

# UTILIZAÇÃO DE LASERSCANNER AEROPORTADO PARA ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS

RODRIGO DE CAMPOS MACEDO

Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
macedo@dsr.inpe.br

**RESUMO** - Este texto foi elaborado a partir da revisão bibliográfica de artigos referentes ao período de 1999 a 2008, sobre aplicações de laserscanner aeroportado em inventários florestais publicados nos principais periódicos de sensoriamento remoto e ciências florestais. Como enfoque, priorizaram-se aplicações em florestas homogêneas e sensores de retorno discreto com footprint estreito. São apresentados os principais conceitos relacionados às variáveis dendrométricas, ao sensor e aos algoritmos computacionais empregados na geração de produtos derivados pertinentes ao tema. A literatura aponta que as grandezas biofísicas obtidas por meio destes algoritmos, representam uma fonte de dados acurada e precisa, mas requerem implementações computacionais ainda não existentes.

**ABSTRACT** – This work was made from papers of 1999-2008 period, that treated about applications of airborne laser scanner at forest inventories pressed in mainly journals of remote sensing and forest science. This present theme focused on applications at homogeneous forests and discrete return sensors with small footprint. The mainly concepts related to dendrometric variables, to the sensor and to the algorithms are presented and its use in generation of derived products about the theme. The literature points that the biophysical measures got by this algorithms, represents an accurate and precision data source, but requires computational implementations that have not been developed until the present time.

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização racional dos recursos florestais tem motivado o uso de dados de sensoriamento remoto não apenas como uma ferramenta de controle e fiscalização, mas também como suporte aos inventários florestais, cujos resultados têm contribuído para estudos que vão desde emissões globais de carbono às análises quantitativas locais de biomassa madeireira. Desta forma, o desenvolvimento contínuo da tecnologia aeroespacial, com a disponibilidade de imagens de distintas características, aliado ao desenvolvimento de técnicas de extração de informações, tem permitido o acompanhamento contínuo das condições dos variados ecossistemas florestais, facilitando seus inventários. Muitos autores vêm tentando obter variáveis dendrométricas remotamente, através de sensores de microondas e de sensores ópticos. Destes últimos, os sensores ópticos ativos, que utilizam LASER têm se destacado bastante, pelo fato de gerarem coordenadas tridimensionais, possibilitando a estimativa de variáveis dendrométricas, tais como altura total, área de copa e quantificação de indivíduos arbóreos, com elevada acurácia.

Zimble et al (2003) afirmam que as estruturas horizontais e verticais de uma floresta são informações

valiosas para tomada de decisões e gerenciamento adequado. Quanto mais detalhada e precisa, mais requer levantamentos de alta resolução, trabalhando-se em escalas grandes. No presente documento, foram selecionados trabalhos realizados em florestas homogêneas, utilizando-se laserscanners aeroportados de retorno discreto e feixe estreito. Não foram discutidos métodos para geração de modelos digitais de elevação, priorizando-se rotinas de delimitação, contagem e mensuração de copas, cálculo de altura de árvores, e a relação destas variáveis com variáveis comumente medidas em campo, tais como DAP e Área Basal.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Variáveis dendrométricas e equações volumétricas

Variáveis dendrométricas são obtidas através de mensurações realizadas em povoamentos arbóreos, sendo as mais comuns: CAP/DAP (Circunferência ou Diâmetro a Altura do Peito) – requisitos para o cálculo da Área Basal – e Altura. Teoricamente, conhecendo a Área Basal (bidimensional) e a Altura (unidimensional), obtém-se o Volume (tridimensional). Porém, as árvores não possuem formas geométricas analíticas (euclidianas), sendo necessário modelar a forma de um indivíduo arbóreo. Isto é feito através de uma cubagem, determinando-se Fatores

de Forma. Desta forma, estima-se o volume de forma mais precisa, porém a extrapolação deste volume em área (m<sup>3</sup>/ha) requer que o espaçamento de plantio ou a quantidade de indivíduos sejam conhecidos. Há equações volumétricas que requerem somente a Área Basal (Equações de Única Entrada) e equações mais complexas, que requerem duas, três ou mais entradas. Obviamente, quanto mais variáveis, maior a chance de acerto da prognose.

## 2.2 Características do Laserscanner

Trata-se de um sensor opticamente ativo que possui a capacidade de emitir e receber um feixe LASER (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation), que congrega mecanismos que amplificam a luz pelo processo da emissão estimulada, sendo que a amplificação da luz é o produto da emissão estimulada. A amplitude de comprimento de onda da oscilação LASER está entre o ultravioleta às ondas sub-milimétricas (infravermelho). A potência resultante está entre uma fração de miliwatt a dezenas de megawatts. Possui as seguintes propriedades: direcionalidade, monocromaticidade, pulsos de curta duração e coerência (LIM et al, 2003).

Laserscanner, laserscanning, LiDAR (Light Detecting and Ranging) e LaDAR (Laser Detecting and Ranging), são termos distintos para o mesmo tipo de sensor. Um típico Laserscanner incorpora uma unidade emissora/medidora LASER, um scanner óptico-mecânico, uma unidade de controle e processamento e um sistema de apoio. O gerador de pulsos é o componente principal do sensor, ele é responsável pelo estímulo do cristal, realizado através de um diodo semicondutor para a emissão da radiação amplificada da luz. Um tipo de cristal comumente usado é o Nd:YAG, por atuar na faixa do infravermelho próximo. A maioria dos sistemas opera numa faixa do espectro eletromagnético entre 800-1600nm, utilizando suas propriedades físicas, tais como: alta potência, pulsos curtos e espectro óptico estreito. A escolha da região espectral dele levar em consideração não somente a reação com o alvo, mas também a segurança com os olhos. Behera (2002) salienta que em aplicações florestais, a faixa indicada é de 900-1064nm, devido ao grande retroespalhamento causado pela vegetação.

Neste sentido, um conceito importante é o de footprint (largura do feixe): o sensor possui uma altura e um ângulo de divergência que delimita o diâmetro do feixe, que por sua vez, determina o elemento de resolução no terreno. Os sensores podem ser classificados quanto à espessura do feixe, em feixes estreitos ou largos. Behera (2002) apresenta um comparativo entre feixes estreitos e largos, salientando a ausência de sensores de feixes largos no meio comercial. Uma consequência do diâmetro do feixe é a detecção de mais de um alvo simultaneamente, originando retornos distintos. Os sensores podem utilizar tecnologia de pulso (retornos discretos) ou de fase (retornos contínuos ou full waveform). Wehr e Lohr

(1999) discutem vantagens e desvantagens entre pulso ou fase e descrevem três formas de classificação: diâmetro do feixe (estreito ou largo); registro do sinal de retorno (pulso ou fase); e padrão de varredura. O padrão de varredura depende do tipo de scanner que pode possuir espelho oscilante, cujo padrão de varredura no terreno é um “zigue-zague”; espelho circular (PALMER), cujo padrão de varredura no terreno são círculos circunscritos; polígono rotativo e; fibra óptica, cujo padrão de varredura no terreno são linhas paralelas.

Baltsavias (1999a) classifica o sistema sensor em duas partes: emissor/receptor e sistemas de apoio. A primeira parte consiste no emissor, sistema de varredura, unidade controladora e gravadora. De acordo com Wehr e Lohr (1999), o fato de o emissor e receptor estarem no mesmo caminho óptico, todo objeto iluminado pelo laser está contido em seu campo de visada. O sistema de apoio é formado por uma Estação Inercial (registro da atitude da aeronave – roll, pitch, yaw) e sistema de posicionamento diferencial (DGPS), embarcado e em superfície (limitado a aprox. 50km). Os dados provenientes da Estação Inercial e DGPS são medidos e armazenados simultânea e paralelamente à medição da distância pelo sistema LASER. Além disso, registra-se também a refletividade dos alvos, denominada Intensidade (I). Baltsavias (1999a) a define como a quantidade de radiação refletida e detectada pelo sensor. É medida em quantidade de energia radiante por unidade de tempo ou superfície. Afirma ainda, que o menor objeto percebido pelo sensor não depende de seu tamanho, mas sim de sua refletividade, havendo influências de tipo de reflexão, condições atmosféricas, etc. Todos estes registros serão utilizados na fase de pré-processamento para definir precisamente as coordenadas X, Y, Z e I. Em geral, este pré-processamento é realizado em programas pertencentes aos fabricantes do sensor. Após esta fase, os dados estão em formato compatível com programas de processamento de imagens.

Outro parâmetro a ser considerado é a intensidade de pontos por área, que depende da velocidade de vôo e potência do equipamento. Equipamentos mais potentes (multipulsos) permitem a elevação da altura de vôo, mantendo-se o diâmetro do feixe e a intensidade de pontos.

## 3 APLICAÇÕES E MÉTODOS

### 3.1 Detecção e mensuração de variáveis dendrométricas

As únicas variáveis medidas diretamente pelo laserscanner são as coordenadas XYZ e o valor da refletividade de um ou mais retornos dos alvos. A partir destas variáveis, é possível extrair uma série de produtos derivados. Em termos gerais, interpolam-se os sinais provenientes dos primeiros retornos em uma grade regular, gerando um modelo digital de superfície (MDS), que expressa a rugosidade da cobertura vegetal – Idealmente, o topo do dossel. Através de filtros (“local mínima”, por exemplo) e classificações adequadas,

interpolam-se os sinais provenientes dos últimos retornos em uma grade regular, gerando um modelo digital do terreno (MDT), que expressa o terreno sob o dossel florestal.

Através da subtração dos modelos ([MDS]-[MDT]), obtém-se um modelo hipsométrico – altura das árvores, no caso florestal. Este modelo é conhecido na literatura como CHM (Crown Height Model). A partir dele, é necessário individualizar as árvores, visando detectar e mensurar variáveis dendrométricas (número de fustes, altura e área de copa). Baltsavias (1999b) comenta que os programas comerciais limitam-se a converter pontos, visualizar, classificar e gerar modelos de superfície, entretanto produtos como contagem de indivíduos, cálculo de altura e área de copa, restringem-se a soluções caseiras e não-comerciais. Friedlaender e Koch (2000) expressam a importância da lógica do algoritmo “local máxima” para a identificação do topo de uma árvore. Para coníferas, cada topo nos pixels vizinhos é considerado outro indivíduo arbóreo. Porém, há problemas em copas de folhosas, pois estas podem apresentar diversos “topos” irregularmente distribuídos. Uma abordagem alternativa é a geração de linhas de cota (curvas de nível) em torno da copa, mas requer altíssima resolução espacial. Persson et al (2002) determinaram os topos das árvores através do “local máxima”, validando os resultados com a posição da árvore no terreno. Porém, esta validação é extremamente complicada, devido aos problemas de multicaminhamento em levantamentos DGPS sob dossel, tortuosidade do fuste e ação de ventos (BRANDTBERG et al, 2003; POPESCU E ZHAO, 2008). Após a determinação do topo das árvores, delimitam-se as copas através de segmentação apropriada, possibilitando o cálculo das áreas dos polígonos (área de copa). Popescu et al (2002) utilizaram filtragem local com janela móvel (tamanho variável) e, além de utilizarem o “local máxima” para valores de Z, incluíram valores de intensidade, semelhantemente às aplicações ópticas, melhorando o modelo. A janela móvel demonstrou-se ser útil para locais com diferenças de idade ou de espécies que possuem copas com formas diferentes. A individualização de árvores pode gerar polígonos sobrepostos ou não, dependendo do algoritmo (BRANDTBERG et al, 2003).

A maior parte dos trabalhos utiliza como variável de entrada um modelo interpolado (modelo hipsométrico). Zandoná (2006) utiliza a própria nuvem de pontos como variáveis de entrada, porém, ao localizar um ponto, o algoritmo requer a definição de um raio de busca, que por sua vez, é dependente de uma função de altura. A relação copa-altura não é trivial, porém é possível relacioná-las através de amostras aleatórias presentes no próprio conjunto de dados.

Kwak et al (2007) detectaram informações espúrias através do “local máxima”, gerando situações em que ocorreram mais de um topo na mesma árvore e situações em que não foi detectado um topo para uma árvore dominada. Aplicaram um filtro morfológico de transformação máxima, visando minimizar a chance de

detectar dois topos de árvores na mesma copa. Para a delimitação das copas, utilizaram um filtro suavizador no filtro morfológico, gerando-se uma imagem 0 e 1; reverteram-na e mediram a distância euclidiana. Desta distância são delimitadas as bordas das copas. Afirmam que a baixa densidade de pontos pode comprometer a acurácia da delimitação de copas.

Lee e Lucas (2007) apresentaram um índice chamado Height-Scaled Crown Openness Index (HSCOI), que expressa uma medida quantitativa para a penetração do feixe LASER no dossel florestal e é suplementar ao tradicional modelo hipsométrico. Popescu e Zhao (2008) avaliaram diversos algoritmos para esta finalidade, tais como filtragens Wavelet e Fourier, análises de percentis e concluíram que o filtro de Fourier apresentou os melhores resultados na análise de estrutura vertical. Utilizam o conceito de voxel, ou seja, a distribuição vertical dos pontos em uma representação espacial de cubo. Ainda estimaram a altura comercial (fuste) através de pontos de inflexão.

### 3.2 Inventário Florestal com Laserscanner

De acordo com Friedlaender e Koch (2000), as técnicas mais utilizadas em inventários florestais são: levantamentos de campo, interpretação de fotografias aéreas, medidas fotogramétricas e modelos de crescimento, todavia, os autores salientam que todos são dispendiosos e demorados, comprometendo cerca de 50-60% dos recursos a serem utilizados no inventário. Chamam a atenção para a questão de inventários florestais em pequenas áreas, onde instrumentos de altíssima precisão e pouca abrangência passam a ser requeridos. Lim et al (2000) salientam que a aplicação de laserscanner em inventários florestais possui o desafio de atender às demandas da indústria florestal, que requer inventários em pequenas áreas, informações acuradas e mais refinadas. Desde 1990, esta utilização vem se intensificando. Através de medidas diretas do topo do dossel e piso da floresta, são derivadas informações, como altura arbórea, quantidade de indivíduos e área de copa. A busca por relações entre estas variáveis e a área basal é o cerne das expectativas de realização de inventário florestal através de laserscanner.

Zimble et al (2003) qualificaram a área de estudo em single store (sem sub-bosque) e multi store (com sub-bosque) e relacionaram a detecção de árvores dominadas com esta classificação. Além disso, salientam erros de superestimativa no número de árvores decorrente da heterogeneidade na forma das copas e erros de subestimativa no número de árvores decorrente da não-contagem de árvores dominadas. Os autores conseguiram caracterizar verticalmente a vegetação e utilizaram esta caracterização para discriminar áreas florestais quanto ao vigor de biomassa. Maltamo et al (2004) utilizaram a distribuição de Weibull completa e com parâmetros truncados para prever árvores pequenas (dominadas). Utilizando-se esta distribuição, houve melhorias na acurácia de contagem de fustes e estimativa de biomassa.

A contagem correta de árvores dominadas apresentou vantagens na estimativa volumétrica, pois compensou a tendência de subestimativa de altura. Os autores relataram dificuldades na relação copa-DAP e altura-DAP para árvores dominadas. Bortolot e Wynne (2005) comentam que a utilização de feixe estreito possui as seguintes limitações: não há garantia de que o pulso tenha atingido o topo de árvore nem que tenha atingido o chão; a quantidade de pontos é demasiada, encarecendo o levantamento e exigindo muito esforço computacional. Os autores revisaram algumas publicações e mostram que os índices de correlação entre dados derivados de LiDAR e medidas de campo variam entre 0,65 e 0,96. Para identificar as árvores, complementaram o algoritmo “local máxima” com algoritmos morfológicos – a forma arredondada das árvores, a forma convexa do topo das árvores e a forma côncava das bordas das copas. Maltamo et al (2006) testaram diversas formas de prever o volume, considerando distribuição em percentis de área basal e distribuição Weibull. Além disso, testaram o efeito de reduzir a densidade de pontos na estimativa volumétrica e concluíram, ao contrário da maior parte dos autores, que a redução de pontos no campo não afetou a acurácia. Apresentaram correlação negativa entre fechamento de dossel e acurácia. Recomendaram estratificação para facilitar análise. Concluíram que altura e densidade de indivíduos são as variáveis que mais influenciam. Coops et al (2007) utilizaram a distribuição de Weibull para auxiliar a modelar a distribuição vertical do dossel florestal. Os autores aplicaram métodos desenvolvidos para waveform em sensor de retorno discreto e obtiveram bons resultados. Popescu (2007) trabalhou com árvores individuais e conseguiu um R2 de 0,9 para DAP e 0,8 para biomassa. Salienta que a aplicação da janela móvel para individualização de árvores depende do tamanho das copas. Chama a atenção para o fato de que a medida de área de copa em campo considera a sobreposição, enquanto que no algoritmo não.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os avanços em aplicações de laserscanner para obtenção e estimativa de variáveis dendrométricas têm proporcionado acurácia cada vez melhor. Além disso, tal como todos os pesquisadores recomendaram em seus artigos, estão ocorrendo integrações entre dados LASER e dados de outros sensores, tais como ETM+ (HUDAK, 2002), MISR (KIMES et al, 2006), IKONOS (DONOGHUE e WATT, 2006), sensores fotogramétricos (SUÁREZ et al, 2005; VÉGA e ST-ONGE, 2008), CASI (LUCAS et al, 2008) e InSAR (BALZTER et al, 2007; WALKER et al, 2007). A utilização dos dados de intensidade juntamente com as variáveis XYZ também é promissora (DONOGHUE et al, 2007). À medida que os sensores com feixe largo e registro de fase, tornarem-se mais comerciais, haverá vantagens para a detecção do piso florestal, do topo das árvores e caracterização de sub-bosques e árvores dominadas. Outra melhoria é o fato dos trabalhos atuais considerarem a árvore individualmente –

e não somente o plot ou o stand. Isto requer técnicas de levantamentos de campo que considerem os problemas de multicaminhamento sob cobertura florestal, tais como a utilização de Estação Total. Além disso, validações (em campo) dos MDT's são importantes para avaliar indiretamente o modelo hipsométrico. Uma demanda ainda existente é a implementação em programas comerciais, de rotinas computacionais necessárias à detecção e mensuração de variáveis dendrométricas. Uma versão desatualizada, quando forem enviadas múltiplas versões.

#### REFERÊNCIAS

- BALZTER, H.; LUCKMAN, A.; SKINNER, L.; ROWLAND, C.; DAWSON, T. Observations of forest stand top height and mean height from interferometric SAR and LiDAR over a conifer plantation at Thetford Forest, UK. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 1173-1197, 2007.
- BEHERA, M. D.; ROY, P. S. Lidar remote sensing for forestry applications: The Indian context. **Current Science**, v. 83, n. 11, p. 1320-1328, 2002.
- BORTOLOTT, Z. J.; WYNNE, R. H. Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 59, p. 342-360, 2005.
- BRANDTBERG, T.; WARNER, T. A.; LANDENBERGER, R. E.; MCGRAW, J. B. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, p. 290-303, 2003.
- COOPS, N. C.; HILKER, T.; WULDER, M. A.; ST-ONGE, B.; NEWNHAM, G.; SIGGINS, A.; TROFYMOW, A. J. Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR **Trees**, v. 21, p. 295-310, 2007.
- DONOGHUE, D. N. M.; WATT, P. J. Using LiDAR to compare forest height estimates from IKONOS and Landsat ETM+ data in Sitka spruce plantation forests. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 11; p. 2161-2175, 2006.
- DONOGHUE, D. N. M.; WATT, P. J.; COX, N. J.; WILSON, J. Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data. **Remote Sensing of Environment**, v. 110, p. 509-522, 2007.
- FRIEDLAENDER, H.; KOCH, B. First Experience in the Application of Laserscanner Data for the Assessment of

- Vertical and Horizontal Forest Structures. **IAPRS**, v. 33, 8p., 2000.
- HUDAK, A. T.; LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; ERTERRRETCHÉ, M. B. Integration of lidar and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, p. 397-416, 2002.
- KIMES, D. S.; RANSON, K. J.; SUN, G.; BLAIR, J. B. Predicting lidar measured forest vertical structure from multi-angle spectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 503-511, 2006.
- KWAK, D.; LEE, W.; LEE, J.; BIGING, G. S.; GONG, P. Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data. **J For Res**, v. 12, p. 425-434, 2007.
- LEE, A. C.; LUCAS, R. M. A LiDAR-derived canopy density model for tree stem and crown mapping in Australian forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, p. 493-518, 2007.
- LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.; ST-ONGE, B.; FLOOD, M. LiDAR remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography**, v. 27, n. 1, p.88-106, 2003.
- LUCAS, R. M.; LEE, A. C.; BUNTING, P. J. Retrieving forest biomass through integration of CASI and LiDAR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 1553-1577, 2008.
- MALTAMO, M.; EERIKÄINEN, K.; PACKALÉN, P.; HYYPPÄ, J. Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics. **Forestry**, v. 79, n. 2 p. 217-229, 2006.
- MALTAMO, M.; EERIKÄINEN, K.; PITKÄNEN, J.; HYYPPÄ, J.; VEHMAS, M. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 319-330, 2004.
- PERSSON, A.; HOLMGREN, J.; SÖDERMAN, U. Detecting and measuring individual trees using and airborne laser scanner. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 68, n. 9, p. 925-932, 2002.
- POPESCU, S. C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. **Biomass and Bioenergy**, v. 31 p. 646-655, 2007.
- POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 37, p. 71-95, 2002.
- POPESCU, S. C.; ZHAO, K. A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p.767-781, 2008.
- SUÁREZ, J. C.; ONTIVEROS, C.; SMITH, S.; SNAPE, S. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. **Computers & Geosciences**, v. 31, p. 253-262, 2005.
- VÉGA, C.; ST-ONGE, B. Height growth reconstruction of a boreal forest canopy over a period of 58 years using a combination of photogrammetric and lidar models. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 1784-1794, 2008.
- WALKER, W. S.; KELLNDORFER, J. M.; LAPOINT, E.; HOPPUS, M.; WESTFALL, J. An empirical InSAR-optical fusion approach to mapping vegetation canopy height. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, p. 482-499, 2007.
- WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 68-82, 1999.
- ZANDONÁ, D. F. **Potencial uso de dados laser scanner para estimativa de variáveis dendrométricas**. Dissertação de mestrado. 92p. UFPR. Curitiba/PR, 2006.
- ZIMBLÉ, D. A.; EVANS, D. L.; CARLSON, G. C.; PARKER, R. C.; GRADO, S. C.; GERARD, P. D. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 171-182, 2003.