecidos, no entanto o método IDW foi o que apresentou um volume médio mais próximo do valor apresentado pela empresa. Quando comparado ao valor obtido pela Linha Interceptado não apresentou diferença significativa.

Os métodos de predição (IDW e Krigagem) apresentaram resultados com erros superiores ao encontrado pela Linha Interceptadora, porém contam com a vantagem de apresentar a dispersão espacial dos valores sobre a área de estudos, podendo ser utilizados junto ao método da Linha Interceptadora sendo uma ferramenta interessante para o planejamento florestal.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Devido à escassez de estudos envolvendo o uso da metodologia LIS para quantificar os resíduos florestais em plantios comerciais no Brasil, seria interessante estudar diferentes metodologias de aplicação do LIS, alterando as formas de distribuição e estrutura das unidades amostrais e a metodologia de levantamento dos diâmetros a fim de buscar a redução do erro oriundo principalmente pela dispersão não randômica dos resíduos.

Outra metodologia interessante que poderia ser estudada é o *Planar Intersect Method*, proposta por Brown (1971), uma vez que adiciona o elemento “altura” na amostragem, possibilitando a mensuração dos elementos lenhosos presentes abaixo da superfície dos aglomerados ou da serapilheira.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFLECK, D. L. R.; GREGOIRE, T. G.; VALENTINE, H. T. Design unbiased estimation in line intersect sampling using segmented transects. **Environmental And Ecological Statistics**, New Haven, v. 12, p.139-154, 2005.

ALBERTA Wildland Fuels Inventory Program: **Crew Information Manual** 2014. Environmental and Sustainable Resource Development. [S.l.: s.n.], 2014. 49 p.

ASSIS, A. L. **Definição da estratégia amostral em plantios de *Eucalyptus* spp. pelo uso da geoestatística**. 2005. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

AUGUSTO, O. F.; SOARES, W.; FERNANDÉZ, C. I. Mapping of the water table levels of unconfined aquifers using two interpolation methods. **Journal Of Geographic Information System**, [s.i.], v. 8, p.480-494, 2016.

BAILEY, G. R. A Simplified Method of Sampling Logging Residues. **The Forestry Chronicle**, Vancouver, Canadá, v. 46, p.288-303, 1970.

BIONDI, F.; AVERY, C.; MYERS, D. Geostatistically modelling stem size and increment in an old-growth forest. **Can. J. For. Res**, Ottawa, v. 24, p.1354-1368, 1994.

BRAND, M. A.; STÄHELIN, T. C. F.; FERREIRA, J. C.; NEVES, M. D. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 2, p.353-360, 2014.

BROWN, J. K. A Planar Intersect Method for Fuel Volume and Surface Area. **Forest Science**, [s.i], v. 17, p.96-102, 1971.

BROWN, J. K. **Handbook for inventorying of downed wood material**. Ogden, Utah: USDA Forest Service, 1974. 24 p.

CANFIELD, R. H. Application of the line interception method in sampling range vegetation. **Journal of Forestry**, v. 39, p. 388-394, 1941.

CARAM, R. O. **Reconstrução de séries e análise geostatística da precipitação do estado de minas gerais**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Meteorologia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

CRUZ FILHO, D.; SILVA, J. N. M. Avaliação da quantidade de resíduos lenhosos em florestal não explorada com técnicas de redução de impacto, utilizando amostragem por linha interceptadora, no Médio Mojú, Amazonia Oriental, Brasil. **Acta Amazonica**, Belém, Pa, v. 39, n. 3, p.527-532, 2009

CORROW, A. L. **Double sampling for coarse woody debris estimations following line intersect sample**. 2007. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Resource Conservation, University Of Montana, Missoula, 2010.

DE VRIES, P. G. **A General Theory on Line Intersect Sampling**: With application on logging residue inventory. Wageningen: Mededelingen Landbouwhogeschool, 1973. 23 p.

DIAS, L. A. F.; SILVA, J. A.; PINTOR, I. R.; OLIVEIRA, M. C. N.; FARIAS, J. R. B.; SIBALDELLI, R. N. R.; ALMEIDA, A. M. R. Métodos de interpolação de dados e distribuição espacial de *Macrophomina phaseolina* no solo. **XI Jornada Acadêmica da Embrapa Soja: Resumos estendidos**, Londrina, p.17-25, 2016.

DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. (eds) "**Análise Espacial de Dados Geográficos**". Brasília, EMBRAPA, 2004 (ISBN: 85-7383-260-6).

DU CROS, R. T.; LOPEZ, S. Preliminary study on the assessment of deadwood volume by the French national forest inventory. **Ann. For. Sci.**, Bordeaux, França, v. 66, p.302, 2009.

ESRI. **An overview of the extensions of ArcGIS**. 2017. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/main/about-arcgis-for-desktop-extensions.htm>>. Acesso em: 18 set. 2017.

ESRI. **How inverse distance weighted interpolation works**. Disponível em: <<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm>>. Acesso em: 13 set. 2017.

ESRI. **How Kriging works.** Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>>. Acesso em: 18 set. 2017.

ESRI. **Cross Validation.** 2017. Disponível em: <<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/geostatistical-analyst/cross-validation.htm>>. Acesso em: 18 set. 2017.

FONSÊCA, N. C. **Estimativa de biomassa e necromassa lenhosa acima do solo em floresta tropical úmida.** 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.

GUIMARÃES, R. E. **Inventário de necromassa em remanescentes florestais no estado do rio de janeiro.** 2015. 27 f. Monografia (Especialização) - Curso de MBA em Gestão Florestal, Economia Rural e Extensão, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

**Indústria Brasileira De Árvores – IBÁ.** Relatório IBÁ 2017. Brasília, 2017. Nº páginas 80.

JORDAN, G.J.; DUCEY, M.J.; GOVE, J.H. Comparing line-intersect, fixed-area, and point relascope sampling for dead and downed coarse woody material in a managed northern hardwood forest. **Can. J. For. Res**, [s.i.], v. 34, p.1766-1775, 2004.

KARPACHEV, S. P.; VJASCHELASV I. Z.; MAKSIM, A. B.; EVGENY, N. S. Quantitative Estimation of Logging Residues by Line- Intersect Method. **Croat. J. For. Eng**, [s.i.], v. 38, p.33-45, 2017.

KRIGE, D.G. A Statistical Approaches to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, v. 52, p.119-139, 1951.

LEAL, F. A. **Técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística aplicadas em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake para estimativa de volume.** 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

MATÉRN, B. A method of estimating the total length of roads by means of a line survey. **Studia Forestalia Suecica**, v. 18, p. 68-70, 1964.

MARTIN, A. J. Suitability of the line intersect method for sampling hardwood logging residues. **USDA Forest Service Research Paper** NE-339, 1976.

MARSHALL, P.L.; G. DAVIS; V.M. LEMAY. **Using line intersect sampling for coarse woody debris**. Forest Research, Technical Report 003, Ecology. 34 p, 2000.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S.; Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **R. Bras. Ci. Solo**, Lavras, v. 27, p.925-933, 2003.

MELLO, J. M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 122 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Recursos Florestais, ESALQ/USP, Piracicaba, 2004.

ORTOLAN, C; AZEVEDO, E. W.; ANTIQUEIRA A. C.; ORTOLAN, F. A. S.; BONISH, H. **Aproveitamento da biomassa residual de colheita florestal**. [S.l.: s. n.]. 10 p.

PICKFORD, S. G.; HAZARD, J. W. Simulation studies on line intersect sampling of forest residue. **Forest Science**, v. 24, p.469-483, 1978.

REIS, A. A.; MELLO, J. M.; JÚNIOR, F. W. A.; CARVALHO, L. M. T. Estratificação em cerrado sensu stricto a partir de imagens de sensoriamento remoto e técnicas geoestatísticas. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 43, n. 106, p.377-386, 2015.

RIBEIRO, A.; NETTO, S. P.; STALL, D.; LEÃO. R. A.; NASCIMENTO, F. A. F. Proposta metodológica para realização de um inventário florestal de necromassa: um estudo de caso. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p.121-127, 2012.

RODRIGUES, C. K. **Viabilidade do aproveitamento da biomassa energética na colheita de povoamento de Pinus em primeiro desbaste**. 2017. 115 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós- Graduação em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Centro-oeste, Irati, 2017.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; WATZLAWICK, L. F. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. edição. Curitiba: Multi-graphic Gráfica e Editora, 2014. 409 p.

SANTOS, P. C.; SANTANA, A. C.; QUEIROZ, J. C. B.; BARROS, P. L. C.; SANTANA, A. L. Estimação volumétrica de resíduos lenhosos de madeira em uma floresta tropical através da krigagem ordinária, Paragominas, Estado do Pará. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 4, p.959-968, 2014.

SETIANTO, A.; TRIANDINI, T. Comparison of kriging and inverse distance weighted (idw) interpolation methods in lineament extraction and analysis. **J. Se Asian Appl. Geol.**, Yogyakarta, Indonésia, v. 5, n. 1, p.21-29, 2013.

**SFB - Serviço Florestal Brasileiro. Manual de campo: procedimentos para coleta de dados biofísicos e socioambientais**. Inventário Florestal Nacional. – Brasília: SFB, jan. 2015.

**Sociedade Brasileira de Silvicultura – SFB**. Fatos e Números do Brasil Florestal. São Paulo, 2006. Nº páginas 106.

VAN WAGNER, C. E. The line intersect method in forest fuel sampling. **Bethesda: Forest Science**, v. 12, n. 1, p. 20 – 26, 1968.

VAN WAGNER, C. E.; WILSON, A. L. Diameter Measurement in the Linear Intersect Method. **Forest Science**, [s.i.], v. 22, p.230-232, 1976.

VAN WAGNER, C. E. **Practical aspects of the line intersect method**. Chalk River: Minister of Supply and Services. Canada, 1982. 10 p.

WARREN, W. G.; OLSEN, P. F. A line intersect technique for assessing logging waste. **Bethesda: Forest Science**, v. 11, p. 267 – 276, 1964.

WARREN, W. G. **Line intersect sampling: an historical perspective**. In: **State-of-the-art methodology of forest inventories: A symposium proceedings** (V. J. LaBau and T. Cunia, eds.). USDA Forest Service General Technical Report PNW-GTR- 263, pp. 33-38, 1990.

WOLDENDORP, G.; SPENCER, R.D.; KEENAN, R.J.; BARRY, S. **An analysis of sampling methods for coarse woody debris in Australian forest ecosystems.** Canberra: BRS – Bureau of Rural Science, 2002. 94p. Report for the National Greenhouse Strategy, Module 6.6.

WOODALL, C.W.; HEATH, L.S.; SMITH, J.E. National inventories of down and dead woody material forest carbon stocks in the United States: Challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam. v.256, n.3, p.221-228, 2008.

ZIMMERMAN, D.; PAVLIK, C.; RUGGLES, A.; ARMSTRONG, M. P. An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting. **Mathematical Geology**, [s.i.], v. 31, n. 4, p.375-390, 1999.

### ANEXO 1: Lista de dados coletados nas linhas amostrais

Amostra	D (cm)	Amostra	D (cm)	Amostra	D (cm)	Amostra	D (cm)
1	5	7	4,4	14	9,3	19	5,4
1	5,4	8	7,9	14	4,2	19	6,8
1	8,8	8	4,4	14	4,8	19	5,5
1	4,9	8	6,4	15	3,6	19	7,1
1	4	8	9,2	15	5,6	19	6
1	9,2	9	7,6	15	10,4	19	7
1	4,6	9	11,1	15	4,1	19	4,3
1	4,2	9	8,3	15	4,4	20	4,5
1	7,4	9	4,5	16	5,3	20	9,2
1	4	9	5,7	16	9,3	20	5,6
2	4,4	9	15,3	16	4,4	20	11,3
2	4,7	9	15	16	7,8	20	5
2	8,2	9	24	16	5,4	20	4,3
2	3,6	9	8,3	16	5,1	20	4,3
2	9	10	4,1	16	7,7	20	5,5
3	13,2	10	4,8	16	15,5	20	5,8
3	6,6	10	6,2	16	5,8	20	5,1
3	8,1	10	7,8	17	4,5	20	8,5
3	15	10	9,1	17	11,9	21	5,3
3	8,2	10	10,8	17	4,9	21	4,1
3	4,6	10	4,2	17	5,6	21	4,1
3	7,7	10	4	17	4,3	21	8,3
4	4,8	11	13,5	17	15	21	6,2
4	4	11	11,5	17	12,2	21	11,8
4	10	11	5,9	17	13,2	21	7,2
4	5	11	6,2	17	12,1	22	6,8
4	4,1	11	4,2	18	5	22	5,7
4	6,9	11	7,1	18	7,3	22	4
5	4,1	11	10,5	18	10	22	4,2
5	5,4	11	4,9	18	10,1	22	7,1
5	7,7	11	4,8	18	8,7	22	4,3
5	10,1	11	4,3	18	10,9	22	5,7
5	9	12	5,7	18	8	22	10,7
6	6	12	6,5	18	10,9	22	6,5
6	4,7	12	8,6	18	5,3	22	7,4
6	25	12	4,4	18	6,6	22	9,3
6	5,3	12	9	18	4,6	22	9,4
6	5,2	12	4,7	18	8,1	22	7,5
6	9,9	13	5,6	18	5,2	22	6
6	5,5	13	5,8	18	4,8	23	5,5
6	5,1	13	7,1	18	5,9	23	7,3
7	9	13	4	19	4,6	23	7,1
7	8,1	13	8,3	19	20	23	12
7	5,3	13	4,8	19	8,9	23	7,5
7	5,6	13	6,7	19	4,8	23	4,5
7	6	13	5,4	19	4,8	23	4,8

(Continua..)

(...continuação)	Amostra	D (cm)	Amostra	D (cm)	Amostra	D (cm)
	23	4,4	26	6	30	5
	23	10	26	9,4	30	4,9
	23	10,2	26	6,4	31	4
	23	8	27	16	31	4,6
	23	4,5	27	13,5	31	6
	23	4,6	27	8	31	8,6
	24	7,3	27	10	31	9,5
	24	5,1	27	4,9	31	8,7
	24	4,6	27	4,6	31	5,7
	24	7	27	4	31	6,2
	24	5	27	5,5	31	4,8
	24	6,2	28	34	31	10,1
	24	10,4	28	6,4	-	-
	24	9,1	28	4,9	-	-
	24	12,2	28	4,1	-	-
	24	11,9	28	9	-	-
	24	11,5	28	6,7	-	-
	24	10,4	28	12,5	-	-
	24	8,5	28	10	-	-
	24	10	28	8,2	-	-
	25	14,7	28	5,3	-	-
	25	4	28	6,5	-	-
	25	10,4	28	5,2	-	-
	25	6,6	28	5,5	-	-
	25	4	28	7,8	-	-
	25	7	28	7,3	-	-
	25	5,7	28	10,1	-	-
	25	4,1	29	4,6	-	-
	25	7	29	5	-	-
	25	4,3	29	9,1	-	-
	25	4	29	8,7	-	-
	26	4,1	29	4,2	-	-
	26	4	29	5,2	-	-
	26	5,9	29	4,2	-	-
	26	14	29	4,4	-	-
	26	4,1	29	5,4	-	-
	26	6,3	29	11,3	-	-
	26	5,1	29	8,7	-	-
	26	7	29	4,9	-	-
	26	7,1	29	7,5	-	-
	26	6	29	8,2	-	-
	26	6,4	29	5,7	-	-
	26	5,9	29	5,8	-	-
	26	4,9	30	4	-	-
	26	4,7	30	11,5	-	-
	26	4,8	30	5	-	-

Onde: D corresponde ao diâmetro em centímetros. Fonte: O Autor (2017).

## ANEXO 2: Parâmetros obtidos para cada linha amostral.

Amostra	D. Médio (cm)	No. Resíduos	Soma de D (cm)	Volume (m <sup>3</sup> )
1	5,75	10	57,5	30,09
2	5,98	5	29,9	16,67
3	9,06	7	63,4	53,96
4	5,80	6	34,8	18,79
5	7,26	5	36,3	23,71
6	8,34	8	66,7	73,40
7	6,40	6	38,4	21,50
8	6,97	4	27,9	17,05
9	11,09	9	99,8	115,69
10	6,37	8	51	30,61
11	7,29	10	72,9	51,94
12	6,48	6	38,9	22,30
13	5,96	8	47,7	24,46
14	6,10	3	18,3	10,46
15	5,62	5	28,1	15,51
16	7,37	9	66,3	47,96
17	9,30	9	83,7	76,51
18	7,43	15	111,4	74,10
19	7,10	12	85,2	66,29
20	6,28	11	69,1	40,14
21	6,71	7	47	29,62
22	6,76	14	94,6	56,94
23	6,95	13	90,4	58,09
24	8,51	14	119,2	91,04
25	6,53	11	71,8	47,83
26	6,23	18	112,1	65,12
27	8,31	8	66,5	57,05
28	8,97	16	143,5	167,04
29	6,43	16	102,9	60,25
30	6,08	5	30,4	18,28
31	6,82	10	68,2	41,87

Onde, “Soma de D” corresponde à soma dos diâmetros para amostra em centímetros, “D. médio” ao diâmetro médio de cada amostra em centímetros e “No. de peças” ao número de observações para cada amostra. Fonte: O Autor (2017)

### ANEXO 3: Resultados da validação cruzada para a técnica IDW.

Amostra	Mensurado (m <sup>3</sup> )	Estimado (m <sup>3</sup> )	Erro (m <sup>3</sup> )
1	40,14	52,02	11,8787
2	29,62	54,59	24,9698
3	58,09	59,49	1,4047
4	91,04	52,05	-38,9963
5	65,12	61,02	-4,1029
6	47,83	59,50	11,6620
7	66,29	52,92	-13,3696
8	74,10	55,76	-18,3336
9	47,96	61,40	13,4416
10	76,50	54,78	-21,7227
11	57,05	56,96	-0,0952
12	41,87	51,33	9,4608
13	167,04	46,48	-120,5580
14	15,51	62,05	46,5398
15	24,46	48,81	24,3550
16	22,30	51,89	29,5856
17	51,95	47,99	-3,9554
18	30,61	56,56	25,9465
19	115,69	44,94	-70,7463
20	17,05	54,60	37,5497
21	21,50	48,89	27,3915
22	73,40	42,20	-31,2081
23	23,71	48,37	24,6636
24	60,25	36,61	-23,6309
25	18,79	40,63	21,8437
26	16,67	36,04	19,3727
27	30,09	28,07	-2,0112
28	53,96	35,06	-18,8985
29	10,46	43,27	32,8114
30	18,28	50,40	32,1252
31	56,94	52,29	-4,6567

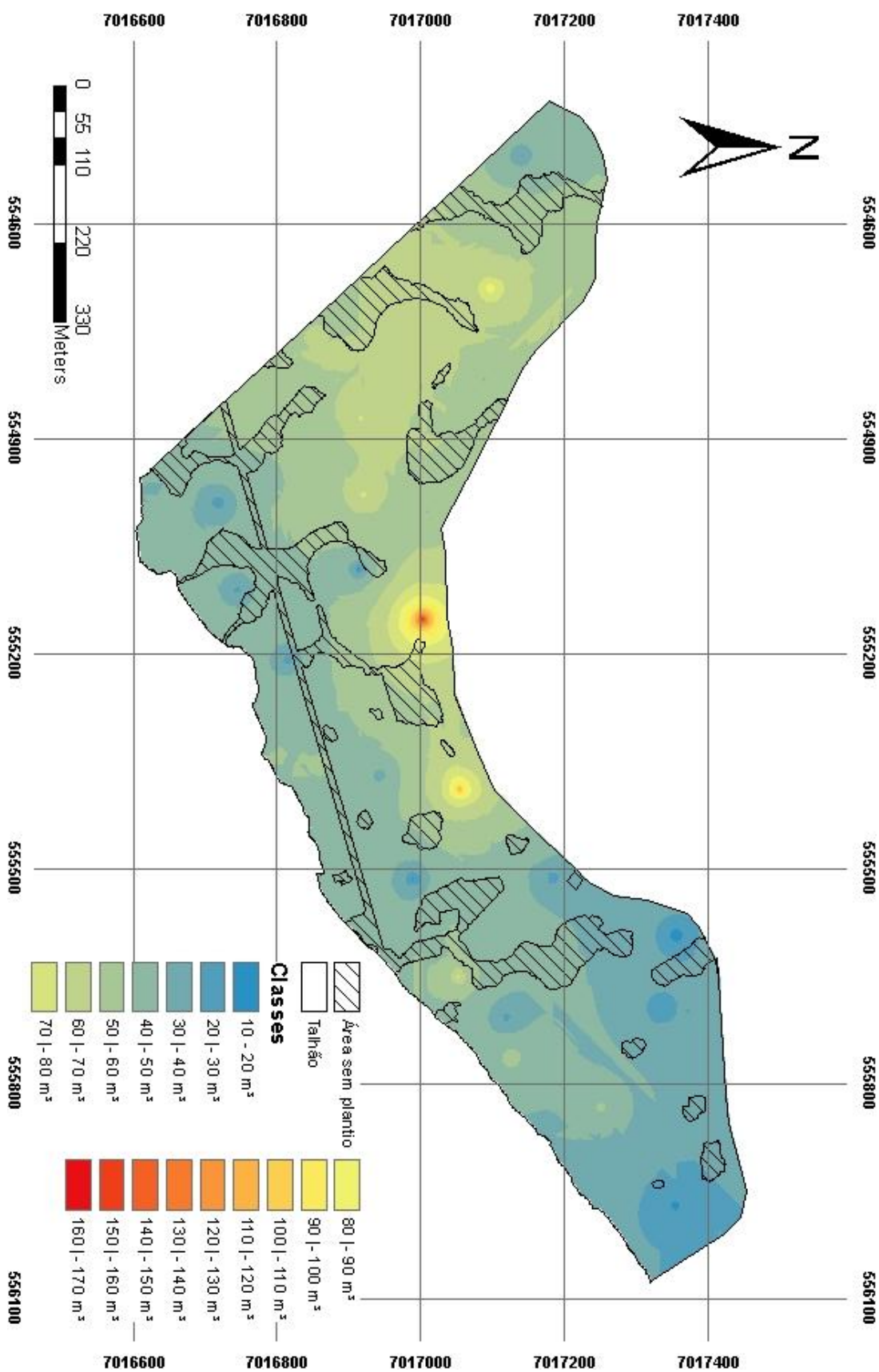
Fonte: O Autor (2017)

#### ANEXO 4: Resultados da validação cruzada da Krigagem Ordinária.

Amostra	Mensurado (m <sup>3</sup> )	Estimado (m <sup>3</sup> )	Erro (m <sup>3</sup> )	Erro padrão	Erro padronizado
1	40,14	50,28	10,1402	39,2155	0,2586
2	29,62	60,27	30,6552	43,8157	0,6996
3	58,09	69,21	11,1178	51,3477	0,2165
4	91,04	65,59	-25,4506	45,8090	-0,5556
5	65,12	72,31	7,1876	50,7793	0,1415
6	47,83	72,66	24,8281	55,3335	0,4487
7	66,29	70,06	3,7749	61,2322	0,0616
8	74,10	68,64	-5,4610	48,8378	-0,1118
9	47,96	68,26	20,2986	50,3919	0,4028
10	76,51	52,97	-23,5400	32,0521	-0,7344
11	57,05	60,96	3,9113	36,6230	0,1068
12	41,87	40,26	-1,6066	26,1882	-0,0613
13	167,04	41,51	-125,5289	32,9237	-3,8127
14	15,51	70,54	55,0213	49,6599	1,1080
15	24,46	31,18	6,7207	24,2474	0,2772
16	22,30	44,65	22,3457	34,6692	0,6445
17	51,95	45,16	-6,7834	34,5399	-0,1964
18	30,61	65,49	34,8739	46,2668	0,7538
19	115,69	35,22	-80,4663	27,0752	-2,9720
20	17,05	52,39	35,3372	41,5243	0,8510
21	21,50	40,38	18,8813	32,9372	0,5733
22	73,40	28,17	-45,2312	21,2046	-2,1331
23	23,71	57,86	34,1551	35,6480	0,9581
24	60,25	35,16	-25,0818	24,0201	-1,0442
25	18,79	26,96	8,1715	21,1031	0,3872
26	16,67	38,40	21,7316	27,2486	0,7975
27	30,09	21,29	-8,7910	15,4354	-0,5695
28	53,96	29,37	-24,5899	24,2307	-1,0148
29	10,46	32,04	21,5779	25,8983	0,8332
30	18,28	43,87	25,5901	31,5485	0,8111
31	56,94	55,05	-1,8977	42,6686	-0,0445

Fonte: O Autor (2017)

### ANEXO 5: Mapa resultante da predição pela técnica Inverso das Distâncias.



### ANEXO 6: Mapa resultante da predição pelo método da Krigagem Ordinária.

