

JONAS MACHADO PIRES

**USO DO *Lidar* (*LIGHT DETECTION AND RANGING*) PARA
ESTIMAÇÃO DA ALTURA DE ÁRVORES EM POVOAMENTOS
DE EUCALIPTO**

Tese 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
JULHO – 2005**

JONAS MACHADO PIRES

**USO DO *Lidar* (*LIGHT DETECTION AND RANGING*) PARA
ESTIMAÇÃO DA ALTURA DE ÁRVORES EM POVOAMENTOS
DE EUCALIPTO**

Tese 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: 4 de maio de 2005.

Prof. Dr. Hélio Garcia Leite
(Conselheiro)

Prof. Dr. Vicente Paulo Soares
(Conselheiro)

Prof. Dr. Carlos Pedro Boechat Soares

Prof. Dr. Nerilson Terra Santos

Prof. Dr. Carlos Antônio Álvares Soares Ribeiro
(Orientador)

A minha mãe Dirce C. Machado.

Ao meu pai José Eudes Pires (*in memorian*).

Aos meus irmãos.

A meu avô Carlos Vieira Machado (*in memorian*).

A meus avós (*in memorian*).

A minha esposa e ao meu filho.

Às pessoas com quem convivi.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as oportunidades.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de realização do Curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento concedido durante o Programa de Pós-Graduação.

Ao Professor Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro, pela orientação, dedicação, confiança e por ter compreendido as minhas limitações.

Ao Professor Hélio Garcia Leite, pela ajuda, dedicação, confiança e amizade.

Ao Professor Vicente Paulo Soares, pela orientação e confiança.

À Aracruz Celulose e Papel, pelo fornecimento dos dados para este trabalho.

Aos funcionários do setor PSM, da Aracruz Celulose, em especial ao Engenheiro Marcelo Antunes, e ao Cartógrafo Jocival. Ao Osvanildo Santana, pelo acompanhamento no campo. À Adriana Leandra de Assis, pelos esclarecimentos nos dados de inventário.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Florestal.

Ao coordenador da pós-graduação, professor Carlos Cardoso Machado.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação, Ritinha e Frederico.

Aos colegas de curso, pelo auxílio, pela amizade e pelo bom convívio.

A meus pais e aos meus irmãos, pelo apoio constante.

À minha esposa e ao meu filho, pelo carinho, estímulo, pela amizade e compreensão nas dificuldades e nos bons momentos durante o curso.

Sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para que este trabalho fosse realizado.

BIOGRAFIA

JONAS MACHADO PIRES, filho de Dirce Cardoso Machado Pires e José Eudes Pires, nasceu em Viçosa-MG, no dia 17 de março de 1967.

Em dezembro de 1995, concluiu o curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa. Em janeiro de 1996, iniciou sua carreira, atuando profissionalmente até março de 2002.

Em abril de 2001, concluiu o curso de especialização em Geoprocessamento, na Universidade Federal de Minas Gerais.

Em março de 2002, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração em Sistema de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto aplicado ao Manejo Florestal em floresta equiâneas, na Universidade Federal de Viçosa.

Em maio de 2005, submeteu-se à defesa de tese.

ÍNDICE

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Descrição do problema.....	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Geral	3
1.2.2. Específicos	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Capacidade produtiva.....	4
2.2. Referencial teórico do <i>Lidar</i>	6
2.3. Aplicação do <i>Lidar</i> na área florestal	8
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
3.1. Área de estudo.....	14
3.2. Configuração operacional do <i>LIDAR</i>	16
3.3. Estimativa da altura total (<i>Ht</i>) de plantações de eucalipto a partir de dados obtidos pelo sensor <i>Lidar</i>	18
3.3.1. Medição da altura total no campo (<i>Ht_{obs}</i>).....	18
3.3.2. Estimativa da altura total de árvores individuais com <i>LIDAR</i> (<i>Ht_{lidar}</i>)	18
3.3.3. Avaliação da exatidão da altura total <i>Lidar</i> (<i>Ht_{lidar}</i>).....	20
3.4. Utilização de dados do sensor <i>LIDAR</i> para a classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto.....	20

3.4.1. Medição da altura dominante média no campo ($\bar{H}d_{obs}$).....	21
3.4.2. Estimativa da altura total média com dados <i>Lidar</i> ($\bar{H}t_{lidar}$).....	22
3.4.3. Comparação entre as alturas totais médias ($\bar{H}t_{lidar}$) versus ($\bar{H}d_{obs}$).....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1. Estimativa da altura total <i>Lidar</i> (Ht_{Lidar}).....	28
4.2. Utilização de dados <i>Lidar</i> para a classificação da capacidade produtiva.	32
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

RESUMO

PIRES, Jonas Machado, M.S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2005. **Uso do LIDAR (*Light Detection and Ranging*) para estimação da altura de árvores em povoamentos de eucalipto.** Orientador: Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro. Conselheiros: Hélio Garcia Leite e Vicente Paulo Soares.

A altura total (Ht) de uma árvore tem alta correlação com seu volume, sendo indispensável para o seu cálculo em nível de indivíduo ou de povoamento. Na fase juvenil é a única variável a ser medida para o acompanhamento do crescimento de talhões e de parcelas experimentais. A classificação da capacidade produtiva permite melhor planejamento operacional, através do conhecimento da produtividade alocada em cada talhão. Utilizam-se equações decorrentes das relações entre a altura dominante (Hd) e idade (I), para se obter a capacidade produtiva. Porém, a medição da altura no campo demanda envolvimento de recursos como, pessoal, veículo, equipamento e tempo. A tecnologia *Lidar (Light Detection and Ranging)* permite medir com acurácia a altura total (Ht) de árvores individuais em povoamentos de eucalipto. Este estudo foi realizado numa área de aproximadamente 306 ha, em plantios comerciais de eucalipto, da empresa Aracruz Celulose S/A, localizados na região de São Mateus, no norte do Espírito Santo, latitude 18° 05' Sul, longitude 39° 30' Oeste de Greenwich. O sistema *Lidar* foi instalado num avião que sobrevoou a área a uma altura média de 1.000 m, com a largura da faixa de varredura de 650 m, permitindo acurácia horizontal de 50 cm e vertical de 15 cm. O objetivo geral do estudo foi elaborar uma metodologia para extração automática de altura total (Ht) de árvores individuais em povoamento de

eucalipto, com dados levantados pelo sensor *Lidar*. Especificamente, buscou-se estimar a altura total (Ht) de árvores individuais em plantios de eucalipto, com dados *Lidar*, utilizando a altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$) para classificação da capacidade produtiva. Na estimativa da altura total de árvores individuais (Ht_{Lidar}) com dados *Lidar*, foram medidas no campo 46 árvores em 24 parcelas diferentes. Aplicou-se o teste t para duas amostras dependentes, e como resultado, a Ht_{Lidar}, a Ht_{Obs} e a Ht_{Suunto}, com médias 25,8m, 25,1m e 25,4m, respectivamente, não diferindo entre si a 1% de probabilidade. Avaliando valores pontuais, observa-se que apenas quatro pontos tiveram diferença superior a 3,0 m, e estas superestimativas pelo *Lidar* ocorreram sempre que a árvore amostrada era um indivíduo suprimido. Essa diferença pode ser atribuída a uma falha na identificação de árvores suprimidas próximas a árvores dominantes, ou mesmo a um erro de medição no campo. Na classificação da capacidade produtiva utilizando a altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$), foram lançadas sistematicamente cinquenta e sete parcelas circulares: 52 com 360 m² e 5 com 507m², estas últimas instaladas em talhões desbastados. Em cada parcela, mediu-se a altura dominante média ($\bar{H}d_{obs}$). Por meio de uma classificação automática, calculou-se a altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$) por parcela. O coeficiente de correlação entre a ($\bar{H}t_{lidar}$) e ($\bar{H}d_{obs}$), foi 0,9533 e a hipótese de identidade entre os dois vetores alturas foi rejeitada a 1% de probabilidade (F(H₀) = 18,2572*). Apesar dessa significância do teste F, ao analisar as tendências (Figuras 20 e 21), verifica-se consistência entre os métodos. Do ponto de vista da mensuração florestal, este fato indica a possibilidade de uso de informações de altura obtidas com o *Lidar* em estudos de classificação da capacidade produtiva. Dada a limitação dos dados, esta possibilidade não pôde ser comprovada neste estudo.

ABSTRACT

PIRES, Jonas Machado, M.S., Universidade Federal de Viçosa, May 2005. **Use of LIDAR (*Light Detection and Ranging*) to stimulate height of trees of standing eucalyptus reserved for cutting.** Adviser: Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro. Committee members: Hélio Garcia Leite e Vicente Paulo Soares.

The total height (tH) of a tree has high correlation with its volume, being essential for its calculation in individual level or stand of trees reserved for cutting the youthful phase, it is the only variable to be measured for the accompaniment of the growth of slices and experimental parcels. The ordering productive capacity allows operational planning better, through the knowledge of the productivity placed in each slice. The recurrent equations of the relations between the dominant height (dH) and age (A) are used to get the productive capacity. However, the measurement of the height in the field demands involvement of resources as, staff, vehicle, equipment and time. The technology *Lidar* (Light Detection and Ranging) allows to measure with accuracy the total height (tH) of individual trees in standing of eucalyptus reserved for cutting. This study was carried through in an area of approximately 306 ha, in commercial planted area of eucalyptus, of the Aracruz company Cellulose S/A, located in the region of São Mateus, in the north of the Espírito Santo, South latitude 18° 05', longitude 39° 30' West of Greenwich. The system *Lidar* was installed in an airplane that flew over the area to an average height of 1.000 m, with the width of the band of sweepings of 650 m, allowing accuracy horizontal line of 50 cm and vertical line of 15 cm. The general aim of the study was to elaborate a methodology for automatic extraction of total height (Ht)

of individual trees in standing of eucalyptus reserved for cutting, with raised data for the *Lidar* sensor. Specifically, one searched esteem the total height (Ht) of individual trees in planted area of eucalyptus, with *Lidar* data, using the average total height *Lidar* (\overline{Ht}_{lidar}) for ordering productive capacity. In the estimate of the total height of individual trees (tH_{Lidar}) with *Lidar* data, had been measured in the field 46 trees in 24 different parcels. One applied test t for two dependent samples, and as resulted, the tH_{Lidar} , the tH_{Obs} and the tH_{Suunto} , with averages 25,8m, 25,1m and 25,4m, respectively, not differing among themselves 1% from probability. Evaluating prompt values, it is observed that only four points had had superior difference the 3,0 m, and these superestimates for *Lidar* had always occurred that the showed tree was a suppressed individual. This difference can be attributed to an imperfection in the identification of suppressed trees next the dominant trees, or same to an error of measurement in the field. In the ordering of productive capacity using the average total height *Lidar* (\overline{Ht}_{lidar}) had been launched thoroughly fifty and seven circular parcels: 52 with 360 m² and 5 with 507m², these last installed in roughed-hew slices. In each parcel, average dominant height (\overline{Hd}_{obs}). By means of an automatic ordering, measured it calculated it average total height (\overline{Ht}_{lidar}) for parcel. The coefficient of correlation between (\overline{Ht}_{lidar}) and (\overline{Hd}_{obs}), was 0,9533 and the hypothesis of identity between the two vectors heights was rejected 1% of probability ($F(H_0) = 18,2572^*$). Despite this significance of test F, when analyzing the trends (Figures 20 and 21), consistency between the methods is verified. Of the point of view of the forest measuring, this fact indicates the possibility of use of gotten information of height with *Lidar* in studies of ordering of productive capacity. Given the limitation of the data, this possibility could not be proven in this study.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do potencial florestal vem sendo aprimorada pelas empresas florestais, com o objetivo de minimizar os erros e reduzir o tempo de processamento, além de procurar apresentar os resultados obtidos da maneira mais clara possível. O conhecimento do volume e da biomassa é de grande importância para o planejamento da produção florestal, de forma que esse inventário é utilizado não só para orientar os planos de exploração, mas também para se proceder à análise econômica e ao planejamento e otimização das atividades da empresa.

A demanda por produtos florestais, crescendo continuamente na última década, tem exigido o emprego de práticas de manejo cada vez mais eficientes, para proporcionar o aumento necessário de produtividade das florestas. O conhecimento da capacidade produtiva ou qualidade do local constitui um dos fatores mais importantes para se implementar um planejamento consistente, que garanta o sucesso do empreendimento florestal.

As empresas florestais investem quantias consideráveis com atividades relacionadas ao inventário florestal, gerando estimativas volumétricas com erros de amostragem que podem chegar a 40% em alguns casos, embora, em geral, admita-se um erro máximo de 10%. O método de amostragem mais comum em inventário florestal é a amostragem sistemática.

A altura constitui uma característica importante da árvore, podendo ser medida ou estimada. Por ter uma alta correlação com o volume, a altura é indispensável para o seu cálculo e para o cálculo de incrementos em altura e em volume. Na fase juvenil, a

altura é a única variável a ser medida para o acompanhamento do crescimento de talhões e de parcelas experimentais; nesse caso, a média das alturas será o parâmetro a ser determinado.

A altura de uma árvore ou porção dela é a distância linear ao longo do fuste, partindo do nível do terreno até o topo, ou outro ponto de referência, sempre em conformidade com o tipo de altura que se procura medir. Em um povoamento florestal, a altura meda se aproxima da altura da árvore de seção transversal média, ou seja, aproxima-se da altura da árvore de volume médio. A altura total das árvores dominantes tem sido largamente usada para identificar a capacidade produtiva de terrenos florestais, pois é pouco afetada por tratamentos silviculturais, e as árvores refletem melhor a qualidade do local, existindo, além disso, uma boa correlação entre altura dominante e produção total em volume do povoamento.

Nos métodos estimativos, a altura é uma das variáveis independentes das tabelas de volume, com funções de *taper* e de outras relações dendrométricas. As alturas são determinadas por medidas diretas, indiretas e estimadas. As medidas diretas podem ser feitas em árvores em pé ou derrubadas. Em árvores derrubadas, geralmente, usa-se trena. Em árvores em pé, usam-se varas de madeira fina, bambus ou hastes encaixáveis umas às outras, não sendo possível medir árvores altas, maiores de 40 m. O método indireto tem sido o mais utilizado, principalmente em inventário florestal. Este método implica em que o medidor não tenha contato com a árvore, fazendo a medida à distância. Para isto, foram construídos instrumentos apropriados chamados de hipsômetros. Dentro do mesmo princípio de construção, existem os altímetros e os clinômetros usados em topografia e ainda as fotografias aéreas para medição de altura.

A tecnologia *Lidar* (*Light Detection and Ranging*) permite extrair com segurança as alturas das árvores em áreas representativas do talhão, evitando-se a coleta desta informação em campo. O *Lidar* (*Light Detection and Ranging*), ou altimetria a laser, é um sensor remoto ativo que, como o próprio nome sugere, utiliza técnicas de luz a laser. Sua técnica consiste na medição do tempo de ida e volta da energia de um pulso laser entre o sensor e o alvo. Este pulso incidente de energia interage com a copa da árvore (folhas, galhos e tronco) e a superfície do solo, retornando-o ao instrumento. O intervalo de tempo do movimento do pulso, do início até o seu retorno ao sensor é medido, fornecendo a distância entre o instrumento e o objeto, desta forma têm-se a sua altura e localização, que são representados por pontos de coordenadas x, y e z.

1.1. Descrição do problema

Considera-se a variável altura como importante característica da árvore que tem uma alta correlação com o volume, sendo, portanto, uma variável indispensável para o cálculo do volume e para o cálculo de incrementos em altura e em volume. Essa grande importância se justifica, ainda, por ser a única variável a ser medida para acompanhamento do crescimento de talhões, e por ser largamente utilizada em estudos de capacidade produtiva de terrenos florestais.

Porém, a medição dessa variável no campo demanda envolvimento de muitos recursos, como pessoal, veículo, equipamento e tempo. Todos estes elementos com implicações e custos diversos e, especialmente, o tempo que, neste mundo globalizado, é um recurso escasso e crítico.

Diante deste fato, verifica-se a necessidade de se buscarem alternativas que garantam a qualidade da medição, reduzindo o tempo e a quantidade de recursos à sua obtenção.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

O objetivo geral deste estudo é apresentar uma metodologia para extração automática de altura total (Ht) de árvores em povoamento de eucalipto, com dados levantados pelo sensor *Lidar* (*Light Detection and Ranging*).

1.2.2. Específicos

- Entre os objetivos específicos, propõe-se estimar a altura total (Ht) de árvores individuais em plantios de eucalipto, com dados obtidos pelo sensor *Lidar*.
- Utilizar dados do sensor *Lidar* para a classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Capacidade produtiva

As árvores respondem aos fatores bióticos, climáticos, edáficos e topográficos, influenciadas pelas práticas silviculturais e de manejo florestal. Conhecendo essa resposta, o manejador pode decidir sobre quais espécies plantar e sobre a densidade do plantio em um determinado local. Para decidir corretamente sobre a época de corte de cada talhão, exige-se conhecimento da taxa de crescimento, produção por unidade, área, idade, capacidade produtiva e densidade (ROSAS, 1994).

Segundo GREY (1985 a, b), o mapeamento e a classificação da capacidade produtiva permitem um melhor planejamento operacional, fornecendo subsídios básicos para antever a produtividade alocada a cada talhão. A partir de informações sobre a qualidade do local, o manejador florestal faz estimativas realistas para produções futuras, definindo a quais locais deve ser dada ênfase num manejo florestal intensivo CARMEAN (1986).

De acordo com CAMPOS et al. (1991), o crescimento das árvores dominantes sofre simultaneamente ações interativas de vários fatores. Dessa forma, ao medir a altura das árvores dominantes, inconscientemente, os fatores estarão sendo medidos, considerando-se que a altura das árvores dominantes não é afetada por competição em espaçamento não muito denso.

A capacidade produtiva pode ser determinada por métodos diretos e indiretos. Diretamente, pelo crescimento da floresta em si e indiretamente a partir de atributos do local que expressam sua produtividade (RENNIE, 1963; CARMEAN, 1975).

Os métodos diretos classificam a capacidade produtiva, relacionando o crescimento das árvores em altura, área basal, volume, biomassa, e outros. Dessa forma, a qualidade do local é relacionada a um componente mensurável da floresta, que expressa os efeitos integrados dos fatores do meio sobre o crescimento das árvores, até a época medida (RALSTON, 1964).

Os dados para classificação de índices de local podem advir de parcelas permanentes, análise completa do tronco e parcelas temporárias, esta última para classificação preliminar. Pelo fato de as medições serem feitas durante alguns anos, as parcelas permanentes fornecem os melhores dados para classificação do local. Segundo CLUTTER et al. (1983), a análise completa de tronco de árvores-amostra derrubadas fornece dados iguais, em qualidade, àqueles obtidos por meio de parcelas permanentes. Uma limitação é que a análise é restrita às coníferas, onde os anéis de crescimento são evidentes.

A construção das curvas de índices de local se dá a partir de equações que expressam, de modo quantitativo, a capacidade produtiva do local. As equações são decorrentes das relações entre a variável dependente altura dominante média (H_d) e variável independente idade (I). Os levantamentos dessas variáveis, em nível de campo, demandam muito tempo, pois, apesar de ser feita em parcelas (uma pequena área representativa do povoamento), todas as alturas totais (H_t), diâmetro a 1,30 m do chão (d_{ap}) e as idades (I) das árvores dentro da parcela devem ser conhecidas. Além disso, exigem metodologias que associem praticidade e baixo custo, principalmente, em situações de florestas extensas.

A classificação da capacidade produtiva ou índice-local é definida pela altura média das árvores dominantes, em uma idade pré-estabelecida. A altura dominante (H_d) é a altura média das 100 árvores de maior diâmetro à altura do peito (d_{ap}) em 1 hectare. As árvores dominantes são aquelas que possuem os maiores diâmetros a 1,3 m de altura (d_{ap}), tronco retilíneo e copa no extrato superior da floresta.

2.2. Referencial teórico do *Lidar*

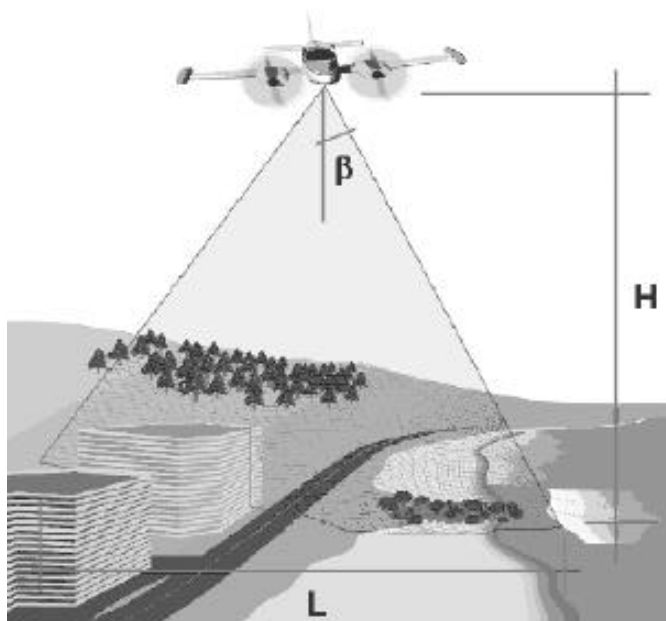
Apesar de o *Lidar* ser considerado uma tecnologia emergente de sensoriamento remoto com uma ampla variedade de aplicações na terra, a tecnologia já existia desde a década de 70. Como exemplo, o laser altimétrico esteve a bordo das Apollo 15, 16 e 17, nas missões à Lua (Kaula et al., 1974). Porém, os resultados do sistema somente puderam avançar tecnologicamente a partir da década de 90, com o desenvolvimento de sensores mais confiáveis, como o Shuttle Laser Altimeter (SLA) (GARVIN et al., 1998) e o Mars Observer Laser Altimeter (MOLA) (SMITH et al., 1998), que fez uma significativa medida topográfica da terra e mares.

Atualmente, dispõe-se de uma grande quantidade de laser altimétricos aerotransportados, facilitando o desenvolvimento de instrumentos e de técnicas de processamento de dados, como fontes de novas aplicações científicas. Como exemplos, estes sistemas incluem o Aerotransportado Topográfico Sistema Laser Altimétrico ATLAS (Airborne Topographic Laser Altimeter System, BUFTON et al., 1991) e o Scanning *Lidar* Imager of Canopy by Echo Recovery (SLICER) (BLAIR et al., 1994).

A varredura realizada pelo sistema *Lidar* instalado em aeronaves é feita transversalmente à direção da linha de vôo, conforme ilustrado na Figura 1, onde o ângulo de abertura é configurável pelo sistema, e a largura (L) da faixa coberta pela varredura é determinada pela Equação 1. O diâmetro do ponto projetado no solo (*footprint*), de acordo com a Figura 2, varia com o ângulo de abertura do raio laser (β) e da altura de vôo da aeronave (H).

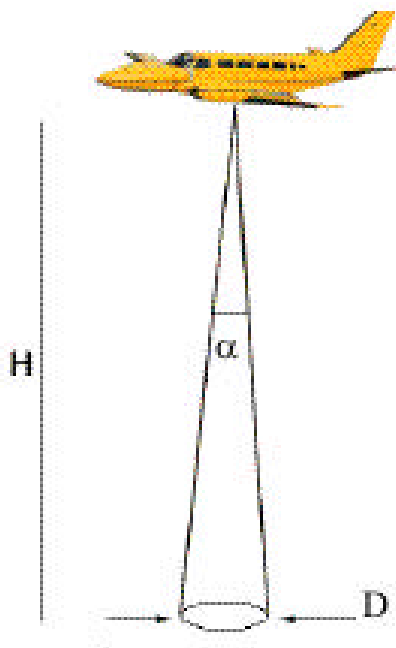
$$L = 2 \cdot H \cdot \tan \beta \quad (1)$$

Os sensores *Lidar* diferenciam-se, entre si, de acordo com o comprimento de onda emitido, a energia, a duração do pulso e sua taxa de repetição, o tamanho do feixe e seu ângulo de divergência, e as informações registradas para cada pulso refletido. A intensidade ou energia do sinal de retorno depende de diversos fatores, conforme explicam Lefsky et al. (2002): a energia total do pulso transmitido, a fração do pulso a laser que é interceptada pela superfície, a reflectância da superfície interceptada no comprimento de onda do laser e a fração da iluminação refletida que se desloca em direção ao sensor.



Fonte: BRANDALIZE (2002).

Figura 1 – Largura da faixa coberta pela varredura pelo laser do sensor.



Fonte: BRANDALIZE (2002).

Figura 2 – Diâmetro do ponto projetado no solo (footprint).

A técnica do imageamento por *Lidar* consiste na medição do tempo de ida e volta da energia de um pulso laser (usualmente com o comprimento de onda no infravermelho próximo, em estudos de vegetação) entre o sensor e o alvo. Este pulso incidente de energia interage com a copa da árvore (folhas, galhos e tronco) e a superfície do solo, retornando ao instrumento. O intervalo de tempo (Time Interval Meter – TIM) do movimento do pulso, do início até o seu retorno ao sensor é medido, fornecendo a distância entre o instrumento e o objeto. A primeira geração de sensores *Lidar*, desenvolvidos para estudos de vegetação, foi criada para registrar esta distância. O primeiro retorno de energia refere-se ao topo da superfície do dossel da floresta. Deste, combinado com o retorno do solo da floresta, obtêm-se as alturas das árvores. Técnicas posteriores e mais sofisticadas passaram a registrar a distância do primeiro e último pulso refletido da superfície (*footprint*), retornando a medida direta da altura para cada observação, e proporcionando estimativas da altura do dossel, volume de madeira, biomassa da floresta (MACLEAN e KRABILL, 1986; NAESSET, 1997) e porcentual da cobertura do dossel (RITCHIE et al., 1993; WELTZ et al., 1994).

2.3. Aplicação do *Lidar* na área florestal

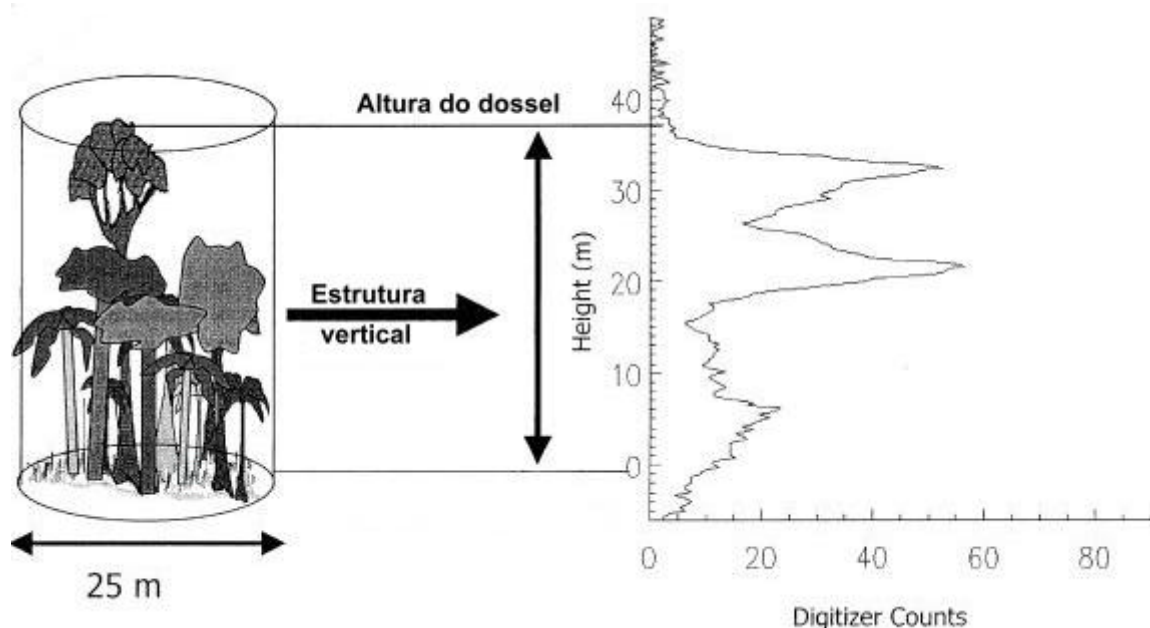
O *Lidar* (*Light Detection and Ranging*), ou altimetria a laser, é um sistema sensor remoto ativo que, como o próprio nome sugere, utiliza o laser como fonte de energia. LEFSKY et al. (2002) destacam a importância dessa tecnologia de sensoriamento remoto, por aumentar a precisão de medições biofísicas e estender as análises espaciais ao universo tridimensional. Assim, permite gerar mapas topográficos de alta resolução e estimativas precisas da altura da vegetação, cobertura, estrutura do dossel, do índice de área foliar (IAF) e da biomassa sobre o solo. Porém, há de atentar-se para algumas limitações quanto ao uso do *Lidar* e outras técnicas de sensores remotos ópticos, como a restrição de funcionamento dos mesmos em condições de nebulosidade e névoas densas que podem atenuar o sinal antes de atingir o solo.

Estudos utilizando pequeno diâmetro projetado no solo (*footprint*) dos sistemas *Lidar* não são aconselhados para mapeamento das estruturas florestais. Primeiro, porque pequenos diâmetros de cobertura freqüentemente assumem a amostra da copa e do topo das árvores (NELSON, 1997). Segundo, porque o pequeno tamanho do suporte, o traçado em áreas extensas, requer vôos longos. Finalmente, com sistemas que só registram os primeiros retornos, torna-se difícil determinar se o pulso emitido, em

questão, penetrou em todo o dossel. De acordo com BLAIR e HOFTON (1999), em áreas com árvores de grande porte, somente um feixe, dentre alguns milhares, retorna do solo e, se esta topografia não pode ser delimitada, a determinação da altura exata acaba sendo prejudicada, por causa da altura das copas medidas serem relativas ao solo. O sistema grande *footprint* possui alguns avanços que ajudam a minimizar ou evitar estes problemas. Dentre estes, o aumento do tamanho *footprint* para um diâmetro médio mínimo da copa de árvore, um molde do dossel (10-25 m), a energia laser consistentemente atinge o solo nivelando a floresta densa. Outro avanço notável do sistema grande *footprint* reside na obtenção de uma ampla seqüência de imagens, que reduzem o custo do mapeamento, principalmente tratando-se de extensas áreas de florestas (BLAIR et al., 1999). Porém, apesar do grande diâmetro do ponto projetado no solo (*footprint*) do *Lidar* ser eficaz para estimativa da estrutura de florestas temperadas com altos níveis de biomassa acima do solo, o seu uso na determinação das mesmas características em florestas tropicais densas é crítico (BALDOCCHI e COLLINEAU, 1994). Isso pode ser explicado principalmente pelo alto grau de cobertura do dossel das florestas tropicais, que pode alcançar 98-99% a 1 metro acima do solo (NICOTRA et al., 1999).

Uma das variáveis inicialmente estudados no uso do sistema *Lidar* foi a avaliação da estrutura horizontal das florestas (diâmetro da copa), obtida pelo simples delineamento do topo das árvores (FRIEDLAENDER e KOCH, 2000).

Porém, é na medição direta da estrutura vertical das florestas que reside a principal vantagem do sistema *Lidar*. A Figura 3 ilustra o conceito básico de um sensor remoto *Lidar*, no estudo da estrutura vertical de uma área de floresta. A medida direta das alturas dos dosséis, topografia do subdossel e a distribuição vertical das superfícies interceptadas fornecem uma riqueza de dados para caracterização e gerenciamento das florestas. Além disso, a forte relação entre estas medidas e outros parâmetros biofísicos, como biomassa acima do solo, fornece informações críticas sobre a função e a produtividade do ecossistema da área em estudo (DUBAYAH e DRAKE, 2001). FRIEDLAENDER e KOCH (2000) mostram essa vantagem do *Lidar* na avaliação da estrutura vertical de uma floresta de coníferas na Alemanha, representando em um gráfico os pontos do solo e do topo da floresta. Os percentuais das representações dos diferentes sinais do solo e do topo foram calculados para se obter uma estimativa aproximada da estrutura vertical do povoamento.



Fonte: DUBAYAH e DRAKE (2001).

Figura 3 – Conceito básico de um sistema sensor *Lidar*.

LEFSKY et al. (2002) atentam para dois problemas na determinação da altura da vegetação, utilizando dados do *Lidar*: a determinação da elevação exata da superfície do solo e a complexidade dos dosséis. Cada tipo de sistema *Lidar* apresenta dificuldades na detecção das partes mais altas do dossel. Com o *Lidar* retorno discreto, densidades muito altas de *footprint* são exigidas para assegurar que as copas das árvores individuais foram medidas. Já com o sistema do tipo *waveform-recording*, aumenta-se a probabilidade das copas das árvores serem atingidas pelo laser.

Estimativas da copa do dossel têm sido feitas, usando ambos os sistemas *Lidar*. Essas estimativas são feitas, usando a fração das medidas *Lidar* que se assume terem sido retornadas pela superfície do solo (WELTZ et al., 1994; LEFSKY, 1997), em que as medidas são o número de retornos discretos ou a energia calculada de uma *waveform*. Em alguns casos, um fator é necessário para corrigir a reflectância relativa do solo e da superfície do dossel no comprimento de onda do laser (LEFSKY, 1997; MEANS et al., 1999).

Objetivando fazer uma descrição do dossel da floresta Douglas-fir/western, a leste das Cascades no Oregon, LEFSKY et al. (1999) utilizaram um grid de 5 x 5 m,

para cada área amostrada e a distância vertical (elevação) entre o primeiro retorno de energia e a média do retorno do solo. Os dados de altura na superfície do dossel foram resumidos em cinco índices, sendo que quatro deles foram calculados diretamente da seguinte maneira: a altura máxima (sendo a altura máxima das 25 waveforms), o número de waveforms que excedeu a altura de 55 m, a altura média (sendo a média das alturas das 25 waveforms) e a altura da superfície do dossel, sendo a diferença entre a altura máxima e a mínima, das 25 alturas obtidas na área amostrada. O quinto índice foi obtido por meio de um gráfico hipsográfico do dossel, mediante a utilização de uma equação (MEANS et al., 1999) que estima a altura média das árvores nos diferentes extratos da floresta.

A missão *Vegetation Canopy Lidar* (VCL), lançado em meados de 2003, seria o primeiro *Lidar* a bordo de um satélite especificamente projetado para estudar a vegetação. O VCL é um sistema do tipo registrador de onda (waveform-recording) que utiliza um *footprint* de 25 m de diâmetro e envolverá aproximadamente 5% da superfície da Terra durante os 18 meses da missão (DUBAYAH et al., 1997). Associado com a missão VCL, está o *Lidar Vegetation Imaging System* (LVIS), uma aeronave, um sistema de mapeamento *wide-swath* desenvolvido pelo Goddard Space Flight Center, da NASA, que tem sido usado para avaliar as capacidades do VCL (DUBAYAH et al., 2000).

BLAIR et al. (1999) avaliaram quatro medidas, utilizando o *Laser Vegetation Imaging Sensor* (LVIS): *Canopy Height* (LHT) que calculou a altura da vegetação, pela diferença entre o primeiro sinal (retorno do topo do dossel) e o último pulso central Gaussiano (o retorno do solo); a segunda medida calculada foi a mediana do conjunto de todos os sinais refletidos, o *Height of Median Energy* (HOME); a terceira medida calculada o *Height/Median Ratio* (HTRT), que foi o HOME dividido pela altura do dossel (LHT); e finalizando o trabalho os autores calcularam o *Ground Return Ratio* (GRND), que foi calculado através da intensidade total (o número total de pulsos refletidos), dividido pela soma da intensidade de todos os outros compartimentos verticais do dossel (Figura 4). O GRND fornece a estimativa do grau de fechamento do dossel. Essas quatro medidas foram fornecidas ao procedimento de regressão, por meio do qual estimaram a área basal, o diâmetro médio (QMSD) e a Biomassa acima do Solo (AGBM). Como resultado, obtiveram um diâmetro médio de 22,24 cm, com um desvio-padrão de 2,00 cm e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,93; para biomassa teve

uma média de 147,70 t/ha, um desvio de 18,39 t/ha e um R^2 de 0,93; e a área basal teve uma média de 26,71 m²/ha, um desvio de 3,00 m²/ha e um R^2 de 0,72.

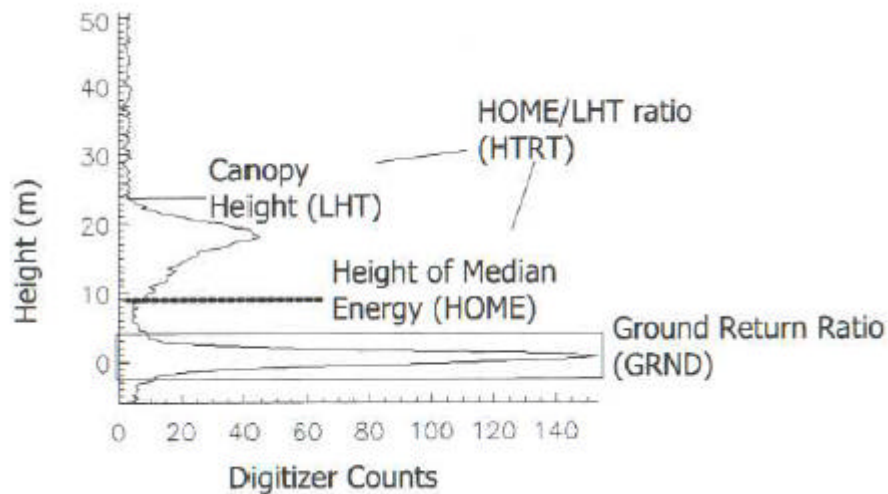


Figura 4 – Parâmetros utilizados por BLAIR et al. (1999), para estimar os atributos estruturais da floresta.

O HOME tem um forte potencial para estimar as características estruturais da floresta, sendo o melhor termo para estimar o diâmetro médio e a biomassa acima do solo. A medida do LHT é influenciada fortemente pela altura da superfície do dossel. Todavia, a medida do HOME pode ser mais sensível ao arranjo vertical e a densidade dos elementos do dossel. Nas áreas com porções densas de materiais no dossel, a energia *Lidar* determina a distância do solo e, por meio desta, incrementa-se o HOME. Contrariamente, nos dosséis mais abertos ou nas áreas distribuídas (numa clareira, como exemplo), mais energia *Lidar* atinge o solo, dessa forma, determinando-o e reduzindo o HOME. Seguindo este raciocínio, o estudo individual da estrutura de árvores também se torna facilitado, como se pode notar nos resultados encontrados por PERSSON (2001), que estudou quatro tipos de florestas, realizando uma varredura de alta resolução e utilizando um algoritmo que recupera o contorno externo da copa das árvores. Os erros de medidas encontrados para a altura das árvores de aproximadamente 63 cm e para o diâmetro da copa de 61 cm são comparáveis aos erros obtidos em medidas manuais. Já FRIEDLAENDER e KOCH (2000) fizeram uma avaliação da altura média de um povoamento com 29 árvores, comparando as medidas de campo com os dados obtidos

pelo *Lidar*. Os resultados mostraram uma diferença média nas alturas superestimadas pelo sensor em 1,09 m, com amplitude de 13 a 19 m.

Nesse contexto, HUISING e GOMES PEREIRA (1998) atentam para a relação da precisão das medidas com a declividade do terreno. Os autores citam que os erros-padrão nas alturas do terreno estão geralmente dentro de 15 cm, mas para terrenos montanhosos ou planos densamente cobertos por vegetação, as estimativas de precisão superam este valor. Por exemplo, numa declividade de 40% este erro supera 40 cm.

Mesmo sendo uma ferramenta relativamente nova, percebe-se que as informações fornecidas pelo sistema *Lidar* abrangem diversas áreas, mostrando ser esse sistema eficiente para tais funções, e talvez por isso seja usado em conjunto com dados fornecidos por outros, do Landsat 7 ETM+ e do IKONOS (CHEN et al., 2004).

Atualmente, as suas aplicações na ecologia têm-se restringido a três categorias: sensoriamento remoto da topografia do solo, medições em tridimensionais da estrutura dos dosséis e previsão das características estruturais das florestas. Um exemplo de sua perspicácia refere-se à obtenção das características estruturais de florestas, para fins de análise dos parâmetros críticos do comportamento de incêndios. Os sistemas *Lidar* dispostos em aeronaves têm produzido melhores resultados do que os obtidos a partir de fotografias aéreas, sensores hiperespectrais aerotransportados e radar de alinhamento aerotransportado (HYYPPA et al., 2001).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

Este estudo foi realizado na empresa Aracruz Celulose S/A, localizada na região de São Mateus, no norte do Espírito Santo, com latitude 18° 05' Sul, longitude 39° 30' a Oeste de Greenwich (Figura 5), clima tipo Aw (Clima Tropical Úmido, com Estação Chuvosa no Verão e Seca no Inverno), conforme classificação proposta por Köppen.

O relevo é formado por chapadões terciários, levemente inclinados em direção ao litoral sendo que, junto à costa, tem apenas 30 m de altitude, atingindo, na sua suave ascensão para o interior, altitudes superiores a 100 m, quando morrem de encontro às elevações do Cristalino (BRASIL, 1970).

Foram utilizados dados provenientes de parcelas temporárias de inventário florestal em plantios comerciais de eucalipto.

A escolha do local se baseou na diversidade de idade, buscando-se um local que pudesse apresentar plantios de eucalipto em diferentes idades. Os povoamentos de eucalipto encontravam-se em idades variando de 48 a 154 meses, plantados originalmente no espaçamento 3 m x 3 m. A Figura 6 dá uma idéia da área em estudo.

Coordenadas: Lat 18° 05' S e Long 39° 30' W.

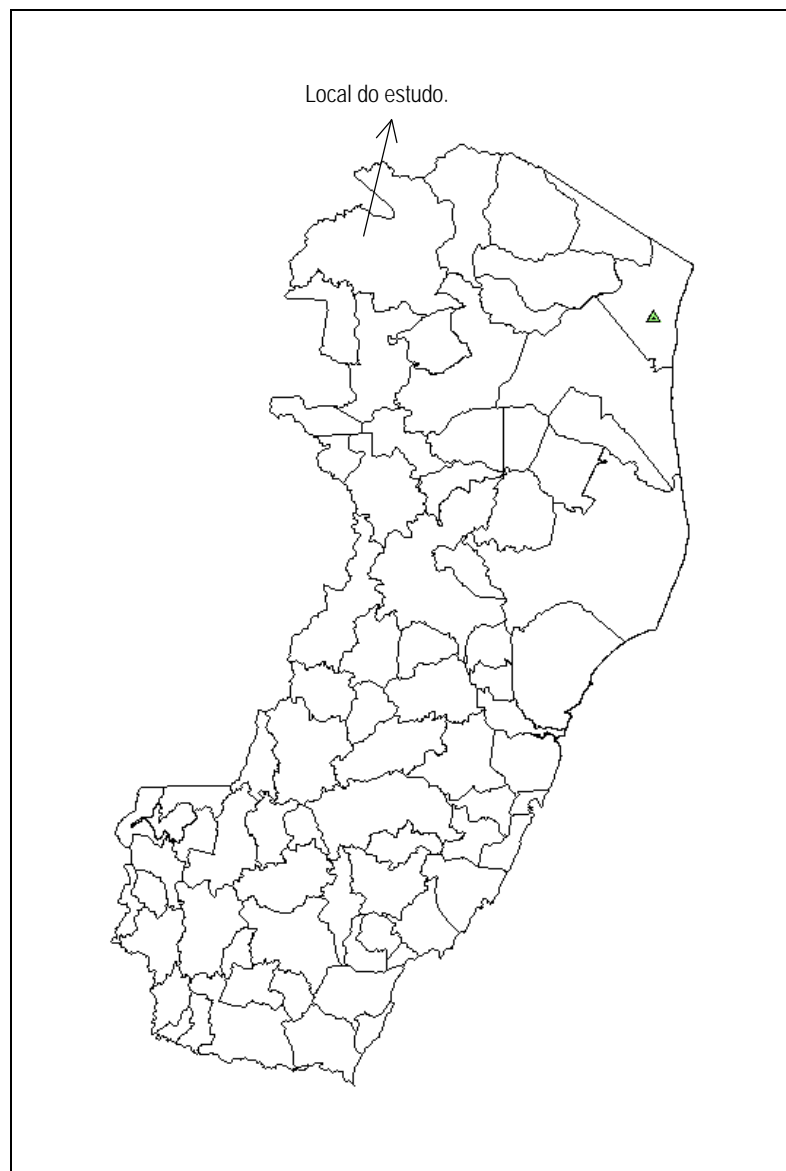


Figura 5 – Localização geográfica da área de estudo.



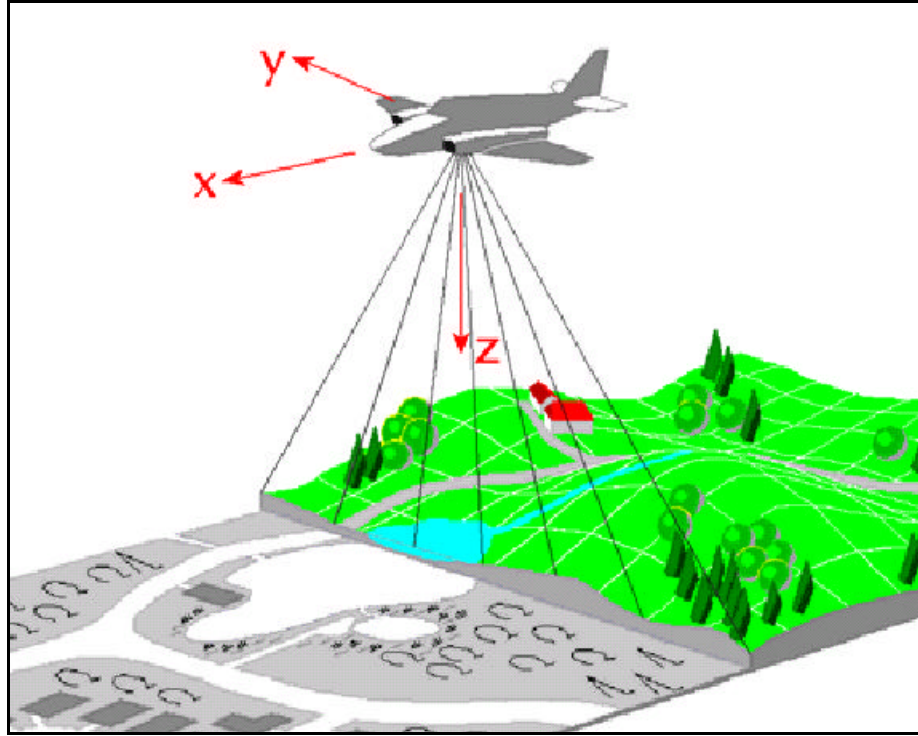
Figura 6 – Foto aérea da área do experimento.

3.2. Configuração operacional do *Lidar*

O sistema de perfilamento a laser, *Lidar* (*Light Detection and Ranging*), cobriu uma área de 305,69 ha. A aeronave efetuou o levantamento, sobrevoando a área a uma altura média de 1.000 m. O equipamento utilizado, um modelo ALTM 2050, cujo laser tinha o comprimento de onda de 1.024 nm e teve a largura da faixa coberta pela varredura de 650 m. A configuração do sensor e altura de vôo da aeronave permitiram ao estudo uma acurácia horizontal de 50 cm e na vertical de 15 cm.

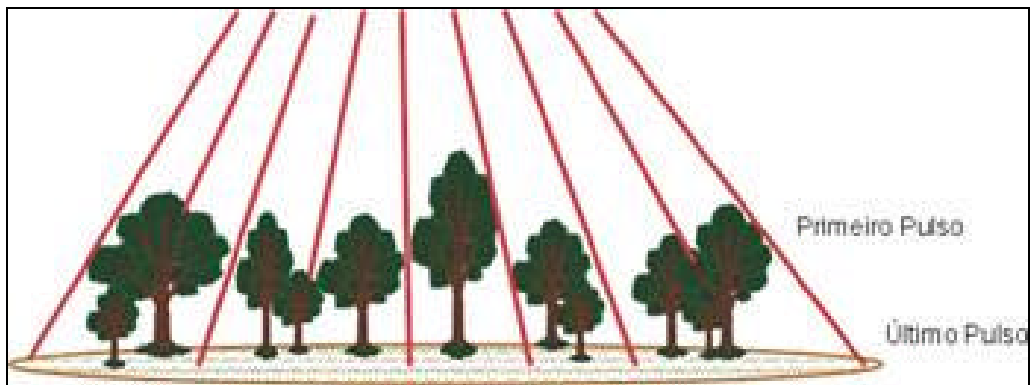
Os dados brutos gerados pelo *Lidar* são os pontos de coordenadas x, y, com a cota (z) refletida dos objetos localizados na área de cobertura (Figuras 7 e 8).

O sistema registrou o primeiro e último pulso laser refletido dos objetos localizados na superfície. Este processamento foi efetuado pela LACTEC, empresa responsável pelo levantamento *Lidar*.



Fonte: KATZENBEISSER (2004)

Figura 7 – Princípio do levantamento aerotransportado pelo Sistema Laser Scanning.



Fonte: LIDAR (2003)

Figura 8 – Sistema de varredura do Lidar, exibindo o feixe de luz laser atingindo o objeto (árvore).

3.3. Estimativa da altura total (Ht) de plantações de eucalipto a partir de dados obtidos pelo sensor *Lidar*

Nesta etapa do trabalho, procurou-se avaliar a exatidão da altura total *Lidar* (Ht_{lidar}), comparando-a à altura total medida no campo (Ht_{obs}), diretamente por uma trena, e a medida indiretamente por um hipsômetro Suunto (Ht_{Suunto}), conforme metodologia descrita a seguir.

3.3.1. Medição da altura total no campo (Ht_{obs})

No primeiro levantamento de campo, em cada parcela, mediu-se a altura total (Ht_{Suunto}) de todas as árvores, utilizando um Suunto, em metros. Em seguida, derrubaram-se duas árvores e mediram-se suas alturas totais (Ht_{obs}), utilizando uma trena, em metros.

De modo a evitar julgamentos pessoais na localização da árvore e posterior determinação de sua altura total (Ht), fez-se um segundo levantamento de campo acompanhado pelo estudante de mestrado, nos dias 30-09-2004 e 01-10-2004. Neste levantamento, buscou-se localizar o centro das parcelas, as árvores medidas e principalmente as árvores abatidas em cada parcela. Para isto, georreferenciou-se o centro das parcelas encontradas e suas árvores abatidas, utilizando-se um GPS topográfico (DGPS, precisão submétrica). Na segunda ida a campo, localizou-se e georreferenciou-se o centro de vinte e quatro (24) parcelas de 360 m² e suas respectivas árvores abatidas (duas por parcela).

3.3.2. Estimativa da altura total de árvores individuais com *Lidar* (Ht_{lidar})

De posse dos dados registrados pelo *Lidar* e utilizando os pontos georreferenciados pelo DGPS, localizou-se o centro das vinte e quatro (24) parcelas e suas respectivas árvores abatidas (duas por parcela), na base de dados.

Conhecendo o espaçamento do povoamento, localizando as árvores abatidas e o centro da parcela, determinou-se a área de ocupação de cada árvore. Todos os pontos refletidos da área de ocupação da árvore abatida seriam refletidos do terreno (chão) ou da árvore (folhas, galhos e tronco).

A delimitação da área de ocupação iniciou-se a partir da localização geográfica das árvores abatidas, obtidas (arvabat) pelo DGPS; em seguida, traçou uma linha imaginária ligando as duas árvores (filt_abat). Outra linha partindo do centro da parcela em direção ao centro da primeira linha imaginária foi traçada (filt_abat). As linhas imaginárias determinaram os alinhamentos do plantio na linha e na entrelinha (Figura 9). Seguindo os alinhamentos das linhas imaginárias, delimitou-se o polígono de ocupação da árvore abatida, o qual seguiu o espaçamento do plantio de 3 m x 3 m e teve como centro o ponto determinado pela árvore abatida. Após a delimitação, selecionam-se os pontos de cota máxima e mínima (Figura 10).

Determinou-se a altura total *Lidar* (Ht_{lidar}) de cada árvore abatida, pela diferença entre o maior e o menor valor de cota dos pontos localizados na sua respectiva área de ocupação.

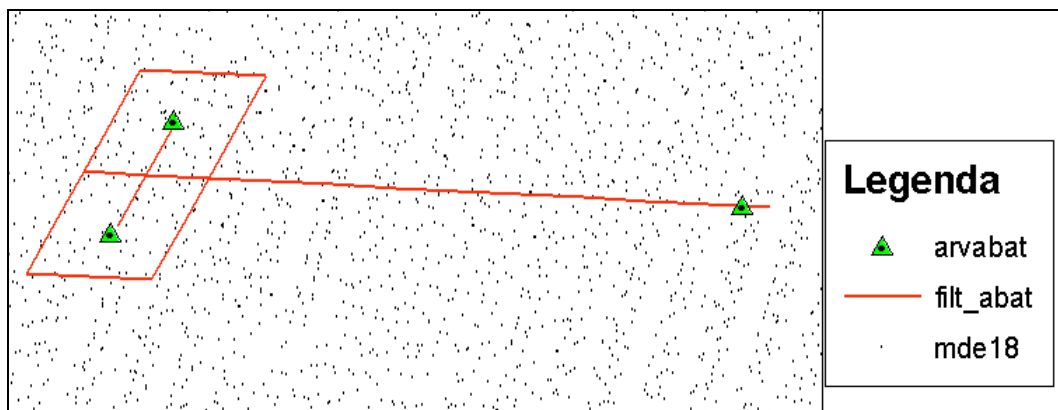


Figura 9 – O ponto triangular (arvabat) representam as árvores abatidas e o centro da parcela. Observa-se uma linha imaginária partindo de uma árvore à outra e a outra linha partindo do centro da parcela. O retângulo representa a área de ocupação de uma árvore. Ao fundo vê-se uma nuvem de pontos (mde 18) capturados pelo sensor.

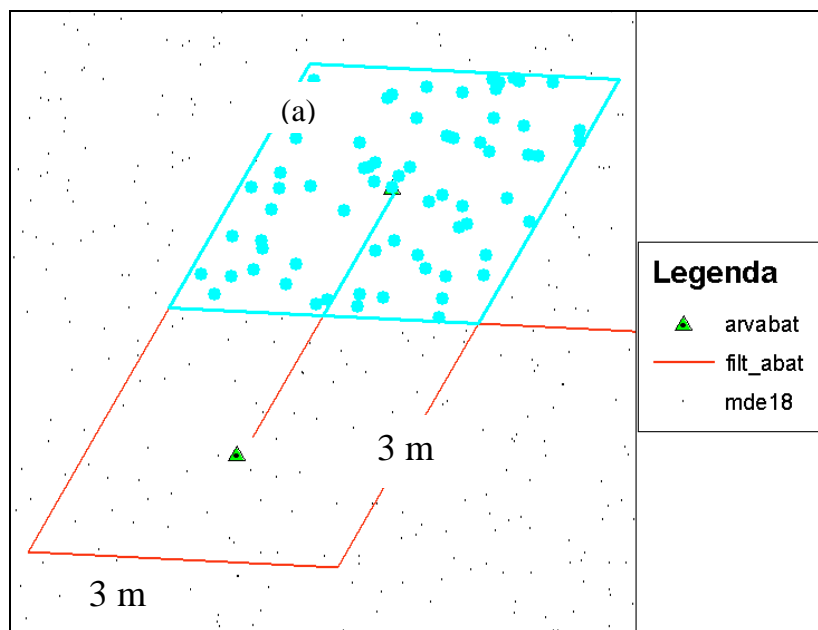


Figura 10 – Apresenta uma ampliação da Figura 9. (a) Este retângulo mostra os pontos selecionados para consulta de seus respectivos valores de cota.

3.3.3. Avaliação da exatidão da altura total *Lidar* (Ht_{lidar})

Para avaliar a exatidão da altura total (Ht_{lidar}) obtida pelo sensor em povoamentos de eucalipto, aplicou-se o teste t para duas amostras dependentes. Assim, comparou-se a altura total medida diretamente nas árvores abatidas (Ht_{obs}), a altura total medida indiretamente pelo hipsômetro Suunto (Ht_{Suunto}), com a altura total medida pelo sensor *Lidar* (Ht_{lidar}).

3.4. Utilização de dados do sensor *Lidar* para a classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto

Nesta etapa do trabalho, procurou-se avaliar o uso da altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$), para classificação da capacidade produtiva em povoamentos de eucalipto, conforme metodologia descrita nos itens que se seguem.

3.4.1. Medição da altura dominante média no campo ($\bar{H}d_{obs}$)

Uma vez escolhida a área do estudo, procurou-se conhecer a estrutura hipsométrica do povoamento em cada idade. Para isso, no primeiro levantamento de campo, foram lançadas sistematicamente 57 parcelas circulares: 52 com 360 m² e 5 com 507 m², estas últimas instaladas em talhões desbastados (Figura 11). O centro de cada parcela foi georreferenciado com GPS de navegação, para posterior identificação da parcela na base de dados laser.

Mediu-se a circunferência das árvores que se encontravam nas parcelas, a 1,30 m de altura (*cap*) com uma fita métrica, e sua altura total utilizando um Suunto (*Ht_{Suunto}*).

O primeiro levantamento de campo, feito por uma equipe contratada pela Aracruz Celulose S/A, foi executado no período de 23-05 a 29-05-2003.

Utilizando os dados de campo (*Ht_{Suunto}* e *cap*), calculou-se a altura dominante média ($\bar{H}d_{obs}$) por parcela. Esta foi definida pela altura total (*Ht_{Suunto}*) média, das cinco árvores de maiores *cap* encontradas em cada parcela.



Figura 11 – Distribuição das parcelas no campo, representadas pelos círculos.

3.4.2. Estimativa da altura total média com dados *Lidar* (\overline{Ht}_{lidar})

É importante ressaltar que em 9 m² (3 m x 3m), na área de ocupação de uma árvore, foram capturados pelo sensor *Lidar* em torno de sessenta (60) pontos de coordenadas (x, y, z), refletidos do solo e da árvore. Estima-se que na área em estudo tenham sido registrados vinte milhões e meio (20.500.000) de pontos de coordenadas. Por isso, buscou-se classificar automaticamente cada árvore, com a sua localização geográfica e respectiva altura total (*Ht*). Na classificação automática, utilizou-se o software ArcGIS e sua extensão *Spatial Analyst* para esta classificação.

A Figura 12 (a) e (b) apresenta o perfil de uma parcela estudada, e a Figura 13 representa visão tridimensional da parcela.

Antes de iniciar a classificação automática, efetuou-se a rotação da base de dados, de modo a coincidir com o alinhamento do plantio (Figura 14). Desta forma, garantiu-se uma seleção correta dos pontos refletidos do terreno (chão) ou da árvore (folhas, galhos e tronco), na sua área de ocupação (Figura 15).

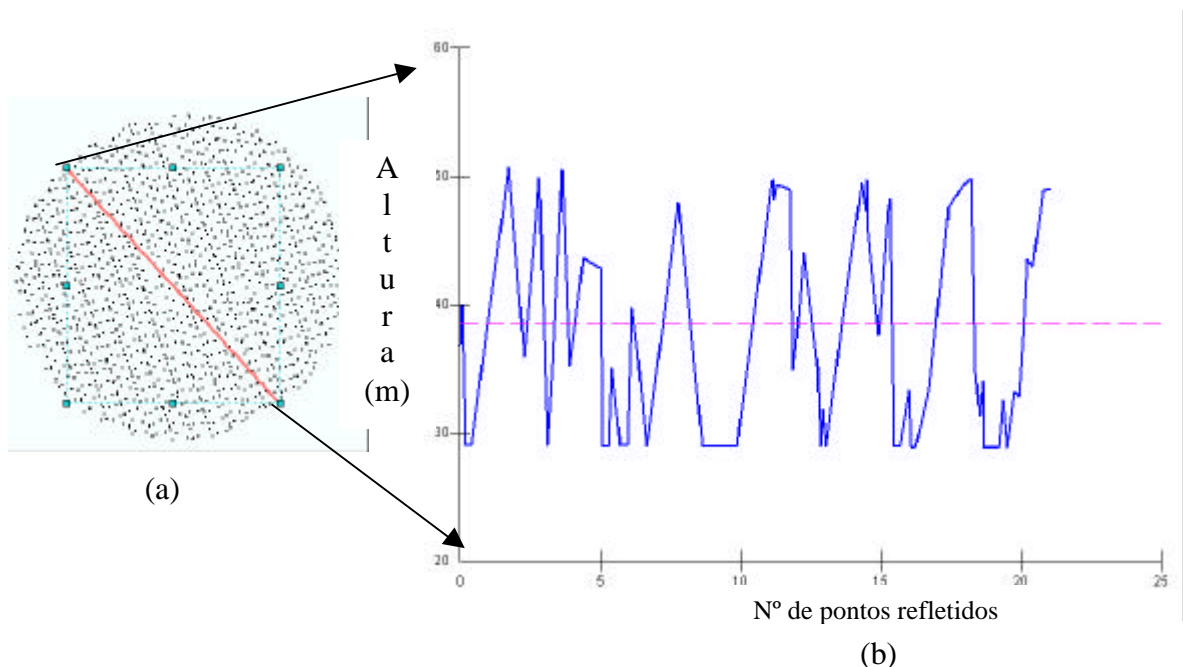


Figura 12 – (a) Mostra a nuvem de pontos da parcela e o corte representado pela linha, que deram origem ao gráfico (b). (b) Representa o perfil vertical da parcela estudada.

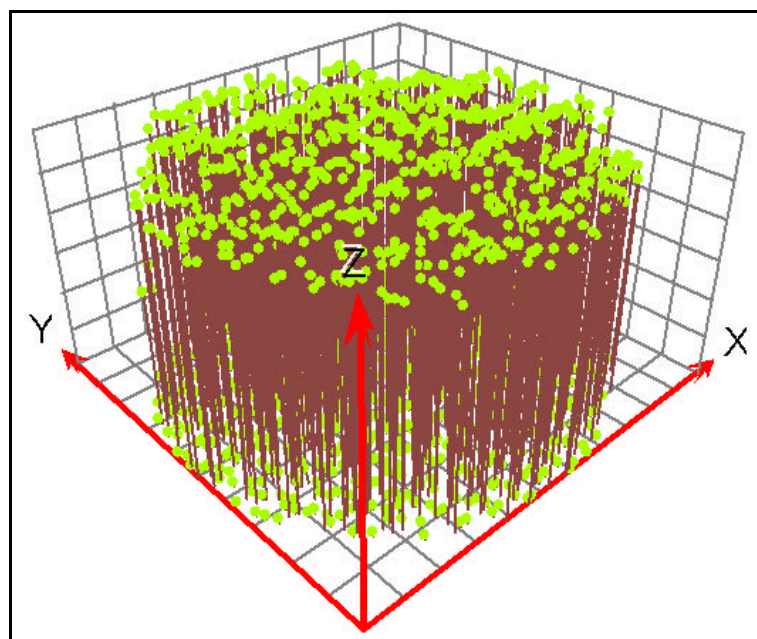


Figura 13 – Representação tridimensional dos pontos da parcela.

O método utilizado no presente trabalho para classificação automática, baseou-se em estruturas celulares ou *grids*; por isso, converteu-se o arquivo que estava no modelo vetorial (feição do tipo ponto) para o modelo *raster*, com o tamanho da célula (*grid*) de 3 m x 3 m, passando pelas seguintes etapas:

- rasterizou-se a massa de dados (feição do tipo ponto), adotando-se um tamanho de célula de 0,25 m;
- reamostrou-se o grid, adotando-se um novo tamanho de célula de 3 m:
 - assumindo-se o valor mínimo de todas as células (terreno);
 - assumindo-se o valor máximo de todas as células (copas);
- calculou-se a diferença entre os grids máximo e mínimo;
- refez-se a rotação do grid, retornando-o à sua orientação original;
- converteu-se o grid resultante para o formato vetorial (feição do tipo ponto):
 - assume-se que cada ponto representa a localização de uma árvore, com sua respectiva altura total (*Ht*).

As informações calculadas e armazenadas até obter a feição tipo ponto, representando as árvores e suas respectivas altura totais (*Ht*) foram:

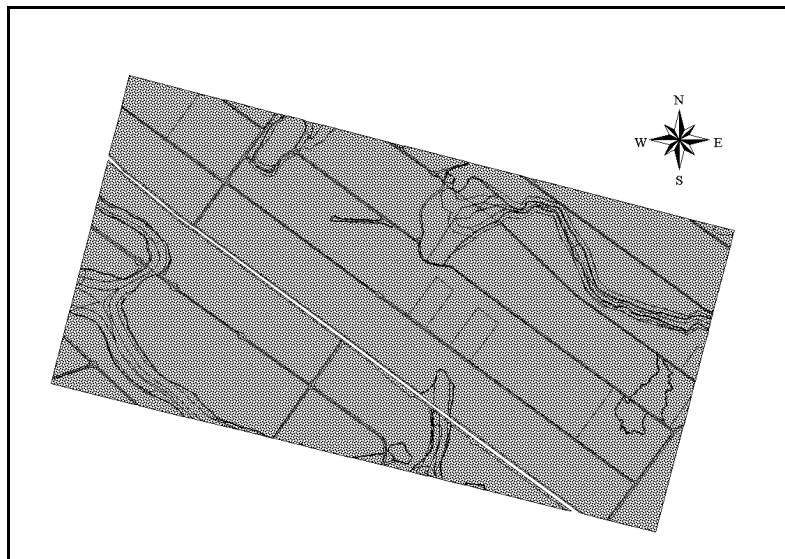


Figura 14 – Representação do alinhamento dos dados brutos *Lidar* no sentido leste-oeste, após levantamento.

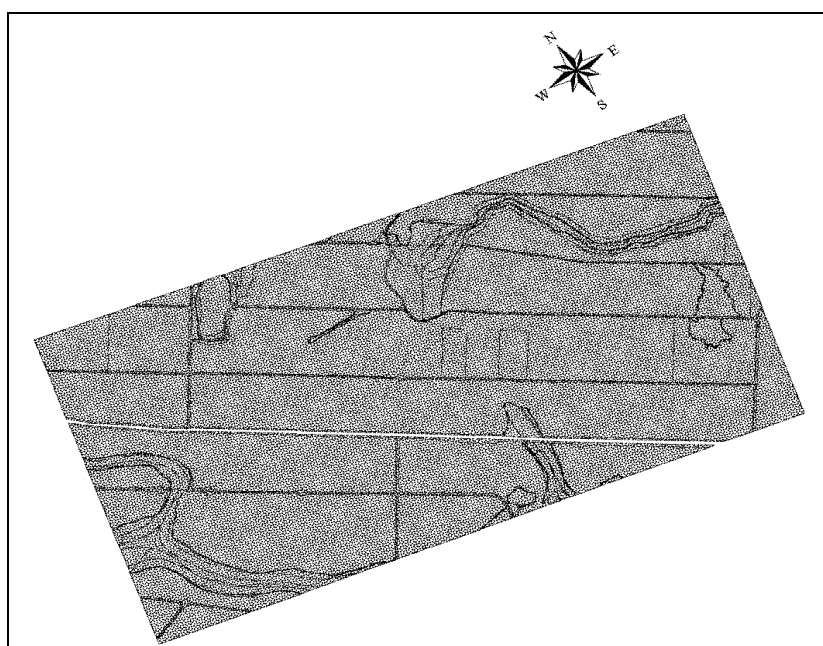


Figura 15 – Representação dos dados brutos re-alinhados na direção sudeste-noroeste, seguindo o alinhamento das árvores de eucalipto.

MDE025 – Arquivo modelo *raster* com *grid* de 0,25 m x 0,25 m, tendo como valor da célula a cota z, resultante da conversão do arquivo re-alinhado formato vetorial;

MDE3MAX – Arquivo *raster* com *grid* de 3 m x 3 m, tendo como valor da célula a cota máxima, ou seja, dentre as 144 células (0,25 m x 0,25 m cada) do arquivo *grid* de entrada, selecionaram-se aqueles de maior cota, e o novo arquivo *grid* (3 m x 3 m) assumiu este valor;

MDE3MIN – Arquivo *raster* com *grid* de 3 m x 3 m, tendo como valor da célula a cota mínima, ou seja, dentre as 144 células (0,25 m x 0,25 m cada) do arquivo *grid* de entrada selecionou-se aquela de menor cota, e o novo arquivo *grid* (3 m x 3 m) assumiu este valor;

MDE3DIF – Arquivo *raster* com *grid* de 3 m x 3 m, tendo como valor da célula a diferença entre “MDE3MAX e MDE3MIN”, ou seja, o valor de cada célula é a altura total (H_t) de sua respectiva árvore;

PTOARV – Concluindo o processamento, converteu-se o arquivo *raster* MDE3DIF, para o formato vetorial (feição tipo ponto), tendo a árvore representada por um ponto, que tem como um de seus atributos o valor da altura total (H_t) (Figuras 16 e 17).

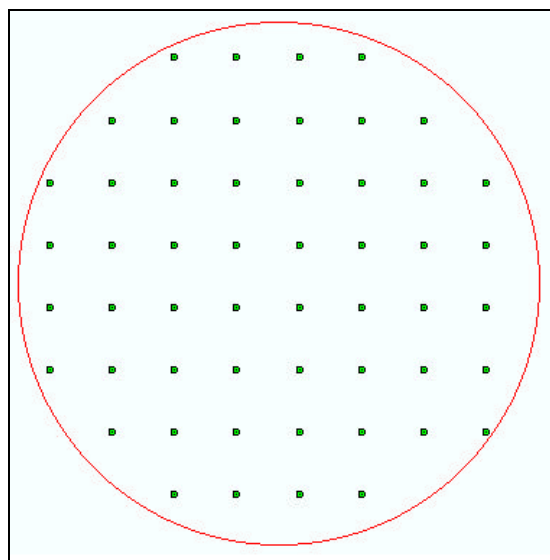


Figura 16 – Parcela circular de 360 m² e suas respectivas árvores amostradas.

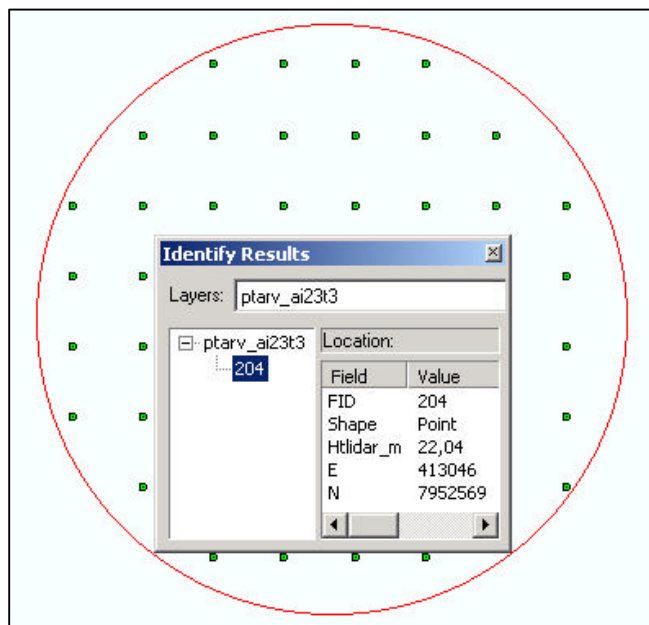


Figura 17 – Representação de uma amostra de cada árvore, sua coordenada E, N e altura total *Lidar* (*Ht Lidar*) em metros.

Após a classificação automática, as árvores encontravam-se georreferenciadas, com isso, foi possível identifica-las em cada parcela e suas respectivas Altura total (*Ht*). Desta forma, para concluir, calculou-se a média das Alturas totais *Lidar* por parcela ($\bar{H}t_{lidar}$).

3.4.3. Comparação entre as alturas totais médias ($\bar{H}t_{lidar}$) versus ($\bar{H}d_{obs}$)

A comparação entre a altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$) e a altura dominante média ($\bar{H}d_{obs}$) foi realizada mediante análise do coeficiente de correlação entre as alturas, análise gráfica e teste “F” de Graybill (GRAYBILL, 1976).

Para obter a estatística F, foi ajustado o modelo de regressão linear simples $Y = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 X + \mathbf{e}$ (1), em que: Y = altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$); β_0 e β_1 = parâmetros do modelo; X = altura dominante média ($\bar{H}d_{obs}$) e ϵ = erro aleatório, $\mathbf{e} \sim NID(0, \mathbf{s}^2)$. A igualdade entre Y e X foi verificada, testando-se a hipótese

$$H_0: \begin{bmatrix} \mathbf{b}_0 \\ \mathbf{b}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; H_a: \text{n\~{a}o } H_0$$

Sob normalidade, a estatística $F(H_0) = \frac{(\mathbf{b} - \mathbf{q})'(X'X)^{-1}(\mathbf{b} - \mathbf{q})}{2QM_{res}} \sim F_a(2; n - 2)$

foi utilizada para avaliar a hipótese H_0 , a 5%, sendo $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_0 \\ \mathbf{b}_1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ e $QM_{res} =$ estimativa da variância residual do modelo linear simples $Y = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 X + \mathbf{e}$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estimativa da altura total *Lidar* (Ht_{lidar})

A altura total obtida pelo sensor lidar (Ht_{lidar}) e as alturas totais medidas no campo pelo Suunto (Ht_{Suunto}) e com uma trena (Ht_{obs}) são mostradas no Quadro 1. Observa-se que mais de 50% das alturas totais medidas pelo sensor lidar (Ht_{lidar}), apresentaram uma diferença em relação à altura total observada no campo (Ht_{obs}) inferior a um metro. Verifica-se, nas parcelas que obtiveram grandes diferenças absolutas, que uma das árvores dessas parcelas tiveram uma diferença inferior a 0,5 m.

Observa-se tendência de que os maiores erros de estimativas pelo sensor *Lidar* ocorressem sempre que uma das árvores amostradas fosse suprimida em relação à outra. Essa diferença foi superestimada pela metodologia *Lidar* que teve resultado semelhante ao encontrado por NILSSON (1996) e FRIEDLAENDER e KOCH (2000).

As médias estimadas, $Ht_{Obs} = 25,1$; $Ht_{Suunto} = 25,4$ e $Ht_{Lidar} = 25,8$ m, não diferiram entre si, pelo teste t para amostras dependentes, a 1% de probabilidade.

Quadro 1 – Alturas obtidas com *Lidar* (Ht_{lidar}), alturas observadas (Ht_{Obs}), alturas obtidas com um Suunto (Ht_{Suunto}) e respectivas diferenças

Obs.	Parcela	Ht_{Suunto} (m)	Ht_{lidar} (m)	Ht_{obs} (m)	Dif (m) = ($Ht_{lidar} - Ht_{obs}$)	Diferença (%)
1	10	25,0	23,1	24,7	-1,6	-6,60
2	10	23,5	22,9	23,0	-0,1	-0,61
3	12	27,5	25,3	26,3	-1,0	-3,99
4	12	26,5	24,8	25,5	-0,7	-2,59
5	13	30,0	28,5	29,7	-1,2	-4,01
6	13	30,0	29,1	30,0	-0,9	-3,10
7	17	26,5	28,8	26,2	2,6	9,73
8	17	30,0	28,5	29,8	-1,3	-4,43
9	18	29,5	27,9	28,7	-0,8	-2,79
10	18	30,0	28,5	30,3	-1,8	-6,01
11	20	30,5	26,9	27,5	-0,6	-2,04
12	22	24,5	26,5	24,3	2,2	8,93
13	22	29,5	27,4	29,5	-2,1	-7,15
14	23	30,0	30,2	30,7	-0,5	-1,79
15	23	21,0	28,8	21,0	7,8	37,29
16	27	29,0	27,7	28,7	-1,0	-3,52
17	27	29,0	27,9	28,9	-1,0	-3,43
18	28	23,5	23,3	23,8	-0,5	-2,23
19	28	19,0	23,1	19,5	3,6	18,26
20	29	26,5	27,0	26,5	0,5	1,92
21	29	28,0	24,5	27,5	-3,0	-11,02
22	32	16,5	16,9	16,4	0,5	3,48
23	32	18,5	20,6	18,4	2,2	11,85
24	33	23,0	26,4	23,5	2,9	12,43
25	33	25,0	22,8	25,3	-2,5	-9,76
26	36	14,5	24,9	14,5	10,4	71,59
27	36	25,0	25,5	25,3	0,2	0,67
28	37	19,5	20,2	19,4	0,8	4,28
29	37	23,5	22,3	23,1	-0,8	-3,59
30	40	26,0	24,8	25,6	-0,8	-3,05
31	40	26,0	25,3	25,4	-0,1	-0,55
32	41	25,5	24,9	25,1	-0,2	-0,96
33	41	22,0	24,7	21,7	3,0	13,92
34	43	26,5	26,1	26,6	-0,5	-1,99
35	43	27,0	26,0	27,5	-1,5	-5,35
36	44	25,0	25,7	24,4	1,3	5,16
37	44	29,0	26,6	28,1	-1,5	-5,27
38	47	28,5	28,8	28,5	0,3	1,09
39	47	18,5	28,5	18,1	10,4	57,62
40	48	15,7	23,4	16,0	7,4	46,19
41	48	23,0	23,2	23,5	-0,3	-1,15
42	51	27,5	26,5	27,1	-0,6	-2,10
43	51	28,0	26,2	27,4	-1,2	-4,45
44	55	24,0	25,1	24,7	0,4	1,54
45	56	31,0	30,5	30,5	0,0	-0,07
46	56	29,0	29,3	28,4	0,9	3,03

* As parcelas destacadas em vermelho tiveram uma de suas árvores com erros inferiores a 0,5 m e superiores a 3,0 m.

Conforme Quadro 2, as medidas da altura total observada no campo (Ht_{Obs}) tiveram uma média de 25,1 m, desvio-padrão de 4,1 m e coeficiente de variação de 16,27%. No caso da altura total medida pelo Suunto (Ht_{Suunto}), tiveram uma média de 25,4 m, com um desvio-padrão de 4,2 m e um coeficiente de variação de 16,71%. Já altura total obtida pelo sensor *Lidar* (Ht_{Lidar}) teve uma média de 25,8 m, um desvio-padrão de 2,8 m e um coeficiente de variação de 10,78%.

Comparando os métodos indiretos de medida da altura total (Ht_{Lidar} e Ht_{Suunto}) ao método direto, a altura total medida no campo com uma trena (Ht_{Obs}), verifica-se que a (Ht_{Obs}) e (Ht_{Suunto}) apresentam médias, desvios (S) e coeficiente de variação (CV) muito próximos. Observa-se que a (Ht_{Obs}) e (Ht_{Lidar}) apresentam médias próximas, porém o desvio (Ht_{Obs}) é quase o dobro da (Ht_{Lidar}), da mesma forma o coeficiente de variação (CV), que é quase 5% maior.

Quadro 2 – Resultado estatístico da altura total (Ht) de árvores individuais

Método	Média (m)	Desvio (S) (m)	CV(%)
Ht_{Obs}	25,1	4,1	16,27
Ht_{Suunto}	25,4	4,2	16,71
Ht_{Lidar}	25,8	2,8	10,78

Observando a altura total *Lidar* (Ht_{Lidar}) e a altura total observada no campo (Ht_{Obs}), na Figura 18, verifica-se que nas menores alturas há uma tendência de superestimação pelo *Lidar*. Foi também nas menores alturas que ocorreram as maiores diferenças.

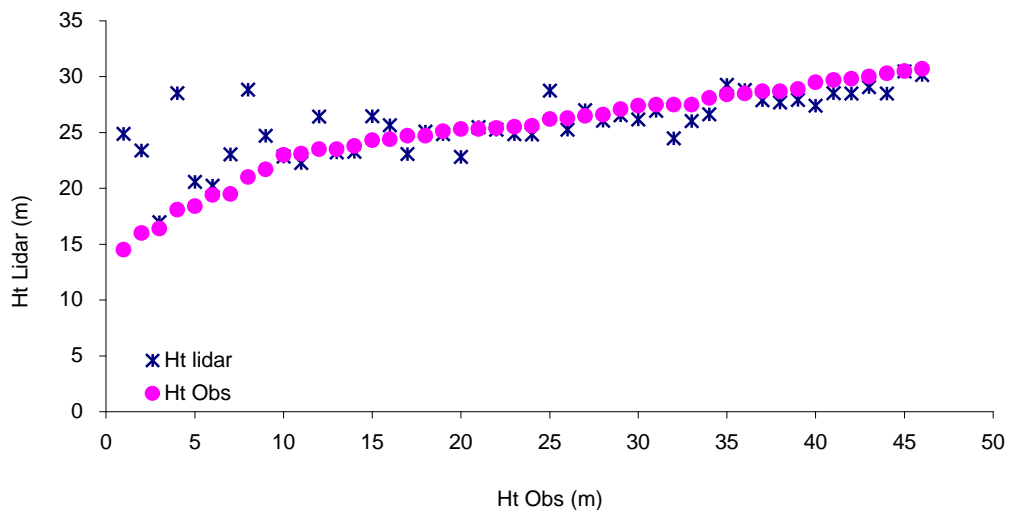


Figura 18 – Comportamento da Ht_{lidar} em relação a Ht_{Obs} .

Analisando-se a altura total *Lidar* (Ht_{lidar}) e a altura total Suunto (Ht_{Suunto}), na Figura 19, verifica-se que nas menores alturas há uma tendência de superestimação pelo *Lidar*. O resultado é semelhante ao encontrado na Figura 18, demonstrando que Ht_{Obs} tem um comportamento semelhante ao de Ht_{Suunto} .

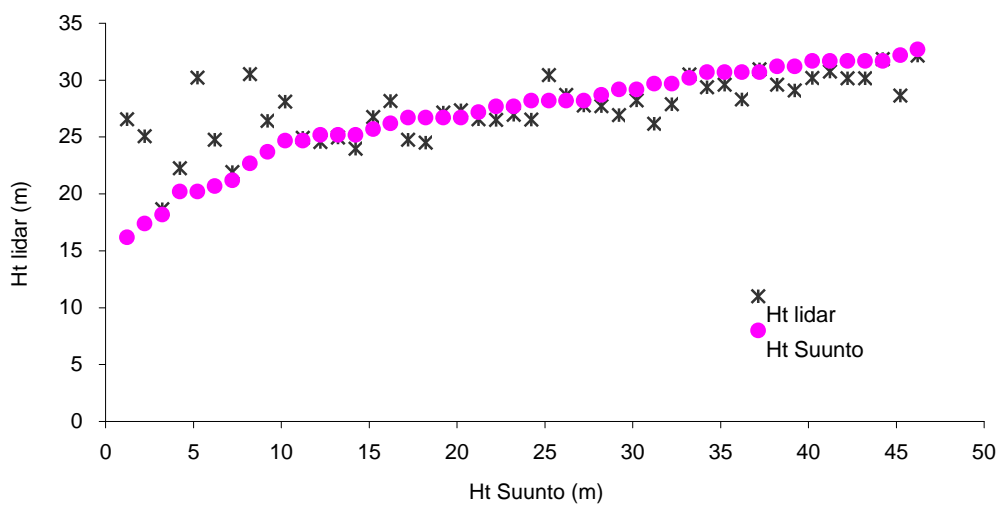


Figura 19 – Comportamento da Ht_{lidar} em relação a Ht_{Suunto} .

4.2. Utilização de dados *Lidar* para a classificação da capacidade produtiva

O coeficiente de correlação entre a altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$) e a altura dominante média ($\bar{H}d_{obs}$), foi 0,9533 e a hipótese de identidade entre os dois vetores alturas foi rejeitada a 1% de probabilidade ($F(H_0) = 18,2572^*$), conforme Quadro 3. Apesar dessa significância do teste F, ao analisar as tendências (Figuras 20 e 21), verifica-se uma consistência entre os métodos.

Quadro 3 – Estimativas do coeficiente de correlação e teste “F” de GRAYBILL para os parâmetros altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$) e a altura dominante média ($\bar{H}d_{obs}$)

Métodos	Correlação (r_{xy})	F (H_0)
($\bar{H}t_{lidar}$) versus ($\bar{H}d_{obs}$)	0,9533	18,2572*

* = significativo a 1% de probabilidade.

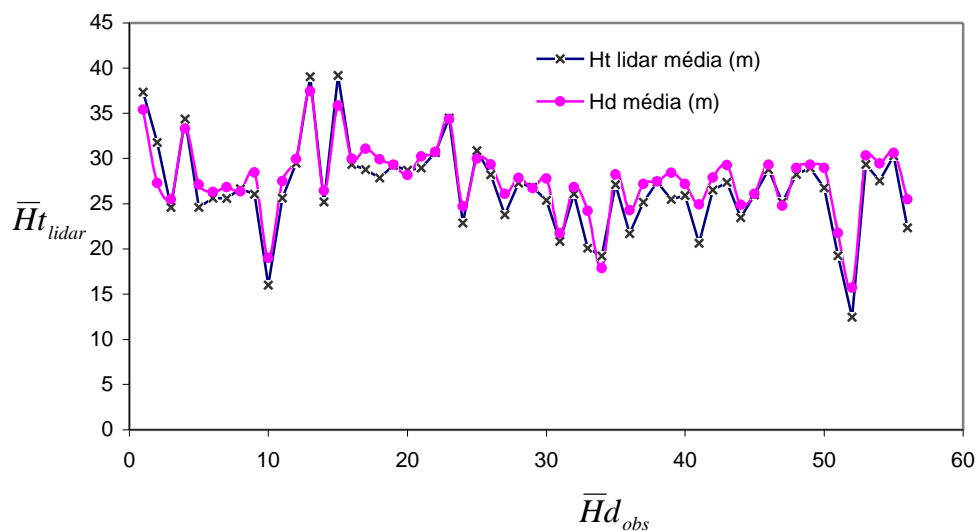


Figura 20 – A altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$) e a altura dominante média ($\bar{H}d_{obs}$).

Observando o gráfico da Figura 21, nota-se que a altura total média *Lidar* (\overline{Ht}_{lidar}) e a altura dominante média (\overline{Hd}_{obs}) adotam uma mesma disposição em relação a idade. Do ponto de vista da mensuração florestal, este fato indica a possibilidade de uso de informações de altura obtidas com o *Lidar* em estudos de classificação da capacidade produtiva. Devido a limitação dos dados, esta possibilidade não pode ser comprovada neste estudo.

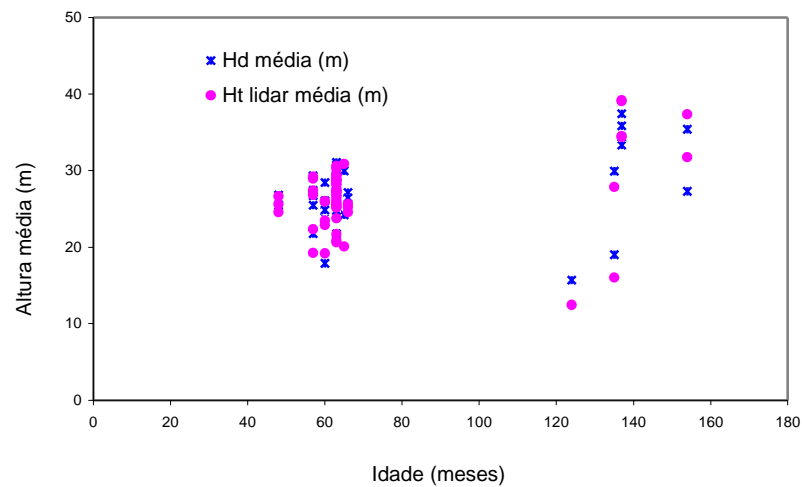


Figura 21 – Comportamento da altura total média *Lidar* (\overline{Ht}_{lidar}) e a altura dominante média (\overline{Hd}_{obs}), em relação à idade.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o potencial do sistema *Lidar* (*Light Detection and Ranging*) na medição de altura total (Ht) de árvores individuais em povoamentos de eucalipto. Para o presente estudo, selecionou-se uma área de aproximadamente 306 ha, com plantios comerciais de eucalipto, da empresa Aracruz Celulose S/A, localizada na região de São Mateus, no norte do Espírito Santo, latitude 18° 05' Sul, longitude 39° 30' Oeste de Greenwich. O sistema *Lidar* foi instalado num avião que sobrevoou a área a uma altura média de 1.000 m, com a largura da faixa de varredura de 650 m, permitindo uma acurácia horizontal de 50 cm e vertical de 15 cm.

O objetivo geral do estudo foi elaborar uma metodologia para extração automática de altura total (Ht) de árvores individuais em povoamento de eucalipto, com dados levantados pelo sensor *Lidar* (*Light Detection and Ranging*). Como objetivos específicos, buscou-se estimar a altura total (Ht) de árvores individuais em plantios de eucalipto, com dados *Lidar*, e utilizar a altura total média *Lidar* (\bar{Ht}_{lidar}) para classificação da capacidade produtiva.

Na estimativa da altura total de árvores individuais (Ht_{Lidar}) com dados *Lidar*, foram medidas no campo 46 árvores em 24 parcelas diferentes. Aplicou-se o teste t para duas amostras dependentes, e, como resultado, a Ht_{Lidar} , a Ht_{Obs} e a Ht_{Suunto} , com médias 25,8m, 25,1m e 25,4m, respectivamente, não diferiram entre si a 1% de probabilidade. Avaliando valores pontuais, observa-se que apenas quatro pontos tiveram uma diferença superior a 3,0 m, e estas superestimativas pelo *Lidar* ocorreram sempre

que a árvore amostrada era um indivíduo suprimido. Essa diferença pode ser atribuída a uma falha na identificação de árvores suprimidas próximas a árvores dominantes, ou mesmo a erro de medição no campo.

Para classificação da capacidade produtiva utilizando a altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$), foram lançadas sistematicamente 57 parcelas circulares: 52 com 360 m² e 5 com 507 m², estas últimas instaladas em talhões desbastados. Em cada parcela, mediu-se a altura dominante média ($\bar{H}d_{obs}$). Por meio de uma classificação automática, calculou-se a altura total média *Lidar* ($\bar{H}t_{lidar}$) por parcela. O coeficiente de correlação entre a ($\bar{H}t_{lidar}$) e ($\bar{H}d_{obs}$) foi 0,9533, e a hipótese de identidade entre os dois vetores alturas foi rejeitada em nível de 1% de probabilidade ($F(H_0) = 18,2572^*$). Apesar dessa significância do teste F, ao analisar as tendências (Figuras 20 e 21), verifica-se uma consistência entre os métodos. Do ponto de vista da mensuração florestal, este fato indica a possibilidade de uso de informações de altura obtidas com o *Lidar* em estudos de classificação da capacidade produtiva. Considerando-se a limitação dos dados, esta possibilidade não pôde ser comprovada neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALDOCCHI, D., COLLINEAU, S. The physical nature solar radiation in heterogeneous canopies: Spatial and temporal attributes. In M.M. Caldwell and R. W. Pearcy, eds Exploration of Environmental heterogeneity by plants. **Academic Press**, New York, 1994.

BLAIR, J. B., COYLE, D. B., BUFTON, J. L., HARDING, D. J. Optimization of an airborne laser altimeter for remote sensing of vegetation and tree canopies. **In Proceedings of IGARSS'94**, Pasadena, CA, v. II, p. 939–941, 1994.

BLAIR, J. B., HOFTON, M. A.. Modeling laser altimeter return waveforms over complex vegetation using high-resolution elevation data. **Geophysical Research Letters**, v. 26, p.2509 – 2512, 1999.

BLAIR, J. B., RABINE, D. L., HOFTON, M. A. The laser vegetation imaging sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation, and topography. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 54, p. 115-22, 1999.

BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a Laser: comparação com métodos fotogramétricos**. Curitiba. Paraná. 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas Experimentais. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. Levantamento exploratório dos solos da região de influência da Cia. Vale do Rio Doce. Rio de Janeiro, 1970. 148p. +mapa. (Brasil, Ministério da Agricultura-EPE-EPFS, Boletim Técnico, 13).

BUFTON, J. L., GARVIN, J. B., CAVANAUGH, J. F., RAMOS-IZQUIERDO, L., CLEM, T. D., KRABILL, W. B., (1991). Airborne lidar for profiling of surface topography. **Opt. Eng.** v. 30, p. 72–78, 1991.

CAMPOS, J.C.C., LEITE, H.G., LELIS, V.S.L. Classificação da capacidade produtiva de *Eucalyptus camaldulensis* na região de João Pinheiro, em Minas Gerais. In: SIF. **Mensuração florestal**. Viçosa, MG: 1991, p. 1-7.

CARMEAN, W. H., Forest site quality evaluation in the United States. **Adv. Agron.**, n.27, p.:209-269, 1975.

CHEN, X., VIERLING, L., ROWELL, E., DeFELICE, T. Using lidar and effective LAI data to evaluate IKONOS and Landsat 7 ETM+ vegetation cover estimates in a ponderosa pine forest. **Remote Sensing and Environmental**, v.91, p.14-26. 2004

CLUTTER, J. L. FORTSON, J.C. PIENAAR, L.U. BRISTER, G.H., BAILEY, R.L. **Timber management : a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.

DUBAYAH, R. O., DRAKE, J. B. Lidar Remote Sensing for Forestry Applications, 2001.

DUBAYAH, R., BLAIR, J.B., BUFTON, J.L.CLARK, D.B., JAJA., KNOX, R.G., LUTHCHES, S.B., PRINCE, S., WEISHAMPEL, J.F. The vegetation canopy Lidar mission. Land satellite Information in the Next Decade II: Sources and Applications. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD. Pages 100 – 112, 1997.

DUBAYAH, R.O., KNOX,R.G., HOFTON,M.A.,BLAIR, J.B., DRAKE, J.B.Land surface characterization using lidar remote sensing. In M. Hill and R. Aspinall, eds. Spatial Information for Land Use Management. International Publishers Direct, Singapore, 2000.

FRIEDLAENDER, H., KOCH, B. **First experience in the application of laser scanner data for the assessment of vertical and horizontal forest structures**, 2000.

GARVIN, J.B., BUFTON, J., BLAIR, J.B., HARDING, D., LUTHCKE, S., FRAWLEY, J., ROWLANDS, D. Observations of the Earth's topography from the Shuttle Laser Altimeter SLA : laser-pulse echo-recovery measurements of terrestrial surfaces. Phys. Chem. Earth 23 9–10, 1053–1068, 1998.

GRAYBILL, F.A. **Theory and application of the linear model**. Massa chussets: Ouxburg Press, 1976. 704p.

GREY, D.C. Site classification of forestry land. **South Afr. For. J.**, n. 138, p. 35-37, 1985a.

GREY, D.C. Site classification-necessary or luxury? **South Afr. For J.**, n.138, p.35-37, 1985b.

HUISING, E.J., GOMES PEREIRA L.M. “Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications”. **ISPRS J. of P. & Rem. Sens.** v. 53, p. 245-261, 1998.

HYYPPIA, J., KELLE, O., LEHIKONEN, 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**, v. 39, n. 5, p. 969–975. 2001.

KAULA, W.M., SCHUBERT, G., LINGENFELTER, R.E., SJORGEN, W.L., WOLLENHAUPT, W.R. Apollo laser altimetry and inferences as to lunar structure. *Geochim. Cosmochim. Acta Suppl.* 5, 3049–3058, Proc. 5th Lunar. Sci. Conf, 1974.

KATZENBEISSER, Rolf. Calibration and data validation of a Lidar fiber scanner. Annual Conference Proceedings. ASPRS. Denver, Colorado. **Proceedings**. May 2004.

LEFSKY, M. A. Application of lidar remote sensing to the estimation of forest canopy and stand structure. **Department of Environmental Science**. University of Virginia, Charlottesville, 1997.

LEFSKY, M.A., COHEN, W.B., PARKER, G.G., HARDING, D. **Lidar Remote Sensing**. *BioScience*, v.52, n.1. 2002.

LEFSKY, M.A., HARDING, D., COHEN, W.B., PARKER, G. G., SHUGART, H.. Surface LIDAR remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of Eastern Maryland, USA, **Remote Sensing of Environment**, v. 67, p. 83-98, 1999.

MACLEAN, G. A., KRABILL, W. B. Gross merchantable timber volume estimation using an airborne Lidar system. *Can. J. Remote Sens.* 12:7–8, 1986.

MEANS, J. E., ACKER, S. A., HARDING, D. J., BLAIR, J. B., LEFSKY, M. A., COHEN, W. B., HARMON, M. E., MCKEE, W. A. Use of large-footprint scanning airborne Lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, p. 298-308, 1999.

NAESSET, E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne Lidar scanner data. *ISPRS J. Photogramm.Remote Sens.* v. 52, p. 49–56, 1997.

NELSON, R. Modeling forest canopy heights: The effects of canopy shape. **Remote Sensing of Environment**, v. 60, p. 327-334, 1997.

NICOTRA, A.B., CHAZDON, R.L., IRIARTE, S. V. B. **Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests**. *Ecology*, v. 80, p. 1908-1926, 1999.

NILSSON, M. Estimation of tree heights and stand volume using and airborne lidar system. **Remote Sensing Environ.** v. 56, p. 1-7. 1996.

PERSSON, A. Extraction of individual trees using laser radar data, Masters Thesis EX013, **Chalmers University of Technology. Göteborg**, Sweden, 28 p., 2001.

RALSTON, C.W. Evaluation of forest site productivity. In: ROMBERGER, T. A., MIKOLA, P. (Eds.) **International review of forest research**. New York: Academic Press, 1964. v.1, p.171-201.

RENNIE, P. J. Methods of assessing site capacit. **Commonw. For Rev.**, v.42, n.4, p.306-317, 1963.

RITCHIE, J. J, EVANS, D. L., JACOBS, D., EVERITT, J. H., WELTZ, M. A. Measuring canopy structure with an airborne laser altimeter. *Trans. ASAE*, v. 36, n. 4, p. 1235–1238, 1993.

ROSAS, M. P. **Alternativas de determinação da idade técnica de corte de Eucalyptus urophylla**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, 1994.

SMITH, D.E., ZUBER, M.T., FREY, H.V., GARVIN, J.B., HEAD, J.W., MUHLEMAN, D.O., PETTENGILL, G.H., PHILLIPS, R.J., SOLOMON, S.C., ZWALLY, H.J., BANERDT, W.B., DUXBURY, T.C. Topography of the northern hemisphere of Mars from the Mars. Orbiter Laser Altimeter. **Science**. v. 279, p. 1686–1692, 1998.

WELTZ, M. A., RITCHIE, J. C., FOX, H. D. Comparison of laser and field measurements of vegetation height and canopy cover. **Water Resour. Res.** v. 30, p. 1311–1319, 1994.