

BRUNO FERRAZ MARTINS

**USO DA TECNOLOGIA LIDAR PARA CLASSIFICAÇÃO
DA CAPACIDADE PRODUTIVA DE POVOAMENTOS DE
EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015

T

M379u
2015
Martins, Bruno Ferraz, 1989-
 Uso da tecnologia LiDAR para classificação da capacidade
 produtiva de povoamento de eucalipto / Bruno Ferraz Martins. –
 Viçosa, MG, 2015.
 v, 24f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Carlos Antônio Álvares Soares Ribeiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.19-24.

1. Florestas - Medição. 2. Levantamentos florestais.
3. Florestas - Sensoriamento remoto. 4. Florestas -
Administração. 5. Radar ótico. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 634.5246

BRUNO FERRAZ MARTINS

**USO DA TECNOLOGIA LIDAR PARA CLASSIFICAÇÃO
DA CAPACIDADE PRODUTIVA DE POVOAMENTOS DE
EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de Magister Scientiae.

APROVADA: 17 de novembro de 2015.

Helio Garcia Leite
(Coorientador)

Sady Júnior Martins Costa de Menezes

Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro
(Orientador)

AGRADEDIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro, pelo incentivo, ensinamento e confiança depositada em mim.

Ao Professor Helio Garcia Leite, sempre tão disposto em ajudar, desde o meu primeiro estágio, ainda na graduação.

Ao Antonilmar Araújo Lopes da Silva e à CENIBRA pela confiança em mim para condução de seus dados.

Aos meus amigos de Viçosa que me ajudaram, tanto direta quanto indiretamente, nessa conquista. Em especial à Eliane.

À minha namorada Athayse, pela força, carinho e paciência que teve comigo durante o processo.

Aos meus pais, Leacir e Regina, pelo amor incondicional, apoio e ensinamentos em todas as etapas da minha vida.

A Deus.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
INTRODUÇÃO	1
OBJETIVOS	2
REVISÃO DE LITERATURA	3
Classificação da Capacidade Produtiva	3
Sensoriamento Remoto Aplicado à Ciência Florestal	3
Uso do Sensor LiDAR	4
Delineamento e detecção de indivíduos.....	7
METODOLOGIA	9
Área de Estudo	9
Inventário Florestal	9
Dados LiDAR	10
Modelos Digitais do Terreno, Superfície e da Altura da Vegetação	10
Detecção das árvores e extração da altura.....	11
Classificação das árvores em dominantes.....	11
Método da curva-guia e classificação dos talhões	12
Comparação entre as curvas	13
Mapeamento da Capacidade Produtiva.....	13
RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
CONCLUSÕES	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

RESUMO

MARTINS, Bruno Ferraz, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2015. **Uso da tecnologia LiDAR para classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto.** Orientador: Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro. Coorientador: Helio Garcia Leite.

A classificação da capacidade produtiva de sítio é um importante auxílio ao manejador de florestas na tomada de decisão e planejamentos de curto, médio e longo prazos. A principal forma de classificação é através da construção de curvas-guia, que se baseia na correlação entre altura dominante média e a idade de um povoamento florestal. A principal fonte de dados para obtenção das curvas é o inventário florestal contínuo. O inventário é uma atividade que demanda muito tempo e custo para realização. Com isso, diversas técnicas de sensoriamento remoto são empregadas a fim de se obter as medições das estruturas das florestas de forma mais rápida e econômica. O sensor remoto com grande potencial para medições de altura a nível de árvore é o LiDAR. Nesse estudo, objetivou-se a medição de alturas de árvores dominantes em um povoamento de eucalipto com diversas idades por um único levantamento LiDAR, de forma a gerar uma curva-guia para classificação do sítio e compará-la com uma curva gerada costumeiramente a partir do inventário contínuo. Os resultados obtidos demonstram que um único levantamento não é o suficiente para construção de uma curva semelhante à gerada pelo IFC, porém, é possível a criação de mapas de classes de qualidade de local com boa precisão.

ABSTRACT

MARTINS, Bruno Ferraz, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2015. **Use of LiDAR technology for classification of productive capacity of eucalyptus stands.** Adviser: Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro. Co-adviser: Helio Garcia Leite.

The site production capacity classification is an important aid to forest wielder in decision making for short, medium and long term planning. The main way of classification is by building guide-curves, based on the correlation between average dominant height and age of a forest stand. The main data source for obtaining the curves is the continuous forest inventory. The inventory is an activity that requires time and effort to be performed. Thus, various remote sensing techniques are employed to obtain the measurements of structures of forests more quickly and economically. The remote sensor with great potential for height measurements at tree level is the LiDAR. This study aimed to measure dominant tree heights in a eucalyptus stand with different ages for a single LiDAR survey in order to generate a guide-curve for the site classification and compare it with a curve generated customarily from continuous inventory. The results demonstrate that a single survey is not enough to build a similar curve to that generated by the IFC, however, the creation of local quality classes maps with good precision is possible.

INTRODUÇÃO

O Brasil tem cerca de 54,4% do seu território com cobertura florestal, sendo, 456 milhões de hectares de florestas naturais e 308 milhões correspondem à área de florestas públicas. Entretanto, a maior parte da produção madeireira vem de florestas equiâneas, cuja área, em 2014, era de 7,74 milhões de hectares (IBÁ, 2015). O gênero mais cultivado foi o *Eucalyptus*, representando cerca de 72% da área total. Naquele ano, a indústria brasileira consumiu 190,03 milhões de metros cúbicos de madeira in natura provenientes de florestas plantadas. O setor respondeu por 1,1% do PIB brasileiro, gerou uma arrecadação de tributos na ordem de R\$ 10,23 bilhões e empregou diretamente cerca de 610 mil pessoas (IBÁ, 2015).

No Brasil, as principais indústrias do setor de base florestal são as de celulose, de painéis de madeira, de processamento mecânico, de produtos de maior valor agregado e as indústrias produtoras de carvão vegetal e lenha (MACHADO, 2014). Para se manterem competitivas nesse segmento, as empresas precisam do maior número de informações acerca de suas terras e base florestal, a fim de garantirem o melhor manejo possível, visando ganhos econômicos, ambientais e sociais. Assim, é essencial que o manejador entenda como o ecossistema florestal responde às diversas variáveis ambientais e, com essa informação, tentar prever o comportamento de uma floresta.

Devido ao ciclo longo das rotações florestais (cerca de sete anos para cultivos de eucalipto no Brasil, por exemplo), as empresas desse setor executam planejamentos de curto, médio e longo prazos baseando-se em informações de crescimento e produção das florestas. Campos e Leite (2013) afirmaram que o crescimento e a produção variam com a idade e com a capacidade produtiva do local, que é definida como o potencial de produção da espécie em um determinado lugar. O comportamento de um povoamento está intimamente relacionado com os atributos do local onde ele está inserido. Classificar a capacidade produtiva desse lugar é essencial para tomadas de decisão no manejo, uma vez que a produção florestal deve refletir as qualidades do mesmo.

A abordagem para classificação da capacidade produtiva mais utilizada é a criação de curvas de índice de local, por meio da relação entre altura dominante e idade de um povoamento. Este método é vantajoso e prático, uma vez que o crescimento em altura reflete todos os fatores ambientais pertinentes (TONINI ET AL., 2002). Campos e Leite (2013) citam três fontes de dados de altura dominante e idade que podem ser usados na

construção dessas curvas: parcelas temporárias, parcelas permanentes ou análise completa do tronco. Eles ressaltam que a primeira fonte só deve ser usada quando todos índices de local estiverem representados em todas as classes de idade do povoamento. Clutter (1983) também menciona a importância dessa representação.

A principal fonte de dados quantitativos e qualitativos acerca de um povoamento é o inventário florestal contínuo (IFC), que se baseia na instalação de parcelas permanentes, que são medidas sistematicamente, em intervalos de tempo pré-definidos. Os dados obtidos das medições periódicas, tais como diâmetro a 1,3 m de altura e altura total são analisados para monitorar o crescimento e a mortalidade do povoamento, em busca de tendências (SHARPE, ET AL., 2003).

Para modelagem de crescimento e produção, os diâmetros de todas as árvores de uma parcela de inventário são medidos enquanto que a altura é obtida para apenas alguns indivíduos. Isso se dá, pois, a medição do primeiro é fácil, rápida e de custo relativamente baixo, enquanto que a medição da altura é demorada e de menor exatidão, impactando diretamente os custos do inventário (BINOTI ET AL., 2013).

A fim de reduzir a participação do inventário nos custos do processo florestal, tem-se estudado técnicas diversas de sensoriamento remoto para obtenção das características tradicionalmente obtidas pelo inventário florestal. Nesse cenário, o uso da tecnologia Light Detection and Ranging (LiDAR) no setor florestal tem sido investigado desde meados de 1985. Sua principal aplicabilidade está na possibilidade da detecção de cada árvore, bem como a obtenção da altura da mesma, através da geração de uma nuvem de pontos tridimensionais e georreferenciados (KWAK ET AL., 2006; HOLMGREN ET AL., 2003).

OBJETIVOS

Diante do exposto, esse estudo teve como objetivo a criação de curvas de índices de local para um conjunto de povoamentos de eucalipto com diferentes idades, utilizando dados de altura dominante de cada talhão, obtidos de um levantamento pelo LiDAR, e comparação com curvas construídas empregando dados de parcelas permanentes de inventários contínuos feitos nos povoamentos em anos anteriores. A hipótese formulada e avaliada foi a que a classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando alturas dominantes em nível de talhão, obtidas com um único levantamento a laser, contemplando diferentes idades, é ineficiente.

REVISÃO DE LITERATURA

Classificação da Capacidade Produtiva

A comunidade científica desenvolveu diversos métodos para realização da classificação da capacidade produtiva. Jones (1969), em seu resumo, separou-os em três categorias: o método das curvas de índice de local, o método da vegetação indicadora e o método de indicação por fatores ambientais.

A classificação pelos índices de local é a forma mais disseminada. Campos e Leite (2013) afirmam que a vantagem do método é o seu resultado quantitativo. Mas citam a desvantagem de o método não ser aplicável em situações onde não se sabe a idade do povoamento ou quando não existirem árvores da espécie a ser cultivada.

O método consiste na construção de curvas cujas equações expressam as relações entre altura dominante média (variável dependente) e a idade (variável independente). A capacidade do sítio é quantificada sendo o valor da altura dominante média do povoamento em uma idade índice pré-determinada, normalmente, próxima à idade de corte. A produtividade pode ser assim classificada pois a altura da árvore tem alta relação com sua produção em volume (CAMPOS E LEITE, 2013).

Existem cinco métodos principais para construção das curvas de índice de local. Dias et al. (2005) compararam três métodos diferentes usados na construção de curvas de índice de local para povoamentos de eucalipto desbastados: o método da curva-guia, da equação das diferenças e da predição de parâmetros. Eles concluíram que o método da curva-guia é o mais adequado para tal. Além disso, conforme Campos e Leite (2013), cabe citar o método dos índices de local preliminar e o de Hammer.

O método da curva-guia consiste na seleção de um modelo de regressão, normalmente um exponencial ou sigmoidal, que expresse a relação entre a altura dominante e idade. O ajuste do modelo resulta em uma curva média dos índices de local que exhibe o crescimento ao longo do tempo. Essa curva média é chamada de curva-guia e, a partir dela, uma equação de índices de local pode ser obtida ao considerar-se que, quando a idade de um povoamento atingir uma idade-índice, o índice de sítio será igual à altura dominante (CAMPOS E LEITE, 2013).

Sensoriamento Remoto Aplicado à Ciência Florestal

A fim de diminuir os erros associados ao inventário, bem como o tempo e custo das medições de campo, o sensoriamento remoto vem sendo estudado e aplicado nas atividades florestais, sendo o imageamento óptico a técnica pioneira (BOYD E DANSON, 2005). O imageamento provê informações acerca de extensas áreas com uma cobertura espacial contínua. Com o avanço da tecnologia nos anos recentes trazendo melhorias significativas na resolução espacial e espectral dos sensores, informações mais detalhadas acerca da floresta podem ser obtidas (WULDER, 1998).

As informações espectrais, espaciais e de textura das imagens adquiridas de sensores passivos são os principais componentes usados na caracterização da floresta (WULDER, 1998). Contudo, esses atributos são facilmente relacionados apenas com as estruturas horizontais da floresta, sendo insensíveis às medições das estruturas verticais (GOETZ ET AL., 2009).

Ozdemir (2008) e Song e Dickinson (2008) utilizaram imageamento para cálculo da cobertura das copas; Wulder et al. (2000) utilizaram imagens de alta resolução para calcular área basal; Read et al. (2003) e Clark et al. (2004) correlacionaram as dimensões de copas em florestas tropicais obtidas a partir de imagens de satélite com diâmetro do tronco; e McAllister e Valeo (2007) estimaram índices de área foliar a partir das imagens.

Atributos que requerem uma caracterização vertical da floresta, como altura, volume e biomassa são normalmente inferidos a partir das estruturas horizontais (TESFAMICHAEL ET AL., 2010). Ozdemir (2008) e Chubey et al. (2006) obtiveram baixa correlação entre altura da vegetação e atributos oriundos de imagens.

Outra limitação do uso de sensores passivos é a impossibilidade da obtenção das imagens da superfície na presença de nuvens, que pode ser constante em algumas regiões (OLIVEIRA ET AL., 2014). Uma solução para essas limitações é o uso de sensores ativos, como o RADAR e o LiDAR, que podem fazer o levantamento na presença de nuvens e à noite, além de conseguirem dados do estrato sub-arbóreo da área de interesse (JENSEN, 2009).

Uso do Sensor LiDAR

A capacidade do sensor LiDAR em obter características tridimensionais dos objetos analisados o permite calcular tanto estruturas horizontais como verticais da floresta, como

altura, topografia abaixo do dossel das árvores e distribuição (HOLMGREN ET AL, 2003).

O sensor normalmente é acoplado à uma aeronave que sobrevoa a região de interesse. O levantamento consiste na emissão de lasers de luz no infravermelho próximo, na região de 1040 a 1060 nm (JENSEN, 2009). Os pulsos emitidos são então refletidos pela superfície e tem seus sinais capturados pelo sensor. Sabendo-se a velocidade da luz e o tempo entre a emissão do pulso e captura do seu sinal, a distância entre o sensor e o objeto “iluminado” pode ser calculada e, conseqüentemente, sua altitude. Para isso, o sistema utiliza quatro tecnologias principais: o scanner, propriamente dito; o sistema de posicionamento global (GPS) diferencial; as unidades de medição inercial (inertial measurement units – IMUs); e um computador para armazenar os dados dos três primeiros elementos (KUMAR, 2012).

O pulso emitido pode ser totalmente ou parcialmente refletido ao interagir com o objeto, gerando, na segunda situação, mais de um retorno. Os sistemas usuais conseguem captar até cinco retornos por sinal. Esses retornos formam uma nuvem de pontos massiva com valores das coordenadas XYZ de cada ponto com altíssima acurácia, sendo XY a posição do ponto no sistema de coordenadas cartesianas e Z o valor da elevação do mesmo (GÖRGENS, 2014).

Ao imagear uma área florestada pelo LiDAR, o pulso é parcialmente refletido pelo topo das árvores; o restante do sinal continua a penetração do dossel, sendo refletido ao interagir com galhos e folhas até ser totalmente refletido ao interagir com o solo. Contudo, em áreas com florestas muito densas, o sinal pode ser totalmente refletido antes de atingir o solo, pois interage com os troncos das árvores.

Na aplicação florestal, os pontos classificados como primeiros retornos (que atingiram os topos das árvores) são usados na construção de um Modelo Digital da Superfície (MDS), enquanto que aqueles classificados como últimos retornos (que atingiram o solo) são usados na construção de um Modelo Digital do Terreno (MDT). A construção desses modelos se dá pela interpolação dos valores XYZ dos pontos pertinentes em uma imagem (grade ou raster) cujos pixels possuem o valor da elevação dos pontos. Ao subtrair o valor da altitude de um pixel no DTM do valor da altitude do pixel correspondente no DSM, tem-se o Modelo Digital da Altura da Vegetação (MDAV).

A Figura 01 representa um perfil com a nuvem de pontos de obtida de uma parte da área de estudo e a Figura 02, o MDAV da região onde o perfil foi retirado.

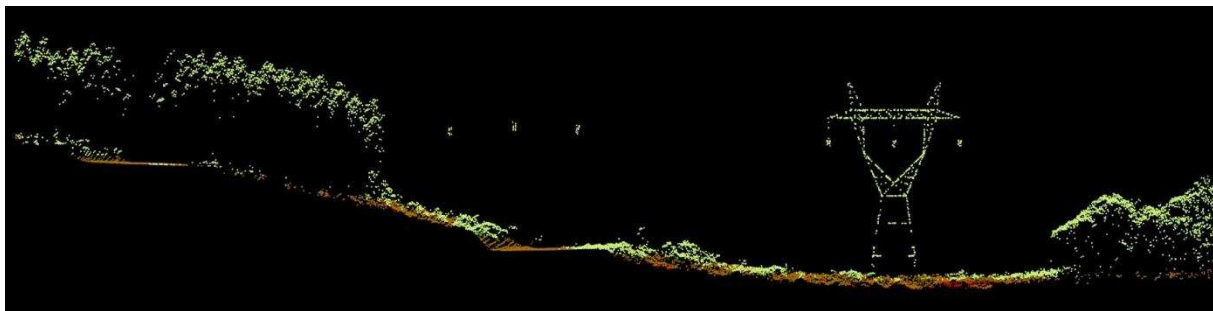


Figura 1 - Perfil com a nuvem de pontos obtidas pelo LiDAR

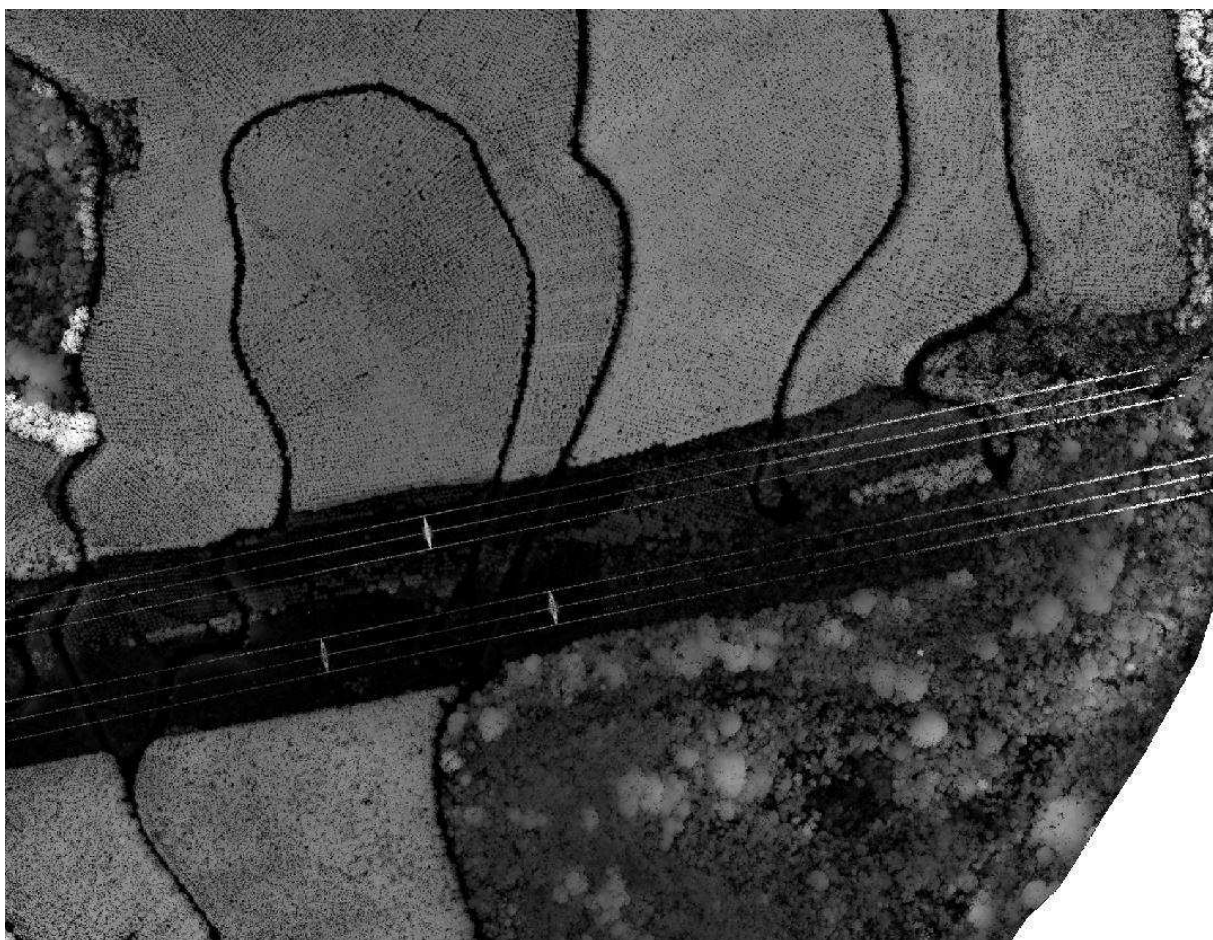


Figura 2 - Modelo Digital da Altura da Vegetação

Dessa forma, a densidade de pontos usada no imageamento por LiDAR afeta diretamente a qualidade das informações a serem obtidas. Uma densidade baixa pode provocar uma subestimação da altura da árvore, seja pelo pulso não ter atingido o solo, seja

por não interceptar o verdadeiro ápice da árvore (ST-ONGE ET AL., 2003; TESFAMICHAEL ET AL., 2010;). Vauhkonen e colaboradores (2008) apresentam uma referência da densidade de pontos a ser utilizada para cada tipo de atividade: 0,5 a 1 retorno por metro quadrado para modelagem de terreno; 5 a 6 retornos/m² para atividades florestais; 11 a 12 retornos/m² para informações em nível de árvore-única; e mais de 20 retornos/m² para aplicações arqueológicas.

Outro fator que afeta os estudos com o LiDAR é a resolução espacial da imagem. Quando um pulso se propaga no espaço, ele sofre uma divergência (ou dispersão) que aumenta com a distância do sensor ao objeto, resultando na área de visada instantânea do laser. A área da projeção do pulso sobre o objeto é chamada footprint e corresponde à resolução espacial da imagem. Levantamentos de baixa resolução (footprint grande) podem ser usados na estimação de parâmetros através de uma abordagem que considera as médias de um talhão ou bloco da floresta (LEFSKY ET AL., 1999; MALTAMO ET AL., 2006; NÆSSET, 1997). Porém, para análises mais detalhadas e seguras, com informações em nível de árvore, levantamentos com uma footprint pequena devem ser conduzidos (KOCH ET AL., 2006).

A literatura científica apresenta diversos estudos consolidando o uso do LiDAR para atividades florestais no hemisfério norte. Holmgren et al (2003) estimaram altura de árvores e volume da haste em parcelas de uma floresta temperada. Andersen et al. (2005) usaram dados do laser para estimar parâmetros das copas das árvores que pudessem ser usados na criação de um modelo de previsão do comportamento do fogo em uma floresta nos Estados Unidos. Zawila-Niedzwiecki et al. (2008) obtiveram alta correlação de dados do LiDAR com dados de inventário florestal em florestas na Polônia. Jensen et al. (2008) predisseram índices de área foliar em duas florestas de coníferas usando LiDAR. Outros estudos podem ser encontrados em Popescu e Wynne (2004), Hudak et al. (2006) e McCombs et al. (2003).

No Brasil, deve-se destacar os trabalhos de Pires (2005), que utilizou dados do laser para estimar altura de árvores em povoamentos de eucalipto; Görgens (2014), que analisou a aplicação da tecnologia para quantificação e qualificação da vegetação em diversas situações; Oliveira (2011) e Zandoná (2006), que avaliaram o uso do LiDAR no inventário de florestas implantadas de *Eucalyptus* e *Pinus*, respectivamente; além dos trabalhos de Zonete (2009) e Macedo (2009).

Delineamento e detecção de indivíduos

A obtenção de informações em nível de árvore a partir de sensoriamento remoto se dá pela detecção e delineamento dos indivíduos, seja pelo uso de fotografias aéreas, imagens de satélite ou LiDAR. Para tal, as copas das árvores devem ser passíveis de serem distinguidas na imagem (KWAK ET AL. 2007). Assim, o tamanho do pixel da imagem deve ser menor que a área de uma copa, de forma que o brilho do pixel do ápice da copa seja maior do que os pixels da borda da copa (WULDER ET AL. 2003). Os autores também afirmam que nem sempre essa diferença de brilho é detectável devido a fatores como o tempo de aquisição da imagem, bem como as propriedades espectrais e de textura que a copa apresenta. Como os valores do pixel de um MDAV representam a altura e não a refletância, esses problemas são contornados no emprego do LiDAR. Contudo, outro problema surge dificultando a detecção dos indivíduos. O alto detalhamento proveniente do LiDAR fornece um MDAV com uma grande variação de valores de altura, inclusive na mesma copa (CHEN ET AL. 2006).

Dessa forma, técnicas de detecção usadas em imagens de satélite ainda são usadas na detecção dos indivíduos no MDAV, ou foram adaptadas para tal uso.

A técnica mais utilizada é o filtro de Local Maxima (LM). Ela consiste na passagem de uma janela de busca que identifica qual pixel apresenta o maior valor entre os demais pixels presentes dentro da janela (DRALLE E RUDEMO, 1997). Portanto, o tamanho da janela adotada influencia diretamente o resultado da análise, uma vez que os pixels de mais de uma árvore poderão ser averiguados dentro da janela. Em análises de florestas implantadas, onde os indivíduos são plantados em linha, seguindo um espaçamento fixo, a distância do espaçamento pode ser usada para determinar o tamanho da janela de busca. No entanto, em plantios em áreas montanhosas, a inclinação do terreno afeta o espaçamento no momento da implantação da muda. Além disso, como o sentido do alinhamento é feito morro acima para facilitar a colheita, o mesmo sofre modificações na direção, de forma a acompanhar o desenho do terreno. Como a passagem da janela segue sempre o mesmo sentido, o espaçamento entre árvores nem sempre pode ser adotado na definição do seu tamanho.

Popescu e Wynne (2004) analisaram a detecção pelo LM usando tamanhos de janelas flexíveis de acordo com a relação entre altura da árvore e tamanho da copa. O

estudo indicou um bom resultado na identificação de coníferas e um resultado ruim para folhosas.

Tesfamichael et al (2009) estudaram o uso do espaçamento do plantio e uma análise de semi-variograma como formas de definição do tamanho da janela de busca do LM para diferentes densidades de pontos do LiDAR em plantios de eucalipto na África do Sul. O espaçamento entre árvores apresentou melhores resultados em todas densidades, com uma porcentagem de acerto variando de 74 a 82% comparado às medições de campo.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A área de estudo abrangeu 8.690 ha de plantios comerciais de *Eucalyptus* sp., em espaçamento de 3x3m, destinados à produção de celulose, divididos em 404 talhões. Os talhões estavam localizados em duas microrregiões de Minas Gerais: Guanhães (em sua maioria) e Conceição do Mato Dentro. A altitude média da área varia de 615 a 1.227 m, sendo a média de 865 m acima do nível do mar. O solo predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. O clima é tropical, subúmido seco, com precipitação anual variando de 500 a 1.000 mm em um regime periódico. A temperatura média anual varia de 23 a 27°C.

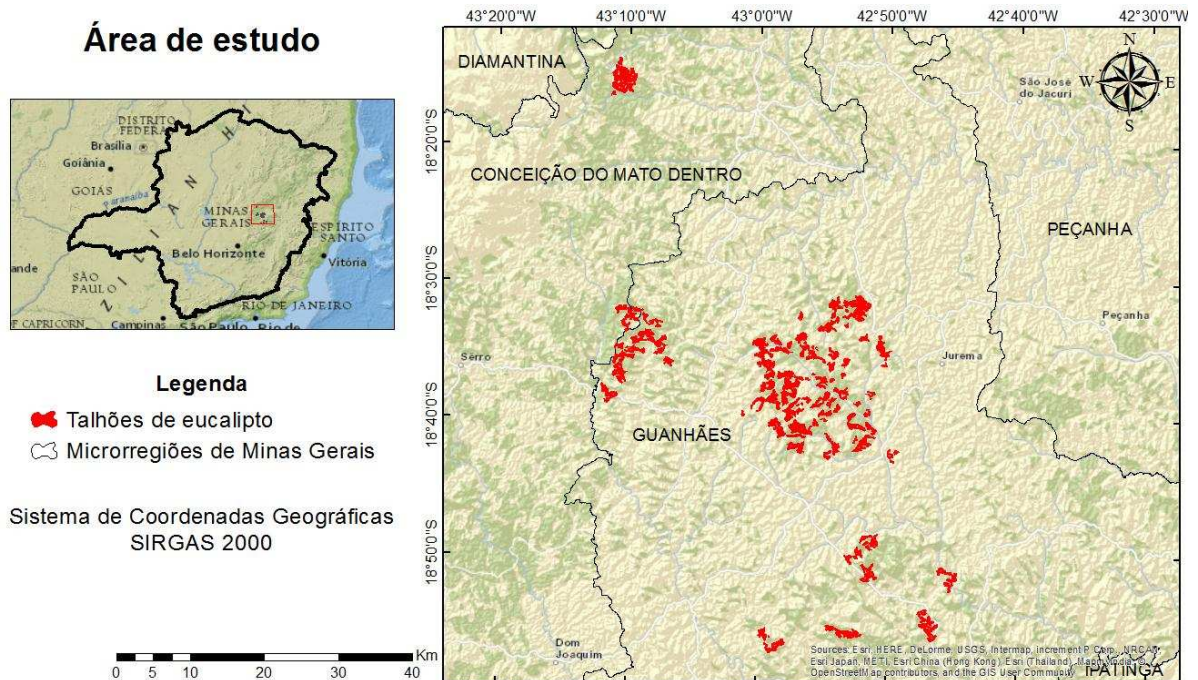


Figura 3- Caracterização da área de estudo

Inventário Florestal

Os dados de altura dominante por parcela medidos no campo foram obtidos do Inventário Florestal Contínuo, de 2006 a 2014, conduzido em parcelas retangulares de 300m², cuja densidade amostral foi de uma parcela a cada 20 hectares. Em cada visita, a altura foi medida para as dez maiores árvores de cada parcela, obtendo-se uma média para cada parcela. O IFC foi realizado em 744 talhões, dentre eles os 404 talhões cobertos pelo LiDAR.

Dados LiDAR

O levantamento com o sensor LiDAR na região foi realizado na última semana de abril e na primeira semana de maio de 2014. O sensor foi acoplado à uma aeronave Cessna Modelo 206. O voo foi realizado a 618 m de altura, a uma velocidade de 198 km/h. O ângulo de abertura foi de 60°, para que uma densidade de cinco pontos por metro quadrado fosse obtida com um diâmetro do feixe (footprint) de 0,31 m (Tabela 1).

Tabela 1 - Especificações da coleta de dados pelo LiDAR

Aeronave	Cessna Modelo 206
Velocidade de Cruzeiro	55 m/s ou 198 km/h
Altura do voo	618 m
Ângulo de Abertura (Field of View – FOV) θ	60°
Largura da Faixa (Swath)	713 m
Footprint	0,31 m
Frequência de Varredura	300 kHz
Densidade de Pontos	5 ppm (pontos por metro quadrado)

Modelos Digitais do Terreno, Superfície e da Altura da Vegetação

Os retornos do laser (pontos da nuvem) foram classificados em terreno e não-terreno e, posteriormente, interpolados para criação dos modelos digitais de terreno e superfície, respectivamente, ambos com resolução espacial de 0,5 m. O modelo digital da altura da vegetação foi criado subtraindo-se os valores dos pixels do MDT dos valores do MDS.

Deteção das árvores e extração da altura

A deteção dos ápices das árvores pelo filtro Local Maxima e obtenção das alturas a partir do MDAV foi realizada no software ArcGIS (ESRI, 2013). O seguinte roteiro foi adaptado de Kumar (2012):

1. Carregou-se a imagem MDAV no ArcGIS;
2. Usou-se a ferramenta Focal Statistics para calcular a média em uma janela de 3x3 pixels, criando o raster MDAV_fs3;
3. Em seguida, comparou-se MDAV com MDAV_fs3 seleccionando todos os pixels em MDAV_fs3 que tiveram seus valores diminuídos e recuperaram-se os valores do MDAV para esses pixels seleccionados. Para isso, usou-se a seguinte linha de comando na ferramenta Raster Calculator: `con(MDAV_fs3<MDAV, MDAV, MDAV_fs3)`;
4. Repetiram-se as etapas 2 e 3 sete vezes, alimentando a etapa 2 com o resultado da etapa 3. Com isso, obteve-se uma imagem suavizada chamada MDAV_s;
5. O passo seguinte foi usar novamente a ferramenta Focal Statistics para calcular, dessa vez, o valor máximo em uma janela de 3x3 pixels na imagem MDAV_s. O raster MDAV_sMX foi criado.
6. Na continuação, criou-se uma nova imagem chamada peaks contendo apenas os pixels que representam os ápices das árvores. Para tal, usou-se a Raster Calculator e a seguinte linha de comando: `setnull(MDAV_sMX<2, setnull(MDAV_sMX!=MDAV_s, MDAV_sMX))`;
7. Os pixels da imagem peaks foram convertidos em feições de pontos pela ferramenta Raster to Point;
8. Com a ferramenta Extract Values to Points, associou-se a cada ponto criado anteriormente, o valor de altura de vegetação do MDAV original referente à sua posição. Com isso, obteve-se uma classe de feições do tipo ponto representando o topo de cada árvore, tendo-se o valor da altura da árvore armazenado em sua tabela de atributos.

Classificação das árvores em dominantes

Para esse estudo, utilizou-se o conceito de Assman (1970) que considera como altura dominante de um povoamento a média das alturas das 100 árvores de maior diâmetro à altura do peito (dap) por hectare nesse povoamento. Portanto, em um talhão

hipotético de 20 hectares, as duas mil árvores de maior dap são contempladas no conceito. Neste estudo, assumindo a existência de correlação significativa entre dap e altura das árvores dominantes, o conceito de Assman (1970) foi modificado para alturas ao invés de dap.

Ainda utilizando o ArcGIS, para cada ponto da classe de feições, identificou-se o código e a área do talhão a que ele pertence. Com isso, ordenaram-se os pontos de cada talhão dos maiores valores de altura para os menores e as maiores árvores, seguindo o conceito modificado de Assman, foram classificadas como dominantes. A média das alturas das árvores dominantes foi então obtida para cada talhão.

Método da curva-guia e classificação dos talhões

Uma curva-guia foi ajustada para cada uma das fontes de altura dominante: IFC, em nível de parcela e LiDAR, em nível de talhão. O modelo de regressão usado foi o logístico e o software usado para seu ajuste foi o CurveExpert (HYAMS, 2005).

$$Hd = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 I}} + \varepsilon$$

Do modelo, obteve-se a seguinte equação:

$$\widehat{Hd} = \frac{\widehat{\beta}_0}{1 + \widehat{\beta}_1 e^{-\widehat{\beta}_2 * I}} \quad (1)$$

sendo Hd, a altura dominante média em metros; I, a idade do povoamento em meses; β_0 , β_1 e β_2 , parâmetros estimados.

A equação de índices de local foi obtida considerando-se que o índice de local (S) será igual à altura dominante (Hd) quando a idade do povoamento (I) atingir uma idade-índice (I_i). Assim, pôde-se escrever:

$$S = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 * I_i}} \quad (2)$$

Isolando β_0 na equação (1) e substituindo na (2), obteve-se:

$$\beta_0 = Hd * (1 + \beta_1 e^{-\beta_2 * I})$$

$$S = \frac{Hd * (1 + \beta_1 e^{-\beta_2 * I})}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 * I_i}} \quad (3)$$

Nesse estudo, foi considerada uma idade-índice de 76 meses. Logo:

$$S = \frac{Hd * (1 + \beta_1 e^{-\beta_2 * I})}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 * 76}} \quad (4)$$

A equação (4) foi usada para quantificar a capacidade produtiva dos talhões, considerando-se cada fonte de dados. Como os dados do IFC estavam em nível de parcela, e com medições em diferentes anos, os talhões tiveram sua capacidade quantificada baseando-se nas idades e medições do último inventário.

Comparação entre as curvas

Para comparação das curvas, aplicou-se o teste F de Graybill (1976).

Mapeamento da Capacidade Produtiva

Para o mapeamento da capacidade produtiva, os valores de S de cada talhão foram agrupados em três classes: I, II e III, onde I representa sítios melhores e III, os piores.

O agrupamento nas três classes seguiu a metodologia proposta por Jenks and Caspall (1971). Nela, o conjunto de dados é dividido em classes, de forma a minimizar a variância dos dados dentro de cada classe e a maximizar a variância entre as classes.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A equação (1) apresentou alto coeficiente de determinação ao ser ajustada para as duas fontes de dados, sendo $R^2 = 0,82$ para o IFC e $R^2 = 0,93$ para o LiDAR. O maior coeficiente para o LiDAR se deu pelo fato dos dados de altura dominante e idade serem em nível de talhão, tendo menor amplitude de altura dominante e cada classe de idade, apresentando menor dispersão em torno da média (Figuras 4 e 5).

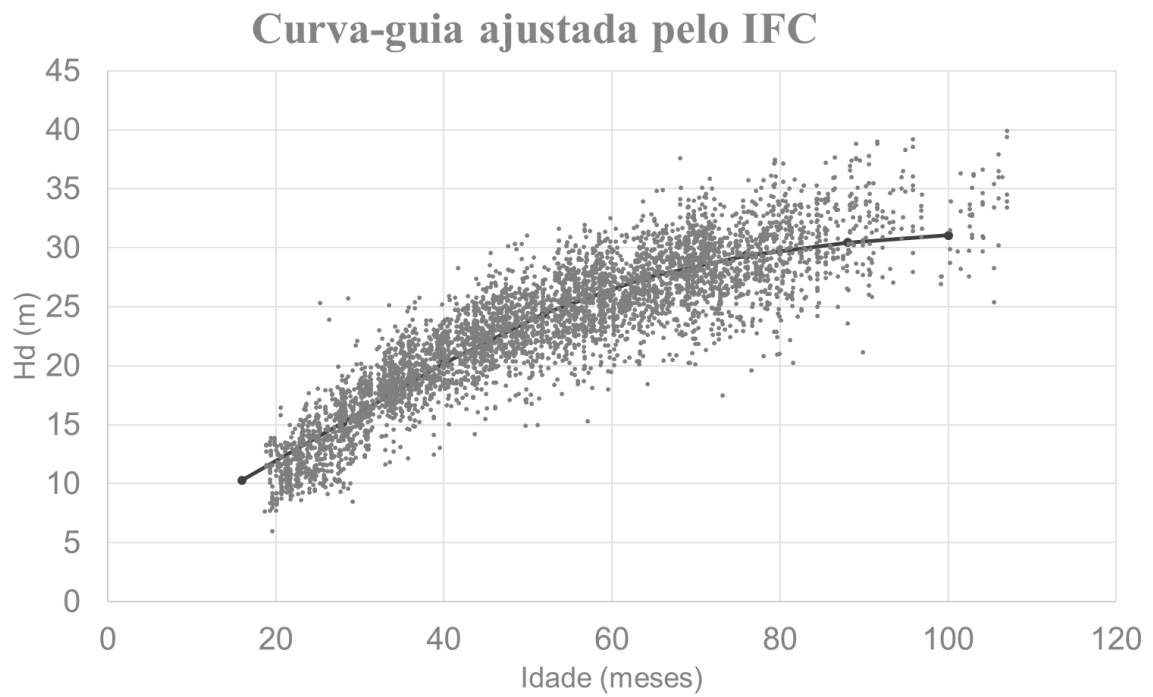


Figura 4 - Ajuste da equação 01 com dados de IFC

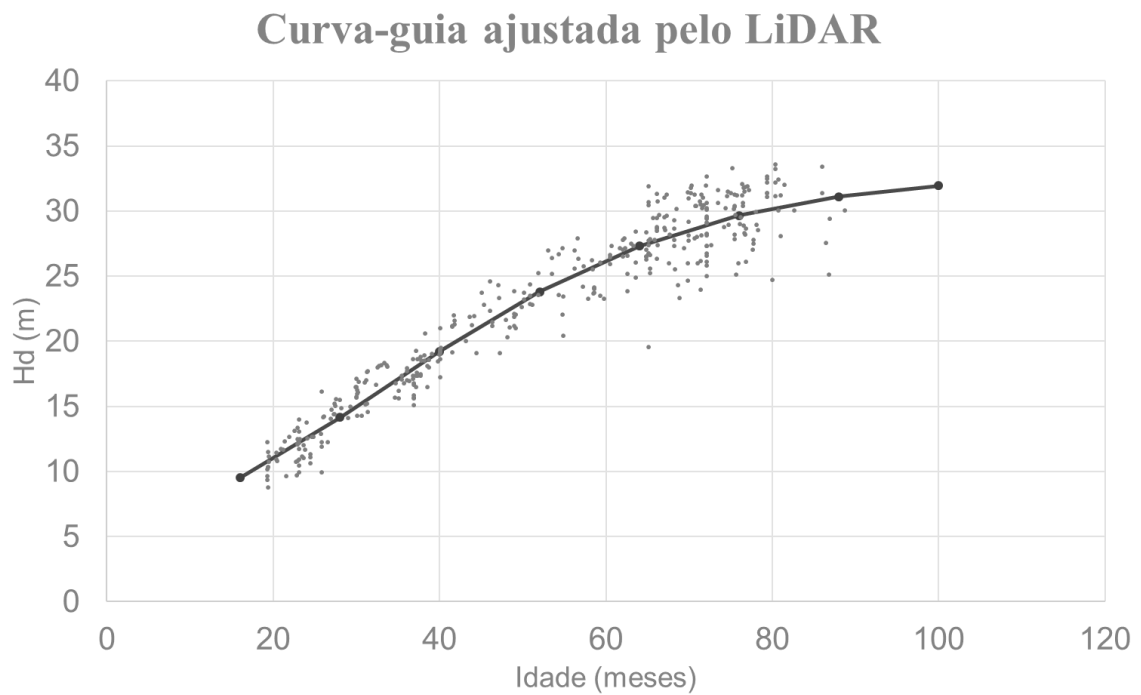


Figura 5 - Ajuste da equação 01 com dados do LiDAR

A equação de índices de local gerada a partir dos dados obtidos com o LiDAR superestima os índices de local em relação à equação gerada pelo IFC (Figura 6). Isso pode

ser devido à diferença no cálculo das dominantes entre as duas coletas. Enquanto que no levantamento a laser é possível fazer o censo de todas as dominantes do talhão, no IFC apenas as maiores árvores da parcela são medidas. Assim, não há garantia de que a árvore considerada como dominante dentro de uma parcela seja também considerada dominante no censo do talhão.

Outro fator que pode explicar essa superestimação é a qualidade da identificação dos indivíduos na classificação do MDAV. O algoritmo utilizado pode superestimar o número de árvores por hectare, de forma que um indivíduo dominante pode ser classificado como sendo dois ou mais indivíduos, afetando a média das alturas dominantes. Diante disso, deve-se conduzir novas pesquisas que definam um algoritmo ótimo para contagem de árvores considerando fatores como espécie, formato da copa, espaçamento do plantio, idade, inclinação do terreno, além de características do sensor e do voo.

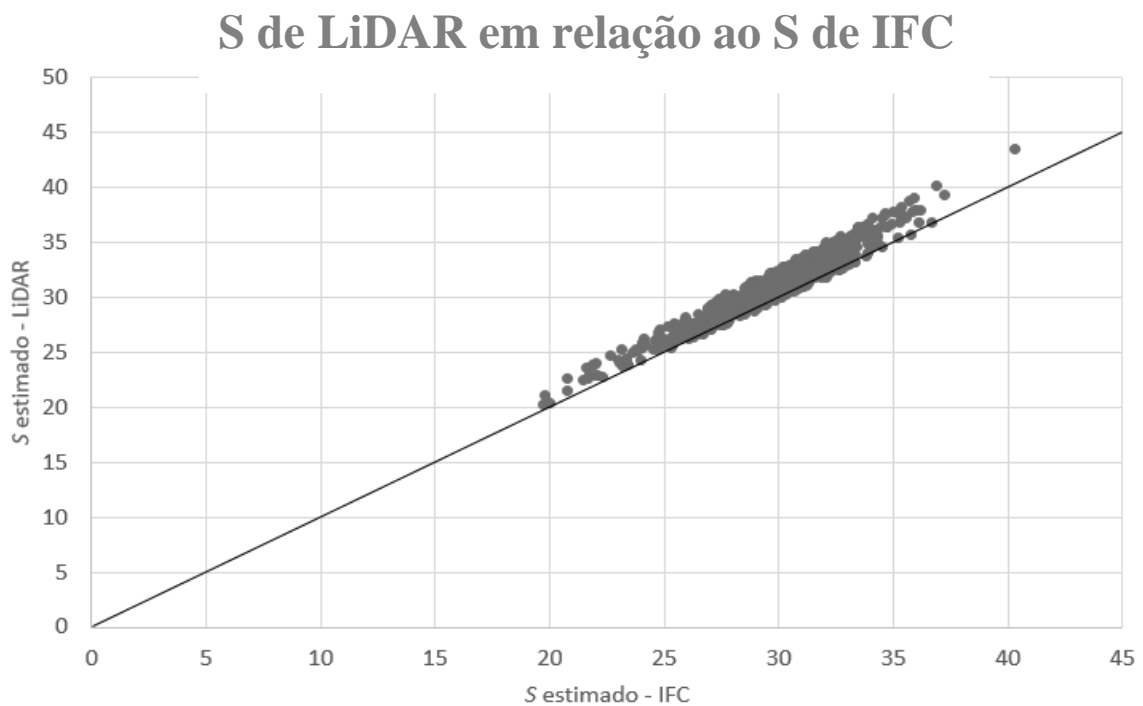


Figura 6 – Tendência de superestimação de S do LiDAR em relação ao IFC

As curvas de índices de local obtidas com parcelas permanentes de IFC e LiDAR foram diferentes teste F de Graybill ($P < 0,05$). Após a idade índice, a curva LiDAR tende a superestimar a altura (Figura 7).

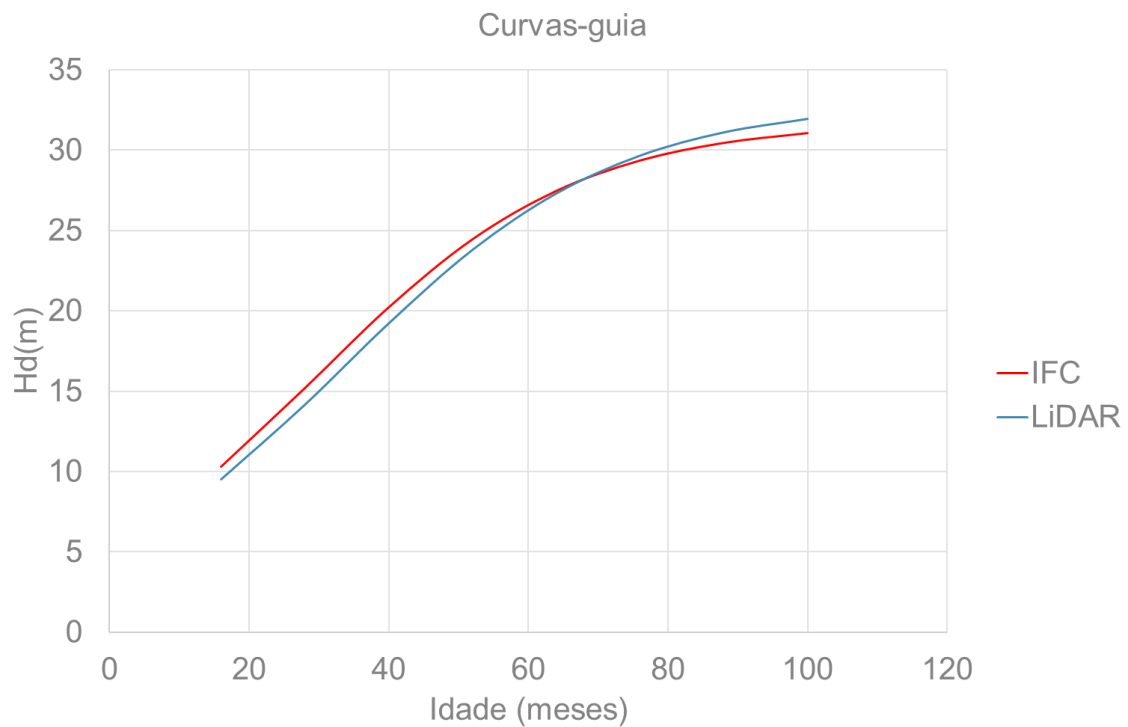
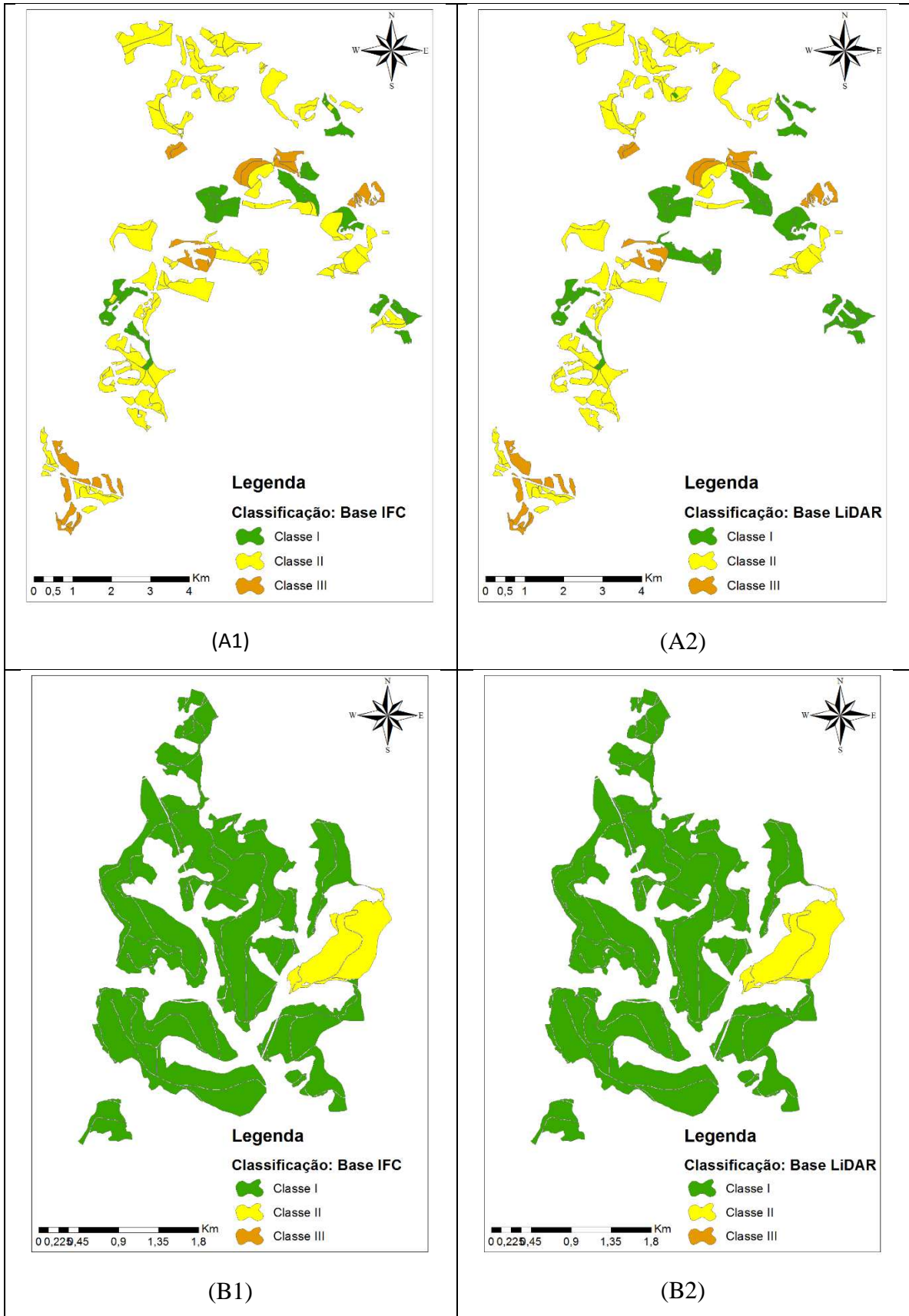


Figura 7 - Curvas-guia

Quanto à divisão dos índices de local em três classes para fins de mapeamento, 87% dos talhões foram classificados igualmente pelos dois métodos. Essa semelhança é considerada aceitável, de forma que o LiDAR pode ser usado na construção de mapas de qualidade de sítio de forma a auxiliar o manejador na estratificação do povoamento florestal. Entretanto, o uso das estimativas de S obtidas pelo LiDAR em modelos de crescimento e produção pode resultar em superestimação da produção e do ano de corte.



Continua...

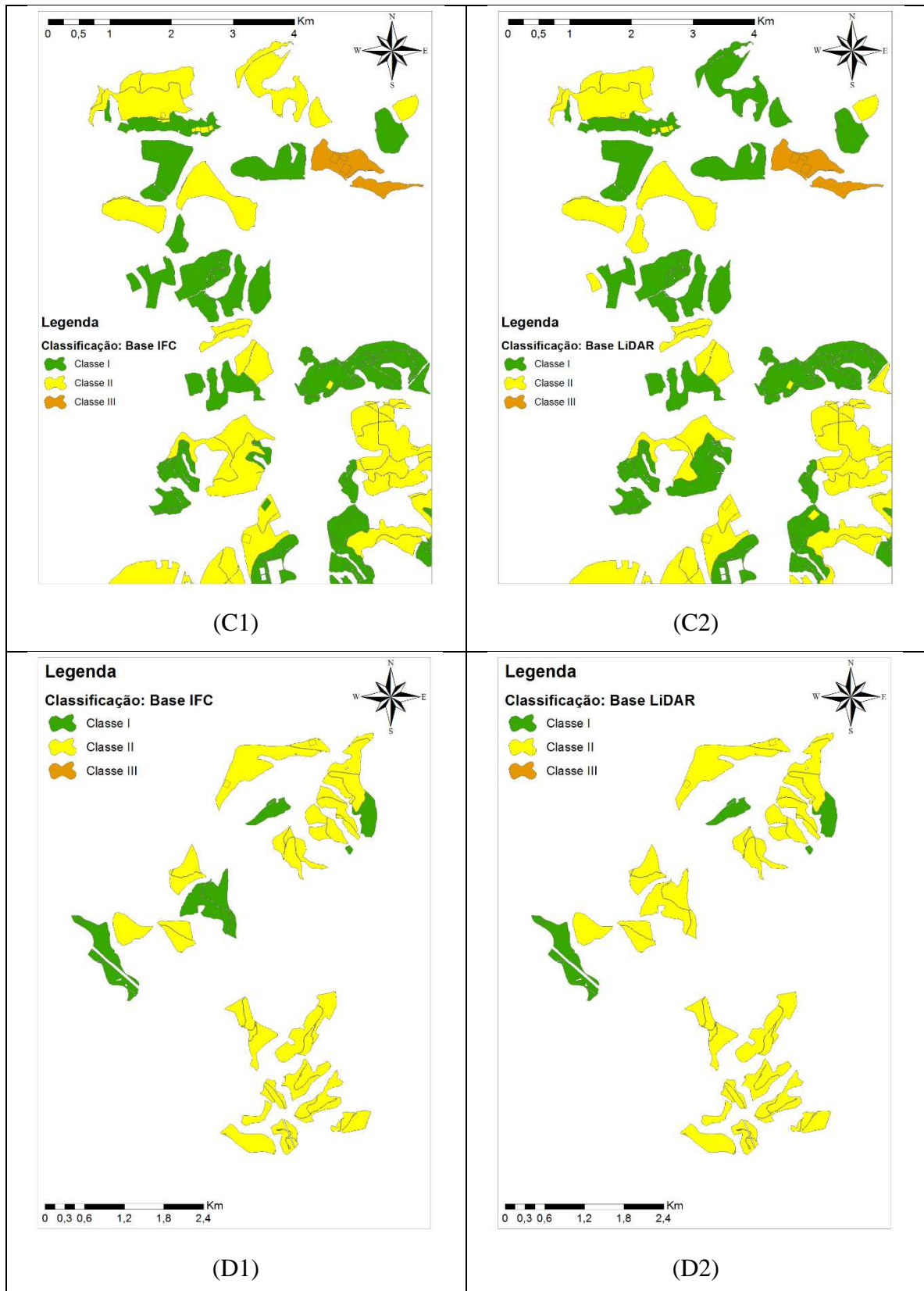


Figura 8 - (A-D)1: Mapas de capacidade produtiva de sítio classificada a partir do IFC; (A-D)2: Mapas de qualidade de sítio classificada a partir do LiDAR.

CONCLUSÕES

A diferença entre as curvas-guia implica que um único sensoriamento pelo LiDAR em um povoamento com diferentes classes de idade não é indicado para determinação de índices de local, assim, levantamentos de LiDAR anuais serão necessários.

Por outro lado, a classificação com o LiDAR pode ser utilizada para mapeamento e estratificação na situação desse estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, H.E.; McGAUGHEY, R. J.; REUTEBUCH, S. E. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 1, p. 441-449, 2005.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506 p.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. da S.; LEITE, H. G.; SILVA, A. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. **Agrária – Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, n.1, p.125-129, 2013.

BOYD, D. S.; DANSON, F. M. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development. **Progress in Physical Geography**, v. 29, n.1, p. 1-26, 2005.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H.G. **Mensuração Florestal: Perguntas e Respostas**. 4 Ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.

CHEN, Q.; BALDOCCHI, D.; GONG, P.; KELLY, M. Isolating individual trees in a Savanna Woodland using small footprint LiDAR data. **Photogramm Eng. Remote Sens.**, v. 72, n. 8, p. 923-932, 2006.

CHUBEY, M. S.; FRANKLIN, S. E.; WULDER, M. A. Object-based analysis of IKONOS-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 72, n. 4, p. 383-394, 2006.

CLARK, M. L.; CLARK, D. B.; ROBERTS, D. A. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 1, p. 68-89, 2004.

- CLUTTER, J. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333 p.
- DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; RODRIGUES, F. L. Avaliação de métodos de ajuste de curvas de índices de local em povoamentos de eucalipto desbastados. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 741-747, 2005.
- DRALLE, K.; RUDEMO, M. Stem number estimation by kernel smoothing of aerial photos. **Can. J. For. Res.**, v. 26, n. 7, p. 1228-1236, 1996.
- ESRI (Environmental Systems Resource Institute). ArcGIS 10.2.1 for Desktop. ESRI, Redlands, California, 2013.
- GOETZ, S. J.; BACCINI, A.; LAPORTE, N. T.; JOHNS, T.; WALKER, W.; KELLNDORFER, J.; HOUGHTON, R. A.; SUN, M. Mapping and monitoring carbono stocks with satellite observations: a comparison of methods. **Carbon Balance and Management**, Heidelberg, v. 4, n. 1, p. 2-9, 2009.
- GÖRGENS, E. B. **LiDAR technology applied to vegetation quantification and qualification**. 2014. 102 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- GRAYBILL, F. A. **Theory and application of the linear model**. Belmont: Duxbury Press, 1976. 704 p,
- HOLMGREN, J.; NILSSON, M.; OLSSON, H. Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning. **Forest Science**, v49, p. 419-428, 2003.
- HUDAK, A. T.; CROOKSTON, N.L.; EVANS, J.S.; FALKOWSKI, M.J.; SMITH, A. M. S.; GESSLER, P. E.; MORGAN, P. 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**, v. 32, n. 2, p. 126-138, 2006.
- HYAMS, D. Curve Expert Version 1.37. **A comprehensive curve fitting package for Windows**, 2005.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Ibá 2015**, Brasília, 2015, 80 p.

JENKS, G. F.; CASPALL, F. C. Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 61, n. 2, p. 217-244, 1971.

JENSEN, J. L. R.; HUMES, K. S.; VIERLING, L. A.; HUDAK, A. T. Discrete return lidar-based prediction of leaf area index in two conifer forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3947-3957, 2008.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução de José Carlos Neves Epiphânio [et al.]. 1 Ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 598 p.

JONES, J .R. Review and comparison of site evaluation methods [Internet]. Rocky Mountain For. and Range Exp. Station, Forest Service, USDA, 1969 [citado em 1 nov. 2015]. Disponível em: <https://ia802709.us.archive.org/19/items/CAT92273099/CAT92273099.pdf>

KOCH, B.; HEYDER, U.; WELNACKER, H. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, New York, v. 72, n. 4, p. 357-363, Apr. 2006.

KUMAR, V. **Forest inventory parameters and carbono mapping from airborne LiDAR**. 2012. 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da geo-informação e observação da Terra) – University of Twente, Enschede, 2012.

KWAK, D. A.; LEE, W. K.; LEE, J. H. Predicting forest stand characteristics with detection of individual tree. In: Proceedings of the MAPPs/ASPRS 2006 fall conference [Internet], 6-10 Novembro de 2006 [citado em 7 nov. 2015], San Antonio, USA. Disponível em: <http://info.asprs.org/publications/proceedings/fall2006/0025.pdf>

KWAK, D. A.; WOO-KYUN, L.; LEE, J. H.; BIGING, G.; GONG, P. Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data. **Journal of Forest Research**, v. 12, n. 6, p. 425-434, 2007.

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**, v. 70, n. 3, p. 339-361, 1999.

MACEDO, R. de C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de Eucalyptus sp. através de laserscanner aerotransportado**. 2009. 145 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal**. 3 Ed. Viçosa: UFV, 2014. 543 p.

MALTAMO, M.; HYYPPÄ, J.; MALINEN, J. A comparative study of the use of laser scanner data and field measurements in the prediction of crown height in boreal forests. **Scan. J. Forest Res.**, v. 21, n. 3, p. 231-238, 2006.

McALLISTER, D. M.; VALEO, C. A robust new method for the remote sensing of LAI in montane and boreal forests. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 8, p.1891-1905, 2007.

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**, v. 49, n. 3, p. 457-466, 2003.

NÆSSET, E. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 2, p. 246-253, 1997.

OLIVEIRA, L. T. **Aplicação do Lidar no inventário de florestas plantadas**. 2011. 118p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

OLIVEIRA, L. T.; CARVALHO, L. M. T.; FERREIRA, M. Z.; OLIVEIRA, T. C. de A.; BATISTA, V. T. F. P. Influência da idade na contagem de árvores de Eucalyptus sp. com dados de LiDAR. **Cerne**, Lavras, v. 20, n.4, p. 557-564, 2014.

OZDEMIR, I. Estimating stem volume by tree crown area and tree shadow area extracted from pan-sharped Quickbird imagery in open Crimean juniper forests. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 19, p. 5643-5655, 2008.

PIRES, J. M. **Uso do Lidar (Light Detection and Ranging) para estimação da altura de árvores em povoamentos de eucalipto**. 2005. 39 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2005.

- 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 for estimating tree height. **Photogramm Eng. Remote Sens.**, v. 70, n. 5, p. 589-604, 2004.
- READ, J. M.; CLARK, D. B.; VENTICINQUE, E. M.; MOREIRA, M. P. Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. **Journal of Applied Ecology**, v. 40, n. 3, p. 592-600, 2003.
- SHARPE, G. W.; HENDEE, J. C.; SHARPE, W. F. **Introduction to Forests and Renewable Resources**. 7 ed. Long Grove : Waveland Press, Inc, 2003. 544 p.
- SONG, C.; DICKINSON, M. B. Extracting forest canopy structure from spatial information of high resolution optical imagery: tree crown size versus leaf area index. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 19, p. 5605-5622, 2008.
- ST-ONGE, B.; TREITZ, P.; WULDER, M. A. Tree and canopy height estimation with scanning lidar. In: WULDER, M; FRANKLIN, S. R. (Ed.). **Remote Sensing of Forest Environments**. New York: Springer, 2003. p. 489-509.
- TESFAMICHAEL, S. G.; AHMED, F.; van AARDT, J. A. N. A semi-variogram approach for estimating stems per hectare in Eucalyptus grandis plantations using discrete return lidar height data. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 7, p. 1188-1199, 2009.
- 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**, v. 34, n. 4, p. 515-540, 2010.
- TONINI, H.; FINGUER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; SPATHELF, P. Comparação gráfica entre curvas de Índice de Sítio para Pinus elliottii e Pinus taeda desenvolvidas no sul do Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 143-152, 2002.
- VAUHKONEN, J.; ENE, L.; GUPTA, S.; HEINZEL, J.; HOLMGREN, J.; PITKÄNEN, J.; SOLBERG, S.; WANG, Y.; WEINACKER, H.; HAUGLIN, K. M.; LIEM, V.; PACKALÉN, P.; GOBAKKEN, T.; KOCH, B.; NÆSSET, E.; TOKOLO, T.; MALTAMO, M. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. **Forestry**, London, v. 85, n. 1, p. 27-40, 2011.

WULDER, M. Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters. **Progress in Physical Geography**, v. 22, n. 4, p. 449-476, 1998.

WULDER, M; NIEMANN, K. O.; GOODENOUGH, D. G. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 73, n. 1, p. 103-114, 2000.

WULDER, M. A.; DECHKA, J. A.; GILLIS, M. A.; LUTHER, J. E.; HALL, R. J.; BEAUDOIN, A.; FRANKLIN, S. E. Operational mapping of the land cover of the forested area of Canada with Landsat data: EOSD land cover program. **The Forestry Chronicle**, v. 79, n. 6, p. 1075-1083, 2003.

ZANDONÁ, D. F. **Potencial uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas**. 2006. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ZAWILA-NIEDZWIECKI, T.; STERENCZAK, K.; BALAZY, R.; STRZELINSKI, P.; ZASADA, M. The use of terrestrial and airborne LIDAR technology in forest inventory. **Ambiência**, v. 4, ed. esp., p. 57- 68, 2008.

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 Queirós, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.