Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Estudo de parâmetros populacionais de plantios clonais de Eucalyptus spp. a partir de nuvens de pontos obtidos com escaneamento a laser aerotransportado

Danitiele Cristina França Laranja

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba 2016

Danitiele Cristina França Laranja Engenheira Florestal

Estudo de parâmetros populacionais de plantios clonais de *Eucalyptus* spp. a partir de nuvens de pontos obtidos com escaneamento a laser aerotransportado

Orientador:

Prof. Dr. LUIZ CARLOS ESTRAVIZ RODRIGUEZ

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Laranja, Danitiele Cristina França

Estudo de parâmetros populacionais de plantios clonais de *Eucalyptus* spp. a partir de nuvens de pontos obtidos com escaneamento a laser aerotransportado / Danitiele Cristina França Laranja. - - Piracicaba, 2016.

137 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. LiDAR 2. Dupla amostragem 3. Estrutura do dossel 4. Detecção de árvores individuais I. Título

CDD 634.9734 L318e

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

Aos meus pais, Antonio e Lidia. Ao meu irmão, Matheus.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

"Existem momentos na vida da gente, em que as palavras perdem o sentido ou parecem inúteis, e, por mais que a gente pense numa forma de empregá-las elas parecem não servir. Então a gente não diz, apenas sente" (Sigmund Freud). Esse é um desses momentos, difícil expressar o agradecimento a todos que de alguma forma fizeram parte deste projeto. Agradeço em primeiro lugar à Deus que me concedeu esta oportunidade e me permitiu grandes conquistas e aprendizados.

Aos meus pais Antonio e Lidia, por todo o apoio, paciência, amor e carinho que me dedicaram. Obrigada por serem meus exemplos, me ensinando grandes valores como honestidade e humildade. Ao meu irmão Matheus, meu lindinho, pelo amor e por me apoiar sempre que preciso. À minha família, por todos os bons momentos que me proporcionaram!!!

Ao Alex pelo amor, companheirismo, paciência e dedicação. Mesmo com a distância em alguns meses, se fez sempre presente!!

Ao Prof. Luiz Carlos Estraviz Rodriguez pela orientação e ensinamentos. Obrigada pela paciência, suporte, conversas e confiança nesses anos.

Ao grupo GET-LiDAR: Eric Görgens, André Silva, Tiago de Conto, Débora Camilo, Julianne Oliveira, Alexandre Camargo, Luísa Carvalho, Gustavo Almeida e Danilo Almeida pelas amizades e colaborações durante o desenvolvimento desse trabalho. Ao Eric Görgens pelo aprendizado, sempre disposto a ajudar e dividir o conhecimento, e pelas palavras amigas e de apoio. Sua ajuda foi imprescindível no desenvolvimento desse trabalho!! Ao André Silva pelas discussões, sugestões e momentos de encorajamento e bom humor!!

Aos amigos do Centro de Métodos Quantitativos (CMQ), em especial ao Jefferson Polizel pelo auxílio sempre que necessário, e aos amigos de laboratório pelos cafés, conversas e momentos de descontração, que tornaram a realização desse projeto possível e mais agradável!

I would like to thank Professor Nicholas Coops for giving me the opportunity to conduct my research in his lab. I am grateful for his confidence, hospitality and kindly guidance on my project. I also thank all people in Integrated Remote Sensing Studio - IRSS who makes that lab a good place to stay. Furthermore, I am thankful to Piotr Tompalski to assisting me during my analyses and writing.

A Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), particularmente ao programa de Pós-graduação em Recursos Florestais por possibilitar o desenvolvimento dessa pesquisa. Agradeço especialmente a Giovana pelas conversas, desabafos, e disposição em sempre ajudar.

I want to thank the University of British Columbia (UBC) and its staff for providing the conditions to develop this research.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro a minha pesquisa.

I thank Canadian Bureau of International Education for the financial support and for allowing me to perform my research in Canada.

A família que me acolheu com carinho em Piracicaba: Aline, Amanda, Ana, Braks, Jãngs, Luciana, Trips e Zãngs. Obrigada pelos bons momentos, conselhos, pelas gordices e por não me deixar desanimar, sem vocês o fardo seria bem mais pesado!!!

Aos amigos sempre presentes desde a graduação, dividindo momentos e conselhos, a Flã, Lãmpa, Koxo e Xau.

I would like to thank all friends that I knew in Canada. Thank you for the great time, you made my stay in Vancouver better. My sincere appreciation to Sandra, Lawrence and Alicia whom kindly received me. Thank for your patience, help and the opportunity to learn about Canadian culture. I also thank Xuan Guo, Ju e Fábio for the great time that we spent together.

"O correr da vida embrulha tudo. A vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta.

O que ela quer da gente é coragem."

(Guimarães Rosa)

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Revisão Bibliográfica	20
1.1.1 Inventário Florestal	20
1.1.2 Tecnologia de escaneamento a laser aerotransportado (ALS)	21
1.1.3 Aplicações da tecnologia ALS na área florestal	23
1.1.4 Abordagem baseada em área (ABA)	25
1.1.5 Detecção de árvores individuais (ITD)	25
1.1.5.1 Processamento digital de Imagem (PDI)	27
1.1.6 Caracterização da estrutura da floresta	29
Referências	30
2 REDUÇÃO DO ERRO AMOSTRAL NA ESTIMATIVA DO VOLUM	E DE
POVOAMENTOS DE <i>EUCALYPTUS</i> spp. POR MEIO DE ESCANEAMENTO L	.ASER
AEROTRANSPORTADO	37
Resumo	37
Abstract	37
2.1 Introdução	38
2.2 Material e Métodos	40
2.2.1 Área de estudo	40
2.2.2 Levantamento dos dados ALS	41
2.2.3 Levantamento de campo	42
2.2.4 Delineamentos amostrais	43
2.2.5 Intensidade amostral	46
2.3 Resultados e Discussão	46
2.4 Conclusão	49
Agradecimentos	49
Referências	49
3 CARACTERIZAÇÃO DAS DIFERENÇAS ENTRE CLONES DE <i>EUCAL</i> Y	′PTUS
ATRAVÉS DE ESCANEAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO	53
Resumo	53
Abstract	54

3.1	Introdução	54
3.2	Material e métodos	57
3.2.1	Área de estudo	57
3.2.2	Levantamento dos dados de campo	58
3.2.3	Levantamento dos dados ALS	59
3.2.4	Análises estatísticas	63
3.3	Resultados	63
3.3.1	Caracterização da estrutura da floresta	63
3.4	Discussão	68
3.5	Conclusão	70
Agrad	decimentos	70
Refere	ências	71
4 DI	ETECÇÃO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS EM NUVENS DE	PONTOS
	ADAS PELO ESCANEAMENTO A LASER AEROTRANSPORT	
POVC	DAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> spp	79
Resur	mo	79
Abstra	act	79
4.1	Introdução	80
4.2	Material e métodos	
4.2.1	Área de estudo	81
4.2.2	Levantamento dos dados de campo	82
4.2.3	Levantamento dos dados ALS	83
4.2.4	Processamento dos dados de campo	84
4.2.5	Processamento dos dados ALS	85
4.2.6	Modelo digital de alturas (CHM)	87
4.2.7	Algoritmos de detecção de árvores individuais	91
4.2.8	Estatísticas para avaliação dos algoritmos	
4.3	Resultados	99
4.3.1	Caracterização das parcelas	99
4.3.2	Características dos CHMs	100
4.3.2.	1 Efeito do tamanho dos pixels	100
4.3.2.2	2 Efeitos da suavização	101
4.3.3	Detecção de árvores individuais	102
4.3.3.	1 Máximo local (LM)	102

4.3.3.2	Curvatura Mínima (CM)	107
4.3.3.3	Análises de volume	110
4.3.3.4	Análises de altura e visual	112
4.4 Dis	scussão	118
4.5 Co	nclusão	120
Agradecii	mentos	121
Referênc	as	121
5 CON	CLUSÃO	125
APÊNDIO	CES	127

RESUMO

Estudo de parâmetros populacionais de plantios clonais de *Eucalyptus* spp. a partir de nuvens de pontos obtidos com escaneamento a laser aerotransportado

As florestas plantadas contribuem para o desenvolvimento econômico, social e ambiental brasileiro, e o setor florestal busca plantios cada vez mais produtivos e melhor aproveitados. A tecnologia a laser aerotransportada (ALS - Airborne Laser Scanning), capaz de gerar informações tridimensionais precisas em extensas áreas e em pequeno intervalo de tempo, tem se destacado nas aplicações florestais, sendo utilizada na quantificação e caracterização de florestas. Neste estudo foram utilizados dados ALS obtidos em dois sobrevoos (2013 e 2014), cobrindo uma área de plantio do gênero Eucalyptus com diferentes clones e idades, localizada no estado de São Paulo. Esta dissertação é dividida em três partes. A primeira buscou avaliar a combinação de métricas ALS e de dupla amostragem nas estimativas de volume e na redução da intensidade amostral, comparando seus resultados aos de métodos amostrais tradicionais. Os resultados mostraram que a dupla amostragem obteve o menor erro de amostragem dentre os delineamentos, permitindo a redução do esforço amostral. A segunda parte visou caracterizar as diferenças estruturais existentes entre clones de eucalipto, com diferentes idades, a partir de métricas ALS e perfis de altura do dossel (CHP). O estudo mostrou que é possível distinguir a estrutura do dossel dos clones, o que pode contribuir com melhorias nas estimativas e no gerenciamento dos plantios comerciais. Na última parte, foram avaliados dois algoritmos de detecção de árvores individuais quanto à quantificação dos indivíduos e os efeitos da composição (tamanho de célula e filtragem) do modelo digital de desempenho algoritmos. Verificou-se (CHM) no desses características do CHM influenciam na detecção. A estratégia com melhor desempenho resultou em um erro médio relativo de 11% no número de indivíduos.

Palavras-chave: LiDAR; Dupla amostragem; Estrutura do dossel; Detecção de árvores individuais

ABSTRACT

Study of population parameters from clonal *Eucalyptus* spp. plantation using point clouds obtained with airborne laser scanning

Planted forests contribute to the economic, social and environmental development of Brazil, and the forest industry aims to increase productivity and the efficient use of these plantations. Airborne Laser Scanning (ALS) technology, capable of generating accurate three-dimensional information, covering large areas in a short time, has highlighted potential in forestry applications and has been applied in forests quantification and characterization. In this study, ALS data were obtained from two flights (2013 and 2014), covering a Eucalyptus plantation area with different clones and ages, in the state of São Paulo. This thesis comprises three parts. The first study aimed to evaluate the combination of ALS metrics and double sampling design for volume estimates and reducing sampling intensity, comparing the results to traditional sampling methods. Results showed that the double sampling had the lowest error from the designs, allowing the reduction of the sampling effort. The second part was proposed to characterize the structural differences between Eucalyptus clones with different ages, based on metrics ALS and canopy height profiles (CHP). The study showed that it is possible to distinguish the canopy structure of the clones, which can contribute to improvements in estimates and management of commercial plantations. In the last study, two individual tree detection algorithms were evaluated for quantification of individuals, and the effect of the canopy height model (CHM) composition at the performance of these algorithms was analyzed. It was found that the CHM characteristics influence the tree detection. The strategy with better performance resulted in an average relative error of 11% in number of trees.

Keywords: LiDAR; Double sampling; Canopy structure; Individual tree detection

1 INTRODUÇÃO

"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)

As florestas plantadas possuem grande importância no Brasil, sobretudo as plantações do gênero *Eucalyptus*. Esse gênero ocupa 5,10 milhões de ha (76,6 % da área total de plantios) e se sobressai graças a sua utilização em diversos setores industriais, com destaque para o segmento de papel e celulose, e seu alto potencial produtivo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013). Esses povoamentos, geralmente são conduzidos sob curta rotação e manejo intensivo (GONÇALVES et al., 1997). Nas últimas décadas, o desenvolvimento de plantações clonais desse gênero e o aperfeiçoamento de práticas silviculturais proporcionaram melhoras na produtividade, homogeneidade e qualidade da madeira (GONÇALVES et al., 2008). Nesse contexto, um adequado manejo e planejamento do uso dos recursos florestais se faz necessário para manutenção da produtividade, visando atender a demanda de mercado e o aumento da eficiência operacional.

O planejamento tem como base o inventário florestal (ZONETE, 2009). Essa atividade permite o conhecimento qualitativo e quantitativo de um povoamento florestal por meio da coleta de dados de alguns indivíduos da população (amostragem), o que possui grande importância na avaliação da produção e confere uma melhor utilização das florestas (LEITE; ANDRADE, 2002). Dessa forma, o inventário florestal exige o levantamento de uma série de medidas estruturais dos povoamentos florestais para avaliar a qualidade do sítio, a quantidade global e a distribuição do volume de madeira, densidade das árvores, área basal, tamanho dos troncos, proporção folhagem/tronco e a altura das árvores (LOVELL et al., 2003).

A estrutura da floresta contém informações importantes a respeito do estado de desenvolvimento das plantas (LEFSKY et al., 1999). Segundo Forrester et al. (2012), a existência de diferentes classes de tamanho de árvore dentro de um povoamento florestal promove diferentes condições de dossel, resultando em

diferentes respostas a um determinado tratamento. Assim, o conhecimento das características estruturais das áreas plantadas pode proporcionar melhoras nas estimativas dos recursos florestais e nas determinações de atividades silviculturais.

Outro fator de grande importância é a correta determinação do número de indivíduos por unidade de área. Segundo Silva (2014), a inclusão da variável densidade de fustes nos modelos melhorou as estimativas de área basal e biomassa. Nos plantios de *Eucalyptus*, as árvores são plantadas em linhas com uma densidade fixa pré-determinada para o talhão. Entretanto, essa densidade não necessariamente permanece a mesma durante a rotação, uma vez que danos podem ocorrer (PACKALÉN; MEHTÄTALO; MALTAMO, 2011). Além disso, podem ocorrer variações no espaçamento entre plantas causadas por erros cometidos na implantação das mudas e irregularidades na topografia do terreno que impedem o plantio em determinadas áreas. Essas variações provocam impacto na estimativa do número de plantas e têm consequências sobre os processos de estimação de volume de madeira. Nesses casos, o número total de indivíduos de um povoamento não é determinado com exatidão pelo inventário florestal (MELLO et al., 2009).

A importância do inventário como etapa essencial do planejamento florestal estimula a busca por ferramentas que permitam obter informações precisas. O sensoriamento remoto, uma ferramenta geralmente utilizada no monitoramento de extensas áreas vem sendo empregado para aumentar a precisão na quantificação dos recursos florestais (MACEDO, 2009).

Na área florestal, as fotografias aéreas foram a principal fonte de dados utilizados no sensoriamento remoto e desempenharam um papel importante na detecção remota. Contudo, na última década técnicas modernas de sensoriamento remoto passaram a possibilitar a aquisição de dados tridimensionais (3D) e de informações espaciais mais precisas dos recursos florestais (VASTARANTA, 2012). A evolução tecnológica desses sensores tem oferecido aos usuários equipamentos com melhor resolução e maior potencial de uso, se comparado aos métodos convencionais (ZONETE, 2009).

Dentre as novas tecnologias, possuem grande destaque os sensores ativos, como é o caso dos sistemas de escaneamento a laser aerotransportado (ALS - Airborne Laser Scanning), também denominados sistemas aeroembarcados de escaneamento LiDAR (Light Detection And Ranging), por fornecerem informações tridimensionais com alta precisão e pelo grande potencial para aquisição de grande

quantidade de informação, em pequeno intervalo de tempo. Além de gerar informações sobre a distribuição horizontal e vertical da estrutura das florestas (LIM et al., 2003).

Duas abordagens metodológicas principais vêm sendo utilizadas para obter informações das florestas a partir de dados ALS: a abordagem em nível de área (ABA – *Area-Based Approach*) e a de árvores individuais (ITD - *Individual Tree Detection* (VASTARANTA, 2012). Essas abordagens realizam correlações entre os dados obtidos em campo e informações derivadas dos dados ALS, diferindo, porém, quanto a escala, sendo a ABA baseada em área e a ITD em árvore individual (VASTARANTA, 2012).

Devido à qualidade das informações produzidas, os sistemas ALS possuem inúmeras aplicações na área florestal, tais como: caracterização da estrutura da floresta (COOPS et al., 2007; LEFSKY et al., 1999; LIM et al., 2003), determinação do número de indivíduos (KAARTINEN et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012; VAUHKONEN et al., 2012), e estimativa das alturas do dossel (HYYPPÄ; INKINEN, 1999; POPESCU; WYNNE; NELSON, 2002), do volume (GÖRGENS et al., 2015; ZONETE, 2009), da área basal (HUDAK et al., 2006) e da biomassa acima do solo (SILVA et al., 2015). Esta dissertação visa explorar as possíveis contribuições do uso de dados ALS para a qualificação e quantificação de plantios clonais do gênero *Eucalyptus*. Os objetivos específicos são:

- Avaliar a utilização de métricas ALS como primeira fase em métodos de dupla amostragem para estimativa de volume, e o potencial de redução da intensidade amostral de campo;
- Verificar a capacidade de dados ALS diferenciarem clones de Eucalyptus de diferentes idades;
- Avaliar diferentes métodos de detecção de árvores individuais em plantios comerciais de *Eucalyptus*, a partir de dados ALS, variando o tamanho da célula e parâmetros de funcionamento de filtros geradores do modelo digital de alturas.

1.1 Revisão Bibliográfica

1.1.1 Inventário Florestal

Devido a importância das áreas florestais, tanto na manutenção de serviços como na produção de bens, são necessários meios eficientes para obter informações qualitativas e quantitativas. Para tanto, são realizados inventários florestais, os quais podem produzir variadas informações (mapeamento de propriedades, estimativas quantitativas e qualitativas dos recursos florestais, estimativas de crescimento, informações sobre a fauna), de acordo com o seu objetivo (SOARES; NETO; SOUZA, 2006).

Na atividade de inventário apenas parte da população (amostras ou parcelas) é mensurada, sendo os resultados extrapolados para toda a área (LEITE; ANDRADE, 2002). A coleta de dados em campo constitui a parte de maior custo de um inventário e está diretamente ligado a amostragem selecionada (CAMPOS; LEITE, 2013). Três fatores podem proporcionar o aumento do erro de amostragem: o tamanho da amostra, a variabilidade das unidades de amostra da população e o método de seleção das unidades de amostra (SHIVER; BORDERS, 1996). Dentre os delineamentos de amostragem utilizados, os mais comuns são: casual simples, sistemático e estratificado (CAMPOS; LEITE, 2013).

Outra abordagem que vem sendo utilizada é a dupla amostragem, que envolve a medição de duas variáveis, a principal ou de interesse, com maior custo e dificuldade de obtenção, e a secundária ou auxiliar, mais fácil e barata de se medir. Essas variáveis podem ser obtidas em múltiplas ocasiões, em que a segunda amostragem consiste em uma subamostra da primeira (SHIVER; BORDERS, 1996).

Segundo Gusson (2014), a dupla amostragem busca reduzir a intensidade amostral na coleta da variável de difícil medição, resultando na economia de tempo e recursos na realização do inventário. Essa abordagem tem sido utilizada em conjunto a variáveis obtidas de imagens de satélite, como o índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (GUSSON, 2014) e a métricas extraídas de dados ALS (STEPHENS et al., 2012).

Nos inventários de florestas plantadas, geralmente são mensurados os DAP's (diâmetro a altura do peito) de todos os indivíduos com o DAP acima do mínimo determinado, e a altura de uma parte das árvores da parcela. Com base nas alturas

medidas, modelos hipsométricos são ajustados para estimativa das alturas das árvores não mesuradas na atividade de campo (CAMPOS; LEITE; 2002).

Nos plantios comerciais, uma das questões de grande interesse é o levantamento do volume de madeira em pé. Nessas áreas, o inventário florestal fornece dados quantitativos do povoamento que permitem a construção de modelos e a estimativa de volume. O ajuste dos modelos volumétricos é feito a partir de um conjunto de dados de árvores abatidas através da atividade de cubagem rigorosa (LEITE; ANDRADE, 2002). Essa atividade consiste no abate de árvores selecionadas, com posterior medição de diâmetros de seções ao longo do fuste, sendo o volume da árvore a soma dos volumes de todas as seções medidas (). Diversos modelos existentes fornecem as estimativas de volume em função do DAP e da altura da árvore (GUIMARÃES; LEITE, 1996).

1.1.2 Tecnologia de escaneamento a laser aerotransportado (ALS)

A nova tecnologia de sensoriamento remoto, denominada de sistemas LiDAR ou ALS, caracteriza-se por ser similar óptico ao RADAR (*Radio Detection And Ranging*), tendo como princípio de funcionamento a emissão de feixe laser em direção à superfície terrestre, sendo refletidos ao atingir objetos (edificações, vegetação ou terreno) e registrados pelo sensor (ZANDONÁ, 2006). Tem-se para cada pulso emitido o registro da precisa localização e orientação do ponto de lançamento do pulso e do tempo de percurso entre o veículo que transporta (emissor), e o ponto atingido pelo pulso na cena alvo, possibilitando assim que o sistema calcule a precisa distância (eq. 1) (BALTSAVIAS, 1999) e localização de cada ponto.

$$D = c * \frac{t}{2} \tag{1}$$

onde:

D = distância de alcance;

c = velocidade da luz;

t = intervalo de tempo entre o envio e o recebimento do pulso.

Os sistemas ALS são constituídos por uma unidade de emissão e recebimento laser; um receptor GPS em uma plataforma aerotransportada e no solo; e um sistema de navegação inercial ou (*Inertial Navigation System -* INS) (GIONGO, 2010). O sistema de posicionamento global (GPS) fornece o posicionamento dos

retornos laser e a unidade inercial promove as correções dos desvios em x, y e z ocasionados pela movimentação da aeronave (SILVA, 2014). Assim, os levantamentos ALS geram informações tridimensionais, nuvem de pontos x, y e z, acerca da superfície terrestre com alta precisão (POPESCU; WYNNE; NELSON, 2002).

Quanto aos tipos de sistema de registro, modo como o retorno do pulso laser é armazenado, pode-se classificar em dois tipos: o de retornos discretos (*discrete return* ou *discrete echo*) e o em formato de ondas completas ou contínuas (*full-waveform*) (Figura 1.1), sendo o primeiro mais comumente utilizado (WHITE et al., 2013). Os sistemas por retornos discretos, podem registrar para cada pulso: o primeiro ou último retorno (1 registro); ambos os ecos (primeiro e último retorno – 2 registros), e até mesmo, sendo alguns capazes de armazenar registros de retornos intermediários (LIM et al., 2003). Já os sistemas de ondas completas permitem o armazenamento de todo o sinal do pulso.

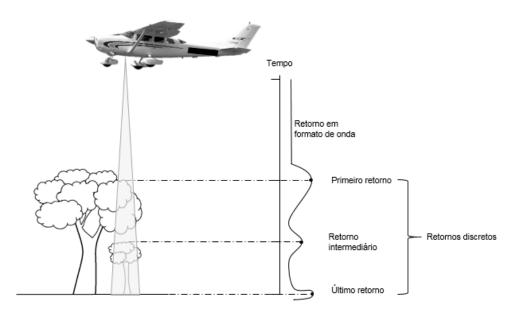


Figura 1.1 – Representação dos retornos resultantes dos dois sistemas de registro: o de retornos discretos e o de onda completa

As configurações da altura de voo e do ângulo de varredura definem a largura da faixa de cobertura (Figura 1.2). Esses fatores afetam também a densidade de pontos coletada e o valor a ser cobrado pelo levantamento. Assim, quanto menor a largura da faixa, maior a densidade de pontos coletada, sendo necessário um maior número de faixas para recobrimento da área e, consequentemente, maior o custo do levantamento (MULLER, 2013).

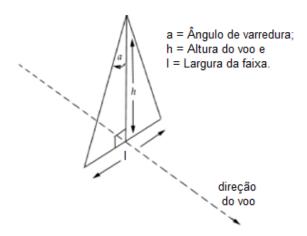


Figura 1.2 – Largura da faixa de cobertura Fonte: adaptado de LIM et al. (2003).

A quantidade de pontos obtidos por unidade de área (densidade) varia em função de algumas configurações do sistema e do voo, como: ângulo de abertura, diâmetro do feixe, frequência de varredura, velocidade da aeronave e altura de voo.

Por apresentar uma divergência o feixe laser resulta em uma projeção na superfície com formato circular ou elíptico. A dimensão do diâmetro do pulso laser no solo, denominada de *footprint*, tem efeito direto sobre a probabilidade de intercepção do feixe nos objetos ao longo da sua trajetória (ALVES, 2010). Quanto maior a divergência do feixe e a altura do sobrevoo, maior o *footprint*. Em aplicações florestais, normalmente, são utilizados *footprint* menores, de até 1 m, por possibilitar boas correspondências entre os dados ALS e árvores individuais, parcelas, ou povoamentos florestais (VAUHKONEN et al., 2014). Assim, as especificações das configurações do sistema e do voo devem ser definidas conforme as particularidades das informações desejadas.

1.1.3 Aplicações da tecnologia ALS na área florestal

Desenvolvidos inicialmente para levantamento de dados para elaboração de modelos digitais de terreno (DTM – *Digital Terrain Model*), sobretudo para locais de difícil acesso, os sistemas ALS, têm se destacado entre as técnicas de sensoriamento remoto, apresentando bons resultados na área florestal. Segundo Wack et al. (2003), a riqueza dos dados resultantes dos sistemas ALS, aliada ao processamento avançado, e sua capacidade de integração com ferramentas GIS, proporcionam a otimização da coleta e da consistência de dados, fornecendo assim melhor suporte às decisões de gestão florestal.

Na área florestal, esses sistemas possibilitam o correto posicionamento, em 3D, da superfície do solo e dos elementos da vegetação (folhas, ramos e troncos) (RODRIGUEZ et al., 2010). Nos sistemas de retornos discretos, os primeiros retornos geralmente provêm do topo do dossel e os últimos do solo, o que permite a criação da superfície do terreno (VASTARANTA, 2012). Essa capacidade de fornecer medidas de altura da vegetação e do solo permite, portanto, que informações a respeito da vegetação sejam derivadas dos dados ALS (LINDBERG, 2012).

O emprego da tecnologia ALS considera atualmente duas abordagens principais para caracterização dos recursos florestais: uma dependente de área para fornecimento de dados em nível de área (ABA – *Area-Based Approach*) (NAESSET, 2002) e outra voltada para a identificação de árvores individuais (ITD – *Individual Tree Detection*), onde as árvores individuais constituem a unidade básica avaliada (VAUHKONEN et al., 2012; VASTARANTA et al., 2012).

No setor florestal, essa tecnologia permite a obtenção de variáveis dendrométricas de forma direta ou através de modelagem (GIONGO et al., 2010). Dentre as variáveis obtidas de modo direto, pode-se se destacar as alturas do dossel (DUBAYAH et al., 2000), que, para sistemas de retornos discretos, são calculadas como sendo a diferença entre os retornos classificados como não pertencentes ao solo e a superfície que representa o terreno (DTM) (LIM et al., 2003). Essa superfície é geralmente criada a partir da seleção de pontos pertencentes ao solo, realizada através de diferentes técnicas de filtragem como a desenvolvida por Kraus e Pfeiffer (1998). Já variáveis como volume e biomassa são estimadas com base em modelos que consideram as relações entre as métricas ALS derivadas e dados de referência, informações resultantes dos levantamentos de campo, para obter as informações desejadas (LINDBERG, 2012).

O grande potencial e os avanços da tecnologia ALS tem possibilitado a ampliação das aplicações desses sistemas. Suas utilizações compreendem desde áreas de florestas nativas (NÆSSET, 1997; Van PELT; NADKARNI, 2004; COOPS et al., 2007; PALACE et al., 2015) como plantadas (ZONETE, 2009; GÖRGENS et al., 2015; SILVA et al., 2015). Além de se estender a caracterização da estrutura da floresta, permitindo aplicações em estudos ecológicos (VAUKONEN et al., 2014).

1.1.4 Abordagem baseada em área (ABA)

Nos métodos da ABA as nuvens de pontos obtidas representam uma determinada área (parcela, talhão) (VAUKONEN et al., 2014). Essa metodologia se baseia na forte correlação existente entre os atributos florestais e as métricas extraídas dos dados ALS (LINDBERG, 2012). Com base nos dados ALS coletados, de uma parcela por exemplo, são calculadas métricas, que permitem a caracterização da floresta, as quais atuam como variáveis preditoras de atributos mensurados em campo (WHITE et al., 2013). As estimativas são realizadas, normalmente por meio de regressão, análise não-paramétrica ou discriminante (HYYPPÄ et al., 2008).

Essa abordagem vem sendo utilizada em diversos estudos, possibilitando a estimativa de parâmetros de inventário florestal. Nilsson (1996), por exemplo, em uma das pioneiras publicações no tema, buscou estimar as alturas e o volume de talhões de *Pinus*, encontrando como resultado a subestimação das alturas médias em 2,1 a 3,7 m e um R² de 0,78 para a estimativa de volume. Næsset (1997) obteve um R² variando de 0,46 a 0,89, utilizando a altura média e a densidade de cobertura do dossel, derivadas de dados ALS, na estimativa do volume.

A aplicação dessa abordagem em áreas de florestas plantadas, mais especificamente em plantios clonais de *Eucalyptus* sp., foi avaliada por Zonete (2009) na estimativa de parâmetros de inventário, como área basal e volume. Os modelos ajustados nesse trabalho, utilizando métricas LiDAR, resultaram em um R² entre 0,94 e 0,95 para o volume e de 0,92 para área basal. Silva et al. (2015) analisaram o uso de métricas ALS e estatísticas derivadas do perfil de alturas do dossel em análises de regressão para obter a biomassa do fuste, com o coeficiente de determinação de 0,93.

1.1.5 Detecção de árvores individuais (ITD)

A obtenção de informações sobre árvores individuais é especialmente útil em uma série de atividades florestais como, por exemplo, na definição de tratamentos silviculturais, de desbastes seletivos e de avaliações de biodiversidade (HU et al., 2014). O aumento da densidade de pontos por m² nos levantamentos permitiu a identificação de árvores individuais e até dos espaços existentes entre elas, e consequentemente uma investigação mais detalhada da estrutura das copas e de

modelos digitais de superfície que expressam a variação em altura da cobertura vegetal (HYYPPÄ et al., 2001). A alta densidade de pontos é essencial para o preciso delineamento das copas das árvores individuais (LINDBERG, 2012).

Em nível de árvore individual, uma das variáveis mais importantes é o diâmetro à altura do peito (DAP) e as inferências que a partir desse valor são feitas quanto à forma do fuste, volume e aproveitamento para diversos fins dos elementos que constituem a parte aérea da árvore. Dos estudos ITD podem-se extrair estimativas da altura das árvores e das dimensões da copa, preditores convencionais de DAP em levantamentos apoiados por tecnologias ALS (VASTARANTA, 2012).

Na abordagem ITD, os algoritmos são geralmente divididos em duas categorias, de acordo com o seu propósito: detecção de árvores ou delineamento de copas (KE; QUACKENBUSH, 2011). A detecção das árvores, vem sendo alvo de um grande número de estudos visando o desenvolvimento de diferentes métodos por diversos grupos de pesquisa (VAUHKONEN et al., 2011). De acordo com Kaartinen et al. (2012), apesar dos vários estudos já desenvolvidos, a ampla disseminação dessa prática ainda não ocorreu e pode estar sendo dificultada por problemas na detecção de árvores individuais sob diferentes condições florestais. Contornadas essas dificuldades, pode se destacar como vantagem desses métodos um dos seus principais resultados, a precisa distribuição dos fustes por classe de altura e a consequente melhoria da precisão dos processos de classificação do sortimento de madeira por classe de produto (KAARTINEN et al., 2012).

Segundo Vastaranta (2012), existem duas abordagens para a detecção de árvores individuais (ITD) a partir de dados ALS: uma baseada em pontos e outra em modelos de superfície. Em condições de florestas boreais, os métodos mais difundidos são os baseados em modelos de superfície e, geralmente baseiam-se na determinação de máximos locais detectados em um modelo digital das alturas (CHM – *Canopy Height Model*). Após esse passo, realiza-se a definição dos limites das copas.

O primeiro trabalho sobre ITD, publicado em 1999 por Hyyppä e Inkinen, demostrou ser possível a detecção automática de árvores individuais com dados ALS. Segundo Wang, Gong e Biging (2004), os vários algoritmos já desenvolvidos para detecção automática de árvores podem ser agrupados em 4 tipos, dependendo da forma como se baseiam em máximos locais (LM – *Local Maximum*), em

contornos (CB – *Contour-Based*), em modelos correspondentes (TM – *Template-Matching*) e em modelos 3D.

O trabalho de Kaartinen e Hyyppä (2008) compara algoritmos de extração de árvores individuais propostos por doze instituições sediadas em diferentes países¹, incluindo o método manual, e os resultados demonstraram que a escolha do método tem maior impacto sobre a precisão e o processo de detecção de árvores do que a densidade de pontos da nuvem de dados laser. Vauhkonen et al. (2012), avaliaram seis algoritmos, em diferentes condições florestais, e concluíram que a estrutura da floresta afeta fortemente a performance dos algoritmos, dependendo o sucesso da detecção de árvores da densidade e do agrupamento das árvores.

Kaartinen et al. (2012), em estudo mais recente, estendeu o escopo da comparação estudada previamente (KAARTINEN; HYYPPÄ, 2008) ao substituir no trabalho anterior três algoritmos automáticos de extração de árvores (*Progea*, *PFC* e *Joanneum*) por quatro novos métodos: *Local maxima* (*LOCM*); *Multi-scale Laplacian of Gaussian* (*MLOG*); *Minimum curvature-based* (*MCV*); e *LOCM with varying window size* (*VWS*). Nesse novo trabalho, os resultados mostraram que os melhores métodos para a detecção de árvores dominantes foram *MCV*, *LOCM*, *Norway* e *Metla*, incluindo *FOI* se a densidade de pontos for de aproximadamente 8 pontos por m².

1.1.5.1 Processamento digital de Imagem (PDI)

Nos métodos ITD, muitas vezes são aplicadas técnicas de processamento digital de imagens para melhoria da superfície (imagem) utilizada. Segundo Gonzales e Woods (2008) uma imagem consiste em uma função bidimensional representada por f(x, y), onde os valores de x e y correspondem a coordenadas espaciais e os de f a intensidade ou nível de cinza. Assim, uma imagem pode ser considerada uma matriz, onde os índices de linhas e colunas representam as coordenadas dos pontos da imagem. Os elementos que constituem a imagem são denominados *pixels* ou *pels* (*picture element*) e, comumente, estão associados a cor ou intensidade de resposta da imagem. Entretanto, pode haver considerável

_

Definiens (Alemanha); FOI (Suécia); Pacific Forestry Centre (PFC, Canadá); University of Hannover (Alemanha); Joannerum Research (Austria); Metla (Finlandia); Norwegian Forest Research Institute e University of Life Sciences (Noruega); National Ilan University (Taiwan); Texas A&M University (EUA); University of Zurich (Suíça); ProGea Consulting and Agricultural University of Cracow (Polônia); e University of Udine (Itália).

variação no conteúdo de informação dos pixels, conforme o tipo de imagem (SOLOMON; BRECKON, 2011).

As diversas técnicas de análise de dados multidimensionais, provenientes de diferentes tipos de sensores, recebem o nome de processamento digital de imagens – PDI (CÂMARA; AGUIAR, 1996). Um dos passos considerados fundamentais no PDI é a manipulação da imagem para a melhoria de sua aparência (*image enhancement*), possibilitando que a interpretação visual ou por meio de máquinas seja mais adequada (JENSEN, 2005).

O aprimoramento da imagem pode ser obtido através de diversas técnicas, dentre as quais se encontram as filtragens espaciais, geralmente utilizadas no realce de bordas ou limites e na redução de ruídos, através de operações que abrangem *pixels* de uma vizinhança, ou seja, um determinado espaço geométrico (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Dessa forma, os filtros espaciais são constituídos por conjunto de pixels vizinhos (Vizinhança, Janela, Kernel ou Máscara de Convolução – Figura 1.3) e um operador predefinido que realiza transformações nas imagens *pixel* a *pixel*, com base nos pixels englobados pela vizinhança. Essas transformações atribuem um novo valor para o *pixel* central (GONZALEZ; WOODS, 2008).

A filtragem usa de janelas (matrizes) móveis, com coeficientes ou pesos, normalmente, compostas por um número ímpar de linhas e colunas. O deslocamento da máscara sobre a imagem, por meio do avanço de um *pixel* por vez denomina-se convolução (CÂMARA; AGUIAR, 1996).

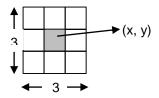


Figura 1.3 – Vizinhança de tamanho 3 x 3 do *pixel* (x, y)

Os filtros podem ser classificados em passa-alta ou *high-pass e* passa-baixa ou *low-pass*. Os filtros conhecidos como passa-alta realçam a diversidade de frequências. Enquanto os do tipo passa-baixa proporcionam a suavização da imagem, e permitem a remoção de ruídos de alta frequência (GONZALEZ; WOODS, 2008). A frequência espacial de uma imagem corresponde às variações de

intensidade (brilho) por unidade de distância. Logo, áreas com pouca variação de brilho (homogêneas), apresentam baixa frequência espacial (JENSEN, 2005).

A aplicação de filtros passa-baixa permite que os componentes de baixa frequência sejam preservados e os de alta frequência reduzidos (ruídos), resultando na suavização da imagem por atenuar as regiões de bordas e detalhes finos da imagem, como ruídos (MENESES; ALMEIDA, 2012; JENSEN, 2005). Destacam-se como mais conhecidos os filtros de média e mediana (MENESES; ALMEIDA, 2012).

O filtro gaussiano, também considerado do tipo passa baixa por proporcionar a suavização da imagem, possui como controle do grau de suavização o tamanho da janela e o parâmetro desvio padrão (σ) (SOLOMON; BRECKON, 2011).

1.1.6 Caracterização da estrutura da floresta

A estrutura da floresta é constituída por diversos componentes (folhagem, copas e troncos das árvores, etc.) (SPIES, 1998), e pode ser caracterizada como o arranjo espacial desses elementos (FRANKLIN et al., 2002). Apesar da variedade em sua composição, essas estruturas são descritas, muitas vezes, pelo tamanho e distribuição espacial das árvores e pela distribuição vertical e horizontal de sua folhagem (McELHINNY et al., 2005; KANE et al., 2010).

Diversos fatores influenciam a estrutura da floresta, como a dinâmica de crescimento e distúrbios, resultando em alterações em seus atributos durante seu desenvolvimento (FRANKLIN et al., 2002; PALACE et al., 2015). Segundo Coops et al. (2007), a caracterização das estruturas das florestas fornece suporte a atividades de manejo, possibilitando o planejamento de tratamentos silviculturais, e até mesmo a avaliação de habitats. Assim, os atributos estruturais frequentemente sofrem intervenções, para atingir objetivos determinados no estabelecimento dos povoamentos (FRANKLIN et al., 2002).

A realização de atividades de campo para caracterização das estruturas florestais são extremante trabalhosa e caras (HALL et al., 2005), o que tende a limitar a quantidade de dados coletados. Dentre as vantagens do uso de sensoriamento remoto pode-se citar a aquisição de dados sobre grandes áreas de forma rápida e econômica (HALL et al., 2005). Entretanto técnicas passivas de sensoriamento remoto possuem limitações em sua capacidade de diferenciar mudanças na estrutura que ocorrem abaixo do dossel (COOPS et al., 2007),

fornecendo apenas informações detalhadas sobre a distribuição horizontal (LIM et al., 2003).

Tecnologias com sensores ativos aerotransportadas como o LiDAR emitem feixes de laser no espectro infravermelho, gerando dados em três dimensões, o que permite a representação da distribuição horizontal e a vertical. Dentre os atributos que podem ser diretamente alcançados com dados ALS destacam-se as alturas, a topografia abaixo do dossel e a distribuição vertical do dossel (LIM et al., 2003). As medidas mais simples que podem ser obtidas da estrutura do dossel, com o uso dessa tecnologia, correspondem a altura e a cobertura do dossel (LEFSKY et al., 2002).

A variação vertical da folhagem, também denominada de perfil de alturas do dossel (CHP - Canopy Height Profile), corresponde a distribuição de todo o material do dossel, em função da altura (LEFSKY et al., 1999). Os perfis de alturas do dossel vem sendo modelados através de funções de distribuição teóricas (MAGNUSSEN; EGGERMONT; LaRICCIA, 1999; COOPS et al., 2007; GÖRGENS et al., 2015; SILVA et al., 2015). Coops et al. (2007) encontraram relações significativas entre os perfis de distribuição da folhagem derivados do campo e dos dados ALS, indicando que modelos da distribuição do perfil vertical da folhagem podem ser transferidos entre dados de campo e ALS.

A distribuição comumente utilizada na caracterização da distribuição da folhagem de várias espécies é a função Weibull, devido a sua flexibilidade (COOPS et al., 2007). Magnussem; Eggermont e LaRiccia (1999) utilizaram a função Weibull com três parâmetros para descrever o perfil vertical de uma floresta de Douglas-fir. Os modelos foram ajustados visando recuperar as alturas das árvores. Além de serem utilizadas para caracterizar os perfis verticais, os paramêtros das distribuições possuem correlação com atributos florestais, tais como: DAP, número de árvores, medidas da copa e biomassa (COOPS et al., 2007, SILVA et al., 2015).

Referências

ALVES, M.V.G. Estimativa de variáveis florestais com perfilamento a laser (LiDAR). 2010. 140p. Tese (Doutorado em Manejo Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS –ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília, 2013, 148p. Disponível em: http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf. Acesso em: 02 fev. 2015.
- BALTSAVIAS, E.P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 54, n. 2/3, p. 199–214, Jul. 1999.
- CÂMARA, G.; AGUIAR, A.P. (Ed.). **SPRING Programming Manual**. São José dos Campos: INPE. 1996. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/manuais.html. Acesso em: 31 maio 2015.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal:** perguntas e respostas. 4. ed. Viçosa: UFV, 2013. 605p.
- COOPS, N.C.; HILKER, T.; WULDER, M.A.; ST-ONGE, B.; NEWNHAM, G.; SIGGINS, A.; TROFYMOW, J.A. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR. **Trees**, Berlin, v. 21, n. 3, p. 295–310, Jan. 2007.
- DUBAYAH, R.; KNOX, R.; HOFTON, M.; BLAIR, J.B.; DRAKE, J. Land surface characterization using LiDAR remote sensing. In: HILL, M.; ASPINALL, R. (Ed.). **Spatial information for land use management**. Singapore: International Publishers Direct, 2000. chap. 3, p. 25 38.
- FORRESTER, D.I.; COLLOPY, J.J.; BEADLE, C.L.; WARREN, C.R.; BAKER, T.G. Effect of thinning, pruning and nitrogen fertiliser application on transpiration, photosynthesis and water-use efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 266, p. 286–300, Feb. 2012.
- FRANKLIN, J.F.; SPIES, T.A.; Van PELT, R.; CAREY, A.B.; THORNBURGH, D.A.; BURG, D.R.; LINDENMAYER, D.B.; HARMON, M.E.; KEETON, W.S.; SHAW, D.C.; BIBLE, K.; CHEN, J. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 155, n. 1/3, p. 399–423, 2002.
- GIONGO, M.; KOEHLER, H.S.; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F.F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.30, n. 63, p.231-244, ago./out. 2010.
- GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NAMBIAR, E.K.S.; NOVAIS, R.F. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. (Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests.** Canberra: ACIAR, 1997. chap. 11, p. 379-417.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests:** a Journal of Forest Science, London, v. 70, n. 2, p. 105–118, Dec. 2008.
- GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. **Digital image processing**. 3.ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008. 954p.

- GÖRGENS, E.B.; PACKALEN, P.; SILVA, A.G.P.; ALVARES, C.A.; CAMPOE, O.C.; STAPE, J.L.; RODRIGUEZ, L.C.E. Stand volume models based on stable metrics as from multiple ALS acquisitions in *Eucalyptus* plantations. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 72, n. 4, p. 489–498, Jan. 2015.
- GUIMARÃES, D.P.; LEITE, H.G. Influência do número de árvores na determinação de equação volumétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 50, p. 37-42, dez. 1996.
- GUSSON, E. Avaliação de métodos para a quantificação de biomassa e carbono em florestas nativas e restauradas da Mata Atlântica. 2014. 112p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- HALL, S.A.; BURKE, I.C.; BOX, D.O.; KAUFMANN, M.R.; STOKER, J.M. Estimating stand structure using discrete-return lidar: an example from low density, fire prone ponderosa pine forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 208, n. 1/3, p. 189–209, Apr. 2005.
- HU, B.; LI, J.; JING, L.; JUDAH, A. Improving the efficiency and accuracy of individual tree crown delineation from high-density LiDAR data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 26, p. 145-155, 2014.
- HUDAK, A.T.; CROOKSTON, N.L.; EVANS, J.S.; FALKOWSKI, M.J.; SMITH, A.M.S. Regression modeling and mapping of coniferous forest basal area and tree density from discrete- return LiDAR and multispectral satellite data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v. 32, n. 2, p. 126–138, Apr. 2006.
- HYYPPÄ, J.; INKINEN, M. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. **The Photogrammetric Journal of Finland**, Espoo, v. 16, n. 2, p. 27-42,1999.
- HYYPPÄ, J.; KELLE, O.; LEHIKOINEN, M.; INKINEN, M. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,** Trento, v. 39, n. 5, p. 969-975, May 2001.
- HYYPPÄ, J.; HYYPPÄ, H.; LECKIE, D.; GOUGEON, F.; YU, X.; MALTAMO, M. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 29, n. 5, p. 1339-1366, Mar. 2008.
- JENSEN, J.R. **Introductory digital image processing:** a remote sensing perspective. 3rd .ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 526p.
- KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J. Tree extraction. **EuroSDR/ISPRS Project**, Official Publication n. 53. EuroSDR (European Spatial Data Research): Dublin, 2008. 56p.

- KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; YU, X.; VASTARANTA, M.; HYYPPÄ, H.; KUKKO, A.; HOLOPAINEN, M.; HEIPKE, C.; HIRSCHMUGL, M.; MORSDORF, F.; NÆSSET, E.; PITKÄNEN, J.; POPESCU, S.; SOLBERG, S.; WOLF, B.M.; WU, J-C. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. **Remote Sensing**, Basel, v. 4, n. 4, p. 950-974, Mar. 2012.
- KANE, V.R.; McGAUGHEY, R.J.; BAKKER, J.D.; GERSONDE, R.F.; LUTZ, J.A.; FRANKLIN, J.F. Comparisons between field- and LiDAR-based measures of stand structural complexity. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 40, n. 4, p. 761–773, Apr. 2010.
- KE, Y.; QUACKENBUSH, L.J. A comparison of three methods for automatic tree crown detection and delineation from high spatial resolution imagery. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 32, n. 13, p. 3625-3647, Jul. 2011.
- KRAUS, K.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 53, n. 4, p. 193–203, Aug. 1998.
- LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; ACKER, S.A.; SPIES, T.A.; PARKER, G.G.; HARDING, D. LiDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir Western Hemlock forests. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 70, n. 3, p. 339-361, Dec. 1999.
- LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; PARKER, G.G.; HARDING, D.J. Lidar remote sensing for ecosystem studies. **Bioscience**, Washington, v. 52, n. 1, p. 19-30, Jan. 2002.
- LEITE, H.G.; ANDRADE, V.C.L. DE. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 321–328, 2002.
- LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.A.; ST-ONGE, B.; FLOOD, M. LiDAR remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography,** London, v. 27, p. 88–106, Mar. 2003.
- LINDBERG, E. **Estimation of canopy structure and individual trees from laser scanning data**. 2012. 78p. Thesis (Doctorate) Faculty of Forest Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 2012.
- LOVELL, J.L; JUPP, D.L.B.; CULVENOR, D.S.; COOPS, N.C. Using airborne and ground- based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v. 29, n. 5, p. 607–622, 2003.
- MACEDO, R.C. Prognose madeireira de plantio clonal de *Eucalyptus spp.* Através de dados derivados de LiDAR aerotransportado. 2009. 133p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais Ministério da Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2009.
- MAGNUSSEN, S.; EGGERMONT, P.; LaRICCIA, V.N. Recovering Tree Heights from Airborne Laser Scanner Data. **Forest Science**, Lawrence, v. 45, n. 3, p. 407-422, 1999.

- McELHINNY, C.; GIBBONS, P.; BRACK, C.; BAUHUS, J. Forest and woodland stand structural complexity: Its definition and measurement. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 218, n. 1/3, p. 1–24, 2005.
- MELLO, J.M.; DINIZ, F.S.; OLIVEIRA, A.D.; MELLO, C.R.; SCOLFORO, R.S.; ACERBI JUNIOR, F. W. Continuidade espacial para características dendrométricas (número de fustes e volume) em plantios de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 185-194, jan. 2009.
- MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. (Org.). Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: UNB. 2012. 266 p. Disponível em: http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>. Acesso em: 06 maio 2015.
- MÜLLER, M. Avaliação da influência da configuração de voo para aquisição de dados lidar na qualidade das variáveis florestais extraídas em florestas plantadas. 2013. 177p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- NÆSSET, E. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 61, p. 246-253, 1997.
- NILSSON, M. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 56, n. 1, p. 1-7, 1996.
- OLIVEIRA, L.T. de; CARVALHO, L.M.T. de; FERREIRA, M.Z.; OLIVEIRA, T.C. de A.; ACERBI JUNIOR, F.W. Application of LIDAR to forest inventory for tree count in stands of *Eucalyptus sp.* **CERNE**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 175–184, jun. 2012.
- PACKALÉN, P.; MEHTÄTALO, L.; MALTAMO, M. ALS-based estimation of plot volume and site index in a eucalyptus plantation with a nonlinear mixed-effect model that accounts for the clone effect. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 68, n. 6, p. 1085–1092, Aug. 2011.
- PALACE, M.W.; SULLIVAN, F.B.; DUCEY, M.J.; TREUHAFT, R.N.; HERRICK, C.; SHIMBO, J.Z.; MOTA-E-SILVA, J. Estimating forest structure in a tropical forest using field measurements, a synthetic model and discrete return LiDAR data. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 161, p. 1–11, Feb. 2015.
- POPESCU, S.C.; WYNNE, R.H.; NELSON, R.F. Estimating plot-level tree heights with LiDAR: local filtering with a canopy-height based variable window. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 37, p. 71-95, Dec. 2002.
- RODRIGUEZ, L.C.E.; POLIZEL, J.L.; FERRAZ, S.F.B.; ZONETE, M.F.; FERREIRA, M.Z. Inventário florestal com tecnologia *laser* aerotransportada de plantios de *Eucalyptus* spp no Brasil. **Ambiência**, Guarapuava, v. 6, Ed. Especial, p. 67-80, jul. 2010.
- SHIVER, B.D.; BORDERS, B.E. **Sampling techniques for forest resource inventory**. New York: John Wiley, 1996. 356p.

- SILVA, A.G.P. Estimativa da biomassa de lenho em povoamentos de Eucalyptus grandis baseada em estatísticas do perfil de dossel geradas por escaneamento a laser aerotransportado. 2014. 146p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- SILVA, A.G.P.; GÖRGENS, E.B.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; RODRIGUEZ, L.C.E. Assessing biomass based on canopy height profiles using airborne laser scanning data in eucalypt plantations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n. 6, p. 504–512, Nov./Dec. 2015.
- SOARES, C.P.B.; NETO, F. DE P.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: Editora UFV, 2006. 276p.
- SOLOMON, C.; BRECKON, T. Fundamentals of digital image processing: a practical approach with examples in MATLAB. Chichester: John Wiley, 2011. 344p.
- SPIES, T.A. Forest structure: A key to the ecosystem. **Northwest Science**, Victoria, v. 72, n. 2, p. 34–39, 1998.
- STEPHENS, P.R.; KIMBERLEY, M.O.; BEETS, P.N.; PAUL, T.S.H.; SEARLES, N.; BELL, A.; BRACK, C.; BROADLEY, J. Airborne scanning LiDAR in a double sampling forest carbon inventory. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 117, p. 348-357, Feb. 2012.
- Van PELT, R.; NADKARNI, N.M. Development of canopy structure in *Pseudotsuga menziesii* forests in the southern Washington Cascades. **Forest Science**, Bethesda, v. 50, n. 3, p. 326–341, 2004.
- VASTARANTA, M.; KANKARE, V.; HOLOPAINEN, M.; YU, X.; HYYPPÄ, J.; HYYPPÄ, H. Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 67, p. 73–79, Nov. 2012.
- VASTARANTA, M. Forest mapping and monitoring using active 3D remote sensing. 2012. 45p. Thesis (Doctorate in Forest Science) Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki, Helsinki, 2012.
- VAUHKONEN, J.; MEHTÄTALO, L.; PACKALEN, P. Combining tree height samples produced by airborne laser scanning and stand management records to estimate plot volume in Eucalyptus plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 41, n. 8, p. 1649-1658, Aug. 2011.
- VAUHKONEN, J.; ENE, L.; GUPTA, S.; HEINZEL, J.; HOLMGREN, J.; PITKÄNEN, J.; SOLBERG, S.; WANG, Y.; WEINACKER, H.; HAUGLIN, K.M.; LIEN, V.; PACKALÉN, P.; GOBAKKEN, T.; KPCH, B.; NAESSET, E.; TOKOLA, T.; MALTAMO, M. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. **Forestry**, Oxford, v. 85, n. 1, p. 27-40, Jan. 2012.

- VAUHKONEN, J.; MALTAMO, M.; McROBERTS, R.E.; NÆSSET, E. Introduction to forestry applications of airborne laser scanning. In: MALTAMO, M.; NÆSSET, E.; VAUHKONEN, J. (Eds.). **Forestry applications of airborne laser scanning:** Concepts and case studies, managing forest ecosystems. Dordrecht: Springer, 2014. chap. 1, p. 1 16.
- WACK, R.; SCHARDT, M.; BARRUCHO, L.; LOHR, U.; OLIVEIRA, T. Forest inventory for *Eucalyptus* plantations based on airborne laserscanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)**, Dresden, v. 34, Part 3/w13, p. 293 296, Oct. 2003.
- WANG, L.; GONG, P.; BIGING, G.S. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. **Photogrammetry Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 70, n. 3, p. 351-357, Mar. 2004.
- WHITE, J.C.; WULDER, M.A.; VARHOLA, A.; VASTARANTA, M.; COOPS, N.C.; COOK, B.D.; PITT, D.; WOODS, M. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. **Forestry Chronicle**, Ottawa, v. 89, n. 6, 7 p., Dec. 2013.
- ZANDONÁ, D.F. Potencial uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. 2006. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- ZONETE, M.F. Análise do uso da tecnologia laser aerotransportado para inventários florestais em plantios clonais de *Eucalyptus sp.* no sul da Bahia. 2009. 95p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

2 REDUÇÃO DO ERRO AMOSTRAL NA ESTIMATIVA DO VOLUME DE POVOAMENTOS DE *EUCALYPTUS* spp. POR MEIO DE ESCANEAMENTO LASER AEROTRANSPORTADO

"Se não houver frutos, valeu a beleza das flores; Se não houver flores, valeu a sombra das folhas; Se não houver folhas, valeu a intenção da semente". (Maurício Francisco Ceolin)

Resumo

O inventário florestal é uma importante atividade que fornece uma ampla gama de informações sobre os parâmetros populacionais de extensas áreas florestais, com base em delineamentos de amostragem. Assim, este trabalho apresenta e avalia o uso combinado de levantamentos laser aerotransporto (ALS -Airborne Laser Scanning) e de dupla amostragem para estimativa de volume em plantios de eucalipto, comparando os resultados obtidos com delineamentos amostrais tradicionais como a amostragem casual simples e a amostragem casual estratificada. No primeiro cenário de dupla amostragem assumiu-se a primeira fase como sendo a métrica de altura percentil 90 (P90) derivado dos dados ALS. No segundo cenário, adotou-se o percentil 90 (P90) e a métrica de proporção porcentagem de todos os retornos acima da média relacionada aos primeiros retornos (ARMFR), derivadas dos dados LiDAR (Light Detection And Ranging). Através de simulações buscou-se determinar a intensidade amostral necessária para atender um erro de amostragem máximo de 5 %. O estudo foi realizado em uma área de 401,6 hectares localizada nos municípios de São Miguel Arcanjo e Pilar do Sul, onde foram lançadas e medidas 37 parcelas em campo. O menor erro de amostragem obtido foi o da dupla amostragem com regressão múltipla (±1,8 %), seguidos pela dupla amostragem com estimador de regressão simples; amostragem casual estratificada; e amostragem casual simples, confirmando o potencial de uso dos dados do sensor laser para melhorar as estimativas de volume do inventário florestal, possibilitando a redução da intensidade amostral. Considerando apenas 10 unidades de amostra, o erro da dupla amostragem obtido na regressão múltipla foi de ±3,4 %.

Palavras-chave: LiDAR; Delineamento amostral; Erro amostral; Dupla amostragem; Métricas ALS

Abstract

The forest inventory is an important activity to provide a wide range of information about the parameters from extensive forested areas based on sampling designs. This study evaluates the use of ALS (Airborne Laser Scanning) metrics as part of a double sampling design for stand volume estimation in Eucalyptus plantation, comparing the results to traditional sampling designs such as simple random sampling and stratified random sampling. In one scheme, the double sampling first phase was the height metric 90th percentile (P90) derived from LiDAR (Light Detection And Ranging) data. In the second double sampling scenario we

adopted the 90th percentile (P90) and the density metric percentage of all returns above the mean of first returns (ARMFR), also derived from LiDAR data. Through simulations we sought to determine the sampling intensity required to obtain a sampling error at most 5 %. The study was conducted in 401.6 hectares of Eucalyptus plantation located between the municipalities of São Miguel Arcanjo and Pilar do Sul (São Paulo), where 37 plots were measured in field. The smallest sampling error was obtained from the double sampling with multiple regression (±1.8 %) followed by the double sampling with simple regression, the stratified random sampling and the simple random sampling; confirming the use of ALS data to improve the volume estimation and enabling the sampling intensity reduction. The error of double sampling with multiple regression was ±3.4% considering only 10 field plots.

Keywords: LiDAR; Double sampling; Sample design; Sampling error; ALS metrics

2.1 Introdução

O Inventário florestal tem por objetivo a quantificação e qualificação dos atributos florestais existentes em uma área, sendo uma peça importante dentro do manejo florestal, seja de florestas naturais, seja de florestas plantadas. Ele é capaz de fornecer detalhes da floresta, por meio de técnicas de amostragem que estimam os parâmetros da população (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997; MORAIS FILHO et al., 2003).

Em função do tamanho das florestas e da densidade de indivíduos por unidade de área, normalmente os inventários florestais são realizados por meio de amostragem. Diferentes delineamentos amostrais existem para melhor estimar o valor de um determinado parâmetro populacional e a sua variação. O erro amostral (E(%)) é determinado a partir do erro padrão da média $(S_{\bar{y}})$, que nada mais é que uma medida de variabilidade da média quando repetidas amostras são tomadas da população (SHIVER; BORDERS, 1996).

Na amostragem casual simples (ACS), todos os elementos da população possuem a mesma probabilidade de pertencer à amostra. A principal limitação da ACS é que o lançamento aleatório das parcelas pode resultar na não representação de todos os estratos da floresta, resultando assim em estimativas imprecisas da população. Neste caso, quando a população pode ser dividida em estratos homogêneos, emprega-se a amostragem casual estratificada (ACE). Os estratos devem ser representados na amostra na mesma proporção com que existem na população. Quanto mais estratificada a floresta e consequentemente mais

homogêneo os estratos, o erro amostral tende a diminuir, uma vez que o erro padrão da média também diminui.

Em casos em que um maior nível de detalhe e precisão são requeridos, a dupla amostragem (ou amostragem em duas fases) se oferece como uma interessante alternativa. Na primeira fase (também conhecida como fase simples), os esforços são direcionados para a obtenção de uma variável auxiliar, sem se preocupar com a variável de interesse. Assim, a variável auxiliar deve ser de mais fácil mensuração e altamente correlacionada com a variável de interesse. A intensidade amostrada durante a primeira fase é geralmente superior à intensidade da segunda fase (SHIVER; BORDERS, 1996).

Na segunda fase (também conhecida como fase completa), a intensidade amostral é menor e medem-se simultaneamente a variável auxiliar e a variável de interesse nas unidades amostrais. Não é necessário que as fases ocorram de maneira simultânea. No entanto, é fundamental que na segunda fase sejam coletadas as duas variáveis de forma a permitir que um estimador de regressão relacione a variável auxiliar e a variável de interesse (SHIVER; BORDERS, 1996).

A dupla amostragem (DA) permite que as informações dos dados auxiliares sejam usadas para melhorar a precisão e exatidão das estimativas das variáveis do inventário florestal, quando comparadas com os inventários baseados apenas nas observações da variável de interesse. Essa melhoria é obtida através do uso de estimadores de regressão ou de razão e depende do nível de correlação entre os dados de sensoriamento remoto e as variáveis de inventário florestal (STEPHENS et al., 2012).

É muito comum o uso de informações obtidas por sensores remotos na primeira fase de uma dupla amostragem em levantamentos florestais. Andersen e Breidenbach (2007), por exemplo, demonstraram que o emprego de variáveis auxiliares obtidas a partir do sensoriamento remoto pode aumentar a precisão e a exatidão das estimativas de inventário. As primeiras aplicações da dupla amostragem em inventários florestais utilizaram na primeira fase informações extraídas de fotos aéreas. Em seguida, imagens de satélite passaram a substituir as fotos aéreas (VAN DEUSEN et al., 1999). O escaneamento laser aerotransportado, baseado em tecnologias LiDAR (*Light Detection And Ranging*) apresenta-se como alternativa tecnológica viável capaz de produzir bons resultados quando métricas

resultantes desses levantamentos são usadas como variáveis auxiliares em inventários de dupla amostragem.

O escaneamento laser aerotransportado (ALS – Airborne Laser Scanning) tem ganhado destaque (MALTAMO et al., 2004). Os sistemas LiDAR, emissores de pulsos de luz laser, baseiam-se nos mesmos princípios dos sistemas RADAR, emissores de ondas de rádio (GIONGO et al., 2010). A tecnologia LiDAR baseada em sensores acoplados aos processos de varredura a laser aerotransportado gera uma grande quantidade informação tridimensional sobre a estrutura vertical e horizontal da floresta com alta precisão, baixo custo e alta velocidade de aquisição de dados (GIONGO et al., 2010).

A escolha do melhor método amostral, além de considerar as características da população, deve adequar a expectativa de maior precisão ao menor custo possível. A não consideração de características específicas da população estudada, pode acarretar custos maiores de inventário (CESARO et al., 1994). Dessa forma, justificam-se as análises de diferentes métodos de amostragem, que busquem reduzir o tempo e o custo de execução do inventário, sem que haja prejuízos à precisão e à exatidão das estimativas.

Næsset et al. (2013) reforçam a recomendação de desenhos amostrais eficientes para inventários, especialmente relacionados à incerteza e aos custos. Diferentes estratégias de amostragem têm sido analisadas com base em técnicas de simulação.

A hipótese deste trabalho é de que a alta densidade de pontos amostrados em levantamentos laser aerotransportados aliado à alta correlação entre as métricas ALS e parâmetros biofísicos da floresta pode ser utilizada na primeira fase do método dupla amostragem e, também, para reduzir esforço e intensidade amostral de campo.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em uma área de 401,6 hectares pertencente à empresa Suzano Papel e Celulose, localizada no interior do Estado de São Paulo, nos municípios de São Miguel Arcanjo e Pilar do Sul (Figura 2.1). O clima da região é caracterizado pela precipitação média anual de 1325 mm e altitude média de 710

m (classificação de Köppen: Cfa) (ALVARES et al., 2013). O relevo é ondulado com inclinação máxima de 32 graus (GAVA, 1997).

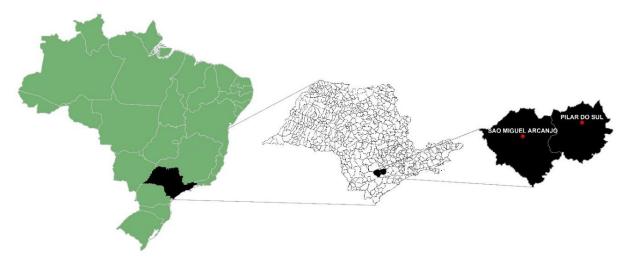


Figura 2.1 - Localização dos municípios da área de estudo

A área é dividida em talhões, formados por plantios clonais do gênero *Eucalyptus*, manejados para a produção de celulose. Apresentam idade de seis anos e foram plantados utilizando-se clones originários de quatro grupos genéticos diferentes, em espaçamento 3 x 2,2 m. Foram considerados neste estudo os dados coletados em 37 parcelas circulares com área de 380,13 m² (Tabela 2.1).

Tahala 21.	 Caracterizaçã 	a dae nav	namentos	do astudo
Tabela 2. I	- Garacienzaca	o dos bov	vanientos	ao estado

Unidade de	Área	N° de	DAP	(cm)	Altur	a (m)	VTCC	(m3/ha)
Produção	(ha)	parcelas	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1	101,47	10	14,0	0,61	23,2	0,86	266,5	30,15
2	64,18	5	14,8	0,38	24,8	0,62	293,7	31,22
3	50,32	5	15,9	0,27	25,9	0,65	358,4	25,24
4	83,31	7	16,0	0,50	26,6	0,61	387,7	25,36
5	102,34	10	16,2	0,88	26,3	1,07	362,9	42,87

^{*} DAP = Diâmetro a altura do peito e VTCC= Volume total com casca.

2.2.2 Levantamento dos dados ALS

Os dados ALS foram obtidos em dezembro de 2013, com uma aeronave CESNA modelo 206, equipada com uma unidade inercial Applanix (IMU +GPS) modelo POS AV 150 e sensor LiDAR Harrier 68i da Trimble. As especificações do voo encontram-se detalhadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Especificações do voo

Características	Descrição dos parâmetros		
Densidade de pontos	10 pontos/m²		
Diâmetro do pulso no alvo (footprint)	0,22 m		
Ângulo de abertura para varredura (FOV)	45°		
Faixa de varredura	363,11 m		
Altura do voo	438,32 m		
Taxa de escaneamento	174,05 Hz		
Taxa de emissão	400 kHz		

O processamento dos dados ALS foi realizado utilizando o software FUSION (McGAUGHEY, 2014). Para este trabalho, foram utilizadas as métricas percentil 90 (P90), que corresponde à altura x em que 90% dos retornos da nuvem estão abaixo da altura x, e a métrica de densidade (ou proporção), porcentagem de todos os retornos acima da média relacionada aos primeiros retornos (ARMFR) (Tabela 2.3). As métricas foram calculadas considerando a altura mínima de 2 m, visando excluir os pontos referentes ao sub-bosque e solo.

Tabela 2.3 - Descrição das métricas ALS utilizadas no estudo

Métricas A	ALS	Descrição	
P90	Percentil 95 de altura	altura em que 90 % dos retornos estão abaixo;	
ARMFR	Porcentagem de retornos acima da média relacionada aos primeiros retornos	$ARMFR = \frac{N_{\overline{h}}}{N_p}.100$	

Onde: $N_{\overline{h}}$ = número de retornos acima da altura média e N_p = número de primeiros retornos.

2.2.3 Levantamento de campo

As 37 parcelas foram lançadas de forma aleatória dentro das 5 unidades de produção (UP). Em cada parcela foram medidos os diâmetros à altura do peito (DAP) de todas as árvores, a altura total das 10 árvores localizadas na linha central da parcela e 4 alturas totais das árvores de maior DAP. O modelo hipsométrico de Campos et al. (1984) foi utilizado para estimação das alturas (H) das árvores não medidas e o volume foi estimado pelo modelo de Schumacher e Hall (1933), para os quais foram fornecidos pela empresa os coeficientes adequados para a região onde o estudo está inserido. O volume total com casca (VTCC) de cada parcela é resultado da soma dos volumes individuais, e convertido para volume por hectare com base na área da parcela.

2.2.4 Delineamentos amostrais

O volume total com casca da área de estudo foi estimado através de três delineamentos amostrais consolidados em cinco cenários. No primeiro, as parcelas foram processadas assumindo amostragem casual simples (ACS). Em seguida, duas estratificações foram implementadas. A primeira amostragem casual estratificada (ACE I) usou apenas o material genético como variável de estratificação. Na ACE II considerou-se o material genético e a unidade de produção (UP) como critérios de estratificação. A UP foi escolhida por agrupar áreas submetidas a condições semelhantes de manejo. Por fim, duas abordagens de dupla amostragem (DA) pelo estimador da regressão foram desenvolvidas. A primeira abordagem (DA I) assumiu apenas uma métrica ALS como variável auxiliar na primeira fase. A segunda abordagem (DA II) considerou duas métricas ALS como variáveis auxiliares expressam estatísticas derivadas da distribuição vertical dos retornos ALS (SILVA, 2014).

Na amostragem casual simples, sendo \bar{Y} a média amostral e t a estatística t de *Student*, tabelada para n-1 graus de liberdade com 5% de significância, o erro de amostragem percentual pode ser estimado pela equação 1 (SHIVER; BORDERS, 1996).

$$E(\%) = \frac{S_{\overline{Y}} \cdot t}{\overline{V}} \cdot 100 \tag{1}$$

Ainda com relação à ACS, sendo y_i o volume por hectare da i-ésima parcela, S_y^2 é a variância do volume por hectare das parcelas, n o número de parcelas e N é o número total de unidades amostrais possíveis dentro da população, a média (eq. 2) e a variância da média (eq. 3) podem ser calculadas da seguinte forma (SHIVER; BORDERS, 1996):

$$\bar{Y} = \frac{\sum y_i}{n} \tag{2}$$

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{S_y^2}{n} \cdot \left(\frac{N-n}{N}\right) \tag{3}$$

O erro padrão da média pode ser então calculado através da equação 4:

$$S_{\bar{y}} = \pm \sqrt{S_{\bar{y}}^2} \tag{4}$$

Na amostragem casual estratificada, sendo \bar{Y}_j a média dos volumes das unidades de amostra do j-ésimo estrato, n_j o número de parcelas no j-ésimo estrato, N_j o número de parcelas possível no j-ésimo estrato, N_j o número de unidades de amostra possíveis na população e S_j^2 a variância do j-ésimo estrato, a média estratificada (eq. 5) e a variância da média estratificada (eq. 6) podem ser estimadas através de (SHIVER; BORDERS, 1996):

$$\bar{Y} = \frac{\sum N_j \, \bar{Y}_j}{N} \tag{5}$$

$$S_{\bar{y}}^2 = \sum \left(\left(\frac{N_j}{N} \right)^2 \cdot \frac{S_j^2}{n_j} \cdot \left(\frac{N_j - n_j}{N_j} \right) \right) \tag{6}$$

O erro padrão da média foi obtido, extraindo-se a raiz quadrada da equação 6.

Na DA I, o estimador da regressão (eq. 7) foi escolhido para relacionar a variável de interesse (2ª fase) volume total com casca (VTCC) com a variável auxiliar (1ª fase) percentil 90 (P90), que expressa a altura abaixo da qual se encontram 90% dos retornos ALS:

$$VTCC = \beta_0 + \beta_1 P90 + \varepsilon \tag{7}$$

onde.

 β_i = coeficientes do modelo e

 ε = erro aleatório.

Já na DA II, foram utilizadas duas variáveis auxiliares (percentil 90 – P90 e porcentagem de retornos acima da média dos primeiros retornos – ARMFR) em uma

regressão linear múltipla (eq. 8) para relacionar essas duas métricas ALS (1ª fase) com a variável de interesse VTCC (2ª fase).

$$VTCC = \beta_0 + \beta_1 P90 + \beta_2 ARMFR + \varepsilon$$
 (8)

Onde,

 β_i = coeficientes do modelo e

 ε = erro aleatório.

Na dupla amostragem, a variância da média amostral (eq. 9) é uma combinação da variância do VTCC mensurado na 2ª fase e do estimador da regressão que relaciona a variável auxiliar com a variável de interesse (eq. 10), podendo ser estimado por (SHIVER; BORDERS, 1996):

$$S_{\overline{y}_{dl}}^2 = \frac{S_y^2}{n} \cdot \left(1 - \left(\frac{n' - n}{n'} \right) \cdot \rho^2 \right) \tag{9}$$

Em que n' e n = número de parcelas na 1ª e 2ª fase, respectivamente e ρ pode ser calculado a partir do coeficiente de determinação ajustado do modelo (SHIVER; BORDERS, 1996):

$$\rho = \sqrt{R_{adj}^2} \tag{10}$$

A métrica de altura P90 foi escolhida com base no trabalho desenvolvido por Zonete et al. (2010), que encontrou o percentil 90 (P90) entre as métricas mais promissoras para modelar volume de plantios florestais. Silva (2014) sugeriu a inclusão métricas de proporção para ajudar a explicar parte da variação do volume. Assim na DA II, foi adicionado ao estimador da regressão a métrica de densidade ARMFR.

2.2.5 Intensidade amostral

Para que a determinação da intensidade amostral ideal nas cinco estratégias amostrais se faça de forma comparativa optou-se por utilizar um processo de simulação variando gradativamente o número de parcelas até que o erro amostral atinja nível satisfatório.

O processo de simulação consistiu, portanto, num processo de redução gradativa ao acaso do número de parcelas (n) até que o erro amostral médio atingisse ±5%. A cada redução, n parcelas eram escolhidas ao acaso e as estatísticas da amostragem (erro padrão, intervalo de confiança e erro amostral) recalculadas. O processo de escolha e de cálculo das estatísticas da amostragem foi repetido 50 vezes para cada redução. Caso a redução atingisse o número mínimo de parcelas definido para cada delineamento amostral, sem que o erro atingisse ±5%, a simulação era encerrada. O número mínimo de parcelas foi definido como 10 parcelas para as amostragens ACS e DA, e em 3 parcelas por estrato na amostragem ACE.

2.3 Resultados e Discussão

A estratificação reduziu o erro amostral em mais de 2 pontos percentuais. Enquanto que o erro via amostragem casual simples apresentou um erro amostral de $\pm 4.8\%$, a estratificação por um nível (material genético) apresentou um erro amostral de $\pm 3.4\%$, que pôde ser reduzido para $\pm 2.6\%$ quando a amostragem foi implementada em dois níveis (material genético e UP). Essa melhora era esperada, uma vez que a estratificação aumenta a homogeneidade das sub amostras e reduz a variância global (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Resumo das estatísticas dos delineamentos amostrais

Amostragem	VTCC (m³/ha)	Variância da média (m³/ha)	Erro Padrão (m³/ha)	Intervalo de Confiança (m³/ha)	Erro Amostral (%)
ACS	331,6	89,7	±9,5	±16,0	±4,8
ACE I	335,5	45,3	±6,7	±11,4	±3,4
ACE II	333,3	27,0	±5,2	±8,8	±2,6
DA I	319,8	14,5	±3,8	±6,4	±2,0
DA II	328,3	12,8	±3,6	±6,0	±1,8

A dupla amostragem atingiu um erro amostral ainda menor, chegando a ±2,0% utilizando uma regressão simples como estimador (DA I) e a ±1,8% utilizando a regressão múltipla como estimador (DA II). A regressão linear simples (eq. 7) apresentou coeficientes significativos (Tabela 2.5), coeficiente de determinação ajustado (R²adj) de 83,7% e erro padrão dos resíduos de 23,3 (m³/ha). A análise de resíduos pode ser visualizada na Figura 2.2.

Tabela 2.5 - Resumo estatístico da regressão linear simples

	Estimado	Erro Padrão	Valor de t	P-Valor	
Intercepto	-335,37	49,04	-6,84	6,18E-08	***
P90	24,25	1,78	13,64	1,42E-15	***

Obs.: *** significativo a 0,001%.

A regressão linear múltipla usada na DA II (eq. 8) composta por uma métrica de altura (P90) e uma de densidade (ARMFR) apresentou coeficientes significativos (Tabela 2.6), coeficiente de determinação ajustado (R²adj) de 85,3% e erro padrão dos resíduos de 22,15 (m³/ha). A análise de resíduos pode ser visualizada na Figura 2.2.

Tabela 2.6 - Resumo estatístico da regressão linear múltipla

	Estimado	Erro Padrão	Valor de t	P-Valor	
Intercepto	-435,34	65,56	-6,64	1,28E-07	***
P90	24,37	1,69	14,41	4,88E-16	***
ARMFR	1,59	0,73	2,17	0,0371	*

Obs.: *** significativo a 0,001% e * significativo a 0,05%

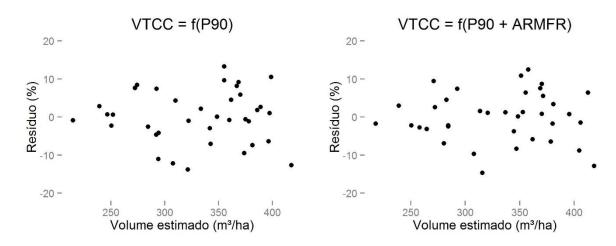


Figura 2.2 - Gráfico percentual dos resíduos em função do volume estimado

A utilização da a alta correlação entre as métricas ALS (P90 e ARMFR) e os parâmetros populacionais do povoamento possibilitou uma estimativa por meio de dupla amostragem mais precisa da variável de interesse (volume). A redução do erro amostral por meio de DA pode reduzir custos, uma vez que menores intensidades amostrais podem manter o erro amostral dentro de intervalos satisfatórios. Stephens et al. (2011) também obtiveram melhora aplicando a dupla amostragem utilizando métricas ALS como primeira fase para estimar o estoque de carbono nas florestas da Nova Zelândia. A regressão linear simples utilizada vinculando a primeira e a segunda fase da dupla amostragem obteve um coeficiente de correlação (R²) de 74%, melhorando em 6% a estimativa anterior do estoque de carbono. Utilizando dados de biomassa de uma floresta simulada, Næsset et al. (2013) encontraram uma redução do erro padrão de ±2,8 Mg ha-1, considerando a amostragem casual simples, para ±1,0 Mg ha-1 na dupla amostragem utilizando dados ALS.

Na simulação desenvolvida para verificar a intensidade amostral para um erro aceitável de $\pm 5\%$, a dupla amostragem permitiu uma redução de 71,4% do número de parcelas em relação à amostragem casual simples (Tabela 2.7). Para um erro aceitável de $\pm 5\%$, são necessárias 35 parcelas seguindo a ACS, 17 parcelas na ACE I. Na ACE II e na DA, a intensidade amostral atingiu o limite mínimo de parcelas proposto anteriormente sem que o erro atingisse os $\pm 5\%$. O erro amostral da ACE II ficou em $\pm 3,5\%$ (18 parcelas – 3 por extrato) e o erro amostral da DA I e da DA II ficaram em $\pm 3,8\%$ (10 parcelas) e $\pm 3,4\%$ (10 parcelas), respectivamente.

Tabela 2.7 - Tamanho amostral dos delineamentos amostrais para o erro máximo de ±5%

Amostragem	Número de Parcelas	Erro Amostral (%)
ACS	35	±5,0
ACE I	17	±4,8
ACE II	18	±3,5
DA I	10	±3,8
DA II	10	±3,4

2.4 Conclusão

A alta correlação existente entre o volume e as métricas ALS permitiu uma considerável melhora das estimativas de volume no inventário florestal, através da aplicação da dupla amostragem. Seu uso permite inclusive uma redução do número de parcelas medidas em campo para um determinado erro amostral tolerável.

Com a popularização e redução dos custos associados aos levantamentos laser aerotransportados, o uso desta tecnologia pode trazer ganhos consideráveis de exatidão e de redução de custos. Especialmente para inventários de grandes áreas, inclusive considerando florestas naturais que se localizam em locais cujo trabalho de campo ocorre em condições extenuantes. Dessa forma, os inventários nacionais também podem se beneficiar de uma abordagem de dupla amostragem com primeira fase baseada em métricas ALS.

Agradecimentos

Este trabalho é parte do programa de pesquisa desenvolvido pelo GET-LiDAR (Grupo de Estudos em Tecnologia LiDAR). Agradecemos o apoio da Suzano Papel e Celulose por viabilizar o levantamento laser aerotransportado e pela coleta dos dados de campo. Agradecemos também à CAPES pelas bolsas de mestrado e doutorado concedidas aos pesquisadores envolvidos neste projeto.

Referências

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map from Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, Dec. 2013.

ANDERSEN, H.E.; BREIDENBACH, J. Statistical properties of mean stand biomass estimators in a Lidar-based double sampling forest survey design. **In: ISPRS WORKSHOP ON LASER SCANNING 2007 AND SILVILASER 2007**, 2007, Espoo. Disponível em:

http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.222.625&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 19 maio 2014.

CAMPOS, J.C.C; RIBEIRO, J.O.; PAULA NETO, F. Inventário florestal nacional, reflorestamento: Minas Gerais. Brasília, DF: IBDF, 1984. 126p.

CESARO, A.; ENGEL, O.A.; FINGER, C.A.G.; SCHNEIDER, P.R. Comparação dos métodos de amostragem de área fixa, relascopia, e de seis árvores, quanto a eficiência, no inventário florestal de um povoamento de *Pinus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 97-108, jun. 1994.

- GAVA, J.L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v.11, n. 30, p. 89-94, abr. 1997.
- GIONGO, M.; KOEHLER, H.S.; MACHADO, S.A.; KIRCHNER, F.F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago./out. 2010.
- McGAUGHEY, R.J. **FUSION/LDV**: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization v. 3.50, Seattle, WA, 2014. Disponível em: http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf. Acesso em: 14 ago. 2015.
- MALTAMO, M.; MUSTONEN, K.; HYYPPÄ, J.; PITKÄNEN, J.; YU, X. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 34, n. 9, p. 1791-1801, Sept. 2004.
- MORAIS FILHO, A.D.; BRAVO, C.V.; ROQUE, R. A.M.; DE ANDRADE, W.F. **Utilização de métodos estatísticos em inventário florestal**. Piracicaba: ESALQ, dez. 2003. Disponível em:< http://www.lce.esalq.usp.br/tadeu/inventarioflorestal.pdf>. Acesso em: 19 maio 2014.
- NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T.; BOLLANDSÅS, O.M.; GREGOIRE, T.G.; NELSON, R. STÅHL, G. Comparison of precision of biomass estimates in regional field sample surveys and airborne LiDAR-assisted surveys in Hedmark County, Norway. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 130, p. 108-120, Mar. 2013.
- PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D.A. **Inventário Florestal**. Curitiba: Editado pelos autores, 1997. 316p.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v.47, n.9, p.719-734, Nov. 1933.
- SHIVER, B.D.; BORDERS, B.E. **Sampling techniques for forest resource inventory**. New York: John Wiley, 1996. 356p.
- SILVA, A.G.P. Estimativa da biomassa de lenho em povoamentos de *Eucalyptus grandis* baseada em estatísticas do perfil de dossel geradas por escaneamento a laser aerotransportado. 2014. 146p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- STEPHENS, P.R.; KIMBERLEY, M.O.; BEETS, P.N.; PAUL, T.S.H.; SEARLES, N.; BELL, A.; BRACK, C.; BROADLEY, J. Airborne scanning LiDAR in a double sampling forest carbon inventory. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 117, p. 348-357, Feb. 2012.
- Van DEUSEN, P.C.; PRISLEY, S.P.; LUCIER, A.A. Adopting an annual inventory system: user perspectives. **Journal of Forestry**, Washington D.C., v. 97, n. 12, p. 11-14, Dec. 1999.

ZONETE, M.F. Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 225-235, jun. 2010.

3 CARACTERIZAÇÃO DAS DIFERENÇAS ENTRE CLONES DE *EUCALYPTUS* ATRAVÉS DE ESCANEAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO

"É somente com o coração que podemos ver corretamente; o essencial é invisível aos olhos." (Antoine de Saint-Exupéry)

Resumo

Os plantios florestais fornecem uma variedade de produtos madeireiros, muitas vezes em rotações mais curtas do que as florestas nativas, contribuindo de forma significativa para a produção global de madeira. Nos países tropicais, o gênero Eucalyptus é o mais plantado, devido a sua adaptabilidade às condições de solo e clima, e geralmente, à sua elevada produtividade. Plantações clonais de eucalipto no Brasil são o resultado de cruzamentos incrementais de genótipos incrementais de programas de pesquisa de melhoramento genético, com o objetivo de aumentar a produtividade, homogeneidade e qualidade das fibras, no entanto, variações nos atributos florestais, tais como volume de fuste, diâmetro, altura e estrutura do dossel, entre clones e espécies ainda permanecem. A estrutura do dossel, em particular, contém informações importantes sobre o desenvolvimento das árvores e está associada a atributos funcionais e processos fisiológicos da floresta. Tecnologias de escaneamento a laser aerotransportado (ALS) têm sido utilizadas pelas indústrias florestais para fornecer avaliações de atributos florestais, fornecendo estimativas precisas das distribuições horizontal e vertical da vegetação, no entanto, poucos estudos analisaram essas diferenças entre clones, dentro e entre as idades. Neste estudo, foi avaliada a utilização de dados ALS para caracterizar diferenças entre clones de eucaliptos no sudeste do Brasil. Para tanto, foram utilizados cinco clones em diferentes idades (4, 6 e 7 anos). Nove métricas ALS e perfis de altura do dossel (CHP) derivados de dados ALS foram selecionados para descrever os atributos estruturais de dossel e sua complexidade. A distribuição Weibull foi empregada para modelar os CHPs. Os resultados indicaram que a altura máxima, representada pelo percentil 95 nesse estudo, variou em todas as comparações entre os grupos de pares. Poucas métricas foram capazes de distinguir estatisticamente a estrutura do dossel dos dois clones de E. grandis (6 anos). Entretanto, quando híbridos de eucalipto, as a clones diferenças significativamente. Em plantios de *E. grandis*, com 4 e 7 anos de idade, diferenças significativas na altura e na densidade do dossel foram encontradas. No geral, esses resultados demonstraram a capacidade do ALS para caracterizar diferenças na estrutura do dossel de clones de Eucalyptus, o que pode proporcionar melhoras nas estimativas de produtividade e na gestão sustentável dos plantios de florestas comerciais no Brasil.

Palavras-chave: LiDAR; Estrutura do Dossel; Clones de *Eucalyptus*; Perfil de Altura do Dossel; Distribuição Weibull

Abstract

Forest plantations provide a suite of wood products, often in shorter rotations than native forests, providing a significant contribution to the overall global wood production. In tropical countries, Eucalyptus is the most planted genus, due to its adaptability to soil and climatic conditions and its generally high productivity. Plantations of Eucalyptus clones in Brazil are the result of incremental breeding and genetic amelioration research programs aimed to increase productivity, homogeneity and fiber quality however variation in forest attributes, such as stem volume, diameter, height and canopy structure among clones and species remains. Canopy structure in particular contains important information on tree development and is associated with functional attributes and processes of forest physiology. Airborne laser scanning (ALS) technology has utilized by the forest industry to provide assessments of forest attributes, providing accurate estimates of both the horizontal and vertical distribution of vegetation, however very few studies have examined these differences among clones, within and across ages. In this study, we evaluated the use of ALS data to characterize differences between *Eucalyptus* clonal plantations in southeastern Brazil. To do so we examined five different clones at varying ages (4, 6 and 7 years-old). Nine ALS metrics, and canopy height profiles (CHP) derived from ALS data to represent the vertical distribution of leaves and branches within the canopy, were selected to describe the canopy structural attributes and complexity. The Weibull distribution was used to model CHP. Results indicate that the maximum height, expressed here by the 95th percentile, varied in all pairwise group comparisons. Few metrics could statistically distinguish canopy structure for the two *E. grandis* clones. However, when compared to other *Eucalyptus* hybrid clones, differences significantly increased. In 4 and 7 year old *E. grandis* plantations significant differences in height and stand canopy density were found. Overall, these results demonstrate the capacity of ALS to characterize differences in canopy structure of Eucalyptus clonal plantations, which can lead to improved site productivity assessments, and overall sustainable management of industrial forest plantations in Brazil.

Keywords: ALS; Canopy structure; Clonal Eucalyptus plantation; Canopy height profile; Weibull distribution

3.1 Introdução

As florestas plantadas possuem grande importância para o setor florestal nos países tropicais. No Brasil, os plantios florestais se caracterizam pelo rápido crescimento, curta rotação, e monoespecificidade. Essas áreas fornecem grande variedade de produtos florestais, contribuindo significativamente para a produção global de madeira (EVANS, 2009; PAYN et al., 2015). *Pinus* e *Eucalyptus* são os gêneros dominantes em escala mundial (FAO, 2000). Nos países tropicais, incluindo o Brasil, o *Eucalyptus* é mais comumente plantado, devido à sua alta produtividade e capacidade de adaptação a diversas condições de solo e clima (ITTO, 2009).

Nas últimas décadas, inovações nas técnicas de clonagem e avanços nas práticas silviculturais resultaram em melhoras quantitativas e qualitativas na produtividade dos plantios de eucalipto (GONÇALVES et al., 2008). A clonagem em particular, foi destinada a melhorar a produtividade, a homogeneidade de árvores individuais, a resistência à seca, geada e doenças, a capacidade de enraizamento, e a qualidade da madeira (GONÇALVES et al., 2013). No entanto, uma série de riscos potenciais estão associados à utilização de clones, principalmente, devido ao pequeno número utilizado, que restringe a base genética (GONÇALVES et al., 2013; GARDINER; MOORE, 2014). Dessa forma, a distribuição de diferentes clones nas áreas de plantio é recomenda aos gestores para diminuir o risco ligado à baixa variabilidade genética e ao baixo desempenho de clones a uma área específica (DeBELL; HARRINGTON, 1993; GARDINER; MOORE, 2014).

Diferenças entre espécies e clones de *Eucalyptus* são evidentes em virtude da grande variedade de espécies nesse gênero (REZENDE et al., 2014). Características como taxa de crescimento em volume, diâmetro a altura do peito (DAP) médio e altura podem diferir entre clones (MO et al., 2003). Além disso, grandes diferenças na distribuição de folhagem entre espécies ou clones de uma mesma espécie podem ser observados (JARVIS; LEVERENZ, 1983; REIS et al., 2004; FORRESTER et al., 2010). Diferenças na estrutura do dossel de uma floresta influenciam seu desenvolvimento (NORMAN; CAMPBELL, 1989) e estão associadas a atributos funcionais e processos da floresta (PARKER et al., 2004), tais como a distribuição de luz e temperatura em seu interior (JENNINGS et al., 1999).

O sistema de escaneamento a laser aerotransportado (ALS) tornou-se uma tecnologia reconhecida para mapeamento e estimativa do volume e crescimento da floresta, e vem sendo amplamente aplicada na área florestal para fornecer informações sobre diversos atributos florestais (WHITE et al., 2013). A natureza tridimensional dos dados ALS permite a caracterização da distribuição da vegetação, tanto horizontal como vertical (LIM et al., 2003), além de fornecer estimativas precisas sobre as alturas e cobertura do dossel (COOPS et al., 2007). As métricas derivadas de dados ALS vem sendo utilizadas nas estimativas de volume, biomassa, área basal e diâmetro médio quadrático (WHITE et al., 2013; GÖRGENS et al., 2015; PALACE et al., 2015; SILVA et al., 2015). Além desses aspectos, uma série de métricas que descrevem a variabilidade da distribuição dos retornos são adequadas para caracterizar a estrutura do dossel (COOPS et al., 2007; KANE et al., 2010).

Diferentes atributos vêm sendo estudados para caracterizar a estrutura vertical e horizontal do dossel através de dados ALS. No nível mais básico, as diferenças no desenvolvimento das florestas são refletidas nas alturas (média e máxima) (LEFSKY et al., 1999a). As métricas ALS podem ser relacionadas, também, com estruturas do talhão como altura, densidade da cobertura vegetal e variabilidade das alturas (LEFSKY et al., 2005) ou serem utilizadas para caracterizar a distribuição vertical. Perfis de alturas de dossel (CHPs) obtidos através de dados ALS vêm sendo utilizados para caracterizar o perfil vertical da floresta. Entretanto, esses perfis não representam o perfil real do dossel devido a limitações, do ponto de vista vertical, de resolver a angulação de folhas e agrupamentos (COOPS et al., 2007; LOVELL et al., 2003), sendo considerados perfis aparentes. Esses perfis, não só permitem a quantificação da biomassa, mas também a estimativa da distribuição vertical do dossel (FIEBER et al., 2015).

Informações acerca da estrutura dos talhões oferecem suporte a diversas atividades silviculturais, promovendo condições ideais para a sobrevivência e o crescimento de plantas (JENNINGS et al., 1999). Adicionalmente, as características estruturais podem ser utilizadas em diversas áreas, tais como desenvolvimento de modelos do comportamento do fogo (HALL et al., 2005), modelagem de carbono (NÆSSET, 2004; SILVA et al., 2015), modelagem fisiológica (MARSDEN et al., 2010), estimativas do índice de área foliar (FIEBER et al., 2015), e caracterização do estágio sucessional das florestas (KANE et al., 2010).

Diversos estudos empregando a tecnologia ALS vem sendo realizados em florestas naturais, no entanto, sua aplicação tem sido limitada em plantações, mais especificamente em povoamentos de *Eucalyptus*. Esses estudos têm-se concentrado em analisar a precisão dos dados ALS para estimar atributos dos talhões (WACK et al., 2003; JUPP et al., 2005; TESFAMICHAEL et al., 2010a, 2010b; GONÇALVES-SECO et al., 2011; PACKALÉN et al., 2011a, 2011b; VAUHKONEN et al., 2011; GÖRGENS et al., 2015). Zonete et al. (2010) demonstraram o elevado potencial do uso de métricas ALS como preditoras de parâmetros de inventário florestal, tais como diâmetro médio, altura média, altura dominante, área basal e volume, em plantios clonais de Eucalyptus em diferentes idades. A estimativa do volume a nível de parcela e índice de sitio utilizando modelos não lineares de efeitos mistos, em povoamentos de Eucalyptus urograndis com 28 clones diferentes, foram avaliados por Packalén et al. (2011).

Um estudo recente avaliou o mapeamento da biomassa do tronco com base em estatísticas dos perfis de alturas do dossel derivados de dados ALS, em uma plantação de *Eucalyptus grandis* com 6,5 anos (SILVA et al., 2015). Nesse estudo, a distribuição Weibull com dois parâmetros foi utilizada para descrever o CHP e modelar a biomassa do fuste, melhorando a precisão da estimativa. Görgens (2016) investigou o uso de dados ALS para caracterizar quatro diferentes grupos de tipologias florestais, utilizando perfis verticais, no Brasil. Similarmente a Silva et al. (2015), a distribuição Weibull foi usada para descrever os perfis de altura de sete florestas diferentes, quatro tipos nativos e três plantios de *Eucalyptus*. Os resultados demonstraram que as tipologias podem ser diferenciadas através dos perfis verticais derivados de dados ALS.

Este estudo, visa avaliar a capacidade de dados ALS para caracterizar as diferenças entre os plantios compostos por diferentes espécies de *Eucalyptus*. Para tanto, de início as parcelas selecionadas foram agrupadas de acordo com o tipo clonal e idade. Posteriormente, nove métricas ALS foram selecionadas para descrever os atributos estruturais e complexidade do dossel. Finalmente, foi descrita a adequação de cada uma das métricas para caracterizar as diferenças entre clones e discutida a capacidade dos dados ALS de gerar informações mais precisas sobre as florestas.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no sudeste do estado de São Paulo, Brasil (23°51'S 47°52'O) e compreende plantios clonais do gênero *Eucalyptus*, com uma área de 892,70 ha (Figura 3.1). Essa área apresenta a temperatura média anual de 18,9 °C e precipitação média anual é de 1325 mm, com altitude média de 710 m (ALVARES et al., 2013). O espaçamento utilizado no plantio é de 3 x 2,2 m, resultando em uma densidade média de 1515 fustes por ha. No Brasil, as plantações florestais destinadas à produção de celulose e papel, geralmente constituem monoculturas do gênero *Eucalyptus*, conduzidos sob curta rotação (6 a 7 anos).



Figura 3.1 – Localização da área de estudo

3.2.2 Levantamento dos dados de campo

As medições em campo foram realizadas entre os meses de abril e setembro de 2014, em 40 parcelas circulares com tamanho fixo de 400 m² (Figura 3.1). As parcelas estavam localizadas em 12 talhões, compostos por diferentes clones de eucalipto com idades diferentes. As posições centrais das parcelas foram coletadas com receptor Topcon HiPer GNSS. Em cada parcela foram mensurados o diâmetro à altura do peito (DAP), a altura de 10 árvores localizadas nas linhas centrais das parcelas e as alturas de 4 árvores de maior DAP. As alturas não mensuradas foram estimadas através do modelo hipsométrico de Campos et al. (1984). O volume de cada fuste foi calculado utilizando o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933), fornecido pela empresa onde o estudo foi desenvolvido e, em seguida resumido a nível de parcela. As parcelas foram agrupadas em seis grupos, conforme a idade e o tipo de clone (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Resumo das características das	parcelas, agrupadas por idade e tipo de clone

	Código	Idade	Número	Número de fustes	DA	P		Altura		Volume Total
Material genético	do Clone	(anos)	de parcelas	(fustes ha ⁻¹)	Média (cm)	SD (cm)	Máxima (m)	Média (m)	SD (m)	(m³ ha-1)
E. grandis x E. urophylla	GU	4	6	1163	14,85	3,13	26,97	23,36	3,11	224,25
E. grandis	G1	4	6	1408	14,70	1,87	23,85	21,67	1,65	230,50
E. grandis	G2	6	8	1400	15,64	3,07	30,50	26,35	3,70	342,65
E. grandis	G3	6	8	1434	15,99	3,68	32,49	26,67	4,30	380,00
E. grandis	G1	7	6	1383	18,22	2,82	31,57	28,37	2,30	470,25
E. grandis x E. dunnii	GD	7	6	1463	15,41	3,50	29,06	24,47	3,54	326,00

As espécies selecionadas apresentam atributos importantes do ponto de vista produtivo. Características como a qualidade da madeira e produtividade fazem com que o *E. grandis* seja uma das espécies mais plantadas no Brasil (BARREIROS et al., 2007). O *E. dunnii* tem apresentado rápido crescimento, uniformidade dos talhões e resistência à geada não severas (HIGA et al., 2000). O híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla* (E), conhecido como *E. urograndis*, foi desenvolvido para aumentar a produtividade, a tolerância a pragas e doenças, com excelente enraizamento, e é uma das principais espécies atualmente utilizadas para a produção de celulose no Brasil (SILVERIO et al., 2007; REZENDE et al., 2014).

3.2.3 Levantamento dos dados ALS

Os dados do escaneamento a laser aerotransportado (ALS) foram adquiridos em julho de 2014, utilizando o sensor LiDAR Harrier 68i da Trimble (TRIMBLE, 2011) instalado em uma aeronave Cessna 206. A altura do sobrevoo foi de cerca de 440 m, com um ângulo de varredura de 45° e uma largura de faixa de aproximadamente 363 m, resultando em um diâmetro do pulso médio no alvo de 0,22 m e uma densidade média de pontos de 10 pontos m-2 (Tabela 3.2). O principal produto desse levantamento é um conjunto de nuvens de pontos em 3D georeferenciados e registrados quanto ao tipo do retorno: primeiro e último retorno.

Tabela 3.2 - Especificações das configurações do voo

Características	Descrição dos parâmetros
Densidade nominal de pontos	10 pontos m ⁻²
Diâmetro do pulso no alvo (footprint)	0,22 m
Ângulo de abertura para varredura (FOV)	45°
Faixa de varredura	363,11 m
Sobreposição mínima entre faixas	50%
Altura do voo	438,32 m
Taxa de escaneamento	174,05 Hz
Taxa de emissão	400 kHz

O modelo digital de terreno (DTM – *Digital Terrain Model*) foi criado com base nos pontos da nuvem classificados como pertencentes ao solo. Primeiro, um algoritmo de filtragem (KRAUS; PFEIFER, 1998) foi aplicado para classificar os retornos como pertencentes ou não ao solo. Em seguida, uma superfície foi criada utilizando os pontos do terreno, o que resultou em um DTM com tamanho de célula de 1 m. Todos os retornos acima do solo foram normalizados para obter as alturas de vegetação. E então, o modelo digital de alturas (CHM – *Canopy Height Model*) foi criado com base nos retornos mais elevados da nuvem de pontos ALS, contido em cada célula do grid, resultando em uma superfície com célula de 1 m. O processamento foi realizado utilizando o software FUSION (McGAUGHEY, 2014).

Estudos anteriores demonstraram a alta correlação entre métricas ALS e características estruturais mensuradas em campo (LEFSKY et al., 2005; COOPS et al., 2007; KANE et al., 2010). Neste estudo, foram selecionadas 9 métricas para representar a estrutura da floresta (Tabela 3.3). Para cada parcela foram calculadas: altura média (H_m); percentil 95 de altura (H_{p95}); desvio padrão das alturas dos retornos (H_{sd}); altura da base da copa (H_{cb}); comprimento da copa (H_c); porcentagem de cobertura do dossel (CP_5); razão de relevância do dossel ou *canopy relief ratio* (CRR); índice de rugosidade ou *rumple* e o índice de rugosidade vertical ou *vertical rumple* (VR).

O H_{p95} foi utilizado para representar a altura máxima das parcelas e o H_{sd} mede a heterogeneidade estrutural das alturas das árvores na dimensão vertical (KANE et al., 2010). A H_{cb} representa a altura em que a frequência de retornos cai abruptamente (POPESCU; ZHAO, 2006), sendo o comprimento da copa obtido pela diferença entre H_{p95} e H_{cb} (Figura 3.2; Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Descrição das métricas ALS selecionadas no estudo

Métricas ALS		Descrição
H_m (m)	Altura média	média das alturas dos retornos acima de 5 m;
H_{p95} (m)	Percentil 95 de altura	altura em que 95 % dos retornos estão abaixo;
H_{sd} (m)	Desvio padrão das alturas	desvio padrão das alturas dos retornos acima de 5 m;
H_{cb} (m)	Altura da base da copa	altura em que a diferença entre a frequência total de pontos abaixo e acima é a maior;
H_c (m)	Comprimento da copa	$H_c = H_{p95} - H_{cb} ;$
CP ₅ (%)	Cobertura do dossel	número de primeiros retornos acima de 5 m dividido pelo total de primeiros retornos;
CRR	Razão de relevância do dossel	$CRR = (H_m - H_{min})/(H_{max} - H_{min})$ (Pike and Wilson 1971);
Rumple	Rugosidade	razão entre a superfície 3D e a 2D;
VR	Rugosidade vertical	$VR = \frac{\sum_{i=1}^{H_{max}} \sqrt{(nv_i - nv_{i-1})^2 + (h_i - h_{i-1})^2}}{H_{max}}$

Onde: H_{min} = altura mínima (m); H_{max} = altura máxima (m); nv_i = número de *volxels* no interval de altura i e h_i = valor da altura do intervalo de altura i (m).

O CP_5 pode ser definido como "a proporção de solo da floresta coberta pela projeção vertical das copas das árvores" (JENNINGS et al., 1999), e está altamente correlacionado com medições de campo do fechamento do dossel (KANE et al., 2010). O CRR expressa de um modo quantitativo a forma relativa do dossel, representando o grau em que a superfície do dossel está na parte superior (CRR > 0,5) ou inferior (CRR < 0,5) do intervalo de altura (PARKER; RUSS, 2004).

O rumple é uma razão entre a área da superfície do dossel e a área da superfície do solo (PARKER et al., 2004), e reflete a heterogeneidade estrutural de superfície do dossel (KANE et al., 2010). Esse valor foi obtido a partir da divisão do CHM em triângulos, as áreas dos triângulos criados foram somadas e divididas pela área da superfície do solo. Dosséis estruturalmente mais complexos apresentam valores mais elevados de rumple (KANE et al., 2008). O VR caracteriza a distribuição vertical dos retornos (TOMPALSKI et al., 2015). Na obtenção dessa métrica a nuvem de pontos normalizada foi convertida em voxels de 1 x 1 x 1 m, e, em seguida, o VR foi calculado com base na fórmula apresentada na tabela 3.3 (TOMPALSKI et al., 2015). Exceto para VR e H_{cb} , todas as métricas ALS foram derivadas utilizando retornos acima da altura de 5 m, visando excluir os pontos referentes ao sub-bosque e solo.

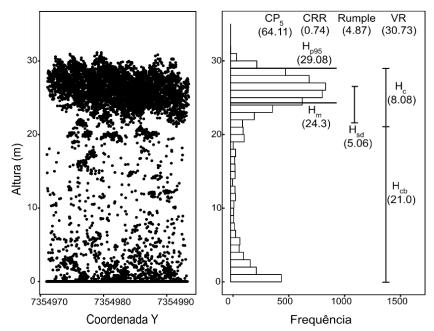


Figura 3.2 – Representação da H_m , H_{p95} , H_{sd} , H_{cb} , H_c , CP_5 , CRR, rumple and VR de uma parcela amostra. Corte transversal e histograma das alturas de uma parcela amostra selecionada. As alturas e o percentil 95 são mensurados em metro e a cobertura do dossel em porcentagem

Os perfis de alturas do dossel (CHP), definido como a área da superfície de todos os elementos do dossel (foliar e lenhosa), em função da altura (LEFSKY et al., 1999a), foram obtidos a partir dos dados ALS. Em seguida, a função de densidade probabilidade Weibull (eq. 1) com dois parâmetros foi ajustada ao CHP, devido à sua capacidade de caracterizar folhagem de diferentes vegetações (COOPS et al., 2007). A distribuição foi ajustada pelo método da máxima verossimilhança (MLE), considerado por Campos e Leite (2013) como o método de estimação mais eficiente, sendo realizada no software R, através do pacote MASS (VENABLES; RIPLEY, 2002). Esse procedimento resultou nos parâmetros de forma e escala sendo atribuídos a cada parcela da amostra. Semelhante às outras métricas, só retornos acima de 5 m foram utilizados.

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta - 1} e^{-(x/\alpha)^{\beta}} x \ge 0$$
 (1)

onde:

α = parâmetro de escala e

 β = parâmetro de forma.

A distribuição apresenta o parâmetro de forma β e o parâmetro de escala α . O primeiro está relacionado ao formato da curva, quando β assume valores entre

três e quatro, essa se aproxima de uma distribuição normal e quando esse valor e igual a 1 a função se resume a uma distribuição exponencial (MOOD; GRAYBILL; BOES, 1974).

3.2.4 Análises estatísticas

Comparações das características da estrutura da floresta entre os clones e idades foram avaliadas pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney (WILCOXON, 1945), um teste não paramétrico que assume a independência das observações e permite comparar se a distribuição da população de dois grupos são idênticas (hipótese nula) (ZAWAWI et al., 2015; MONTAGHI, 2013). As análises foram realizadas no software R (R Core Team 2015).

3.3 Resultados

3.3.1 Caracterização da estrutura da floresta

As métricas ALS calculadas, e os parâmetros de distribuição de Weibull (α e β) estimados, agrupados por idade e clone, podem ser visualizados na Tabela 3.4. Os resultados do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney entre grupos, cujas diferenças foram significativas são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Valores médios das métricas e dos parâmetros da distribuição Weibull derivados dos dados ALS, calculados para parcelas representando diferentes tipos de clones e idades. O desvio padrão é apresentado entre parênteses

Código clone	GU	G1	G2	G3	G1	GD	
Idade (anos)	4	4	6	6	7	7	
H_m	19,74 (0,97)	19,57 (0,98)	24,18 (0,57)	25,15 (0,98)	26,98 (0,74)	23,54 (1,85)	
H_{p95}	25,93 (1,00)	22,21 (0,80)	28,84 (1,47)	30,71 (1,04)	29,79 (0,81)	26,68 (1,31)	
H_{sd}	5,31 (0,34)	2,15 (0,36)	5,75 (0,97)	5,63 (0,76)	3,84 (0,61)	2,95 (0,56)	
H_{cb}	18,33 (1,21)	16,83 (1,17)	23,25 (1,16)	23,63 (1,06)	24,83 (0,98)	23,63 (2,19)	
H_c	7,60 (0,68)	5,38 (0,68)	5,59 (0,51)	7,09 (0,57)	4,96 (0,36)	7,09 (1,34)	
CRR	0,64 (0,03)	0,73 (0,07)	0,76 (0,04)	0,71 (0,03)	0,82 (0,03)	0,78 (0,09)	
CP_5	72,16 (3,76)	93,55 (1,24)	69,75 (3,97)	72,44 (5,47)	81,74 (4,87)	88,34 (1,36)	
Rumple	3,95 (0,52)	1,93 (0,15)	5,02 (1,08)	5,02 (0,67)	2,59 (0,68)	2,02 (0,38)	
VR	34,38 (2,95)	48,10 (2,15)	33,71 (4,03)	28,28 (2,02)	36,20 (3,26)	38,88 (4,33)	
Α	21,61 (0,98)	20,36 (0,94)	26,04 (0,83)	27,03 (1,03)	28,06 (0,84)	24,55 (1,80)	
В	4,83 (0,46)	12,75 (2,31)	6,65 (1,77)	6,56 (1,13)	13,49 (1,49)	13,14 (3,92)	

Alturas e percentil 95 (H_{n95}) em metros e cobertura do dossel (CP_5) em porcentagem (%).

Tabela 3.5 – P-valor resultante do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney para as métricas, entre grupos

Idade (anos)	Clones	H_m	H_{p95}	H_{sd}	H_{cb}	Нс	CP ₅	CRR	Rumple	VR	α	β
4	G1 – GU		0.002	0.002		0.002	0.002	0.036	0.002	0.002		0.002
6	G2 – G3		0.021			0.002		0.027		0.005		
7	G1 – GD	0.002	0.005	0.026	0.004		0.004				0.002	
4 e 7	G1 – G1	0.002	0.005	0.002	0.005		0.002	0.044		0.002	0.002	

 $[\]alpha$ e β correspondem aos parâmetros Weibull estimados. Métricas cuja as diferenças foram significativas, os p-valores são apresentados. As diferenças foram consideradas significativas para p-valor < 0,05.

Comparações entre clones, com mesma idade, indicaram que as alturas médias derivadas dos dados ALS são estatisticamente diferentes entre os clones de 6 e 7 anos de idade (teste de Wilcoxon, p < 0,01). Os resultados do teste de Wilcoxon indicaram que a métrica H_{p95} teve diferenças significativas para todos os grupos (p < 0,05). Os atributos de altura, H_m e H_{p95} , aumentaram com o desenvolvimento das árvores no clone G1 (Figura 3.3 e Tabela 3.4). O H_{sd} e CP_5 foram significativamente diferentes para o clone G1, com 4 e 7 anos de idade. O H_{sd} aumentou de 2,15 para 3,84 m e o CP_5 diminuiu de 93,55 % para 81,74 % com o crescimento do clone de G1. A variabilidade nas distribuições verticais (VR) foi significativa entre os grupos, exceto para os dois clones com 7 anos (teste de Wilcoxon, p < 0,01). Considerando o índice de rugosidade, os resultados indicaram maior irregularidade na superfície do clone GU (Rumple = 3,95) quando comparado ao G1 (Rumple = 1,93) (teste de Wilcoxon, p < 0,01), com 4 anos.

Os retornos do dossel estavam localizados na porção superior do perfil de altura (CRR > 0,5). No entanto, para os materiais de 4 anos, o clone G1 apresentou maior concentração de retornos na parte superior da copa do que o clone GU, o que indica um menor comprimento da copa, confirmado por menores valores de H_c . Para os dois clones de 6 anos, o G2 possuía maior valor de CRR (0,76) (Tabela 3.4).

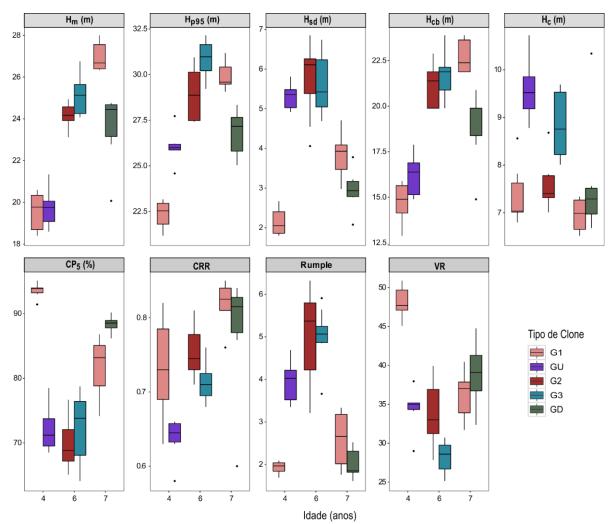


Figura 3.3 – Boxplots das métricas ALS: altura média (m); percentil 95 (m); desvio padrão da altura (m); altura da base da copa (m); comprimento da copa (m); cobertura de dossel (%); razão de relevância do dossel; índice de rugosidade e rugosidade vertical, representando a variabilidade para os diferentes clones e idades

Os valores médios do H_{p95} , H_{cb} e H_c para cada grupo são apresentados na Figura 3.4. Foram observadas diferenças significativas na H_c para clones que de 4 e 6 anos de idade (teste de Wilcoxon, p < 0,01). A H_{cb} foi significativamente diferente para clones com 7 anos e para o clone G1 (4 e 7 anos) (teste de Wilcoxon, p < 0,01).

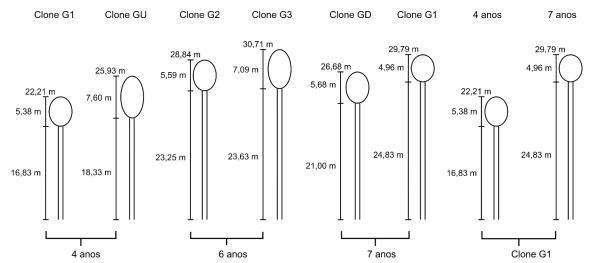


Figura 3.4 – Representação da média da altura da base da copa, do comprimento da copa e da altura total (H_{p95}) calculada para cada grupo

A Figura 3.5 ilustra as secções transversais de exemplares das parcelas, em cada um dos grupos, em conjunto com as distribuições Weibull derivadas dos dados ALS. As diferenças existentes na estrutura vertical entre os grupos podem ser claramente visualizadas. Nas plantações mais jovens, os clones diferiram em altura e comprimento da copa. O comprimento da copa no clone G1 foi mais curto, com a superfície do dossel mais regular e menor concentração de retornos na parte inferior da copa, abaixo de 16,0 m (Figura 3.5, A). Observou-se clara diferença no tamanho da copa entre as parcelas aos 6 anos, com ambos os clones apresentando superfícies do dossel irregulares, com os maiores valores de *rumple* (5,02), e retornos abaixo da altura de 23,0 m (Figura 3.5, B). Para os clones de 7 anos de idade (Figura 3.5, C), as distribuições verticais foram semelhantes. O desenvolvimento do clone G1 pode ser verificado na Figura 3.5-D, a H_{cb} aumentou cerca de 6 m ao longo de 3 anos.

Considerando as distribuições Weibull ajustadas aos dados ALS para os clones com 4 anos, a curva caracterizou de forma adequada os perfis de alturas no clone G1 e moderadamente para o clone GU que continha mais heterogeneidade vertical. No caso do clone GU, as curvas Weibull se ajustaram melhor a parte superior da copa do que a inferior. Analisando os parâmetros da distribuição (Tabela 3.4 e 3.5), o teste de Wilcoxon revelou que a principal diferença entre os clones de 4 anos estava no parâmetro β (p < 0,01), que corresponde à forma de distribuição. Esse parâmetro foi maior no clone G1 (β = 12,75) do que em GU (β = 4,83).

Os perfis de dossel para clones com 6 anos foram muito semelhantes, com parâmetros α e β próximos. Para os clones de 7 anos e entre o clone G1, as únicas

diferenças significativas foram detectadas no parâmetro α (teste de Wilcoxon, p < 0,01).

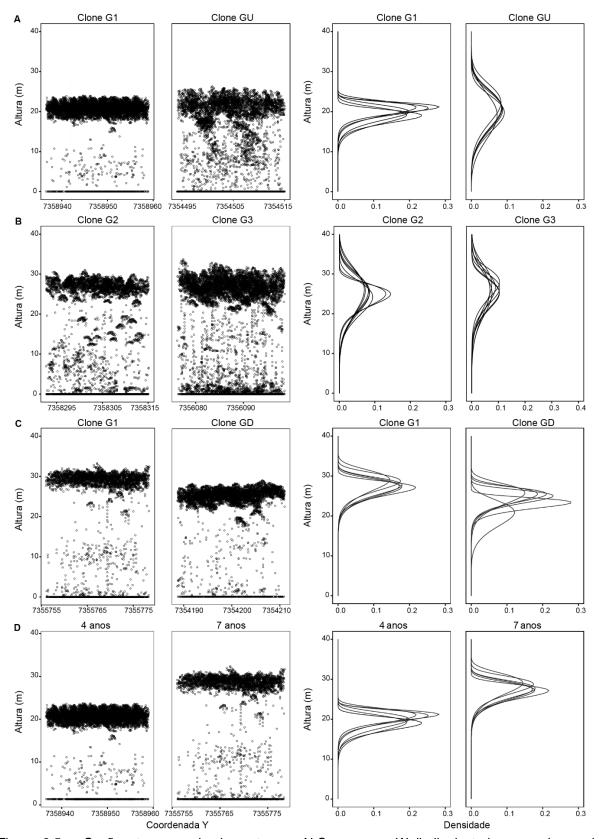


Figura 3.5 – Seções transversais dos retornos ALS e curvas Weibull ajustadas aos clones de Eucalyptus em A) 4 anos; B) 6 anos; C) 7 anos e D) clone G1 com 4 e 7 anos de idade

3.4 Discussão

A caracterização da estrutura da floresta é essencial para descrever as fases de desenvolvimento da floresta (KANE et al., 2010) e para apoiar atividades de gestão (COOPS et al., 2007). No entanto, a avaliação dessas características através de métodos tradicionais é trabalhosa. A tecnologia ALS pode descrever adequadamente a estrutura do dossel, fornecendo informações valiosas sobre os povoamentos florestais que incluem estimativas do volume, DAP, área basal, altura e cobertura do dossel. Diversas aplicações de dados ALS visando caracterizar as características estruturais foram estudadas em florestas nativas (HALL et al., 2005; COOPS et al., 2007; PALACE et al., 2015). Neste artigo, demonstra-se que essas abordagens podem ser utilizadas para além de florestas nativas, e que os dados ALS podem ser usados para caracterizar uma série de propriedades estruturais das plantações do gênero *Eucalyptus* e identificar diferenças entre espécies e clones.

Devido à heterogeneidade estrutural dos povoamentos, uma única métrica não tem sido capaz de capturar a complexidade do dossel, sendo necessária uma combinação de métricas para descrever a estrutura das áreas (KANE et al., 2008). Esse estudo demonstrou que mesmo entre os clones de uma mesma espécie, de mesma idade (por exemplo *E. grandis*; G2 e G3 clone) algumas métricas foram capazes de capturar as diferenças estruturais. Individualmente, o percentil 95 da altura teve a capacidade de diferenciar entre todos os grupos de clones, enquanto o índice de rugosidade e o parâmetro β da distribuição Weibull tiveram o pior desempenho.

As plantações mais jovens diferiram no percentil 95 de altura, no desvio padrão dos retornos ALS e no comprimento da copa. Considerando esses dois grupos, o clone GU (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) apresentou maior complexidade na estrutura do dossel, com valores mais elevados de desvio-padrão da altura e rumple, e menor porcentagem de cobertura do dossel. Os dois clones de *E. grandis* com 6 anos (G2 e G3), foram os mais similares em estrutura, com o menor número de métricas capaz de separar estes grupos. Pequenas diferenças entre estes dois clones, no entanto, ainda podem ser caracterizadas com dados ALS, o clone G2 possui copas mais curtas e compactas (Figura 3.4). Os clones com 7 anos (G1 e GD) apresentaram diferenças de altura, com maior desenvolvimento no clone G1. As diferenças entre esses dois grupos estavam relacionadas com a altura

da base da copa e a densidade da copa. Além do incremento em altura no clone G1 (4 e 7 anos de idade), foram encontradas diferenças na densidade das copas (cobertura do dossel) e na altura da base da copa. No entanto, o comprimento da copa não variou com o crescimento das árvores.

O uso de CHPs para descrever a distribuição vertical da vegetação e a aplicação da distribuição Weibull para modelar esses perfis tem provado ser apropriado, com aplicabilidade em diferentes tipos de vegetação (COOPS et al., 2007; FIEBER et al., 2015; SILVA et al., 2015; GÖRGENS, 2016). Nesse estudo, os perfis de altura do dossel derivados dos dados ALS ilustraram as diferenças na estrutura vertical entre os grupos, e destacaram a variação entre as parcelas amostradas com 4 anos de idade, verificada através da rugosidade vertical (VR) e o parâmetro β da distribuição Weibull. O parâmetro de forma controla a amplitude da distribuição (COOPS et al., 2007). Já o parâmetro de escala (α) corresponde ao percentil 63,2 da distribuição (McCOOL, 2012) e ao fator de posicionamento (COOPS et al., 2007). Os dois clones com 7 anos e clone G1 apresentaram diferenças nesse parâmetro, com o clone G1 aos 7 anos concentrando a distribuição nas alturas mais elevadas.

O conhecimento da estrutura do dossel fornece informações sobre o estado de desenvolvimento das comunidades vegetais (LEFSKY et al., 1999b). Estudos anteriores investigaram essa associação em florestas naturais, com a diversidade estrutural do dossel variando de acordo com o crescimento da floresta (PARKER; RUSS, 2004; Van PELT; NADKARNI, 2004; KANE et al., 2010). Em plantios florestais, o desenvolvimento do dossel está associado ao crescimento e tamanho das copas das árvores (FORRESTER et al., 2010). No presente estudo, foi possível observar uma diminuição na cobertura do dossel com o desenvolvimento dos povoamentos (Clone G1 - 4 a 7 anos), provavelmente resultante do declínio na área foliar e mortalidade das árvores. Não foram encontradas evidências significativas que comprovem o aumento da heterogeneidade no clone G1.

A caracterização dos clones através dos CHPs e de métricas ALS tem o potencial para demonstrar se clones estão sendo corretamente selecionados e manejados. A alta produtividade dos plantios de eucalipto está relacionada não só ao local (solo, água, ...), mas também com a seleção e estabelecimento de materiais clonais superiores, e a práticas silviculturais adequadas (GONÇALVES et al., 2008; RAMALHO et al., 2010; STAPE et al., 2010; HAKAMADA et al., 2015). Ao longo das

últimas décadas, avanços significativos têm ocorrido nas técnicas de reprodução, no entanto, variações no crescimento das árvores dentro plantios ainda ocorrem devido a uma série de fatores que influenciam a produtividade dos povoamentos (ZUCON et al., 2015). Essa variação pode ser refletida em muitos atributos (DAP, altura, volume) (MO et al., 2003), incluindo a distribuição vertical da folhagem da floresta (ALCORN et al. 2013). Packalén et al. (2011a) incluíram o efeito do clone nas estimativas de volume de parcelas amostras e de índice de sítio em plantações de eucalipto, resultando em melhorias na precisão dos modelos globais, com o nível clone explicando uma quantidade considerável da variação entre talhões.

A estrutura da floresta abrange numerosos elementos, com muitos considerados essenciais para o funcionamento e diversidade dos ecossistemas (SPIES, 1998). Nas florestas plantadas, a estrutura de copa é um componente importante devido à sua associação ao crescimento do tronco e a produtividade (ALCORN et al., 2013). O conhecimento desse elemento pode melhorar as atividades silviculturais, como a desrama e o desbaste, otimizando os efeitos no crescimento e forma do fuste (ALCORN et al., 2013) e, consequentemente, a quantidade e a qualidade de madeira produzida. Portanto, o conhecimento das características do clone assegura a seleção do material genético adequado, apoiando os tratamentos silviculturais, que são essenciais para a manutenção da produtividade, e pode melhorar a precisão das estimativas, se essas diferenças forem consideradas.

3.5 Conclusão

Neste estudo, foram utilizadas nuvens de pontos ALS para caracterizar uma série de clones de *Eucalyptus*. Os resultados indicaram que as diferenças de altura, cobertura do dossel, estruturas vertical e horizontal podem ser descritas com sucesso com os dados ALS. Descrever as características do dossel das espécies (ou clones) em plantios, utilizando dados ALS, permite um aperfeiçoamento das intervenções silviculturais, bem como a melhoria na capacidade de monitorar e estimar o volume e biomassa das florestas plantadas.

Agradecimentos

Este trabalho faz parte do projeto de pesquisa desenvolvido pelo Grupo de Estudos em Tecnologia LiDAR (GET-LiDAR), Universidade de São Paulo, Brasil e o

Estúdio Integrado de Sensoriamento Remoto (IRSS) - University of British Columbia, Canadá. Nós reconhecemos as seguintes instituições por seu apoio: Suzano Papel e Celulose e FotoTerra para fornecer os conjuntos de dados ALS; o Programa de Recursos Florestais de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo, o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), e a Universidade de British Columbia por fornecer a infra-estrutura e o ambiente adequado para o desenvolvimento dessa pesquisa; e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Governo do Canadá através do Programa de Futuros Líderes nas Américas (ELAP) pelo apoio a esse estudo através de uma bolsa de estudos.

Referências

ALCORN, P.J.; FORRESTER, D.I.; SMITH, R.G.B.; THOMAS, D.S.; JAMES, R.N.; NICOTRA, A.B.; BAUHUS, J. Crown structure and vertical foliage distribution in 4-year-old plantation-grown *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus cloeziana*. **Trees**, Berlin, v. 27, n. 3, p. 555-566, Jun. 2013.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, Dez. 2013.

BARREIRO, R.M.; GONÇALVES, J.L.M.; SANSÍGOLO, C.A.; POGGIANI, F. Modificações na produtividade e nas características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 103-111, jan./fev. 2007.

CAMPOS, J.C.C; RIBEIRO, J.O.; PAULA NETO, F. Inventário florestal nacional, reflorestamento: Minas Gerais. Brasília, DF: IBDF, 1984. 126p.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal:** perguntas e respostas. 4. ed. Viçosa: UFV, 2013. 605p.

COOPS, N.C.; HILKER, T.; WULDER, M.A.; ST-ONGE, B.; NEWNHAM, G.; SIGGINS, A.; TROFYMOW, J.A. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR. **Trees**, Berlin, v. 21, n. 3, p. 295–310, Jan. 2007.

DeBELL, D.S.; HARRINGTON, C.A. Deploying genotypes in short-rotation plantations: mixtures and pure cultures of clones and species. **Forestry Chronicle**, Ottawa, v. 69, n. 6, p. 705–713, Dec. 1993.

EVANS, J. **Planted forests:** uses, impacts and sustainability. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations and CAB International, 2009. 213p.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2000**. FAO Forestry Paper, 140. Roma, 2000. 479p.

- FIEBER, K.D.; DAVENPORT, I.J.; TANASE, M.A.; FERRYMAN, J.M.; GURNEY, R.J.; BECERRA, V.M.; WALKER, J.P.; HACKER, J.M. Validation of Canopy Height Profile methodology for small-footprint full-waveform airborne LiDAR data in a discontinuous canopy environment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 104, p. 144-157, Jun. 2015.
- FORRESTER, D.I.; MEDHURST, J.L.; WOOD, M.; BEADLE, C.L.; VALENCIA, J.C. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from Eucalyptus plantations: an Australian perspective. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1819–1835, Mar. 2010.
- GARDINER, B.; MOORE, J. Creating the wood supply of the future. In: FENNING, T. (Ed.), **Challenges and opportunities for the World's forest in the 21st century**. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2014. Part VIII, p. 767-781. 81 v.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, London, v. 70, n. 2, p. 105–118, Dec. 2008.
- GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.P.D.; LACLAU, J.P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 6–27, Aug. 2013.
- GONÇALVES-SECO, L.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; FRAGA-BUGALLO, B.; CRECENTE, R.; MIRANDA, D. Assessing the attributes of high-density *Eucalyptus globulus* stands using airborne lasers data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 32, n. 24, p. 9821–9841, Sept. 2011.
- GÖRGENS, E.B.; PACKALEN, P.; SILVA, A.G.P.; ALVARES, C.A.; CAMPOE, O.C.; STAPE, J.L.; RODRIGUEZ, L.C.E. Stand volume models based on stable metrics as from multiple ALS acquisitions in *Eucalyptus* plantations. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 72, n. 4, p. 489–498, Jan. 2015.
- GÖRGENS, E.B.; SOARES, C.P.B.; NUNES, M.H.; RODRIGUEZ, L.C.E. Characterization of Brazilian forest types utilizing canopy height profiles derived from airborne laser scanning. **Applied Vegetation Science**, Edinburgh,v. 19, n. 2, p. 1-10, Jan. 2016.
- HAKAMADA, R.E.; STAPE, J.L.; LEMOS, C.C.Z.; EMANUEL, A.; ALMEIDA, A.; SILVA, L.F. Uso do inventário florestal e da uniformidade entre árvores como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em plantios clonais de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 27-39, mar. 2015.
- HALL, S.A.; BURKE, I.C.; BOX, D.O.; KAUFMANN, M.R.; STOKER, J.M. Estimating stand structure using discrete-return lidar: an example from low density, fire prone ponderosa pine forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 208, n. 1/3, p. 189–209, Apr. 2005.

- HIGA, R.C.V.; HIGA, A.R.; TREVISAN, R.; SOUZA, M.V.R. Resistência e resiliência a geadas em *Eucalyptus dunnii* maiden plantados em Campo do Tenente, PR. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, v. 40, n. 1, p. 67-76, 2000.
- ITTO. **Encouraging industrial forest plantations in the tropics**: report of a global study. International Tropical Timber Organization, Yokohama, Japan, 2009. p. 141.
- JARVIS, P.G.; LEVERENZ, J.W. Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. In: LANGE, O.L.; NOBEL, P.S.; OSMOND, C.B.; ZIEGLER, H. (Ed.). Physiological plant ecology IV. Ecosystem processes: mineral cycling, productivity and man's influence. Berlin: Springer, 1983. chap. 8, p. 233–280.
- JENNINGS, S.B.; BROWN, N.D.; SHEIL, D. Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. **Forestry**, Oxford, v. 72, n. 1, p. 59-74, 1999.
- JUPP, D.L.B.; CULVENOR, D.; LOVELL, J.L.; NEWNHAM, G. **Evaluation and validation of canopy laser radar (LIDAR) systems for native and plantation forest inventory.** CSIRO Marine and Atmospheric Research, Canberra, Autralia, 2005. 150 p. Disponível em:
- http://www.cmar.csiro.au/publications/cmarseries/frame.html. Acesso em: 13 out. 2015.
- KANE, V.R.; GILLESPIE, A.R.; MCGAUGHEY, R.; LUTZ, J.A.; CEDER, K.; FRANKLIN, J.F. Interpretation and topographic compensation of canopy self-shadowing. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 112, n. 10, p. 3820–3832, Oct. 2008.
- KANE, V.R.; McGAUGHEY, R.J.; BAKKER, J.D.; GERSONDE, R.F.; LUTZ, J.A.; FRANKLIN, J.F. Comparisons between field- and LiDAR-based measures of stand structural complexity. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 40, n. 4, p. 761–773, Apr. 2010.
- KRAUS, K.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 54, n. 4, p. 193–203, Aug. 1998.
- LEFSKY, M.A.; HARDING, D.; COHEN, W.B.; PARKER, G.; SHUGART, H.H. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of Eastern Maryland, USA. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 83–98, Jan. 1999a
- LEFSKY, M.A.; COHEN, W.B.; ACKER, S.A.; PARKER, G.G.; SPIES, T.A.; HARDING, D. LiDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir Western Hemlock forests. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 70, n. 3, p. 339-361, Dec. 1999b.
- LEFSKY, M.A.; HUDAK, A.T.; COHEN, W.B.; ACKER, S.A. Patterns of covariance between forest stand and canopy structure in the Pacific Northwest. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 95, n. 4, p. 517–531, Apr. 2005.

- LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.A.; ST-ONGE, B.; FLOOD, M. LiDAR remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography,** London, v. 27, p. 88–106, Mar. 2003.
- MacARTHUR, R.H.; HORN, H.S. Foliage profile by vertical measurements. **Ecology**, Brooklyn, v. 50, n. 5, p. 802–804, Sep. 1969.
- MARSDEN, C.; LE MAIRE, G.; STAPE, J.L.; SEEN, D.L.; ROUPSARD, O.; CABRAL, O.; EPRON, D.; LIMA, A.M.N.; NOUVELLON, Y. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1741–1753, Apr. 2010.
- McCOOL, J.I. **Using the Weibull distribution:** reliability, modeling and inference. John Wiley, 2012. 336p.
- McGAUGHEY, R.J. **FUSION/LDV**: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization v. 3.50, Seattle, WA, 2014. Disponível em: http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf. Acesso em: 14 ago. 2015.
- MO, X.; PENG, S.; LONG, T.; CHEN, W.; YANG, X. Important traits and combined evaluation of *Eucalypt* clones. In: WEI, R.P.; XU, D. (Ed.). **Eucalyptus plantations**: research, management and development. Singapure: World Scientific Publishing, 2003. p. 102-136.
- MONTAGHI, A. Effect of scanning angle on vegetation metrics derived from a nationwide Airborne Laser Scanning acquisition. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v. 39, n. S1, p. 152-173, Dec. 2013.
- NÆSSET, E. Estimation of above- and below-ground biomass in boreal forest ecosystems. In: THIES, M.; KOCK, B.; SPIECKER, H.; WEINACKER, H. (Ed.). **Laser-scanners for forest and landscape assessment**. Freiburg: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004. v. 36 (Part 8/W2), p. 145–148.
- NORMAN, J.M.; CAMPBELL, G.S. Canopy structure. In: PEARCY, R.W.; EHLERINGER, J.R.; MOONEY, H.A.; RUNDEL, P.W. (Ed.). **Plant Physiological Ecology**: Field methods and instrumentation. New York: Chapman and Hall, 1989. chap. 14, p. 301-326.
- PACKALÉN, P.; MEHTÄTALO, L.; MALTAMO, M. ALS-based estimation of plot volume and site index in a *Eucalyptus* plantation with a nonlinear mixed-effect model that accounts for the clone effect. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 68, n. 6, p. 1085-1092, Aug. 2011a.
- PACKALEN, P.; HEINONEN, T.; PUKKALA, T.; VAUHKONEN, J.; MALTAMO, M. Dynamic treatment units in *Eucalyptus* plantation. **Forest Science**, Bethesda, v. 57, n. 5, p. 416-426, Oct. 2011b.

- PALACE, M.W.; SULLIVAN, F.B.; DUCEY, M.J.; TREUHAFT, R.N.; HERRICK, C.; SHIMBO, J.Z.; MOTA-E-SILVA, J. Estimating forest structure in a tropical forest using field measurements, a synthetic model and discrete return LiDAR data. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 161, p. 1–11, May 2015.
- PARKER, G.G.; RUSS, M.E. The canopy surface and stand development: assessing forest canopy structure and complexity with near-surface altimetry. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 189, n. 1-3, p. 307–315, Feb. 2004.
- PARKER, G.G.; HARMON, M.E.; LEFSKY, M.A.; CHEN, J.; VAN PELT, R.; WEIS, S.B.; THOMAS, S.C.; WINNER, W.E.; SHAW, D.C.; FRANKLIN, J.F. Three-dimensional structure of an old-growth *Pseudotsuga–Tsuga* canopy and its implications for radiation balance, microclimate, and gas exchange. **Ecosystems**, New York, v. 7, n. 5, p. 440–453, Aug. 2004.
- PAYN, T.; CARNUS, J.M.; FREER-SMITH, P.; KIMBERLEY, M.; KOLLERT, W.; LIU, S.; ORAZIO, C.; RODRIGUEZ, L.C.E.; SILVA, L.N.; WINGFIELD, M.J. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 352, p. 57- 67, Sept. 2015.
- PIKE, R.J.; WILSON, S.E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. **Geological Society of America bulletin**, New York, v. 82, n. 4, p. 1079–1084, May 1971.
- POPESCU, S.C.; ZHAO, K. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 112, n. 3, p. 767-781, Marc. 2008.
- R CORE TEAM. **R: A Language and environment for statistical computing v.3.2**. Vienna, 2015.
- RAMALHO, M.A.P.; TOLEDO, F.H.R.B.; SOUZA, J.C.; TEIXEIRA, R.A. **Competências em melhoramento genético de plantas no Brasil.** Viçosa: Arka, 2010. 104p.
- REIS, M.G.F.; ALMEIDA, M.L.; REIS, G.G.; CHAVES, R.A.; FONTAN, I.C.I. Artificial pruning planning for clonal *Eucalyptus* forest based on crown architecture. In: BORRALHO, N.M.G.; PEREIRA, J.S.; MARQUES, C.; COUTINHO, J.; MADEIRA, M.; TOME´, M. (Ed.). *Eucalyptus* in a changing world. Aveiro: Proceedings of INTERNATIONAL UNION OF FORESTRY RESEARCH ORGANIZATIONS CONFERENCE, 2004.
- REZENDE, G.D.S.P.; RESENDE, M.D.V.; ASSIS, T.F. Eucalyptus breeding for clonal forestry. In: FENNING, T. (Ed.), **Challenges and opportunities for the World's forest in the 21**st **century**. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2014. Part V, p. 393-424. 81 v.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington D.C., v. 47, n. 9, p. 719-734, Nov. 1933.

- SILVA, A.G.P.; GÖRGENS, E.B.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; RODRIGUEZ, L.C.E. Assessing biomass based on canopy height profiles using airborne laser scanning data in eucalypt plantations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n. 6, p. 504–512, Nov./Dec. 2015.
- SILVÉRIO, F.O.; BARBOSA, L.C.A.; MALTHA, C.R.A.; SILVESTRE, A.J.D.; PILO-VELOSO, D.; GOMIDE, J.L. Characterization of Lipophilic wood extractives from clones of *Eucalyptus urograndis* cultivate in Brazil. **Bioresources**, Raleigh, v. 2, p. 157-168, 2007.
- SPIES, T.A. Forest structure: A key to the ecosystem. **Northwest Science**, Victoria, v. 72, n. 2, p. 34–39, 1998.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; FONSECA, S.; LOOS, R.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.; LIMA, A.M.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; SILVA, G.; ANDRADE, H.; ALVES, J.M. The Brazil *Eucalyptus* potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1686-1694, Apr. 2010.
- TESFAMICHAEL, S.G.; AHMED, F.; VAN AARDT, J.A.N. Investigating the impact of discrete-return lidar point density on estimations of mean and dominant plot-level tree height in *Eucalyptus grandis* plantations. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 31, n. 11, p. 2925-2940, Jul. 2010a.
- TESFAMICHAEL, S.G.; VAN AARDT, J.A.N.; AHMED, F. Estimating plot-level tree height and volume of *Eucalyptus grandis* plantations using small-footprint, discrete return lidar data. **Progress in Physical Geography**, London, v. 34, n. 4, p. 515–540, Apr. 2010b.
- TOMPALSKI, P.; COOPS, N.C.; WHITE, J.C.; WULDER, M.A. Enriching ALS-derived area-based estimates of volume through tree-level downscaling. **Forests**, Basel, v. 6, n. 8, p. 2608-2630, Jul. 2015.
- TRIMBLE NAVIGATION LIMITED. **Trimble Harrier 68i Corridor Mapping System**. 2011. Disponível em: http://www.nikon-trimble.co.jp/products/pdf/geospatial/harrier_68i.pdf>. Acesso em: 10 out. 2015.
- Van PELT, R.; NADKARNI, N.M. Development of canopy structure in *Pseudotsuga menziesii* forests in the southern Washington Cascades. **Forest Science**, Bethesda, v. 50, n. 3, p. 326–341, Jun. 2004.
- VAUHKONEN, J.; MEHTÄTALO, L.; PACKALÉN P. Combining tree height samples produced by airborne laser scanning and stand management records to estimate plot volume in *Eucalyptus* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 41, p. 1649-1658, Aug. 2011.
- VENABLES, W.N.; RIPLEY, B.D. **Modern applied statistics with S**. 4th ed. Berlin: Springer, 2002. 495p.

WACK, R.; SCHARDT, M.; BARRUCHO, L.; LOHR, U.; OLIVEIRA, T. Forest inventory for *Eucalyptus* plantations based on airborne laserscanner data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS),** Calgary, v. 34, Part 3/w13, p. 293 - 296, Oct. 2003

WHITE, J.C.; WULDER, M.A.; VARHOLA, A.; VASTARANTA, M.; COOPS, N.C.; COOK, B.D.; PITT, D.; WOODS, M. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. **Forestry Chronicle**, Ottawa, v. 89, n. 6, 7 p., Dec. 2013.

ZAWAWI, A.A.; SHIBA, M.; JEMALI, N.J.N. Accuracy of LiDAR-based tree height estimation and crown recognition in a subtropical evergreen broad-leaved forest in Okinawa, Japan. **Forest Systems**, Madrid, v. 24, n. 1, p. 1-11, 2015.

ZONETE, M.F.; RODRIGUEZ, L.C.E.; PACKALÉN, P. Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 225–235, Jun. 2010.

ZUCON, A.R.S.: HAWKES, B.; LEMOS, C.C.Z.; BATISTUZZO, G.Z.B.; HAKAMADA, R.E.; PONTES, G.R.; FREITAS, T.U.; BAZANI, J.H.; ALVARES, C.A.; JUNIOR, J.C.A.; GONÇALVES, J.L.M. Use of unmanned aerial vehicle images as a tool to evaluate stand uniformity in clonal *Eucalyptus* plantations. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 18., 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 4636-4642.

4 DETECÇÃO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS EM NUVENS DE PONTOS GERADAS PELO ESCANEAMENTO A LASER AEROTRANSPORTADO EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* spp

Resumo

A obtenção de informações sobre árvores individuais é necessária em diversas atividades florestais, uma vez que o número de indivíduos e a alturas das árvores estão relacionados às condições e desenvolvimento das florestas. Devido à grande importância dessas medidas, uma das abordagens utilizadas a partir de dados ALS (Airborne Laser Scanning) é baseada em árvores individuais (ITD -Individual Tree Detection). O presente estudo avaliou o uso de dois algoritmos de detecção de árvores individuais, para determinação do número de indivíduos, em plantios clonais de Eucalyptus spp. localizados no Estado de São Paulo, através do uso de dados ALS obtidos em 2014. Os algoritmos testados foram o de máximo local (LM) e o de curvatura mínima (CM) que operam no modelo digital de alturas (CHM). Assim, foi analisada o efeito do tamanho da célula da superfície (0,25, 0,50, 075 e 1 m) e da suavização (filtros: média, mediana e gaussiano) do CHM nos algoritmos. O LM e o CM utilizam o filtro de máximo local na etapa final de processamento. O tamanho adequado para a janela de filtro (2 x 2, 3 x 3, 4 x 4 m e variável) também foi verificada neste estudo. Os resultados indicaram que as características do CHM interferem nas respostas do algoritmo. As superfícies com células de dimensões menores e com aplicação de suavização obtiveram os melhores resultados na quantificação de árvores. As janelas de busca para o filtro de máximo local de menores dimensões (2 e 3 m) foram as mais adequadas para a área em estudo. O algoritmo LM apresentou melhor resultado, com a estratégia mais adequada resultando em um erro médio relativo de cerca 11% na quantificação dos indivíduos arbóreos.

Palavras-chave: LiDAR; Algoritmos de detecção; Canopy height model; Número de indivíduos

Abstract

Obtaining information on individual trees is required in many forestry activities, once the number of individuals and the tree heights is related to the conditions and the development of forests. Because of the importance of these measures, one of the approaches used from ALS data (Airborne Laser Scanning) is based on single tree detection (ITD). This study evaluated the use of two individual tree detection algorithms, to determine the number of individuals, in clonal plantations of Eucalyptus spp. located at São Paulo state, by using ALS data in 2014. The tested algorithms were the local maximum (LM) and minimum curvature (CM), which operates in the canopy height model (CHM). Thus, it was analyzed the effect of the surface cell size (0.25, 0.50, 0.75 and 1 m) and smoothing (filters: mean, median and Gaussian) of CHM in the algorithms. The LM and CM use the local maximum filter in the final step of the process and the appropriate size for the filter window (2 x 2, 3 x 3, 4 x 4 m and variable) was also evaluated in this study. The results indicated that the CHM characteristics affect the algorithm responses. Surfaces with small cells and filtering application obtained the better results in the quantification of trees. The smaller search windows for the local maxima filter (2 and 3 m) were the most appropriate for the study area. The LM algorithm showed better results, with the most appropriate strategy resulting in a mean relative error of about 11% in the quantification of individual trees.

Keywords: LiDAR; Double sampling; Sample design; Sampling error; ALS metrics

4.1 Introdução

O gênero *Eucalyptus* constitui uma das principais fontes para produção de celulose e papel no Brasil, grande parte devido a boa adaptação as condições encontradas no país, que permitiu alcançar altos níveis de produtividade. Devido ao seu grande potencial, investimentos em pesquisa, melhoramento genético e nas técnicas de manejo vem sendo realizadas com objetivo de aumentar cada vez mais sua produtividade (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS - SNIF, 2015).

As plantações demandam planejamento das atividades, sendo a maior parte das informações utilizadas no planejamento florestal obtidas a partir da atividade de inventário, realizada através de coletas de informações em campo, que exigem grandes investimentos (tempo e dinheiro) para a sua execução. A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto tem sido avaliada quanto a sua capacidade de apoio as medições tradicionais (MALTAMO et al., 2004). As tecnologias ALS (Airborne Laser Scanning), que consistem em um sistema LiDAR (Light Detection And Ranging) aerotransportado de escaneamento a laser com sensor ativo, tem se destacado entre as novas tecnologias, por sua alta capacidade de aquisição de grande quantidade de dados, em pouco espaço de tempo (GIONGO et al., 2010), sendo capaz de produzir uma nuvem de pontos com coordenadas 3D (X, Y e Z), com grande acurácia.

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos, comprovando o uso de dados ALS na estimativa de atributos florestais como: altura (POPESCU; WYNNE, 2004), número de indivíduos (PERSSON; HOLMGREN; SÖDERMAN, 2002; OLIVEIRA et al., 2012), volume (GÖRGENS et al. 2015; KANKARE et al., 2011; ZONETE, 2009) e biomassa (SILVA et al., 2015).

Segundo Hu et al. (2014), a informação sobre árvores individuais é necessária em diversas atividades florestais, como tratamentos silviculturais, desbastes seletivos e levantamento de biodiversidade. O número de indivíduos e a alturas das árvores estão relacionados as condições e desenvolvimento das

florestas, sendo fundamentais nas estimativas do diâmetro e volume (McCOMBS; ROBERTS; EVANS, 2003).

Devido à grande importância dessas medidas, uma das abordagens utilizadas para a estimativa de variáveis a partir de dados ALS é baseada em árvores individuais ou *Individual Tree Detection* (ITD), consistindo na detecção das árvores, no delineamento das copas e na extração de seus atributos (VASTARANTA et al., 2012; PITKÄNEN et al. 2004; POPESCU; WYNNE; NELSON, 2003; KANKARE et al., 2011). Essa abordagem, geralmente utiliza o modelo digital de alturas (CHM) gerado a partir da interpolação das alturas dos retornos ALS, estando o seu desempenho relacionado ao algoritmo de detecção e a sua parametrização, e as condições da floresta, como densidade e distribuição espacial (VAUHKONEN et al., 2014; KAARTINEN et al., 2012; VAUHKONEN et al., 2012).

Esse trabalho buscou avaliar a adequação do uso de algoritmos de detecção na estimação do número de árvores individuais, desenvolvidos para florestas temperadas, em plantios de *Eucalyptus* spp. no Estado de São Paulo. Mais especificamente: 1) verificar a influência da composição do modelo digital de alturas (CHM) no desempenho dos algoritmos, através de variações na sua composição (tamanho e suavização); 2) avaliar o efeito da dimensão da janela de busca do filtro de Máximo Local (LM) na detecção de árvores individuais em plantios de *Eucalyptus* em espaçamento 3 x 2 m e 3) determinar a estratégia com melhor desempenho para a área em estudo.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em uma área pertencente à empresa Suzano Papel e Celulose, localizada no interior do Estado de São Paulo, nos municípios de São Miguel Arcanjo e Pilar do Sul (Figura 4.1), em plantios industriais clonais do gênero *Eucalyptus*.

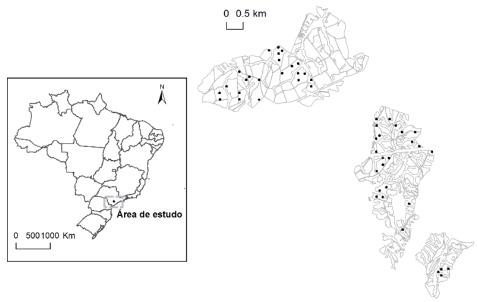


Figura 4.1 – Localização dos municípios da área de estudo

O clima da região pode ser classificado como clima temperado com verão quente e ausência de estação seca (classificação de Köppen: Cfa), com precipitação média anual é de 1325 mm e altitude média de 710 m (ALVARES et al., 2013). O relevo é considerado ondulado com inclinação máxima de 32 graus (GAVA, 1997).

4.2.2 Levantamento dos dados de campo

No estudo foram utilizadas 46 parcelas com formato circular e raio de 11,28 m, pertencentes a empresa Suzano, as quais foram medidas nos meses de abril a setembro de 2014. Essas parcelas foram instaladas com base em uma coordenada pré-determinada, para atender a intensidade e o tipo de amostragem desejada pelo inventário florestal contínuo, a qual corresponde ao ponto central da localização das parcelas.

A coordenada correspondente ao centro das parcelas foi coletada com o receptor GPS HiPer L1/L2 da Topcon que permite o posicionamento cinemático em tempo real (RTK - *Real Time Kinematic*) para obter correções instantâneas, resultando em precisão centimétrica.

Em cada parcela foram mensurados os diâmetros a altura do peito (DAP) de todos os indivíduos, a altura total das 10 árvores localizadas nas linhas centrais da parcela e 4 alturas totais das árvores de maior DAP. A coleta e o processamento das parcelas do inventário foram realizados pela empresa responsável.

A área é dividida em unidades de produção, formadas por plantios clonais do gênero *Eucalyptus*, manejados para a produção de celulose. Foram considerados nesse estudo os dados coletados em 46 parcelas circulares, distribuídas em 14 unidades de produção (Tabela 4.1), com idade entre 4 e 7 anos, plantadas com clones originários de cinco grupos genéticos diferentes, em espaçamento 3 x 2,2 m e 3,2 x 2 m. As informações referentes a cada parcela encontram-se no Apêndice A.

Tabela 4.1 – Caracterização das parcelas utilizadas no estudo, agrupadas por unidade de produção

Unidade de Produção	ldade	Código Material Genético	N° de parcelas	Nº de árvores médio/ parcela	DAP (cm)	Altura (m)	VITCC (m³)
1	4,3	Е	4	46	15,11	23,94	0,21
2	6,7	С	5	58	15,73	24,94	0,23
3	6,9	Α	3	58	18,18	29,12	0,35
4	5,9	D	3	57	16,35	27,14	0,29
5	6,0	D	3	58	15,19	25,42	0,23
6	4,0	Е	2	48	14,33	22,21	0,17
7	3,9	Α	2	54	15,11	20,30	0,16
8	6,9	Α	3	53	18,27	27,61	0,33
8	6,9	С	1	59	13,85	22,15	0,18
9	5,9	В	5	58	15,10	25,83	0,23
10	4,5	Α	4	58	14,49	22,35	0,17
11	6,5	В	4	44	17,78	29,20	0,38
12	6,0	D	2	58	16,66	27,83	0,29
13	6,0	В	3	54	16,54	27,22	0,28
14	6,4	В	2	47	18,65	30,09	0,41

Diâmetro a altura do peito (DAP), altura e volume individual total com casca (VITCC) correspondem a valores médios.

4.2.3 Levantamento dos dados ALS

O levantamento laser aerotransportado foi realizado em julho de 2014, com uma aeronave CESSNA modelo 206, equipada com sistema inercial Applanix (IMU + GPS) modelo POS AV 150 e sensor LiDAR Harrier 68i da Trimble (TRIMBLE, 2011) (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Equipamento *LiDAR* Harrier 68i da Trimble Fonte: https://www.trimble.com.

A área de sobrevoo foi de aproximadamente 1074 hectares. A altura do sobrevoo foi de 438,32 m, resultando em um diâmetro do pulso no alvo de 0,22 m. As especificações do voo encontram-se detalhadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Especificações do voo

Características	Descrição dos parâmetros
Densidade nominal de pontos	10 pontos/m²
Diâmetro do pulso no alvo (footprint)	0,22 m
Ângulo de abertura para varredura (FOV)	45°
Faixa de varredura	363,11 m
Sobreposição mínima entre faixas	50%
Altura do voo	438,32 m
Taxa de escaneamento	174,05 Hz
Taxa de emissão	400 kHz

O principal produto desse levantamento consiste numa nuvem de pontos georreferenciados e discriminados quanto ao tipo do retorno.

4.2.4 Processamento dos dados de campo

Com os dados obtidos nas parcelas medidas em campo, o primeiro passo foi determinar o número de árvores em cada parcela. Foram considerados todos os indivíduos com DAP maior que 6 cm. As árvores bifurcadas, com dois fustes, foram consideradas como dois indivíduos na mesma cova. O número de fustes em cada parcela foi denominado para efeito desse estudo como número de árvores ou indivíduos.

O modelo hipsométrico de Campos et al. (1984) foi utilizado para estimação das alturas totais (Ht) das árvores não medidas em campo, e então cada árvore teve

seu volume individual total com casca (VITCC) estimado pelo modelo de Schumacher e Hall (1933), ambos fornecidos pela empresa, para a região na qual a área de estudo está inserida. O volume total com casca (VTCC) de cada parcela foi obtido pela soma dos volumes dos indivíduos.

4.2.5 Processamento dos dados ALS

Realizado o escaneamento da área, a base de dados bruta gerada foi préprocessada pela empresa que produziu os dados ALS. Os dados brutos foram processados e posicionados através do uso do software LPMaster, que permite realizar o ajuste horizontal entre as várias faixas escaneadas em relação a faixa cruzada, gerando uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais. As nuvens de pontos foram referenciadas ao Datum Sirgas2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas).

dados foi realizado processamento dos no software **FUSION** (McGAUGHEY, 2014) e consistiu basicamente na filtragem, limpeza e classificação da nuvem de pontos (Figura 4.3). O primeiro passo foi a aplicação de um filtro, para a remoção dos pontos considerados atípicos, ou seja, pontos localizados muito acima ou abaixo da vegetação estudada. O parâmetro considerado no filtro removeu retornos acima ou abaixo da média de elevação com mais ou menos 3 vezes o desvio padrão. A partir da nuvem de pontos filtrada foram geradas as superfícies que correspondem ao modelo digital de terreno (DTM – Digital Terrain Model), ao modelo digital de superfície (DSM – *Digital Surface Model*) e ao modelo digital de alturas (CHM). Para a criação do MDT, foram identificados os retornos considerados pertencentes ao solo através do algoritmo de Kraus e Pfeifer (1998), conforme a Equação 1.

$$p_{i} = \begin{cases} \frac{1}{1} & v_{i} \leq g \\ \frac{1}{1 + (a(v_{i} - g)^{b})} & g < v_{i} \leq g + w \\ 0 & g + w < v_{i} \end{cases}$$
 (1)

onde:

 $p_i = peso;$

 v_i = valor residual individual;

g = parâmetro de limiar;

a; b = parâmetros:

w = parâmetro de tolerância.

Inicialmente uma superfície de referência é criada, com base na média dos valores de elevação dos retornos para um determinado pixel, atribuindo pesos iguais as todos os pontos da nuvem. A elevação de cada retorno é subtraída da superfície de referência, obtendo-se para os pontos o valor residual individual (v_i) . Então, para cada ponto é atribuído um peso de acordo com o seu valor de distância. Pontos abaixo da superfície e com valores de v_i menores que o parâmetro limiar (g) recebem o peso (p_i) igual a 1. Já os pontos com v_i entre g e a soma de g com o parâmetro de tolerância (w) atribui-se o peso entre 0 e 1, sendo o peso ponderado pela função com os parâmetros de inclinação a e b (McGAUGHEY, 2014; SILVA, 2014).

Os retornos com v_i maior que a soma de g mais o parâmetro de tolerância (w) recebem o peso igual a zero, sendo esses descartados no processo de classificação e não tem influência na geração da próxima superfície intermediária.

A cada iteração (repetição) uma nova superfície intermediária é gerada e os pesos recalculados. Após a última iteração, uma nova superfície (DTM) é criada com base nos pontos remanescentes, sendo adotada a média dos valores de elevação dos pontos no interior de cada célula. A parametrização adotada nesse estudo foi g = -2.0, w = 2.5, a = 1, b = 4, com o tamanho da célula de 1 m e as ferramentas foram *GroundFilter* e *GridSurfaceCreate* implementadas no software FUSION.

A nuvem de pontos foi recortada com base na coordenada central das parcelas instaladas em campo, obtendo-se assim as áreas correspondentes às parcelas em estudo, para a criação do modelo digital de superfície por parcela.

O DSM foi obtido atribuindo ao centro da célula do grid o valor do retorno laser de maior valor de elevação para cada célula da superfície. Já o modelo digital de alturas foi gerado através da subtração das elevações do solo encontradas no DTM, da superfície DSM.

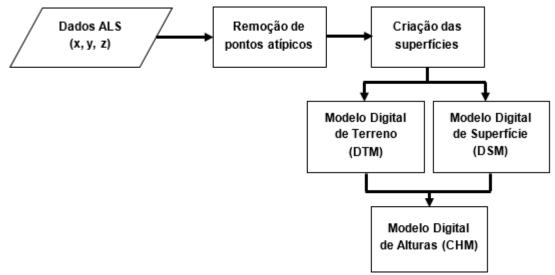


Figura 4.3 - Fluxograma dos processamentos aplicados aos dados ALS

4.2.6 Modelo digital de alturas (CHM)

Foram testadas durante a criação dos modelos digitais de alturas variações no tamanho do grid, malha que compõe o CHM, e a aplicação de filtros de imagem para suavização das superfícies, visando reduzir o efeito dos possíveis *outliers*. Dessa forma, foram avaliados 4 tamanhos de células na composição do grid da superfície, sendo 1,0 (cs1), 0,75 (cs75), 0,50 (cs5) e 0,25 m (cs25) e a ausência e aplicação de filtros, como o de Média (M), Mediana (MF) e o Gaussiano (GAU). Para cada filtro de suavização, foram feitas variações em seus parâmetros de composição, o que é melhor definido na descrição dos filtros. Em resumo, para cada parcela, 16 opções de CHM foram geradas (Figura 4.4).

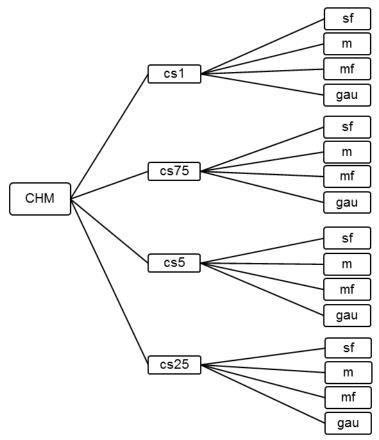


Figura 4.4 – Representação das variações testadas no tamanho das células do grid e nas técnicas de suavização do CHM

A suavização com os filtros de média e mediana foi executada durante a criação dos CHMs no software FUSION, através da ferramenta *CanopyModel*. Na criação do modelo digital de alturas, uma superfície inicial é calculada com base no retorno com maior elevação para cada célula (DSM). O DSM é então subtraído do DTM e a superfície é assim suavizada com a aplicação do respectivo filtro. Além de selecionar o tipo de filtro (média ou mediana), define-se o tamanho da janela do filtro e opta-se ou não pela permanência dos picos.

Esses filtros atuam em janelas de tamanho fixo, que controlam o número de células (matriz) a serem consideradas no cálculo do novo valor do *pixel* central. Quanto maior a janela utilizada, mais acentuado será o efeito de suavização. Nesse estudo foram testadas duas variações nos tamanhos das janelas de cálculo 3 x 3 e 5 x 5 *pixels*.

O filtro de média, atribui ao *pixel* central um novo valor baseado na soma dos valores encontrados nas células da janela, dividido pelo número de células, ou seja, a média (eq. 2).

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \tag{2}$$

onde:

ÿ= média dos valores dos pixels;

 y_i = valor do *pixel* i;

N = número de *pixels* na janela do filtro.

Já o filtro de mediana atribui ao *pixel* central o valor da mediana dos pixels da janela. A mediana é uma medida menos sensível a valores extremos do que a média.

Distintamente dos filtros anteriores, a execução do filtro Gaussiano foi realizada no software Saga (CONRAD et al., 2015). Aplica-se uma função Gaussiana contínua bidimensional (eq. 3), determinada por dois parâmetros: a dimensão da janela de cálculo e o desvio padrão (SD).

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} * \exp(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2})$$
 (3)

onde:

 σ = Desvio padrão;

X = coordenada X e

Y = coordenada Y.

Para esse filtro, foram testadas duas dimensões de janela (3 x 3 e 5 x 5 *pixels*) e três valores para o desvio padrão (0,6, 0,7 e 0,8) na criação da superfície. Assim como os filtros anteriores, janelas maiores resultam em maior efeito de suavização. A aplicação de valores maiores para o SD exige que a janela do filtro seja maior.

Dessa forma, para cada parcela 40 opções de CHM foram geradas, considerando todas as variações aplicadas na criação das superfícies (Figura 4.5).

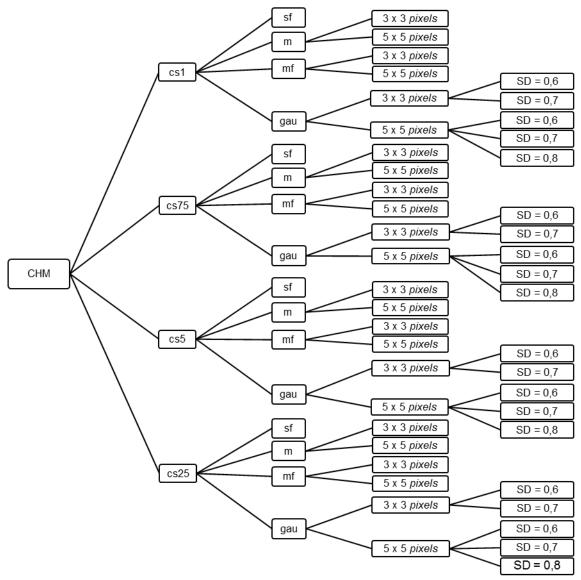


Figura 4.5 – Representação das possíveis variações testadas na composição dos CHMs

As superfícies geradas receberam siglas para designar as diferentes combinações de parâmetros, conforme descrito abaixo:

- sf = superfície sem filtro;
- m3 = superfície com filtro de média usando janela de cálculo de tamanho 3 x 3 pixels;
- m5 = superfície com filtro de média usando janela de cálculo de tamanho 5 x 5 pixels;
- mf3 = superfície com filtro de Mediana usando janela de cálculo de tamanho 3 x 3 pixels;
- mf5 = superfície com filtro de Mediana usando janela de cálculo de tamanho 5 x 5 pixels;

- gau06_3 = superfície com filtro Gaussiano criada com SD = 0,6 e
 janela de cálculo de tamanho 3 x 3 pixels;
- gau06_5 = superfície com filtro Gaussiano criada com SD = 0,6 e
 janela de cálculo de tamanho 5 x 5 pixels;
- gau07_3 = superfície com filtro Gaussiano criada com SD = 0,7 e
 janela de cálculo de tamanho 3 x 3 pixels;
- gau07_5 = superfície com filtro Gaussiano criada com SD = 0,7 e
 janela de cálculo de tamanho 5 x 5 pixels;
- gau08_5 = superfície com filtro Gaussiano criada com SD = 0,8 e
 janela de cálculo de tamanho 5 x 5 pixels.

4.2.7 Algoritmos de detecção de árvores individuais

Dois algoritmos desenvolvidos para florestas temperadas foram testados e adaptados para a quantificação de indivíduos arbóreos em plantios.

Máximo local (LM)

O algoritmo de Máximo Local (LM – *Local Maximum*), também conhecido como filtro LM, utiliza o CHM para identificar os máximos locais através do uso de uma janela de busca de tamanho variável ou fixo (McGAUGHEY, 2014).

O LM pressupõe que os valores mais elevados obtidos pelo laser em uma vizinhança espacial representam a ponta da copa da árvore. O bom resultado na identificação do local da árvore depende da seleção cuidadosa do tamanho da janela de busca do filtro. A escolha de um filtro de tamanho muito pequeno ou muito grande, pode ocasionar erros de comissão ou omissão (POPESCU; WYNNE, 2004).

Dessa forma, por existirem variados tamanhos de copa, as janelas devem ser ajustadas apropriadamente de acordo com a estrutura espacial encontrada na nuvem de dados ALS acima do solo (POPESCU; WYNNE, 2004). A definição do tamanho da janela de busca se baseia na relação entre a altura da árvore e o tamanho de sua copa (POPESCU; WYNNE; NELSON, 2002) ou no espaçamento de plantio.

Nesse estudo a altura mínima foi definida com base na menor altura medida nas parcelas de campo, de uma mesma idade, e descontando-se um metro. Por exemplo: sendo a altura mínima mensurada nas parcelas de 3 anos igual a 14 m, a altura mínima considerada na análise foi de 13 m.

O tamanho da janela (*T*) no processamento é determinado em função da altura da superfície no centro da janela utilizando a equação polinomial (4).

$$T = A + B * Ht + C * Ht^{2} + D * Ht^{3} + E * Ht^{4} + F Ht^{5}$$
(4)

onde:

 $T = \text{dimensão} (m \times m) \text{ da janela do filtro LM};$

A, B, C, D, E e F = coeficientes da equação polinomial;

Ht = altura (m) máxima no centro da janela do filtro.

Para ajuste da janela variável pela equação 4, 230 árvores (5 indivíduos por parcela) foram mensuradas de forma manual a partir da nuvem de pontos. A partir da localização de uma árvore extraem-se os atributos como altura e diâmetro da copa (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Cilindro para seleção e medição dos pontos pertencentes a árvore extraída da nuvem ALS

Para a janela fixa, utiliza-se a equação polinomial atribuindo aos coeficientes *B, C, D, E e F* o valor zero e determinando um valor fixo para o coeficiente *A*. Foram considerados para dimensão da janela de busca fixa 3 tamanhos: 2, 3 e 4 m (Figura 4.7). O número total de máximos locais contidos em uma parcela foi usado como indicador do número de indivíduos por parcela.

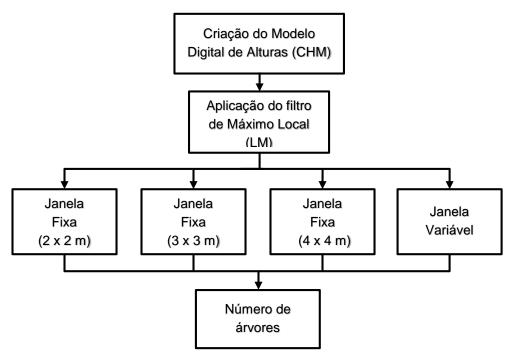


Figura 4.7 - Fluxograma de processamento do algoritmo LM

CURVATURA MÍNIMA (CM)

O algoritmo se baseia no cálculo da curvatura mínima do CHM, similar ao método desenvolvido por Yu et al. (2010). A curvatura mínima é uma das duas curvaturas principais de uma superfície e corresponde a curvatura da seção normal com o menor valor em um determinado ponto na superfície (Figura 4.8). Em uma superfície como o CHM, o valor mais alto da curvatura mínima descreve o topo da árvore - curvatura mínima maior que zero e os valores menores que zero descrevem os vales entre as árvores (KANKARE, et al., 2011; KAARTINEN et al., 2012).

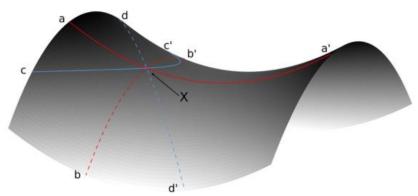


Figura 4.8 – Representação das quatro direções naturais marcadas na superfície no ponto X, sendo a – a': curvatura mínima, b – b': curvatura máxima, c – c: linha de contorno e d – d': linha de gradiente. Fonte: PRASICEK et al., 2014 adaptado de SHARY; SHARAYA; MITUSOV, 2002

As curvaturas, geralmente são utilizadas para indicar o quanto um objeto é curvo (PRASICEK, et al. 2014). O cálculo da curvatura mínima é realizado conformo o método proposto e implementado por Wood (1996). O valor de uma curvatura pode ser calculado a partir de um polinômio de segunda ordem (eq. 5) ajustado de acordo com o perfil estudado, sendo o valor da curvatura a sua segunda derivada (PRASICEK, et al. 2014).

$$y = a * x^2 + b * x + c \tag{5}$$

onde:

x = distância horizontal;

y = altura;

a, b, c =coeficientes.

O cálculo da curvatura mínima é realizado através da Equação 6, utilizando os parâmetros ajustados, pelo método dos mínimos quadrados, para um determinado tamanho de janela de cálculo (EVANS, 1979; WOOD, 1996).

$$CM = -a - b - \sqrt{(a-b)^2 + c^2}$$
 (6)

onde:

CM = curvatura mínima;

a, b, c = coeficientes do polinômio ajustado.

Segundo Miqueles e Centeno (2003), as imagens geradas a partir do cálculo do valor da curvatura mínima apresentam, como característica básica, um contorno bem delineado e muito suave, o que resulta em melhor visualização e análise de fronteiras entre os objetos.

A curvatura mínima de uma superfície é calculada utilizando uma vizinhança, que para esse estudo ficou definida como 5 x 5 *pixels*. Assim, os CHMs criados tiveram a sua curvatura mínima calculada, e em seguida, os máximos locais encontrados aplicando-se filtro LM. Em cada segmento seleciona-se o pixel de mais alto valor (topo da árvore), com a sua localização correspondendo à localização dos indivíduos. Assim como o algoritmo anterior, o número total de máximos locais contidos em uma parcela foi usado como indicador do número de indivíduos por parcela (Figura 4.9).

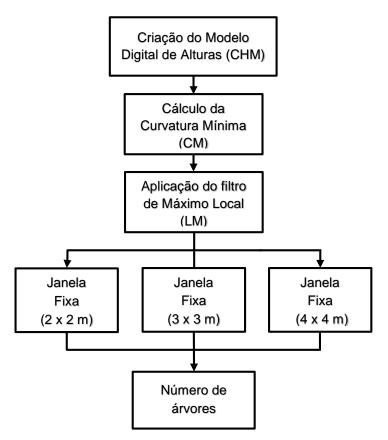


Figura 4.9 - Fluxograma de processamento do algoritmo CM

4.2.8 Estatísticas para avaliação dos algoritmos

Os algoritmos foram avaliados quanto à acuidade em determinar o número de indivíduos, para tanto foram utilizadas estatísticas que permitam a comparação entre o número de árvores detectadas através dos dados ALS e o número real obtido em campo. Como os dados disponíveis para estudo não contêm as coordenadas de cada indivíduo contido nas parcelas, outras medidas (volume e altura) foram utilizadas, visando apoiar a escolha do algoritmo. Dessa forma, foi gerada uma estimativa de volume por parcela (m³) a partir das alturas das árvores detectadas, e comparada com o volume por parcela (m³) estimado pelo inventário. Outra característica analisada foi a distribuição das alturas encontradas, em relação a distribuição das estimativas do inventário.

O desempenho das estratégias adotadas quanto ao número de indivíduos detectados foi analisado com base no erro médio relativo (E_r %), definido como a soma da diferença entre os valores preditos e os observados em cada parcela, ponderada pelo valor observado e dividido pelo número de parcelas e no desvio padrão dos erros relativos (S_{Er}), Equações 7 e 8 respectivamente. Em uma predição

perfeita o valor de E_r % seria igual a zero.

$$E_r (\%) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)}{y_i}}{n}\right) * 100$$
 (7)

$$S_{Er} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (E_{r_i} - \overline{E_{r_i}})^2}{n-1}}$$
 (8)

onde:

n = número de parcelas;

 y_i = valor observado para a parcela i;

 \hat{y}_i = valor predito para a parcela i;

 E_{r_i} = erro relativo para a parcela i;

 $\bar{E}_{r,i}$ = erro relativo médio das parcelas.

Com relação ao desempenho na quantificação dos indivíduos, em cada algoritmo foram selecionadas as 10 estratégias com melhor desempenho na quantificação de indivíduos, para posterior análise de volume. Para tanto, foram considerados os erros relativos médios e a dispersão dos erros. Na seleção adotouse o limite de 50 % para os máximos e mínimos Er%, dentre as estratégias pertencentes a esse intervalo, optou-se pelas que possuíssem baixos valores Er% e máximos ER%. Foi considerado como mais adequado o algoritmo subestimar a encontrar árvores não existentes (erros de comissão).

Visando contribuir para a seleção da melhor abordagem, um modelo de regressão linear foi então construído, para predizer o volume individual total com casca (VITCC) em função da altura total (*Alt*) das árvores. No ajuste do modelo foram utilizados dados de 115 árvores cubadas pelo método de Smalian, pertencentes ao banco de dados de árvores cubadas da empresa. As árvores selecionadas estavam localizadas nas fazendas em que estão inseridas as parcelas de estudo e continham o mesmo material genético das parcelas estudadas.

Os parâmetros do modelo foram estimados através do Método dos Mínimos Quadrados ou Mínimos Quadrados Ordinários (MMQ), que visa minimizar os desvios (resíduos) entre os valores observados e estimados. A aplicação de transformação logarítmica foi utilizada para a linearização do modelo (eq. 9).

$$Ln(VITCC) = \beta_0 + \beta_1 * Ln(Alt) + \varepsilon$$
(9)

onde:

 β_i = coeficientes do modelo;

Ln = logaritmo natural;

VITCC = volume total individual com casca (m³);

Alt = altura total da árvore (m) e

 ε = erro aleatório.

O uso da transformação logarítmica de variáveis induz a um erro sistemático nas estimativas dos valores da variável dependente. Esse erro é conhecido como discrepância logarítmica, sendo necessário o uso de um fator de correção para minimizar essa discrepância (MEYER, 1941 apud MADGWICK; SATOO, 1975). Deste modo, adotou-se o fator de correção de Meyer (eq. 10), que pode ser utilizado para modelos com a base 10 ou a base natural.

$$f = e^{(\frac{QMR}{2})} \tag{10}$$

onde:

f = fator de correção para discrepância logarítmica;

e = exponencial;

QMR = quadrado médio dos resíduos.

Assim, o volume de cada árvore foi obtido utilizando a equação 11.

$$VITCC = (e^{\beta 0 + \beta_1 * Ln(Alt)}) * f$$
 (11)

Na avaliação dos algoritmos foi considerado o volume por parcela (m³), obtido através da soma dos volumes totais individuais com casca, estimados através da Equação 11, em cada parcela. Os resultados das diferentes abordagens/estratégias foram comparados com os valores estimados pela campanha de inventário em parcelas de campo.

Foram considerados na análise de desempenho na estimativa de volume os indicadores estatísticos RMSE e o viés. Os volumes estimados paras as estratégias foram avaliadas através dos indicadores estatísticos raiz do erro médio quadrático (RMSE - Root Mean Square Error) e o RMSE relativo ($RMSE_r$). O RMSE consiste no desvio padrão das diferenças entre os valores preditos e os observados (eq. 12) e

 $RMSE_r$ é calculado como distância entre os valores preditos e observados em relação a média abservada (eq. 13). O RMSE é utilizado para expressar a exatidão dos resultados, sendo zero o valor ideal.

O viés (*bias*) foi usado para mensurar a tendência do algoritmo em superestimar ou subestimar os resultados (eq. 14). As estatísticas RMSE e o viés possuem a mesma unidade de medida da variável *y*.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$
 (12)

$$RMSE_r = \frac{RMSE}{\bar{y}} * 100 \tag{13}$$

$$Vi\acute{e}s = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\widehat{y}_i - y_i)}{n} \tag{14}$$

onde:

yi = valor observado para a parcela i;

 \hat{yi} = valor predito para a parcela i;

 \bar{y} = média dos valores observados nas parcelas;

n = número de parcelas.

A estratégias pré-selecionadas pelo seu desempenho na quantificação do número de indivíduos foram avaliadas quanto a estimativa de volume. Nessa etapa, foram eleitas as estratégias com melhores resultados (valores baixos) para RMSE, $RMSE_r$ e viés, sendo adotado o limite de 20 % para o $RMSE_r$. Após essa análise, as estratégias foram avaliadas quanto a distribuição da altura e padrão visual.

As alturas das árvores detectadas foram extraídas dos CHMs originados, utilizando as coordenadas dos pontos considerados topos das árvores (máximo local). No caso do algoritmo CM, as coordenadas obtidas nas superfícies de curvaturas mínimas foram aplicadas aos CHMs utilizados no cálculo da curvatura mínima, para obtenção das alturas. A análise das alturas levou em consideração as alturas das árvores detectadas nas parcelas através do uso dos dados ALS, comparadas as mensuradas e estimadas pelo inventário da área. A altura média (m), a raiz do erro médio quadrático - RMSE (eq. 12), o $RMSE_r$ (eq. 13) e o viés (eq. 14)

foram utilizados na avaliação do desempenho dos algoritmos. Além dessas estatísticas, análises gráficas da distribuição das alturas do inventário e dos resultantes dos dados ALS foram empregadas. Assim, a abordagem mais adequada deve apresentar as distribuições das alturas nas parcelas próximas a encontrada no inventário, o que permite inferir se a estratégia representou todas as classes de alturas existentes.

4.3 Resultados

4.3.1 Caracterização das parcelas

As parcelas consideradas neste estudo possuem em média 54 indivíduos, com assimetria negativa, que pode ser verificada pela aproximação da mediana ao Q3 (Figura 4.10). Apenas uma parcela contém o número de indivíduos muito inferior às demais (35 árvores), resultado de uma elevada taxa de mortalidade ou falha (32,8%).

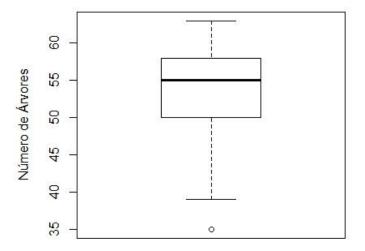


Figura 4.10 – Distribuição da variável número de indivíduos nas parcelas em estudo

A distribuição das variáveis DAP e altura das parcelas podem ser visualizadas na figura 4.11. O DAP médio das 46 parcelas variou entre 13 e 20 cm, sendo a maior frequência na classe de 15 cm. Já as alturas médias apresentaram maior variação, com valores entre 19 e 31 m, com a média de 25,84 m. O volume médio das parcelas foi de 13,80 m³, com parcelas atingindo de 7,71 a 23,42 m³.

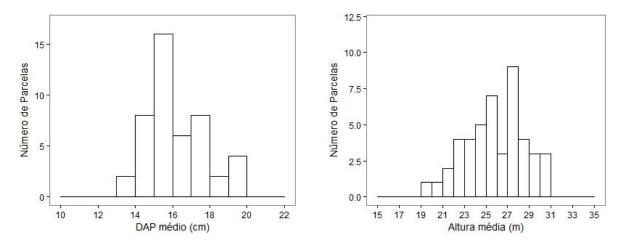


Figura 4.11 – Histograma das variáveis DAP médio (cm) e altura média (m) das parcelas em estudo

4.3.2 Características dos CHMs

4.3.2.1 Efeito do tamanho dos pixels

Os tamanhos selecionados para as células do grid interferem diretamente na representação dos indivíduos (Figura 4.12). Pode-se constatar que com a diminuição do tamanho do pixel que compõe o CHM há uma melhor reprodução do formato da copa. Entretanto, para o *pixel* de 0,25 m nem todas as células possuem retornos nas copas, resultando em um modelo digital de altura com grande quantidade de ruídos. Já os CHMs compostos por células maiores (1 m), proporcionam em algumas copas, um deslocamento do ponto central da árvore.

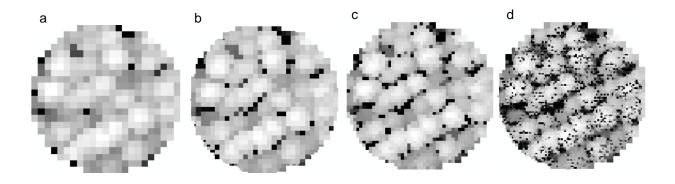


Figura 4.12 – Representação do CHM de uma parcela com células do grid de tamanho: a) 1,0, b) 0,75, c) 0,50 e d) 0,25 m. As células mais claras representam as maiores alturas e as escuras as menores alturas

4.3.2.2 Efeitos da suavização

Com relação ao efeito da aplicação dos filtros nas superfícies, é possível visualizar na Figura 4.13 a suavização proporcionada. O filtro de média é sensível a valores extremos, gerando em algumas superfícies *pixels* com grandes valores de altura deslocados do centro da copa. Já os filtros de mediana e Gaussiano tendem a manter a representação do formato das copas e os valores mais elevados no centro.

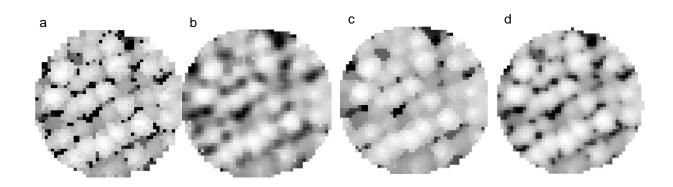


Figura 4.13 – Representação do CHM de uma parcela: a) sem filtro, b) filtro de média, c) filtro de mediana e d) filtro gaussiano. As células mais claras representam as maiores alturas e as escuras as menores alturas.

Para um mesmo filtro, pode-se observar que as janelas de tamanho 5 x 5 *pixels* geram maior suavização na imagem que as de 3 x 3 *pixels*, podendo até ocasionar o agrupamento de indivíduos em alguns CHMs (Figuras 4.14).

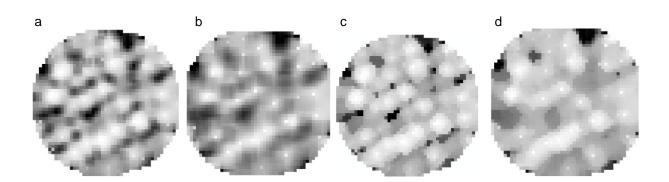


Figura 4.14 – Representação do modelo digital de alturas de uma parcela com filtro de média com janelas de tamanho: a) 3 x 3 *pixels* e b) 5 x 5 *pixels* e com filtro de mediana com janelas de tamanho: c) 3 x 3 *pixels* e d) 5 x 5 *pixels*.

As alternativas testadas para o filtro gaussiano que possui dois parâmetros, o tamanho da janela de cálculo e o desvio padrão, são apresentadas na Figura 4.15 onde as colunas correspondem ao tamanho da janela de cálculo e as linhas ao

desvio padrão adotado. Adotar maiores valores para os desvios exigem que a matriz de cálculo seja maior, logo para o SD = 0,8 apenas a janela de tamanho 5 x 5 *pixels* pode ser testada. Assim como o tamanho da janela, quanto maior o SD empregado maior a suavização produzida.

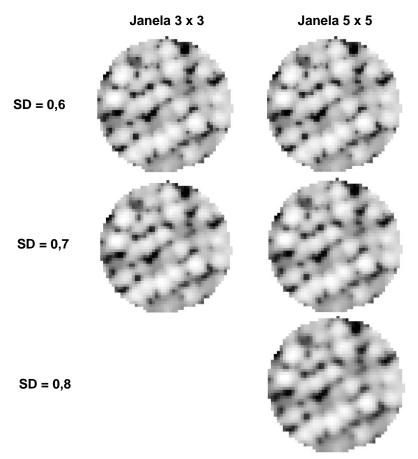


Figura 4.15 – Representação do modelo digital de alturas de uma parcela com filtro gaussiano com janelas de tamanho 3 x 3 *pixels* (coluna à direita) e 5 x 5 *pixels* (coluna à esquerda) e com desvios de 0,6 (primeira linha), de 0,7 (segunda linha) e de 0,8 (terceira linha)

4.3.3 Detecção de árvores individuais

4.3.3.1 Máximo local (LM)

A equação para estimar o tamanho da janela de busca do filtro LM em função da altura total de árvores foi ajustada no software R® (eq. 15 e Figura 4.16).

$$W = 2.014 + 0.001 * Ht^2$$
 (15)

onde:

W = tamanho da janela de busca do filtro de máximo local (m) e

Ht = altura do CHM em metros.

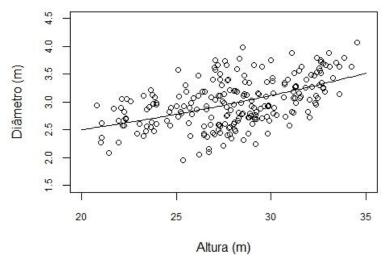


Figura 4.16 – Representação gráfica da equação proposta para a determinação do tamanho da janela de busca

As variáveis, diâmetro da copa e altura total da árvore, utilizadas no modelo apresentaram um coeficiente de correlação linear de Pearson (ρ) de 0,50. A regressão linear (eq. 16) apresentou coeficientes significativos (Tabela 4.3), coeficiente de determinação ajustado (R²adj) de 25,88 % e erro padrão dos resíduos de 0,367 m. A análise de resíduos pode ser visualizada na Figura 4.17.

Tabela 4.3 - Resumo estatístico da regressão linear simples

	Estimado	Erro Padrão	Valor de t	P-Valor	
Intercepto	2,014	0,111	18,067	<2e-16	***
H₽	0,001	0,000	8,979	<2e-16	***

Obs.: *** significativo a 0,001%.

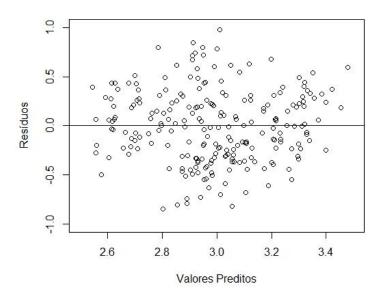


Figura 4.17 – Gráfico de dispersão dos resíduos versus os valores preditos

O algoritmo LM tendeu a subestimar as estimativas, com exceção apenas das abordagens $Im2_mf5_cs25$ e $Im2_m5_cs25$ que apresentaram um $E_r\%$ de 1,12 e 14,55%, respectivamente. Os $E_r\%$ para o número de indivíduos detectados nesse algoritmo variaram de -75,61% a 14,55% (Apêndice B).

Analisando o tamanho utilizado na célula que compõe o CHM nota-se que o aumento na dimensão do *pixel* proporciona maior média de erros relativos, sendo a variação de cerca de 10% em cada aumento de 0,25 m (Figura 4.18).

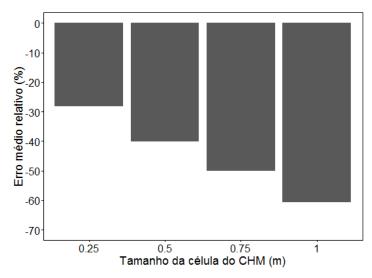


Figura 4.18 — Representação gráfica do $E_r\%$, por tamanho de célula do CHM, obtida com a aplicação do algoritmo LM

Nos CHMs em que não foram aplicados filtros, o algoritmo apresentou a tendência de subestimação, com o $E_r\%$ de -63,59 a -14,83%, assim como nas superfícies com filtro de média com janela de 3 x 3 *pixels*, com o $E_r\%$ entre -56,21 e -5,40%. Com relação as superfícies com filtro de média de 5 x 5 *pixels*, apenas uma alternativa tendeu em superestimar o número de indivíduos com $E_r\%$ de 14,55%. O mesmo ocorreu para os CHMs com aplicação do filtro de mediana, para a janela de 3 x 3 *pixels* o $E_r\%$ foram de -58,27 a -11,03%, subestimação dos resultados, e para a janela de 5 x 5 *pixels* apenas uma alternativa superestimou os resultados em 1,12%. Já as superfícies as quais foram suavizadas com a técnica gaussiana, para todas as variações a tendência foi de subestimação.

Os valores médios de erro relativo (%) por estratégia de suavização (Tabela 4.4) oscilaram de -51,59 a -37,18 %, sendo o menor valor observado no emprego do filtro de média de 3 x 3 *pixels*. Para a variação dentro das técnicas de filtragem o aumento na dimensão da janela de cálculo do filtro proporcionou um pequeno

aumento na média da porcentagem de erros. No filtro Gaussiano, o aumento no valor do desvio padrão, maior suavização, ocasionou maior porcentagem de erro.

Tabela 4.4 – Média de erros, por estratégia de suavização, obtida com a aplicação do algoritmo LM

Estratégia de Suavização	Erro Médio Relativo (%)
Filtro Gaussiano: SD = 06 e janela = 3 x 3 pixels	-47,62
Filtro Gaussiano: SD = 06 e janela = 5 x 5 pixels	-47,85
Filtro Gaussiano: SD = 07 e janela = 3 x 3 pixels	-48,78
Filtro Gaussiano: SD = 07 e janela = 5 x 5 <i>pixels</i>	-49,67
Filtro Gaussiano: SD = 08 e janela = 5 x 5 <i>pixels</i>	-51,59
Filtro Média com janela = 3 x 3 pixels	-37,18
Filtro Média com janela = 5 x 5 pixels	-42,06
Filtro Mediana com janela = 3 x 3 pixels	-39,19
Filtro Mediana com janela = 5 x 5 pixels	-42,03
Sem filtro	-42,18

Na figura 4.19 é possível verificar os valores dos $E_r\%$ agrupados por tamanho de janela de busca do filtro LM e suavização adotada. Pode-se constatar que em todas as superfícies, submetidas ou não a técnicas de suavização, os valores dos erros cresceram com o aumento da janela de busca utilizada, ficando o resultado da janela variável bem próximo ao da de 3 m. Analisando as janelas de busca, as com tamanho de 3 m, 4 m e variável tenderam a subestimar o número de árvores, variando os $E_r\%$ de -71,52 a -17,28 % para a de 3 m, de -75,61 a -32,05 % para a de 4 m e de -71,42 a -13,30 % para a variável. Já a janela do filtro LM de 2 m apresentou um $E_r\%$ de -64,17 a 14,55 %.

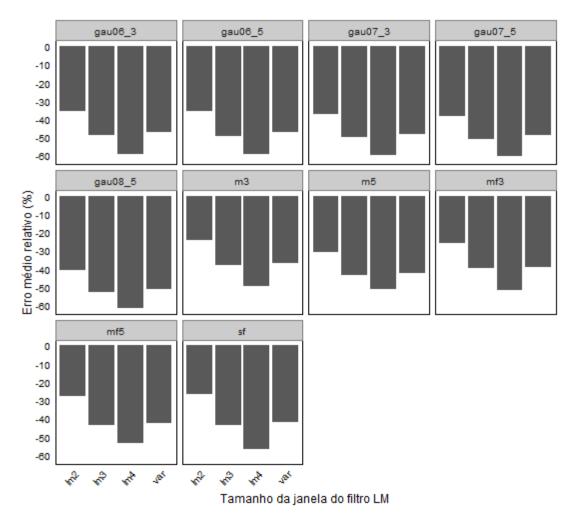


Figura 4.19 – Valores de $E_r\%$ por tamanho de janela de busca filtro de máximos locais, para cada estratégia de suavização adotada no algoritmo LM

A distribuição dos $E_r(\%)$, para as parcelas em estudo, obtidos para as 160 estratégias adotadas no algoritmo LM podem ser visualizados no apêndice B. Considerando o $E_r\%$, 98,75% das estratégias apresentaram resultados negativos, indicando uma tendência de subestimação do número de indivíduos. Os casos em que o número de árvores detectado é maior que o observado em campo ($E_r\%>0$), geralmente ocorrem nas combinações das superfícies com células do grid de tamanhos pequenos (cs5 e cs25) e com a aplicação do tamanho 2 x 2 m da janela de busca do filtro LM.

As 10 estratégias do algoritmo LM selecionadas apresentaram os E_r % de -13,59 a -6,78% e um desvio padrão dos erros médios relativos (S_{Er}) variando de 12,87 a 16,44% (Tabela 4.5).

do di 10.00					
Abordagem	Nº Médio Árvores	Er (%)	Mínimo Er (%)	Máximo Er (%)	SEr
lm2_gau08_5_cs25	48	-10,87	-30,36	19,57	12,87
lm2_gau07_3_cs25	47	-12,04	-35,09	21,74	14,02
lm2_gau06_5_cs25	47	-12,86	-33,33	20,51	14,52
lm2_m3_cs5	46	-14,70	-45,76	20,34	16,44
lm2_sf_cs25	46	-14,83	-42,37	15,25	15,21
lm3_m5_cs25	44	-17,28	-39,58	13,56	13,14
lm2_mf3_cs5	44	-17,51	-47,46	13,56	15,69
lm2_sf_cs5	42	-21,23	-47,46	13,56	14,89
var_mf5_cs25	42	-22,63	-41,86	13,56	15,50
lm3 mf5 cs25	40	-25.09	-45.76	10.17	14.14

Tabela 4.5 – Resultados obtidos para as 10 estratégias selecionadas do algoritmo LM, para o número de árvores

Er = erro relativo médio e Ser = desvio padrão dos erros médios relativos.

4.3.3.2 Curvatura Mínima (CM)

No algoritmo CM as estratégias apresentaram o E_r % variando entre -74,91% a 97,90%, com a maioria tendendo a subestimação, e 9% das abordagens superestimando os resultados.

Considerando o tamanho utilizado na célula que compõe o CHM nota-se, assim como no método anterior, que o aumento na dimensão da célula resulta em maior porcentagem média de erros. Entretanto, a menor média de erros ocorre para a célula de 0,25 m, correspondendo o resultado a superestimação (Figura 4.20).

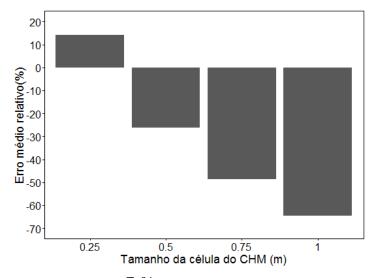


Figura 4.20 – Representação gráfica do $E_r\%$, por tamanho célula do CHM, obtida com a aplicação do algoritmo CM

Nas superfícies sem filtro, o algoritmo apresentou a tendência de subestimação, com o $E_r\%$ de -61,98 a -4,35%, com exceção apenas de duas estratégias $Im2_sf_cs5$ e $Im2_sf_cs25$ com o $E_r\%$ de 24,13 e 97,85%, respectivamente. Para os CHMs com filtro de média de tamanho 3 x 3 *pixels*, com o $E_r\%$ variando de -70,10 a -97,90% e com filtro de média de 5 x 5 *pixels*, variando de -72,82 a 46,14%, apenas uma estratégia ($Im2_m3_cs25$ e $Im2_m5_cs25$) em cada, tendeu em superestimar o número de indivíduos. O mesmo ocorreu para os CHMs com aplicação do filtro de mediana, para a janela de 3 x 3 *pixels* os $E_r\%$ foram de -69,74 a 85,82% e para a janela de 5 x 5 *pixels* de -74,91 a 47,30% com apenas uma estratégia superestimando os resultados em ambas. Já as superfícies as quais foram suavizadas com a técnica gaussiana, os valores encontrados para os vieses foram próximos, assim como a variação para esses valores.

Os valores médios de erro relativo (%) por estratégia de suavização (Tabela 4.6) variaram de -39,72 a -21,75 %, sendo o menor valor observado na superfície sem filtro. Assim como no método anterior, as variações dentro das técnicas de filtragem, como o aumento na dimensão da janela de cálculo do filtro proporcionou um pequeno aumento na média da porcentagem de erros e no CHM com filtro Gaussiano o aumento no valor do desvio padrão, maior suavização, causou um pequeno aumento nos erros.

Tabela 4.6 – Média de acertos por estratégia de suavização obtida com a aplicação do método CM

Estratégia de Suavização	Erro Médio Relativo (%)
Filtro Gaussiano: SD = 06 e janela = 3 x 3 <i>pixels</i>	-28,82
Filtro Gaussiano: SD = 06 e janela = 5 x 5 <i>pixels</i>	-28,97
Filtro Gaussiano: SD = 07 e janela = 3 x 3 <i>pixels</i>	-30,32
Filtro Gaussiano: SD = 07 e janela = 5 x 5 <i>pixels</i>	-30,72
Filtro Gaussiano: SD = 08 e janela = 5 x 5 <i>pixels</i>	-32,41
Filtro Média com janela = 3 x 3 pixels	-31,06
Filtro Média com janela = 5 x 5 pixels	-39,72
Filtro Mediana com janela = 3 x 3 pixels	-31,21
Filtro Mediana com janela = 5 x 5 pixels	-38,50
Sem filtro	-21,75

Para o algoritmo CM, os valores dos $E_r\%$ agrupados por tamanho de janela de busca do filtro de máximos locais e suavização adotada são apresentados na Figura 4.21. Assim como no algoritmo LM, para todas as superfícies os valores de

média dos erros aumentaram com o crescimento da dimensão da janela de busca do filtro LM.

Considerando as janelas de busca do filtro LM com tamanho de 3 e 4 m, aplicadas as curvaturas mínimas, tenderam a subestimar o número de árvores, variando os E_r % de -68,31 a -1,65 % e de -74,91 a -31,43 %, respectivamente. Já a janela de 2 m apresentou um E_r % de -63,06 a 97,90 %.

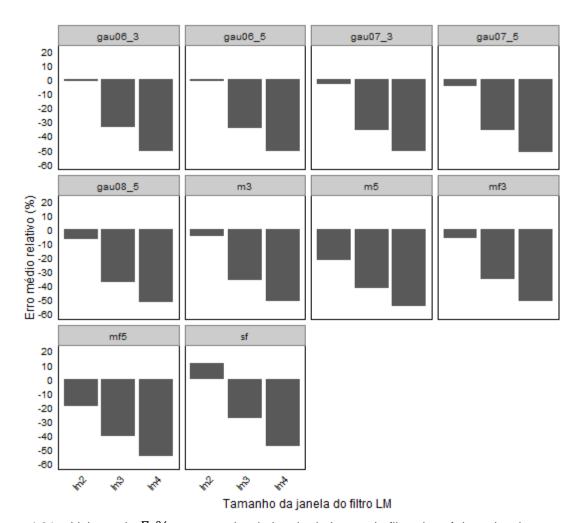


Figura 4.21 – Valores de $E_r\%$ por tamanho de janela de busca do filtro de máximos locais para cada estratégia de suavização adotada no algoritmo CM

No apêndice C são apresentadas a distribuição dos erros médios relativos $E_r(\%)$ das 120 estratégias adotadas no algoritmo CM. Em 90,83% das estratégias apresentaram resultados negativos para o $E_r\%$, indicando uma tendência na subestimação do número de indivíduos. Do mesmo modo que o algoritmo LM, os casos em que o número de árvores detectado é maior que o observado em campo $(E_r\%>0)$ geralmente ocorrem nas combinações das superfícies com células do grid

de tamanhos menores (cs5 e cs25) e na aplicação do tamanho 2 x 2 m da janela de busca do filtro de máximos locais.

As 10 estratégias do algoritmo CM selecionadas apresentaram um $E_r(\%)$ variando de -31,43 a -20,01 % e um desvio padrão dos erros médios relativos (S_{Er}) variando de 8,66 a 13,46% (Tabela 4.7). Os máximos e mínimos erros médios relativos encontrados, assim como o S_{Er} podem ser visualizados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos para as 10 estratégias selecionadas do algoritmo CM, para o número de árvores

Estratégia	Nº Médio Árvores	Er (%)	Mínimo Er (%)	Máximo Er (%)	SEr
lm3_gau06_3_cs5	43	-20.01	-38.98	5.71	9.28
lm3_gau06_5_cs5	43	-20.28	-40.68	5.71	9.55
lm3_gau07_3_cs5	42	-22.23	-45.76	-5.71	8.66
lm2_mf5_cs5	41	-22.52	-46.03	11.43	13.46
lm3_gau07_5_cs5	41	-22.71	-47.46	-4.35	9.00
lm2_m5_cs5	41	-23.90	-45.76	0.00	9.57
lm3_gau08_5_cs5	40	-25.23	-47.46	-5.71	9.28
lm3_mf3_cs5	40	-25.48	-44.07	-2.86	8.98
lm3_m3_cs5	40	-26.00	-44.07	2.86	9.70
lm4_m5_cs25	36	-31.43	-47.46	11.43	11.39

Er = erro relativo médio e Ser = desvio padrão dos erros médios relativos.

4.3.3.3 Análises de volume

As variáveis, volume e altura, utilizadas no modelo apresentaram um coeficiente de correlação linear de Pearson (ρ) de 0,92. A regressão linear (eq. 11) apresentou coeficientes significativos (Tabela 4.8), coeficiente de determinação ajustado (R²adj) de 97,24% e erro padrão dos resíduos de 0,168 m³. A análise de resíduos pode ser visualizada na Figura 4.22.

Tabela 4.8 - Resumo estatístico da regressão linear simples

	Estimado	Erro Padrão	Valor de t	P-Valor	
Intercepto	-13,693	0,183	-74,81	<2e-16	***
Alt	3,762	0,059	63,38	<2e-16	***

Obs,: *** significativo a 0,001%.

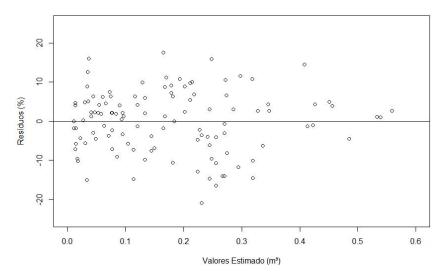


Figura 4.22 - Gráfico percentual dos resíduos em função do volume estimado

Considerando o volume estimado através do modelo ajustado, para o algoritmo LM, 50% das estratégias selecionadas apresentaram uma pequena tendência de subestimação (viés entre -0,66 e -0,06 m³) das estimativas de volume. As 10 estratégias desse algoritmo apresentaram o RMSE variando de 1,78 a 3,41 m³ (*RMSEr* de 12,90 a 24,72%) e o viés de -0,66 a 1,20 m³ (Tabela 4.9). Já para o algortimo CM as estratégias tenderam a subestimar as estimativas de volume, com o viés entre -6,23 e -1,62 m³. O RMSE para a estimativa de volume das estratégias desse algoritmo variou de 2,41 a 6,45 m³ e o *RMSEr* de 17,46 a 46,71% (Tabela 4.9).

Tabela 4.9 – Resultados obtidos para as 20 estratégias selecionadas dos algoritmos

(Continua)

Algoritmo	Estratégia	Volume Médio (m³)	RMSE (m³)	RMSEr (%)	Viés (m³)
LM	lm2_gau08_5_cs25	13,32	1,78	12,90	-0,48
LM	lm2_gau07_3_cs25	13,74	1,98	14,33	-0,06
LM	var_mf5_cs25	13,23	2,07	14,97	-0,55
LM	lm3_mf5_cs25	13,14	2,10	15,25	-0,66
LM	lm3_m5_cs25	14,18	2,11	15,28	0,39
LM	lm2_gau06_5_cs25	13,72	2,13	15,44	-0,08
LM	lm2_sf_cs5	14,01	2,84	20,57	0,21
LM	lm2_mf3_cs5	14,58	3,04	22,02	0,78
LM	lm2_sf_cs25	14,91	3,29	23,88	1,11
LM	lm2_m3_cs5	15,00	3,41	24,72	1,20
CM	lm3_gau06_3_cs5	12,18	2,41	17,46	-1,62
CM	lm3_gau06_5_cs5	12,10	2,45	17,78	-1,70
CM	lm3_gau07_3_cs5	11,84	2,57	18,59	-1,96

(conclusão)

Algoritmo	Estratégia	Volume Médio (m³)	RMSE (m³)	RMSEr (%)	Viés (m³)
CM	lm3_mf3_cs5	11,80	2,70	19,53	-2,00
CM	lm3_gau07_5_cs5	11,65	2,72	19,74	-2,15
CM	lm3_gau08_5_cs5	11,16	3,09	22,41	-2,64
CM	lm3_m3_cs5	11,34	2,98	21,59	-2,46
CM	lm2_m5_cs5	10,66	3,49	25,29	-3,14
CM	lm2_mf5_cs5	12,01	2,87	20,77	-1,79
CM	lm4_m5_cs25	7,57	6,45	46,71	-6,23

Com base nos valores apresentados na tabela 4.9 foram selecionadas as 11 estratégias que apresentaram melhores resultados para o viés, RMSE e o $RMSE_r < 20\%$. O viés para a estimativa de volume dessas estratégias variou de -2,15 a 0,39, com o RMSE entre 1,78 e 2,72 m³ e o RMSEr de 12,90 a 19,74%.

4.3.3.4 Análises de altura e visual

Das estratégias empregadas, 11 foram selecionadas por seus resultados na detecção de indivíduos e na estimativa de volume por parcela. Essas 11 (Tabela 4.10) foram melhor avaliadas, considerando as alturas encontradas e de forma visual.

Tabela 4.10 – Estratégias selecionadas com base no desempenho na quantificação de indivíduos e estimativa de volume

Algoritmo	Estratégia
LM	lm2_gau08_5_cs25
LM	lm2_gau07_3_cs25
LM	var_mf5_cs25
LM	lm3_mf5_cs25
LM	lm3_m5_cs25
LM	lm2_gau06_5_cs25
CM	lm3_gau06_3_cs5
CM	lm3_gau06_5_cs5
CM	lm3_gau07_3_cs5
CM	lm3_mf3_cs5
CM	lm3_gau07_5_cs5

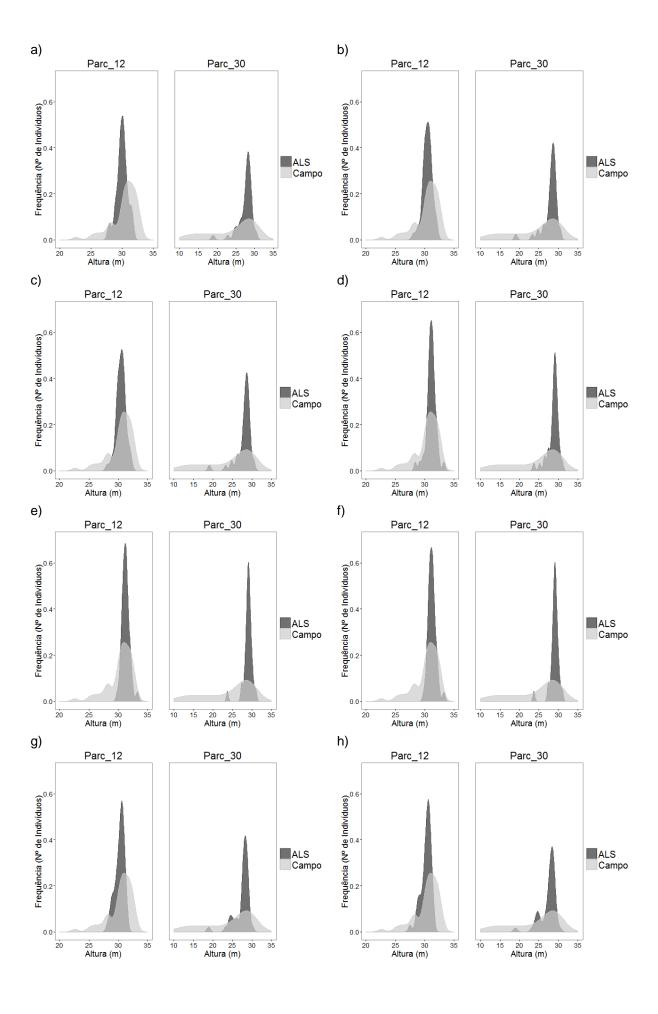
As estatísticas calculadas para as alturas extraídas dos dados ALS são demonstradas na Tabela 4.11. Os *RMSEr* variaram de 4,96 a 9,56% e o RMSE 1,28 a 2,47 m. As estratégias tenderam a superestimar as alturas (Viés de 0,81 a 2,19 m).

Tabela 4.11 - Valores médios para as estatísticas calculadas paras as 11 estratégias selecionadas

Estratégia	Altura Total Média (m)	RMSE (m)	RMSEr (%)	Viés (m)
lm2_gau08_5_cs25_LM	26.67	1.30	5.04	0.83
lm2_gau07_3_cs25_LM	27.02	1.56	6.03	1.18
lm2_gau06_5_cs25_LM	27.08	1.61	6.23	1.24
lm3_m5_cs25_LM	27.78	2.20	8.53	1.95
var_mf5_cs25_LM	27.89	2.34	9.06	2.05
lm3_mf5_cs25_LM	28.03	2.47	9.56	2.19
lm3_gau07_5_cs5_CM	26.64	1.28	4.96	0.81
lm3_gau06_5_cs5_CM	26.68	1.30	5.02	0.84
lm3_gau06_3_cs5_CM	26.69	1.31	5.07	0.86
lm3_gau07_3_cs5_CM	26.71	1.32	5.11	0.88
lm3_mf3_cs5_CM	27.03	1.54	5.97	1.19

Analisando graficamente (Figuras 4.23) as distribuições das alturas encontradas nos dados ALS e as obtidas pelo inventário, para duas parcelas da área em estudo em cada estratégia, pode-se afirmar que as distribuições resultantes dos dados ALS se concentraram nas classes superiores de altura, não havendo boa representação das classes inferiores a 20 m e das classes acima de 33 m. Assim, as estratégias analisadas tenderam a superestimação da variável altura (Viés > 0 m).

As superfícies com filtros Gaussianos geraram distribuições semelhantes, mas o aumento do valor do desvio padrão resultou em um pequeno deslocamento da distribuição para as classes inferiores. No algoritmo LM o filtro de média (lm3_m5_cs25) encontrou mais indivíduos nas classes de altura inferiores, se comparado ao filtro de mediana (lm3_mf5_cs25). Nos dois algoritmos, o viés da altura obtida nas superfícies com suavização utilizando filtro Gaussiano foram um pouco menores do que nas superfícies com filtro de média e mediana.



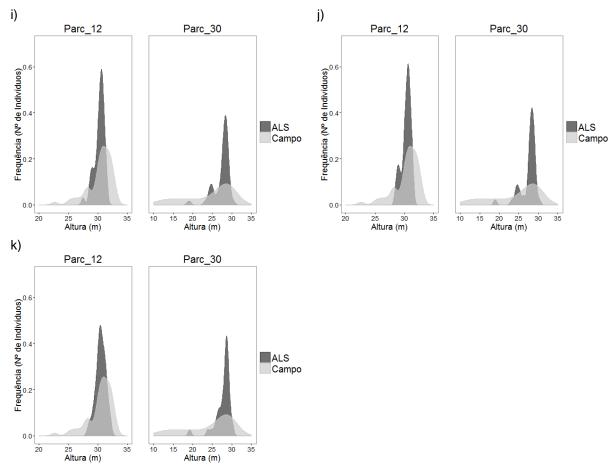
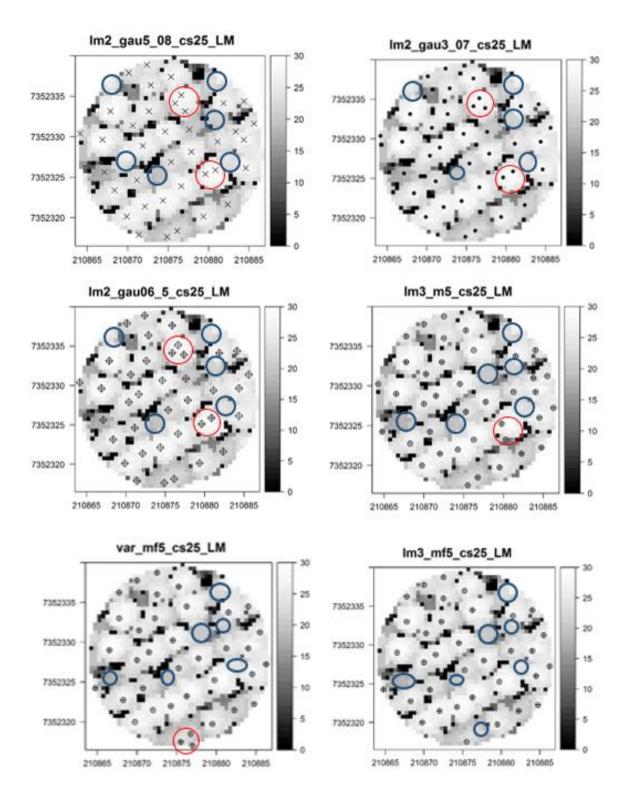


Figura 4.23 – Histogramas representando a distribuição das alturas geradas por dados ALS e a nas distribuição alturas obtidas inventário. das no estratégias: lm2_gau08_5_cs25_LM, b) m2_gau07_3_cs25_LM, c) lm2_gau06_5_cs25_LM, d) var_mf5_cs25_LM, lm3 m5 cs25 LM, e) f) lm3 mf5 cs25 LM, h) lm3_gau06_5_cs5_CM, i) lm3_gau06_3_cs5_CM, j) lm3_gau07_5_cs5_CM, lm3_gau07_3_cs5_CM e k) lm3_mf3_cs5_CM

A representação visual teve como base um CHM que permitisse uma boa representação das copas, para visualização dos indivíduos detectados pelas estratégias. Desse modo, a superfície utilizada foi a sem suavização, com *pixels* de 0,50 m (sf_cs5) e a parcela selecionada foi a número 1 (Figura 4.24).

A análise visual dos resultados permitiu a comparação dos algoritmos quanto ao posicionamento do topo dos indivíduos (máximo local), além de identificar erros de comissão e omissão, alguns erros foram destacados pelos círculos vermelhos e azuis, respectivamente. Nas estratégias do algoritmo LM, houve um bom posicionamento do topo dos indivíduos, com maior ocorrência de erros de omissão (menores árvores), e com pequena variação entre as estratégias com suavização Gaussiana. Já o algoritmo CM resultou, em algumas superfícies, no deslocamento na posição dos valores de maior elevação do centro para a lateral das copas,

resultando na criação de falsos picos, e em algumas copas mais de um pico nas laterais, como destacado em vermelho, constituindo erros de comissão.



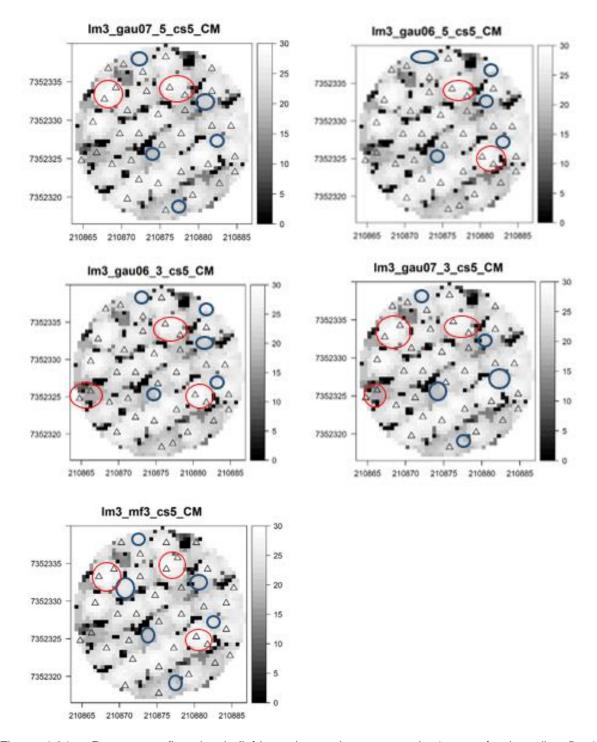


Figura 4.24 – Representações dos indivíduos detectados na parcela 1, através da aplicação 11 estratégias selecionadas, no CHM sem suavização, com célula de tamanho 0,5 m que permite uma boa visualização das copas

Assim, com base nos resultados apresentados (Tabela 4.12) e na interpretação visual a estratégia que proporcionou a melhor resposta ($Im2_gau08_5_cs25_LM$) utilizou o algoritmo LM com janela de busca 2 x 2 m, na superfície com as células de tamanho 0,25 m, com aplicação do filtro Gaussiano (SD = 0,8 e janela de cálculo de 5 x 5 *pixels*). Essa estratégia apresentou um E_r % de -

10,87% na quantificação dos indivíduos e para a estimativa de volume o viés de - 0,48 m³ e o *RMSEr* de 12,90%. As alturas encontradas apresentaram uma pequena tendência de superestimação (viés de 0,83 m). Assim, essa estratégia apresentou uma boa estimativa de volume (96,5%).

Tabela 4.12 – Valores médios das estatísticas calculadas paras as 11 estratégias selecionadas

	Nº d€	Indivíd	luos		Volume			Altura	
Estratégia	Média	Erro Médio (%)	Ser (%)	Média (m)	RMSEr (%)	Viés (m)	Média (m)	RMSEr (%)	Viés (m)
lm2_gau08_5_cs25_LM	48	-10.87	12.87	13,32	12.90	-0.48	26.67	5.04	0.83
lm2_gau07_3_cs25_LM	47	-12.04	14.02	13,74	14.33	-0.06	27.02	6.03	1.18
lm2_gau06_5_cs25_LM	47	-12.86	14.52	13,72	15.44	-0.08	27.08	6.23	1.24
lm3_m5_cs25_LM	44	-17.28	13.14	14,18	15.28	0.39	27.78	8.53	1.95
var_mf5_cs25_LM	42	-22.63	15.50	13,23	.14,97	-0.55	27.89	9.06	2.05
lm3_mf5_cs25_LM	40	-25.09	14.14	13,14	15.25	-0.66	28.03	9.56	2.19
lm3_gau07_5_cs5_CM	41	-22.71	9.00	11.65	19.74	-2.15	26.64	4.96	0.81
lm3_gau06_5_cs5_CM	43	-20.28	9.55	12.10	17.78	-1.70	26.68	5.02	0.84
lm3_gau06_3_cs5_CM	43	-20.01	9.28	12.18	17.46	-1.62	26.69	5.07	0.86
lm3_gau07_3_cs5_CM	42	-22.23	8.66	11.84	18.59	-1.96	26.71	5.11	0.88
lm3_mf3_cs5_CM	40	-25.48	8.98	11.80	19.53	-2.00	27.03	5.97	1.19

4.4 Discussão

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da detecção de árvores individuais a partir de dados ALS obtidos em plantios de *Eucalyptus*. Com relação ao tamanho das células que constituem os modelos digitais de altura pode-se afirmar que os menores tamanhos geram melhores representações das copas das árvores. Entretanto, para a dimensão de 0,25 m alguns *pixels* não encontram retornos no dossel, gerando assim valores baixos dentro das copas, que podem induzir a existência de falsos picos nas superfícies. Esses *pixels* podem ser considerados ruídos e causar uma superestimação na quantidade de árvores, por fornecer a superfície falsos máximos locais.

Dessa forma, os algoritmos apresentaram menores porcentagens de erros quando aplicados as superfícies com menores tamanhos de células, ocorrendo, entretanto, para o algoritmo CM a superestimação para o CHM com pixels de 0,25 m, o que pode ter sido ocasionado devido a criação de falsos picos na lateral das copas durante a geração da superfície de curvatura mínima.

Outro fator que influenciou a resposta dos algoritmos foi a suavização da superfície, as 11 estratégias selecionadas continham a superfície suavizada. A determinação do grau de suavização empregado constitui um ponto importante na detecção dos indivíduos, pois parâmetros com valores maiores podem resultar no agrupamento de copas, favorecendo a subestimação da quantidade de árvores, entretanto as variações no grau de suavização usadas não resultaram em grandes diferenças no desempenho dos métodos.

Os algoritmos apresentaram melhores resultados com os tamanhos de janelas de busca do filtro de máximo local próximos ao espaçamento utilizado no plantio, proporcionando o aumento na dimensão da janela em aumento no erro. Silva et al. (2013), avaliaram o uso do filtro de Máximo Local na detecção de árvores, em plantios de *Eucalyptus* sp, com espaçamento de 3 x 2 m, utilizando variações na dimensão das janelas de busca (1 a 5 m). Os resultados indicaram um comportamento inversamente proporcional entre o tamanho da janela e a acurácia, ou seja, janelas de maior tamanho obtiveram piores resultados.

Apesar dos erros no número de indivíduos estarem acima de -10%, os volumes estimados a partir dos dados ALS, para as 20 estratégias selecionadas, apresentaram no geral pequenas tendências de subestimação, o que pode estar relacionado ao fato das árvores detectadas representarem as maiores classes de altura das parcelas, que correspondem a maior proporção do volume. Já as árvores não encontradas, pertencem as menores classes de altura e representam uma pequena proporção do volume. Em seu estudo, Persson et al. (2002) identificaram 71% das árvores das parcelas, correspondendo a grande parte das árvores não detectadas as de pequeno diâmetro, o que resultou em uma boa estimativa do volume (91%), pois as árvores mais valiosas constituem a maior proporção do volume.

As médias das alturas encontradas pelos dados ALS apresentaram uma pequena tendência de superestimação, o que pode ter ocorrido em virtude dos indivíduos encontrados pertencerem as classes superiores de altura. Outro fator que pode contribuir para essa superestimação está relacionado a criação do CHM, que é desenvolvido com base nos retornos mais altos da nuvem de pontos, o que pode favorecer a representação de árvores superiores em detrimento das inferiores, uma vez que os indivíduos de menor porte podem ser encobertos por galhos dos elementos maiores (SILVA et al., 2013). A tendência de superestimação também foi

verificada por Yu et al. (2010). Em seu estudo esses autores compararam a abordagem baseada em área e a baseada em árvore individual, geralmente usadas em dados derivados de tecnologia ALS, para predizer atributos a nível de parcela, obtendo para a ITD um RMSE de 5,69% para altura média.

Os algoritmos apresentaram bons resultados na detecção de árvores individuais, resultando na maior parte das estratégias em erros de omissão. Entretanto para algumas estratégias do algoritmo CM houve maior número de árvores extras detectadas (erros de comissão), resultantes provavelmente dos picos laterais nas copas apresentados pelas superfícies, o que pode ter compensado o número de árvores não detectadas. Resultado semelhante foi observado por Kaartinen et al. (2012), ao comparar diversos métodos, observaram bons resultados ao detectar árvores dominantes em detrimento de árvores dominadas para o algoritmo LM, e já o algoritmo CM, esse apresentou a melhor porcentagem quanto à detecção das árvores, porém resultou em erros de comissão (árvores extras). No trabalho de Maltamo et al. (2004), os resultados demostraram boa precisão do uso de dados ALS com o algoritmo LM na descrição do estrato arbóreo dominante, sendo a porcentagem de árvores dominantes detectadas de 80% e de apenas cerca de 40% quando consideradas todas as árvores.

Cabe ressaltar a dificuldade em detectar os topos das árvores de eucalipto devido ao movimento causado pelo vento. Com o balanço das árvores, essas acabam juntando-se a indivíduos vizinhos, sendo difícil separar as copas individuais. Assim, uma alternativa seria o desenvolvimento de algoritmos que atuem na parte inferior da nuvem de pontos ALS, visando localizar os troncos das árvores.

4.5 Conclusão

A abordagem de árvores individuais aplicada a nuvem de pontos ALS originária de plantios do gênero *Eucalyptus* foi utilizada neste estudo. Os resultados indicaram que o modelo digital de alturas com células de dimensões menores e com aplicação de suavização possibilitam melhores resultados quanto a quantificação de indivíduos. Na área de estudo, com plantios de *Eucalyptus* em espaçamento 3 x 2 m, as janelas de busca para o filtro de Máximo Local de menores dimensões (2 e 3 m) demostraram ser mais adequadas para contagem de árvores.

O uso de dados ALS permitiu a detecção de árvores individuais, sendo o melhor desempenho encontrado no algoritmo LM, com a estratégia selecionada resultando em um erro médio relativo de cerca 11 % na quantificação dos indivíduos arbóreos.

Agradecimentos

Este trabalho faz parte do projeto de pesquisa desenvolvido pelo Grupo de Estudos em Tecnologia LiDAR (GET-LiDAR), Universidade de São Paulo, Brasil. Nós reconhecemos as seguintes instituições por seu apoio: Suzano Papel e Celulose e FotoTerra para fornecer os conjuntos de dados ALS; o Programa de Recursos Florestais de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo e o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) por fornecer a infra-estrutura e o ambiente adequado para o desenvolvimento dessa pesquisa; e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio a esse estudo através de uma bolsa de estudos.

Referências

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map from Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, Dez. 2013.

CAMPOS, J.C.C; RIBEIRO, J.O.; PAULA NETO, F. Inventário florestal nacional, reflorestamento: Minas Gerais. Brasília, DF: IBDF, 1984. 126p.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. **Geoscientific Model Development**, London, v. 8, n. 7, p. 1991-2007, Jul. 2005.

EVANS, I.S. **An integrated system of terrain analysis and slope mapping**. Durham: Department of Geography, University of Durham, 1979. 192p.

GAVA, J.L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v.11, n. 30, p. 89-94, abr. 1997.

GIONGO, M.; KOEHLER, H.S.; MACHADO, S.A.; KIRCHNER, F.F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago./out. 2010.

- GÖRGENS, E.B.; PACKALEN, P.; SILVA, A.G.P.; ALVARES, C.A.; CAMPOE, O.C.; STAPE, J.L.; RODRIGUEZ, L.C.E. Stand volume models based on stable metrics as from multiple ALS acquisitions in *Eucalyptus* plantations. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 72, n. 4, p. 489–498, Jan. 2015.
- HU, B.; LI, J.; JING, L.; JUDAH, A. Improving the efficiency and accuracy of individual tree crown delineation from high-density LiDAR data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 26, p. 145-155, 2014.
- KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; YU, X.; VASTARANTA, M.; HYYPPÄ, H.; KUKKO, A.; HOLOPAINEN, M.; HEIPKE, C.; HIRSCHMUGL, M.; MORSDORF, F.; NÆSSET, E.; PITKÄNEN, J.; POPESCU, S.; SOLBERG, S.; WOLF, B.M.; WU, J-C. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. **Remote Sensing**, Basel, v. 4, n. 4, p. 950-974, Marc. 2012.
- KANKARE, V.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M.; YU, X.; HYYPPÄ, J; HYYPPÄ, H. The fusion of individual tree detection and visual interpretation in assessment of forest variables from laser point clouds. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)**, Calgary, v. 38, Part 5/W12, p. 157-161, 2011.
- KRAUS, K.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 54, n. 4, p. 193–203, Aug. 1998.
- MADGWICK, H.A.I.; SATOO, T. On estimating the aboveground weights of tree stands. **Ecology**, Washington DC, v. 56, n. 6, p. 1446-1450, 1975
- MALTAMO, M.; MUSTONEN, K.; HYYPPÄ, J.; PITKÄNEN, J.; YU, X. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 34, n. 9, p. 1791-1801, Sept. 2004.
- McCOMBS, J.W.; ROBERTS, S.D.; EVANS, D.L. Influence of fusing lidar and multispectral imagery on remotely sensed estimates of stand density and mean tree height in a managed loblolly Pine plantation. **Forest Science**, Lawrence, v. 49, n. 3, p. 457-466, Jun. 2003.
- McGAUGHEY, R.J. **FUSION/LDV**: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization v. 3.50, Seattle, WA, 2014. Disponível em: http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf. Acesso em: 14 ago. 2015.
- MEYER, H.A. A correction for a systematic error occurring in the application to the logarithmic equation. **Pennsylvania State Forest School, Research Paper**, Mont Alto, n. 7, 3 p., 1941.
- MIQUELES, M.A.; CENTENO, J.A.S. Detecção e caracterização de vegetação usando dados do laser scanner aerotransportado. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2003. p. 1-12.

- OLIVEIRA, L.T. de; CARVALHO, L.M.T.; FERREIRA, M. Z.; OLIVEIRA, T.C.A.; ACERBI JUNIOR, F. W. Application of LIDAR to forest inventory for tree count in stands of *Eucalyptus* sp. **CERNE**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 175–184, Apr./Jun. 2012.
- PERSSON, A.; HOLMGREN, J.; SÖDERMAN, U. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 68, n. 9, p. 925 932, Sept. 2002.
- PITKÄNEN, J.; MALTAMO, M.; HYYPPÄ, J.; YU, X. Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)**, Calgary, v. 36, Part 8/W2, p. 187-191, 2004.
- POPESCU, S.C.; WYNNE, R.H.; NELSON, R.F. Estimating plot-level tree heights with LiDAR: local filtering with a canopy-height based variable window. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 37, p. 71-95, Dec. 2002.
- POPESCU, S.C.; WYNNE, R.H. Seeing the trees in the forest: using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 70, n. 5, p. 589 604, May 2004.
- PRASICEK, G.; OTTO, J.-C.; MONTGOMERY, D.R.; SCHROTT, L. Multi-scale curvature for automated identification of glaciated mountain landscapes. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 209, p. 53-65, Marc. 2014.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington D.C., v. 47, n. 9, p. 719-734, Nov. 1933.
- SHARY, P.A.; SHARAYA, L.S.; MITUSOV, A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 107, n. 1/2, p. 1–32, May 2002.
- SILVA, C.A.; KALUBERG, C.; HUDAK, A.; LIEBERMANN, R.; CARVALHO, S.P.C.; RODRIGUEZ, L.C.E. Aplicando filtro local máximo (LM) através dos métodos da janela fixa e variável em dados LiDAR para identificação de árvores individuais em povoamentos de *Eucalyptus* sp. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO –SBSR,16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 6081-6088.
- SILVA, A.G.P. Estimativa da biomassa de lenho em povoamentos de *Eucalyptus grandis* baseada em estatísticas do perfil de dossel geradas por escaneamento a laser aerotransportado. 2014. 146p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- SILVA, A.G.P.; GÖRGENS, E.B.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; RODRIGUEZ, L.C.E. Assessing biomass based on canopy height profiles using airborne laser scanning data in eucalypt plantations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n. 6, p. 504–512, Nov./Dec. 2015.

TRIMBLE NAVIGATION LIMITED. **Trimble Harrier 68i Corridor Mapping System**. 2011. Disponível em: http://www.nikon-trimble.co.jp/products/pdf/geospatial/harrier 68i.pdf>. Acesso em: 10 out. 2015.

VASTARANTA, M.; KANKARE, V.; HOLOPAINEN, M.; YU, X.; HYYPPÄ, J.; HYYPPÄ, H. Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 67, p.73–79, Nov. 2012.

VAUHKONEN, J.; ENE, L.; GUPTA, S.; HEINZEL, J.; HOLMGREN, J.; PITKÄNEN, J.; SOLBERG, S.; WANG, Y.; WEINACKER, H.; HAUGLIN, K.M.; LIEN, V.; PACKALÉN, P.; GOBAKKEN, T.; KOCH, B.; NÆSSET, E.; TOKOLA, T.; MALTAMO, M. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. **Forestry**, Oxford, v. 85, n. 1, p. 27-40, Jan. 2012.

VAUHKONEN, J.; MALTAMO, M.; McROBERTS, R.E.; NÆSSET, E. Introduction to forestry applications of airbone laser scanning. In: MALTAMO, M.; NÆSSET, E.; VAUKONEN, J. (Ed.). **Forestry applications of airbone laser scanning**. London: Springer, 2014. chap. 1, p. 1 – 11.

WOOD, J. The geomorphological characterisation of digital elevation models. 1996. 456p. Thesis (Doctorate in Philosophy) - Department of Geography, University of Leicester, Leicester, 1996.

YU, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; MALTAMO, M. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 90, p. 451–462, Apr. 2004.

ZONETE, M.F. Análise do uso da tecnologia laser aerotransportado para inventários florestais em plantios clonais de *Eucalyptus* sp no sul da Bahia. 2009. 95 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

5 CONCLUSÃO

Dentre as atividades mais importantes do inventário florestal destacam-se: a estimação de volume do povoamento; a estratificação quando necessária; e a contagem de indivíduos. Este trabalho avalia os potenciais ganhos na qualidade das estimativas obtidas a partir de dados ALS nesses três aspectos.

No capítulo 2, em que buscou-se avaliar o uso combinado de dados ALS e de dupla amostragem para estimativa de volume em plantios de eucalipto, comparando a delineamentos tradicionais, os resultados encontrados com a aplicação da dupla amostragem indicaram, se considerado o erro amostral, melhorias de cerca de 60% nas estimativas de volume e a redução do esforço amostral em campo (71,4%) em relação à amostragem casual simples. A ampliação do escopo desse trabalho, envolvendo mais plantios, e inclusive plantios de outras espécies, precisaria ser considerado para que se pudesse comprovar o nível de ganho da dupla amostragem observado na qualidade das estimativas.

Diferenças existentes entre materiais genéticos clonais e entre idades nos povoamentos de *Eucalyptus* foram exploradas no capítulo 3. Os resultados demonstraram que diferenças entre espécies e clones de uma mesma espécie de *Eucalyptus* podem ser descritas a partir de dados ALS. Para os dados utilizados, a altura máxima (P95), foi estatisticamente diferente em todas as comparações entre clones. Considerando plantios de *E. grandis* com diferentes idades, 4 e 7 anos, diferenças na altura e na cobertura do dossel (CP_5) foram observadas. A incorporação de mais atributos de estratificação, como solo, relevo etc., poderiam trazer melhorias nos resultados.

A abordagem de árvores individuais foi utilizada na última parte, capítulo 4, onde foi possível verificar a capacidade dos dados ALS em detectar árvores por meio de algoritmos que atuam no CHM. A composição do CHM (tamanho de célula e suavização) afetou o desempenho dos algoritmos. Na área estudada, o algoritmo de máximo local (LM) apresentou melhores resultados, atingindo um erro relativo médio de 11% em sua melhor estratégia. Novos estudos que permitam substituir o uso de modelos digitais de superfície, como o modelo digital de alturas (CHM), pelo uso de camadas mais internas do dossel poderiam ser recomendados como um desdobramento promissor deste trabalho.

As tecnologias ALS, como comprovado neste estudo, mostram-se como as mais adequadas para promover significativas melhorias na capacidade do gestor florestal exercer as suas funções. Os três casos descritos mostraram apenas um pequeno exemplo do amplo leque de possíveis aplicações. Quando incorporadas ao uso de escaneamento laser terrestre e de imagens multi e hiper espectrais, por exemplo, o ALS oferece ainda maiores possibilidades. É nesse sentido que, por restar ainda um longo caminho pela frente, fica a esperança de que este trabalho tenha trazido contribuição significativa para servir de motivação para o avanço de novos estudos.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Tabela com a caracterização das parcelas utilizadas no capítulo 3 (continua)

Nº Parcela	N° de Árvores	DAP Médio (cm)	SD DAP (cm)	Altura Média (m)	SD Altura (m)	VTCC ² (m ³)
1	47	15,47 15,25	3,29	24,54	3,06	10,33
2	39 50	15,35	3,36	23,60	3,20	8,12
3	50	15,03	3,20	24,31	3,54	10,35
4	47 50	14,60	3,50	23,31	3,70	8,99
5	58	16,04	3,84	25,33	4,00	14,54
6	60	14,89	2,47	23,66	2,65	11,43
7	59	15,60	3,23	24,87	3,69	13,41
8	57	16,43	3,58	25,76	3,39	14,92
9	58	15,66	2,99	25,06	3,21	13,21
10	55 	17,30	2,75	28,00	2,82	16,74
11	59 - 2	18,15	1,98	29,02	1,65	19,92
12	59	19,09	2,87	30,36	2,11	23,42
13	52	16,18	4,05	27,15	4,87	14,62
14	63	15,58	4,10	26,09	4,93	15,96
15	55	17,28	4,03	28,18	4,03	17,82
16	59	15,08	3,56	24,84	4,33	12,98
17	57	15,39	3,74	25,52	4,15	13,46
18	58	15,12	3,45	25,88	4,02	13,30
19	46	14,64	2,58	21,76	2,32	7,71
20	50	14,01	2,87	22,67	2,87	8,29
21	52	15,09	1,98	19,89	1,18	8,04
22	55	15,12	1,88	20,71	0,98	8,92
23	54	17,90	3,75	27,30	2,46	17,39
24	53	17,85	3,03	27,70	2,90	16,96
25	59	13,85	4,88	22,15	4,27	10,71
26	52	19,05	2,55	27,83	1,89	18,45
27	58	15,89	2,39	27,23	2,89	14,57
28	56	14,94	2,52	25,71	3,23	11,91
29	58	15,05	3,20	25,81	4,37	13,01
30	58	14,43	4,55	24,24	6,10	12,51
31	58	15,20	2,65	26,14	3,33	13,02
32	59	15,00	1,69	23,21	1,69	10,80
33	59	13,82	1,78	21,39	1,89	8,51
34	54	14,76	2,34	22,67	2,67	9,59
35	59	14,39	1,57	22,15	1,51	9,45
36	48	16,18	4,84	27,74	5,40	14,73
37	43	17,88	4,45	29,91	4,84	16,64
38	48	17,21	4,69	28,52	5,36	16,59
39	35	19,87	5,18	30,65	4,86	16,98
40	59	16,30	3,26	27,63	4,04	16,41

APÊNDICE A - Tabela com a caracterização das parcelas utilizadas no capítulo 3 (conclusão)

Nº Parcela	N° de Árvores	DAP Médio (cm)	SD DAP (cm)	Altura Média (m)	SD Altura (m)	VTCC ² (m³)
41	56	17,02	3,28	28,05	4,03	17,05
42	53	16,68	3,37	27,18	3,21	14,99
43	54	17,22	2,96	27,90	3,20	16,37
44	54	15,71	2,96	26,60	3,28	13,25
45	47	18,26	4,08	29,56	5,01	18,24
46	46	19,04	4,18	30,61	4,65	20,15

SD = desvio padrão; VTCC = Volume total com casca.

APÊNDICE B - Tabela com os resultados para as 160 estratégias do algoritmo LM, na quantificação de indivíduos do capítulo 3

(continua)

Estratégia	Er (%)	Mínimo Er (%)	Máximo Er (%)	SEr
lm2_sf_cs1	-35.99	-64.41	-5.08	13.17
lm3_sf_cs1	-50.80	-76.27	-22.03	11.17
lm4_sf_cs1	-63.59	-79.66	-42.59	7.36
lm2_sf_cs75	-34.80	-60.00	-3.39	14.26
lm3_sf_cs75	-45.86	-74.58	-28.81	10.41
lm4_sf_cs75	-55.63	-76.27	-36.96	8.65
lm2_sf_cs5	-21.23	-47.46	13.56	14.89
lm3_sf_cs5	-41.38	-67.80	-15.25	10.78
lm4_sf_cs5	-58.51	-74.58	-37.14	7.98
lm2_sf_cs25	-14.83	-42.37	15.25	15.21
lm3_sf_cs25	-36.41	-59.32	0.00	13.30
lm4_sf_cs25	-48.75	-72.88	-28.26	9.64
lm2_m3_cs1	-45.16	-71.19	-13.56	11.71
lm3_m3_cs1	-48.62	-76.27	-19.23	11.45
lm4_m3_cs1	-56.21	-77.97	-35.19	8.86
lm2_m3_cs75	-31.88	-59.32	1.69	13.98
lm3_m3_cs75	-38.46	-71.19	-8.47	12.95
lm4_m3_cs75	-47.83	-76.27	-30.51	10.21
lm2_m3_cs5	-14.70	-45.76	20.34	16.44
lm3_m3_cs5	-33.98	-57.63	1.69	12.71
lm4_m3_cs5	-50.83	-72.88	-25.71	9.39
lm2_m3_cs25	-5.40	-32.76	25.42	13.99
lm3_m3_cs25	-31.01	-54.24	3.39	13.20
lm4_m3_cs25	-44.09	-67.80	-15.25	10.89
lm2_m5_cs1	-58.72	-75.86	-31.43	9.19
lm3_m5_cs1	-69.32	-81.36	-45.71	5.99
lm4_m5_cs1	-72.40	-83.05	-54.29	4.98
lm2_m5_cs75	-51.22	-76.27	-31.43	9.68
lm3_m5_cs75	-54.72	-76.27	-34.29	8.63
lm4_m5_cs75	-56.47	-76.27	-37.14	8.41
lm2_m5_cs5	-28.05	-52.54	8.47	13.93
lm3_m5_cs5	-33.69	-62.71	3.39	12.25
lm4_m5_cs5	-43.87	-71.19	-22.86	9.26
lm2_m5_cs25	14.55	-22.92	84.62	21.82
lm3_m5_cs25	-17.28	-39.58	13.56	13.14
lm4_m5_cs25	-32.05	-56.90	-5.08	10.73
lm2_mf3_cs1	-42.43	-66.10	-8.47	12.42
lm3_mf3_cs1	-49.74	-72.88	-19.23	11.25
lm4_mf3_cs1	-58.27	-76.27	-37.04	8.79
lm2_mf3_cs75	-33.30	-62.71	-1.69	14.34

APÊNDICE B - Tabela com os resultados para as 160 estratégias do algoritmo LM, na quantificação de indivíduos do capítulo 3

(continuação)

 Estratégia	Er (%)	Mínimo Er (%)	Máximo Er (%)	SEr
lm3_mf3_cs75	-40.89	-71.19	-6.78	13.44
 lm4_m3f_cs75	-50.67	-76.27	-28.85	10.45
lm2_mf3_cs5	-17.51	-47.46	13.56	15.69
lm3_mf3_cs5	-36.18	-61.02	1.69	13.03
lm4_mf3_cs5	-52.80	-74.58	-31.43	9.24
lm2_mf3_cs25	-11.03	-37.29	23.73	15.66
lm3_mf3_cs25	-32.81	-54.24	1.69	13.82
lm4_mf3_cs25	-45.85	-71.19	-16.95	10.77
lm2_mf5_cs1	-42.23	-69.49	-6.78	14.36
lm3_mf5_cs1	-65.90	-79.31	-48.57	7.70
lm4_mf5_cs1	-71.84	-81.03	-57.14	5.05
lm2_mf5_cs75	-40.05	-64.29	6.78	16.82
lm3_mf5_cs75	-49.69	-74.58	-20.34	11.79
lm4_mf5_cs75	-56.56	-76.27	-36.96	8.78
lm2_mf5_cs5	-29.94	-55.93	10.17	14.96
lm3_mf5_cs5	-34.96	-59.32	3.39	12.39
lm4_mf5_cs5	-47.80	-71.19	-28.57	9.83
lm2_mf5_cs25	1.12	-31.25	51.28	19.57
lm3_mf5_cs25	-25.09	-45.76	10.17	14.14
lm4_mf5_cs25	-38.94	-62.71	-5.08	11.85
lm2_gau06_3_cs1	-53.49	-72.88	-33.33	9.18
lm3_gau06_3_cs1	-63.70	-76.27	-42.86	7.03
lm4_gau06_3_cs1	-69.54	-81.36	-51.43	6.11
lm2_gau06_3_cs75	-46.04	-67.27	-16.95	11.69
lm3_gau06_3_cs75	-52.94	-71.19	-36.54	8.21
lm4_gau06_3_cs75	-59.89	-79.66	-42.86	7.15
lm2_gau06_3_cs5	-30.20	-52.54	-1.69	12.54
lm3_gau06_3_cs5	-44.22	-64.41	-23.73	10.13
lm4_gau06_3_cs5	-58.91	-76.27	-37.14	7.03
lm2_gau06_3_cs25	-12.47	-35.09	23.08	14.69
lm3_gau06_3_cs25	-34.72	-56.90	-5.08	12.67
lm4_gau06_3_cs25	-47.89	-69.49	-22.86	9.33
lm2_gau06_5_cs1	-53.81	-72.88	-35.59	9.08
lm3_gau06_5_cs1	-64.13	-76.27	-42.86	6.96
lm4_gau06_5_cs1	-69.90	-81.36	-51.43	6.11
lm2_gau06_5_cs75	-46.43	-69.09	-16.95	11.75
lm3_gau06_5_cs75	-53.04	-71.19	-36.54	8.21
lm4_gau06_5_cs75	-60.11	-79.66	-42.86	7.21
lm2_gau06_5_cs5	-30.53	-52.73	-1.69	12.90
lm3_gau06_5_cs5	-44.23	-63.64	-21.74	10.45
lm4_gau06_5_cs5	-58.85	-76.27	-37.14	7.09

APÊNDICE B - Tabela com os resultados para as 160 estratégias do algoritmo LM, na quantificação de indivíduos do capítulo 3

(continuação)

	- (0()			
<u>Estratégia</u>	Er (%)	Mínimo Er (%)	Máximo Er (%)	SEr
lm2_gau06_5_cs25	-12.86	-33.33	20.51	14.52
lm3_gau06_5_cs25	-35.11	-58.62	-5.08	12.73
lm4_gau06_5_cs25	-47.92	-69.49	-22.86	9.53
lm2_gau07_3_cs1	-57.79	-74.58	-37.04	7.97
lm3_gau07_3_cs1	-66.58	-77.97	-42.86	6.62
lm4_gau07_3_cs1	-71.67	-81.36	-48.57	6.52
lm2_gau07_3_cs75	-48.28	-69.49	-26.92	10.02
lm3_gau07_3_cs75	-54.14	-72.88	-36.54	7.92
lm4_gau07_3_cs75	-60.49	-81.36	-48.08	7.16
lm2_gau07_3_cs5	-31.56	-50.91	-1.69	12.67
lm3_gau07_3_cs5	-44.19	-66.10	-25.00	10.30
lm4_gau07_3_cs5	-58.86	-76.27	-34.29	7.33
lm2_gau07_3_cs25	-12.04	-35.09	21.74	14.02
lm3_gau07_3_cs25	-34.48	-55.93	-3.39	12.54
lm4_gau07_3_cs25	-48.17	-69.49	-22.86	9.30
lm2_gau07_5_cs1	-59.37	-76.27	-40.74	7.81
lm3_gau07_5_cs1	-67.80	-81.36	-48.57	6.31
lm4_gau07_5_cs1	-72.62	-83.05	-54.29	5.71
lm2_gau07_5_cs75	-49.92	-72.88	-26.92	10.03
lm3_gau07_5_cs75	-55.50	-72.88	-36.54	8.36
lm4_gau07_5_cs75	-61.67	-81.36	-48.57	6.67
lm2_gau07_5_cs5	-32.83	-56.14	-1.69	13.28
lm3_gau07_5_cs5	-45.21	-66.10	-27.12	9.81
lm4_gau07_5_cs5	-58.78	-76.27	-40.00	7.06
lm2_gau07_5_cs25	-11.88	-35.09	23.91	13.28
lm3_gau07_5_cs25	-35.03	-56.90	-6.78	12.52
lm4_gau07_5_cs25	-48.06	-67.80	-22.86	9.35
lm2_gau08_5_cs1	-64.17	-77.97	-42.59	7.10
lm3_gau08_5_cs1	-71.52	-83.05	-55.56	5.34
lm4_gau08_5_cs1	-75.61	-84.75	-65.71	4.29
lm2_gau08_5_cs75	-53.72	-74.58	-32.61	8.91
lm3_gau08_5_cs75	-58.43	-76.27	-34.29	7.68
lm4_gau08_5_cs75	-63.81	-79.66	-50.00	6.38
lm2_gau08_5_cs5	-34.64	-56.90	-1.69	13.54
lm3_gau08_5_cs5	-46.07	-67.80	-27.12	9.88
lm4_gau08_5_cs5	-58.66	-76.27	-34.29	7.41
lm2_gau08_5_cs25	-10.87	-30.36	19.57	12.87
lm3_gau08_5_cs25	-35.33	-57.63	-8.47	12.14
lm4_gau08_5_cs25	-48.87	-69.49	-31.43	8.51
var_sf_cs1	-50.76	-74.58	-22.03	11.08
var_sf_cs75	-44.25	-64.41	-3.39	13.47

APÊNDICE B - Tabela com os resultados para as 160 estratégias do algoritmo LM, na quantificação de indivíduos do capítulo 3

(conclusão)

Estratégia	Er (%)	Mínimo Er (%)	Máximo Er (%)	SEr
var_sf_cs5	-38.28	-58.49	8.47	16.49
var_sf_cs25	-33.88	-55.17	3.39	14.83
var_m3_cs1	-48.62	-76.27	-19.23	11.45
var_m3_cs75	-37.69	-61.82	-1.69	13.99
var_m3_cs5	-31.79	-50.94	8.47	16.37
var_m3_cs25	-28.64	-54.39	8.47	14.53
var_m5_cs1	-69.32	-81.36	-45.71	5.99
var_m5_cs75	-54.45	-76.27	-33.90	9.09
var_m5_cs5	-32.62	-57.63	8.47	14.04
var_m5_cs25	-13.30	-35.42	36.96	16.65
var_mf3_cs1	-49.74	-72.88	-19.23	11.25
var_mf3_cs75	-40.30	-66.10	-1.69	14.42
var_mf3_cs5	-34.47	-56.36	8.47	16.72
var_mf3_cs25	-31.07	-54.39	6.78	15.37
var_mf5_cs1	-65.90	-79.31	-48.57	7.70
var_mf5_cs75	-47.80	-68.09	-3.85	14.20
var_mf5_cs5	-34.30	-55.93	8.47	14.64
var_mf5_cs25	-22.63	-41.86	13.56	15.50
var_gau06_3_cs1	-63.47	-76.27	-42.86	7.07
var_gau06_3_cs75	-51.26	-69.09	-16.95	10.86
var_gau06_3_cs5	-41.57	-63.64	-6.78	13.99
var_gau06_3_cs25	-31.69	-55.17	3.39	14.47
var_gau06_5_cs1	-63.90	-76.27	-42.86	7.02
var_gau06_5_cs75	-51.32	-69.09	-16.95	10.86
var_gau06_5_cs5	-41.58	-63.64	-6.78	14.37
var_gau06_5_cs25	-31.92	-55.17	3.39	14.45
var_gau07_3_cs1	-66.40	-77.97	-42.86	6.63
var_gau07_3_cs75	-53.01	-70.69	-26.92	9.22
var_gau07_3_cs5	-41.49	-65.45	-6.78	13.95
var_gau07_3_cs25	-31.32	-52.63	5.08	14.77
var_gau07_5_cs1	-67.57	-81.36	-48.57	6.42
var_gau07_5_cs75	-54.48	-72.88	-26.92	9.63
var_gau07_5_cs5	-42.40	-62.71	-6.78	14.07
var_gau07_5_cs25	-31.59	-53.45	5.08	14.90
var_gau08_5_cs1	-71.42	-83.05	-55.56	5.41
var_gau08_5_cs75	-57.82	-74.58	-34.29	8.32
var_gau08_5_cs5	-43.00	-63.79	-6.78	13.90
_var_gau08_5_cs25	-31.47	-51.72	3.39	14.17

APÊNDICE C- Tabela com os resultados para as 120 estratégias do algoritmo CM, na quantificação de indivíduos do capítulo 3

(continua)

Estratégia	Er (%)	Mínimo Er (%)	Máximo Er (%)	SEr
lm2_sf_cs1	-46.91	-72.88	-20.00	9.80
lm3_sf_cs1	-57.06	-76.27	-37.14	7.79
lm4_sf_cs1	-61.98	-76.27	-45.71	6.04
lm2_sf_cs75	-31.32	-59.32	-5.71	10.25
lm3_sf_cs75	-38.09	-62.71	-17.14	8.61
lm4_sf_cs75	-47.30	-66.10	-36.17	6.04
lm2_sf_cs5	24.13	-1.69	82.05	17.34
lm3_sf_cs5	-12.59	-28.33	22.86	10.31
lm4_sf_cs5	-47.07	-59.32	-25.71	9.21
lm2_sf_cs25	97.85	46.67	174.36	31.01
lm3_sf_cs25	-4.35	-42.37	62.86	17.21
lm4_sf_cs25	-36.27	-57.63	5.71	11.83
lm2_m3_cs1	-60.02	-74.58	-41.67	7.15
lm3_m3_cs1	-65.78	-79.66	-51.28	6.21
lm4_m3_cs1	-70.10	-81.36	-57.14	5.08
lm2_m3_cs75	-47.41	-69.49	-28.57	8.38
lm3_m3_cs75	-52.16	-71.19	-28.57	7.67
lm4_m3_cs75	-55.27	-71.19	-34.29	7.21
lm2_m3_cs5	-12.00	-37.29	22.86	12.54
lm3_m3_cs5	-26.00	-44.07	2.86	9.70
lm4_m3_cs5	-41.54	-59.32	-17.14	8.01
lm2_m3_cs25	97.90	47.46	171.43	25.64
lm3_m3_cs25	-2.28	-28.81	51.28	15.89
lm4_m3_cs25	-38.02	-53.33	-10.26	10.45
lm2_m5_cs1	-62.34	-81.36	-48.00	7.61
lm3_m5_cs1	-67.26	-84.75	-54.00	6.56
lm4_m5_cs1	-72.82	-88.14	-59.26	5.60
lm2_m5_cs75	-49.10	-69.49	-33.33	8.17
lm3_m5_cs75	-57.66	-74.58	-42.59	7.11
lm4_m5_cs75	-62.89	-76.27	-48.57	5.71
lm2_m5_cs5	-23.90	-45.76	0.00	9.57
lm3_m5_cs5	-40.78	-61.02	-26.09	7.32
lm4_m5_cs5	-52.97	-65.52	-31.43	7.42
lm2_m5_cs25	46.14	8.47	130.77	23.95
lm3_m5_cs25	-1.65	-17.24	37.14	11.80
lm4_m5_cs25	-31.43	-47.46	11.43	11.39
lm2_mf3_cs1	-59.05	-74.14	-31.43	9.48
lm3_mf3_cs1	-66.24	-77.97	-45.71	6.77
lm4_mf3_cs1	-69.74	-78.18	-48.57	5.62
lm2_mf3_cs75	-44.92	-66.10	-23.40	9.20
lm3_mf3_cs75	-48.87	-69.49	-31.91	7.96

APÊNDICE C- Tabela com os resultados para as 120 estratégias do algoritmo CM, na quantificação de indivíduos do capítulo 3

(continuação)

Estratégia	Er (%)	Mínimo Er (%)	Máximo Er (%)	SEr
Im4_mf3_cs75	-53.87	-69.49	-35.90	7.14
lm2_mf3_cs5	-8.42	-37.29	34.29	12.97
lm3_mf3_cs5	-25.48	-44.07	-2.86	8.98
lm4_mf3_cs5	-44.18	-58.62	-25.64	7.37
lm2_mf3_cs25	85.82	35.59	208.57	32.05
lm3_mf3_cs25	-3.22	-23.73	60.00	15.03
lm4_mf3_cs25	-36.40	-55.93	0.00	11.04
lm2_mf5_cs1	-63.06	-75.47	-50.00	7.09
lm3_mf5_cs1	-68.31	-79.66	-56.41	5.91
lm4_mf5_cs1	-74.91	-83.05	-63.04	4.69
lm2_mf5_cs75	-40.72	-62.96	-17.39	12.67
lm3_mf5_cs75	-47.59	-72.22	-26.09	11.92
lm4_mf5_cs75	-54.88	-75.93	-36.96	9.74
lm2_mf5_cs5	-22.52	-46.03	11.43	13.46
lm3_mf5_cs5	-41.05	-55.56	-14.29	8.42
lm4_mf5_cs5	-52.90	-64.91	-37.14	7.02
lm2_mf5_cs25	47.30	6.78	122.86	25.91
lm3_mf5_cs25	-6.84	-31.58	40.00	15.40
lm4_mf5_cs25	-36.50	-57.14	0.00	11.28
lm2_gau06_3_cs1	-57.92	-72.88	-38.00	7.40
lm3_gau06_3_cs1	-64.39	-74.58	-52.17	5.61
lm4_gau06_3_cs1	-67.36	-76.92	-57.14	5.00
lm2_gau06_3_cs75	-42.46	-62.71	-28.57	8.33
lm3_gau06_3_cs75	-46.17	-64.41	-31.48	7.68
lm4_gau06_3_cs75	-50.77	-66.10	-31.91	7.24
lm2_gau06_3_cs5	0.75	-23.73	54.29	14.58
lm3_gau06_3_cs5	-20.01	-38.98	5.71	9.28
lm4_gau06_3_cs5	-46.82	-65.52	-23.08	9.53
lm2_gau06_3_cs25	94.17	42.37	179.49	28.70
lm3_gau06_3_cs25	-6.49	-30.51	48.57	15.61
lm4_gau06_3_cs25	-38.37	-56.90	2.86	10.75
lm2_gau06_5_cs1	-58.06	-72.88	-38.00	7.41
lm3_gau06_5_cs1	-64.47	-74.58	-52.17	5.67
lm4_gau06_5_cs1	-67.48	-76.92	-57.14	5.05
lm2_gau06_5_cs75	-42.50	-62.71	-28.57	8.41
lm3_gau06_5_cs75	-46.31	-64.41	-31.48	7.67
lm4_gau06_5_cs75	-51.08	-66.10	-34.04	7.11
lm2_gau06_5_cs5	0.53	-23.73	54.29	14.56
lm3_gau06_5_cs5	-20.28	-40.68	5.71	9.55
lm4_gau06_5_cs5	-47.02	-65.52	-23.08	9.66
lm2_gau06_5_cs25	93.96	42.37	174.36	28.10

APÊNDICE C- Tabela com os resultados para as 120 estratégias do algoritmo CM, na quantificação de indivíduos do capítulo 3

(conclusão)

	- (0()		147 · F (0/)	
Estratégia	Er (%)	Mínimo Er (%)	Máximo Er (%)	SEr
lm3_gau06_5_cs25	-6.48	-28.81	45.71	15.22
lm4_gau06_5_cs25	-38.43	-56.90	2.86	10.74
lm2_gau07_3_cs1	-59.85	-72.88	-42.00	7.05
lm3_gau07_3_cs1	-65.97	-76.27	-51.28	5.57
lm4_gau07_3_cs1	-68.60	-77.97	-54.29	5.55
lm2_gau07_3_cs75	-44.98	-66.10	-30.51	7.46
lm3_gau07_3_cs75	-48.20	-66.10	-34.04	7.16
lm4_gau07_3_cs75	-52.57	-66.10	-34.29	7.01
lm2_gau07_3_cs5	-4.56	-30.51	42.86	12.73
lm3_gau07_3_cs5	-22.23	-45.76	-5.71	8.66
lm4_gau07_3_cs5	-45.64	-61.02	-20.51	9.34
lm2_gau07_3_cs25	94.45	38.98	185.71	28.76
lm3_gau07_3_cs25	-7.47	-33.33	45.71	14.37
lm4_gau07_3_cs25	-38.26	-52.54	5.71	10.48
lm2_gau07_5_cs1	-60.73	-72.88	-47.83	6.65
lm3_gau07_5_cs1	-66.42	-76.27	-53.85	5.47
lm4_gau07_5_cs1	-69.21	-77.97	-57.14	5.33
lm2_gau07_5_cs75	-45.07	-66.10	-30.51	7.56
lm3_gau07_5_cs75	-48.71	-66.10	-34.04	7.08
lm4_gau07_5_cs75	-53.12	-66.10	-36.17	6.87
lm2_gau07_5_cs5	-5.51	-28.81	37.14	12.20
lm3_gau07_5_cs5	-22.71	-47.46	-4.35	9.00
lm4_gau07_5_cs5	-45.38	-61.02	-20.51	9.31
lm2_gau07_5_cs25	92.85	38.98	191.43	28.57
lm3_gau07_5_cs25	-6.65	-33.33	42.86	14.57
lm4_gau07_5_cs25	-38.00	-54.24	2.86	10.41
lm2_gau08_5_cs1	-62.82	-76.27	-45.71	6.91
lm3_gau08_5_cs1	-68.14	-79.66	-54.29	5.64
lm4_gau08_5_cs1	-70.44	-81.36	-58.14	5.38
lm2_gau08_5_cs75	-48.54	-69.49	-34.04	7.43
lm3_gau08_5_cs75	-51.53	-69.49	-36.17	6.95
lm4_gau08_5_cs75	-55.22	-69.49	-40.00	6.84
lm2_gau08_5_cs5	-10.02	-30.51	20.00	11.19
lm3_gau08_5_cs5	-25.23	-47.46	-5.71	9.28
lm4_gau08_5_cs5	-44.75	-62.71	-25.71	7.98
lm2_gau08_5_cs25	91.33	32.20	180.00	27.69
lm3_gau08_5_cs25	-5.18	-33.33	37.14	14.10
lm4_gau08_5_cs25	-38.38	-50.91	-8.57	9.75