

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIOGO MARTINS ROSA

Review

**SISTEMA LIDAR PORTÁTIL TERRESTRE: ESTUDOS E APLICAÇÕES
FLORESTAIS**

CURITIBA/PR

2014

DIOGO MARTINS ROSA

**SISTEMA LIDAR PORTÁTIL TERRESTRE: ESTUDOS E APLICAÇÕES
FLORESTAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Florestal.

Área de concentração: Sensoriamento remoto

Orientador: Prof. Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima
Coorientador: Prof. Dr. Bruce Walker Nelson

CURITIBA/PR

2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Agradeço principalmente:

A equipe da Pós-Graduação em Gestão Florestal da Universidade Federal do Paraná (UFPR/PECCA), pela bolsa, oportunidade, ensinamentos, apoio, acompanhamento e dedicação.

Ao Prof. Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima da Universidade Federal do Paraná - UFPR pelo acompanhamento deste trabalho, os ensinamentos, oportunidade e por ter me orientado.

Ao coorientador: Prof. Dr. Bruce Walker Nelson do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia – INPA pela oportunidade, atenção, esclarecimentos, ensinamentos na área de sensoriamento remoto.

Ao Danilo Roberti Alves de Almeida (CFT/INPA), companheiro que me apontou o “norte” no estudo do LiDAR, Obrigado!

A todos os colegas/companheiros do curso que me auxiliaram durante toda a pós-graduação.

A toda minha família e a Deus.

Muito obrigado.

“Todo o conhecimento genuíno tem origem na experiência direta”.

Mao Tsé-Tung

“Para mim é fascinante como a terra melhora, como a água nasce, como tudo está se desenvolvendo. A minha paixão é o solo, porque tudo depende do solo, inclusive os homens”.

Dra. Ana Maria Primavesi

RESUMO

As informações da cobertura florestal são essenciais para os gestores florestais. Dados precisos sobre a altura das árvores e densidade de vegetação no dossel, apesar de serem básicos são de difícil obtenção e onerosos com a utilização das técnicas convencionais. A tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) pode obter estimativas dos aspectos estruturais da floresta com alta precisão e maior rapidez. O sistema LiDAR portátil terrestre por sua vez tem grande potencial para aplicações florestais, por ser móvel e proporcionar alta capacidade de aquisição de dados, em grandes quantidades, da estrutura vertical da floresta, com alta precisão, baixo custo e rapidez, servindo na determinação de atributos estruturais, como o perfil da altura e da abertura do dossel, o índice de área foliar e a densidade da vegetação ao longo de todo perfil vertical da floresta. Estes atributos estruturais da floresta, estimados à partir de nuvens bidimensionais de retornos laser, são importantes nos estudos de ecologia, regeneração, monitoramento, manejo, planejamento e gestão florestal. Entretanto, existem ainda muitos desafios no desenvolvimento de métodos, validações, comparações técnicas e econômicas e aplicações em modelagem com dados provenientes desse sistema.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, estrutura florestal, floresta, *laser*, LiDAR terrestre

ABSTRACT

The information of forest cover are essential for forest managers. Accurate data on the height of the trees and vegetation density in the canopy, although basic are difficult to obtain and costly using conventional techniques. The LiDAR technology (Light Detection and Ranging) can obtain estimates of the structural aspects of the forest with high accuracy and faster. The terrestrial LiDAR portable system in turn has great potential for forestry applications, to be mobile and provide high capacity data acquisition, in large quantities, of the vertical forest structure, with high precision, low cost and speed, serving in determining structural attributes such as profile height and canopy openness, leaf area index and the density of the vegetation along the entire vertical profile of the forest. These structural attributes of the forest, estimated at from two-dimensional clouds of laser returns are important in ecological studies, regeneration, monitoring, management, planning and forest management. However, there are still many challenges in developing methods, validation, technical and economic evaluation and modeling applications with data from that system.

Keywords: remote sensing, forest structure, terrestrial LiDAR.

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

Hz - Hertz

HS – *High-Speed*

IAF – índice de área foliar

DAF – densidade de área foliar

FLP – *First & Last Pulse*

LD – *Laser distance*

Laser - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

Radar - *Radio Detection and Ranging*

LiDAR - *Light Detection and Ranging*

RIEGL: *Laser Measurement Systems*

VHS – *Very High-Speed*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 – Os múltiplos retornos do LiDAR são gerados a partir de um único pulso emitido. Dependendo da capacidade de detecção do sensor, um, dois ou poucos retornos podem ser registrados (<i>discrete return</i>) ou muitos retornos são registrados em classes de distância, constituindo um histograma (<i>full-waveform</i>).	14
Figura 2 – Sensor LiDAR <i>rangefinder</i> (esquerda) e nuvem bidimensional de pontos (direita)	16
Figura 3 - Planta esquemática da plataforma do LiDAR(a), o sistema LiDAR portátil terrestre(b) e o mesmo sistema numa mochila(c).....	18

TABELAS

Tabela 1 – Descrição dos preços do sistema LiDAR portátil terrestre.....	15
Tabela 2 - Especificações dos sensores do LiDAR portátil terrestre	17

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	13
2.1 GERAL	13
2.2 ESPECÍFICOS	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	13
4 SISTEMA LIDAR PORTÁTIL TERRESTRE	14
4.1 PRINCÍPIOS E CARACTERIZAÇÃO	14
4.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS	17
4.3 ATRIBUTOS E MÉTRICAS	19
4.3.1 Índice e densidade de área foliar (IAF e DAF)	19
4.3.2 Rugosidade do dossel (Rc)	20
4.4 ESTUDOS E APLICAÇÕES FLORESTAIS	21
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
REFERÊNCIAS	27

INTRODUÇÃO

Os diferentes tipos de florestas (fitofisionomias florestais) são caracterizados precisamente pelas diferenças estruturais da vegetação e influência de fatores edafoclimáticos (planta-solo-clima). Tais diferenças qualitativas e quantitativas na estrutura da floresta podem contribuir para o entendimento de relações ecológicas entre vegetação, gradientes ambientais e também em estudos de viabilidade da gestão florestal de diferentes fitofisionomias (POPESCU *et al.*, 2002; COOMES *et al.*, 2003)

Para a gestão florestal é importante avaliar a dinâmica dos estoques (volume, biomassa, carbono e área foliar) nos diferentes ambientes, pois o planejamento das atividades é em função dos estoques existentes e a facilidade de acesso à área (ROCHA *et al.*, 2003). A insuficiência de informações sobre o crescimento e a dinâmica da estrutura florestal ao longo do tempo, têm sido um fator limitante para o gestor florestal (COSTA *et al.*, 2008; VASCONCELOS *et al.*, 2009).

Características estruturais (altura de dossel, densidade de vegetação e distribuição dos indivíduos) e as características funcionais (exemplo: fotossíntese) das florestas estão relacionadas com a organização de suas copas, que são indicadores que permitem as avaliações como o estágio de desenvolvimento, a tipologia da floresta e vulnerabilidade aos distúrbios (COOMES *et al.*, 2003).

Entretanto a escassez de métodos eficientes para determinação da estrutura florestal, acabam limitando a concepção da relação entre a estrutura florestal e suas características funcionais em escalas espaciais compatíveis (LEFSKY *et al.*, 2002; POPESCU *et al.*, 2002; PARKER *et al.*, 2004). Logo para facilitar a mensuração e compreensão da estrutura florestal e sua dinâmica, são necessárias técnicas de sensoriamento remoto nas estimativas de atributos estruturais e suas relações, partindo do princípio de métodos mais eficientes para determinar essas estruturas em escalas espaciais compatíveis, com maior riqueza de dados (NOVO, 1998; MOREIRA, 2005).

A altimetria laser, ou LiDAR (*Light Detection and Ranging*), é uma tecnologia de sensoriamento remoto que possui sua própria fonte de energia, uma fonte de luz, o LiDAR, é aplicada no âmbito da geodesia, arqueologia, geografia, geologia, geomorfologia, sismologia, engenharia florestal, oceanografia costeira, detecção remota e física da atmosfera. O termo "radar laser" é também usado, no entanto a tecnologia LIDAR não utiliza ondas rádio ou micro-

ondas, que definem a tecnologia Radar (*Radio Detection And Ranging*). O LiDAR emite radiação eletromagnética em no infravermelho próximo podendo variar de 700 a 1300nm e, assim, é classificado como um sensor ativo. A tecnologia LiDAR promete tanto aumentar a precisão das medições biofísicas e medir diretamente a altura e distribuição das copas das árvores (topografia florestal), proporcionando estimativas de alta precisão da altura da vegetação, cobertura e estrutura do dossel, área foliar e biomassa acima do solo (LEFSKY *et al.*, 2002; D'OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Lim *et al.*, (2003) relatam o uso de LiDAR para aplicações em florestas, logo no início da década de 1980, sendo uma tecnologia de alta precisão para estudos de floresta (DRAKE *et al.*, 2002; LEFSKY *et al.*, 2002). Existem diferentes tipos de plataformas que operam a partir desse sensor laser, ou seja, orbital, aerotransportado e terrestre, que permitem uma variedade de informações a serem adquiridas em grande escala até pequena escala.

Os dados dos sistemas LiDAR orbitais baseados em satélites, enquanto disponíveis (sem nenhum custo), são limitados em termos de qualidade dos dados, cobertura geográfica e temporal, estudos como do Lefsky *et al.*, (2005) avaliaram a péssima relação ($r^2 < 0,3$) entre os dados do sensor LiDAR orbital *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) a bordo do *Ice, Cloud and land Elevation Satellite* (ICESat) e a biomassa florestal na Amazônia.

Os sistemas LiDAR aerotransportados de varredura (da sigla inglês ALS - *Airborne Laser Scanner*) produzem pontos tridimensionais (x, y, z) que correspondem a superfícies e objetos presentes no terreno. Os primeiros sistemas LiDAR aerotransportados de varredura foram desenvolvidos com um sistema de pulsos *decrete-return*, o qual registra o tempo para o primeiro ou o último retorno do pulso; após a evolução dos sistemas de armazenamento alguns sistemas permitiram a gravação dos pontos intermediários. Nesses últimos anos, surgiu um sistema conhecido como sistema de ondas contínuas (*full-waveform*), que registra integralmente todo o sinal do pulso (veja, seção 4.1 sobre *full-waveform* e *discrete-return*). Com o sistema LiDAR aerotransportado é possível elaborar Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta resolução, muito importante para o planejamento e exploração florestal (KRAUS e PFEITER, 1998).

Existem várias limitações que dificultam a utilidade de sistemas LiDAR aerotransportados e orbitais para as investigações de parâmetros florestais (LEFSKY *et al.*, 2002; 2005). Para os sistemas aerotransportados, os custos para a implantação do instrumento, aquisição da aeronave, permissão e processamento de dados são elevados e, levando em consideração estudos de pequenas áreas e monitoramento é inviável.

Por sua vez sistemas LiDAR terrestres podem ter gamas de ângulos em duas ou três dimensões. Estudos como os de Watt e Donoghue, (2005); Danson *et al.*, (2007); Lingua e Pirotti, (2009); Buck, (2011) examinaram atributos de florestas com um sistema de laser terrestre de varredura, seus dados são tridimensionais (3D), (da sigla inglês, TSL – *Terrestrial Laser Scanner*), sendo maior parte dos estudos em florestas plantadas. No entanto, estes aparelhos ainda são muito caros, limitados para o uso em florestas tropicais densas e não são portáteis, sendo necessário instrumentos que fossem portáteis e com poucas limitações em floresta tropicais densas e, também há pouco avanço no uso dos dados do laser terrestre de varredura para obtenção de Modelo Digital de Terreno (MDT) (NETO *et al.*, 2014).

Logo, Parker *et al.*, (2004) definiram um sistema LiDAR portátil terrestre (LPT) facilmente montado a partir de componentes disponíveis comercialmente, com funcionamento simples e fácil de usar sob uma variedade de condições do terreno. Porém, esse sistema possui suas limitações, seus dados são bidimensionais (2D), escalas espaciais pequenas e não possui dados sobre o terreno, assim não se pode criar um Modelo Digital de Elevação (MDE).

Existem revisões sobre os sistemas LiDAR aerotransportados e orbitais (WEHR e LOHR, 1999; VAN LEEUWEN e NIEUWENHUIS, 2010; GIONGO *et al.*, 2012), revisões sobre o Laser Scanner terrestre (DASSOT *et al.*, 2011), entretanto sobre o sistema LiDAR portátil terrestre ainda não existe nenhuma revisão. Assim, devido a quantidade de informações fornecidas e preço acessível do instrumento (sensor), acredita-se no potencial aumento de trabalhos com esse sistema, daí a importância desta revisão.

Portanto na seleção de um método de mensuração de variáveis florestais, deve-se estudar o melhor modo de alcançar tais resultados, avaliando-o do ponto de vista do custo e da confiabilidade dos dados, dentre diversas alternativas disponíveis. Assim, esse trabalho focou no LiDAR portátil terrestre devido seu grande potencial para aplicações florestais, por ser móvel e proporcionar alta capacidade de aquisição de dados da estrutura vertical da floresta em grande quantidade, com alta precisão, baixo custo e rapidez em escalas ecologicamente significativas (PARKER *et al.*, 2004).

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é fornecer uma revisão bibliográfica atualizada do potencial da tecnologia LiDAR portátil terrestre (tipo: *rangefinder*), como uma ferramenta alternativa de sensoriamento remoto, na obtenção de dados e informações florestais.

2.1 GERAL

Apresentar o estágio de desenvolvimento do sistema LiDAR portátil terrestre e sua confiabilidade na medição da estrutura e obtenção de informações florestais.

2.2 ESPECÍFICOS

- a) Levantar por meio da revisão bibliográfica a eficiência no levantamento dos atributos estruturais da floresta (como altura e abertura de dossel, densidade da vegetação ao longo do perfil vertical e estimativas de área foliar);
- b) Investigar e caracterizar os diferentes modelos do sistema LiDAR portátil terrestre para estimar atributos estruturais da floresta;
- c) Reunir informações sobre os usos do sistema LiDAR portátil terrestre aplicado à floresta.

3 MATERIAL E MÉTODOS

- Levantamento bibliográfico em livros, artigos e teses de sensoriamento remoto, geociência e no ramo florestal.
- Pesquisar em trabalhos e protocolos que relatam experiências na utilização do sistema LiDAR portátil terrestre nas áreas de engenharia, sensoriamento remoto, geociência e ecologia florestal.

4 SISTEMA LiDAR PORTÁTIL TERRESTRE

4.1 PRINCÍPIOS E CARACTERIZAÇÃO

A tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) é baseada nos mesmos princípios utilizados no sistema de RADAR (*Radio Detection And Ranging*), com a diferença de que, ao invés do uso de ondas de rádio para localizar os objetos, o sistema LiDAR utiliza pulso laser no espectro infravermelho próximo, onde vem demonstrando um avanço para uma ampla aquisição de informações dos objetos de interesse, num pequeno intervalo de tempo (LEFSKY *et al.*, 2002; NELSON *et al.*, 2003 PARKER e EVANS, 2009; GIONGO *et al.*, 2010).

Os dados LiDAR podem ser *discrete-return* ou *full-waveform* (Figura 1), onde o *discrete-return* possui uma área de iluminação do laser (pegada) menor, normalmente um ponto do qual os valores absolutos de retornos, normalmente primeiro e último retorno, podendo ter retornos intermediários. O *full-waveform* tem uma pegada maior e o produto dele é histograma de intensidade de retornos nos diferentes níveis de altura acima do chão (LEFSKY *et al.*, 2002).

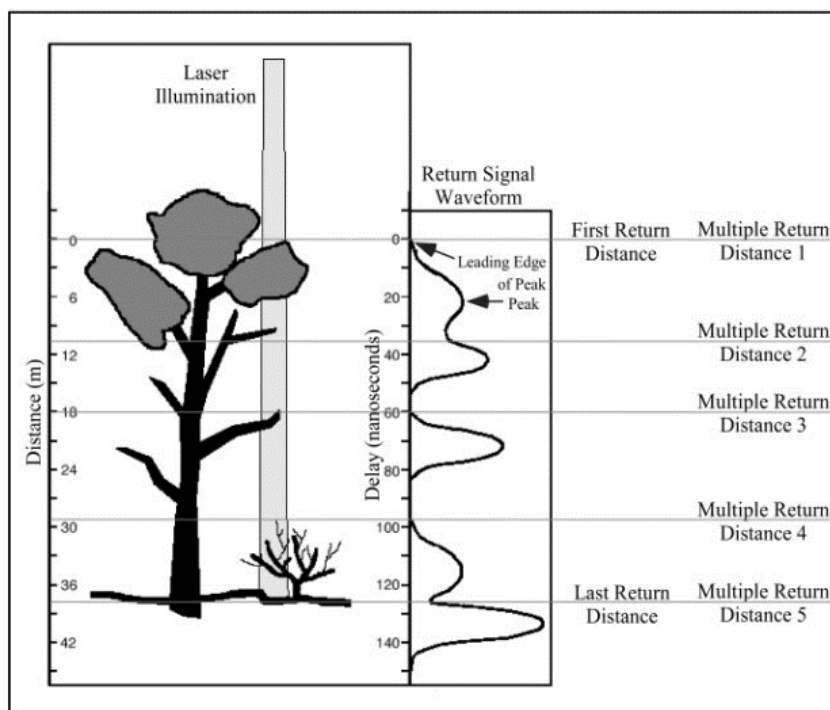


Figura 1 – Os múltiplos retornos do LiDAR são gerados a partir de um único pulso emitido. Dependendo da capacidade de detecção do sensor, um, dois ou poucos retornos podem ser registrados (*discrete-return*) ou muitos retornos são registrados em classes de distância, constituindo um histograma (*full-waveform*).

Fonte: Lefsky *et al.*, (2002)

As características mais importantes dos equipamentos disponíveis no mercado, dos Sistemas LiDAR utilizados em aplicações florestais são:

1. Tipo do sistema de registro ou sistema de pulsos (*discrete-return* ou *full-waveform*);
2. Dimensão do *footprint* (diâmetro do pulso laser a terra/alvo), somente se aplica aos sistemas LiDAR aerotransportado de varredura.
3. Taxa de amostragem (número de pulsos por segundo), determinando a densidade de pontos do sensor LiDAR (Hz), onde são mais relevantes para sistemas de pulsos *discrete-return*, no caso de sistemas *full-waveform*, isto já está embutido no cálculo do tamanho do *footprint*.

Os sistemas LiDAR estão sendo cada vez mais utilizados para estudos florestais em diferentes ecossistemas, inclusive florestas tropicais (DRAKE *et al.*, 2002; STARK *et al.*, 2012). Normalmente são utilizados LiDAR aerotransportados de varredura e terrestres de varredura que produzem dados tridimensionais de florestas (BORNAZ e RINAUDO 2004; VAN LEEUWEN e NIEUWENHUIS, 2010). O LiDAR portátil terrestre sem varredura, do tipo *rangefinder*, é mantido muito próximo do solo, mirando para o céu. É transportado em linha reta pelo usuário em velocidade constante. O movimento do usuário fornece o eixo horizontal (distância em metros) e os tempos dos retornos de cada pulso fornecem o eixo vertical (altura em metros dos objetos reflectantes) resultando em dados bidimensionais de florestas. Entretanto o sistema LiDAR portátil terrestre tipo *rangefinder*, de primeiro e último retornos por pulso é relativamente barato (Tabela 1), todo sistema custa entre US\$ 12.000,00 - 15.000,00 (PARKER e RUSS, 2004; PARKER *et al.*, 2004; ALMEIDA *et al.*, 2014). Para o sistema LiDAR portátil aerotransportado o preço mínimo encontrado na literatura foi de ~US\$ 30.000,00, excluindo o custo da aeronave (NELSON *et al.*, 2003).

Tabela 1 – Descrição dos preços do sistema LiDAR portátil terrestre

Sistemas	Componentes	Descrição	Preços (US\$)
Laser <i>rangefinder</i>	Riegl LD90-3100VHS-FLP	2.000Hz ¹ , 900nm ² , ± 25mm ³	8.200,00
Computador	Panasonic Toughbook (CF-U1)	1GB RAM, 16GB disco SSD	3.700,00
Suporte	Bandeja (plataforma)	Alumínio	1.000,00
Energia	2 Baterias para o Laser	12volts	160,00
	4 Baterias para o Computador	7.2volts	540,00
	Cabos	serial RS232/USB-RS232	100,00
Total			13.700,00

¹densidade dos pulsos ²comprimento de onda ³precisão

Cotação do dólar: R\$ 2,40 (2014)

Fonte: Riegl.com; Panasonic.com; Lojas de eletrônicos em Manaus/AM (2014).

A tecnologia LiDAR *discrete-return* do tipo *rangefinder* (Figura 2), que é o foco dessa revisão, é um sistema de sensoriamento remoto ativo utilizado para medir a distância das estruturas em função do tempo percorrido entre a emissão e o retorno do raio (pulso) laser (LEFSKY *et al.*, 2002). Os sensores de LiDAR portátil terrestre (*rangefinder*) mais utilizados são: Riegl LD90-3100HS e Riegl LD90-3100VHS-FLP (Horn, Áustria) (Tabela 2).

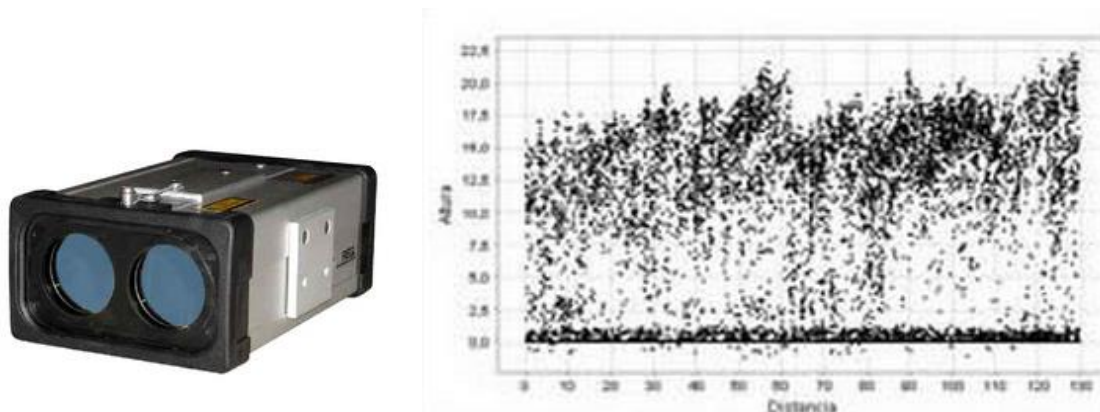


Figura 2 – Sensor LiDAR *rangefinder* (esquerda) e nuvem bidimensional de pontos (direita)
Fonte: MANUAL RIEGL LD90-3

Esses sensores encaixam-se nas especificações descritas por Parker *et al.*, (2004) para um LiDAR *rangefinder* (para um sistema portátil terrestre), que são: (I) uma taxa de repetição de impulsos rápidos e regulares (> 10 Hz); (II) a portabilidade; (III) a precisão de $< 0,1$ m; (IV) comunicação inequívoca de *sky hits*, onde não há planta interceptada; (V) a capacidade de medir os alvos de muito perto do instrumento a uma altura máxima da floresta (100 m); (VI) segurança dos olhos; (VII) a captura contínua de dados; e (VIII) disponibilidade comercial. Outras características desejáveis, definidas pelo mesmo autor, incluem: (i) o controle sobre o registro da distância de cada pulso ou o registro de uma média de pulsos consecutivos; (ii) divergência de feixe estreito; (iii) diâmetro de feixe pequeno; e (iv) uma distribuição uniforme de energia do laser dentro do feixe.

Tabela 2 - Especificações dos sensores do LiDAR portátil terrestre

	Modelos	
	Riegl LD90-3100HS	Riegl LD90-3100VHS-FLP
Máxima da densidade de pulsos laser (Hz)	200 – 1.000	2.000
Precisão (mm)	± 15	± 25
Comprimento de onda do laser (nm)	890	900
Faixa de medição (m)	150	200
Divergência do feixe ¹ (mrad)	1,8	3,0 x 0,5
Resolução da medição (mm)	2 – 20	20 – 50
Mínima distância (m)	1	5
Classe de segurança ²	Classe I	Classe I
Estudos	Parker <i>et al.</i> , (2004); Staebler e Fitzjarrald, (2005); Corp <i>et al.</i> , (2009); Sumida <i>et al.</i> , (2009); Saleska <i>et al.</i> , (2009); Listopad <i>et al.</i> , (2011); Aiba <i>et al.</i> , (2013)	Hardiman <i>et al.</i> , (2011); Stark <i>et al.</i> , (2012); Stark, (2012); Schietti <i>et al.</i> , (2013); Almeida <i>et al.</i> , (2014); McMahon <i>et al.</i> , (2015).

¹ 1 mrad corresponde a um aumento na largura de feixe de 10 cm em cada 100 m de distância.

² Classe I: seguro para os olhos (ANSI, 1993).

Fonte: Manual RIEGL LD90-3, adaptado pelo autor (2014).

Entretanto, existem duas características problemáticas nesses modelos: feixe de saída relativamente grande e distâncias registradas como uma média de vários pulsos. No LD90-3100HS/3100-VHS-FLP, a média do laser é obtido de, no mínimo, cinco pulsos consecutivos para dar uma única medição. Se cinco consecutivos pulsos de laser não retornar o sistema aguarda até 10 pulsos para obter cinco aceitáveis retornos antes de dar uma mensagem de erro "sem retorno"; Porém o modelo LD90-3100VHS-FLP oferece a opção de medir médias ou de medir cada pulso para evitar esse viés. Assim o sistema ainda possui alguns vieses devido a largura do feixe e o comprimento de onda médio, mas estes têm relativamente pouco efeito sobre as estimativas da estrutura (PARKER *et al.*, 2004).

4.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

O LIDAR portátil terrestre (Figura 3) é um equipamento de fácil manuseio para coleta de dados. O sensor fixo numa plataforma e mantido numa distância conhecida do chão (Figura 3a, 3c). Os sensores emitem de 200 a 2.000 pulsos por segundo (Hz), no comprimento de onda de 890 a 900nm, onde o pulso é refletido intensamente pela vegetação (LILLESAND e THOMAS, 2004; JONES e VAUGHAN, 2010). A distância das estruturas ao alvo é fornecida a partir do tempo entre a emissão e retorno de um feixe laser no espectro infravermelho, ou

seja, o equipamento registra o primeiro e o último retorno da distância das estruturas que é fornecida a partir do tempo entre a emissão e o retorno do feixe laser, produzindo uma nuvem de retornos bidimensionais. Os pulsos que ultrapassam o dossel e não retornam são chamados de *skyshots* ou *sky hits* (PARKER *et al.*, 2004; ALMEIDA *et al.*, 2014).

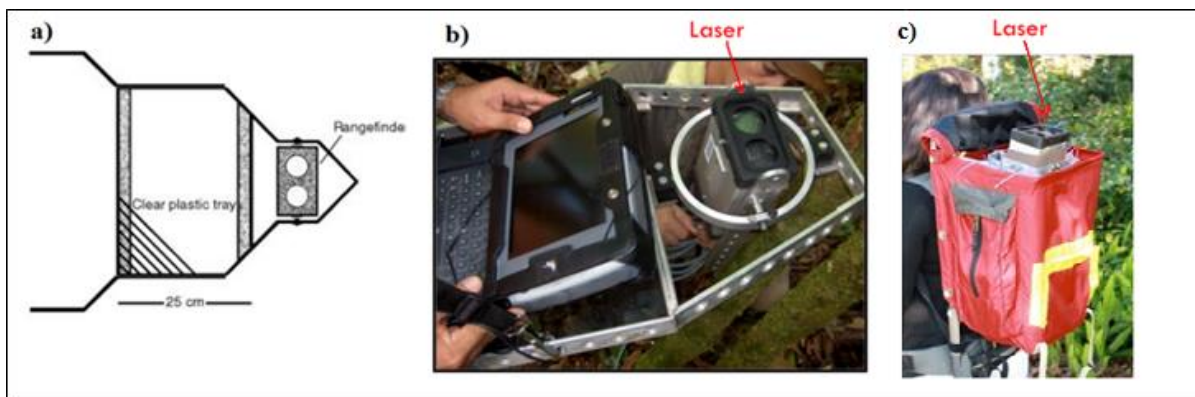


Figura 3 - Planta esquemática da plataforma do LiDAR(a), o sistema LiDAR portátil terrestre(b) e o mesmo sistema numa mochila(c)

Fonte: Adaptado de Parker *et al.*, (2014) (a); Scott Stark, (2014) (b); Listopad *et al.*, (2011) (c)

A forma de coleta do sistema LiDAR portátil terrestre está ligada ao objetivo das medições, mas no geral, o sistema é carregado por um operador que se desloca ao longo da linha central da parcela ou transecto a uma velocidade constante, para obter a distribuição uniforme dos pulsos (PARKER *et al.*, 2004; HARDIMAN *et al.*, 2011, ALMEIDA *et al.*, 2014). A linha central da parcela, dependendo da extensão, é repartida em segmentos para facilitar a mensuração e distribuição uniforme dos pulsos na parcela. Para cada segmento é feito um arquivo de dados, os arquivos contêm a distância vertical de cada barreira que interceptou os pulsos ao longo do perfil vertical da floresta (PROTOCOLO LiDAR PPBIO)

No geral, o sensor é utilizado com a mira vertical perto do zênite, sendo preso numa plataforma (Figura 3a) e deslocando-o horizontalmente (linha reta) em velocidade constante, onde depende da habilidade do operador. Almeida *et al.*, (2014) recomendam a utilização de um metrônomo sonoro para um descolamento em velocidade constante, conseguindo erro inferior a 5%, uma velocidade inconstante poderia afetar atributos estruturais como a possibilidade de captar melhor a altura máxima da floresta e inferir sobre a densidade e o índice de área foliar, mas testes e calibrações ainda devem ser feitos para comprovar estes efeitos. As métricas da estrutura da floresta com base nos dados LiDAR portátil terrestre são calculadas no *software R* ® (R CORE TEAM, 2014) através de *scripts*, sendo uma outra vantagem desse sistema que utiliza um software livre para análise dos seus dados.

4.3 ATRIBUTOS E MÉTRICAS

Os cálculos para obtenção das métricas e aspectos da estrutura da floresta com os dados LiDAR portátil terrestre, utiliza-se os valores brutos (pulsos) da altura (eixo-y) nas janelas da distância (eixo-x), normalmente é utilizado janelas de um metro (1m) para o cálculo das métricas da floresta:

- 1) A distribuição da vegetação ao longo do perfil vertical é calculada a partir de um histograma de densidade dos retornos. Destes histogramas são obtidos os parâmetros de escala e forma;
- 2) Altura máxima (pontos máximos), média (média aritmética dos pontos mais altos em intervalos de um metro do transecto) e mediana (percentil 50%) e fração das clareias (*gap fraction*) é a proporção das janelas que não possuem pontos acima de uma altura limítrofe de 10m ou 15m, podendo variar para cada tipo florestal;
- 3) Abertura do dossel é a proporção dos pulsos de *skyshots* ou *sky hits*;

4.3.1 Índice e densidade de área foliar (IAF e DAF)

A densidade retorno (pulsos) são transformados em “voxels/pixels”, que possuem dimensão de 1m (i) – 1m (j), em seguida, dentro de cada coluna, são quantificados o número de pulsos que entraram em cada “voxel” e depois subtraídos os pulsos refletidos dentro de cada “voxel” (número de pulsos que deixaram cada “voxel”).

Para estimativa do perfil de valores de DAF em intervalos verticais de 1 metro, e o IAF total do perfil, será utilizado o método MacArthur-Horn (1969) como na equação 1. Este método estima a densidade de vegetação corrigindo a perda de intensidade de pulsos ao longo do perfil vertical.

$$DAF_{i,j} = \ln(\text{retornos/pulsos totais}) \times \Delta h \quad (1)$$

Onde:

DAF é a densidade de área foliar de um “voxel” de 1m de altura x 2m de comprimento;

i é o “voxel” no seu sentido vertical: 1-2 m, 2-3 m, 3-4m, etc;

j é o mesmo “voxel” no seu sentido horizontal, em intervalos de 0-2m, 2-4m, 4-6m, etc;

retornos é o número de retornos obtidos para aquele “voxel”;

pulsos totais é o número de pulsos que entraram na base do “voxel” (ou seja, não foram refletidos pelos voxels inferiores), e

Δh é a altura do “voxel” ($\Delta h = 1m$).

Portanto para cada “voxel” de 1m de altura por 2m de comprimento, é estimado um respectivo DAF. O IAF de um trecho linear de 2m é obtido pela soma de todos os DAF de uma pilha de “voxels” (equação 2).

$$IAF_j = \sum_{i=1}^{N_i} DAF_{i,j} \quad (2)$$

Onde o IAF_j é o índice de área foliar do trecho linear j do transecto.

A média do IAF de todas os trechos j do transecto é o IAF médio do transecto.

4.3.2 Rugosidade do dossel (R_C)

Para calcular R_C , tem que primeiro calcular o desvio padrão (ao longo do perfil vertical eixo-y) onde é a distribuição de densidade de folha no interior de cada coluna de pulsos (DAF). Isso resulta em uma fila horizontal de valores, representando cada um desvio vertical, caracterizando uma ampla determinada coluna de 1m ao longo do chão da floresta (eixo-x). Finalmente, R_C é calculado como o desvio padrão de toda a linha (ao longo do eixo-y) de desvios padrões verticais (PARKER *et al.*, 2004; HARDIMAN *et al.*, 2011) (equação 3):

$$R_C = \sigma(\sigma[DAF]_i)_j \quad (3)$$

Onde:

i é o eixo vertical;

j é eixo horizontal;

σ é o desvio padrão.

DAF são os valores obtidos ao longo de um plano vertical transecto um campo tridimensional de densidades de folha.

4.4 ESTUDOS E APLICAÇÕES FLORESTAIS

Conhecer o crescimento de uma floresta é fundamental para o manejo florestal e o planejamento de atividades florestais (COSTA *et al.*, 2008). O LiDAR tem como potencial realizar mensurações diretas que viabilizam as estimativas de variáveis dendrométricas (NILSSON, 1996). As métricas que podem ser estimadas a partir das medições diretas obtidas dos dados LiDAR são as alturas máximas e média do dossel da floresta, ou seja, a topografia das copas (estrutura vertical). Outras características estruturais importantes da floresta, como o índice e densidade de área foliar, rugosidade do dossel, densidade da vegetação, biomassa da parte aérea, área basal e diâmetro podem ser obtidos por estimativas e técnicas de modelagem.

Para determinar os atributos estruturais em áreas de cobertura florestal com o LiDAR portátil terrestre são utilizadas informações obtidas do tempo das emissões e os retornos dos impulsos laser. Onde o primeiro retorno (*first*) é o primeiro eco interceptado, ou seja, o alvo mais próximo do sensor, e as informações do último retorno (*last*), sendo o alvo reflectante mais distante do sensor, a probabilidade de um *last return* vir dos pontos mais altos das árvores é na verdade muito baixa em floresta com o índice de área foliar de 6 a 7, como na Amazônia. A probabilidade de detecção do elemento reflectante mais alto dentro de um cilindro de um m² cai exponencialmente com a altura, quando há outras folhas abaixo deste elemento mais alto.

A probabilidade de detecção de um elemento é governada pela lei de Beer-Lambert, que leva em consideração a altura do objeto e a quantidade de outros objetos abaixo dele. Como são 2.000 pulsos por segundo de *first e last returns*, em qualquer segundo de trânsito horizontal, haverá alta probabilidade de pelo menos um destes retornos vir do objeto mais alto. Mas a probabilidade de um único pulso fornecer o elemento mais alto é muito baixo. Os pulsos que não retornam são chamados de *skyshots* ou *sky hits*.

Nos últimos anos, o uso do sistema LiDAR portátil terrestre para levantamentos da estrutura florestal como: abertura de dossel, altura máxima e média da floresta, densidade de sub-bosque, perfil bidimensional de altura do dossel, densidade e índice de área foliar e rugosidade do dossel, vem sendo objeto de vários estudos.

Parker *et al.*, (2004) testaram diferentes modelos (sensores) de LiDAR portáteis para determinar as características estruturais e funcionais da floresta, relacionando com a topografia, organização de suas copas (perfil da altura do dossel) e a estrutura foliar, que basicamente é o perfil da altura da área de superfície total denominado “C” (h), e a soma de todas as alturas que é o índice de área de copa (CAI), e descreveram o primeiro sistema LiDAR portátil terrestre (Figura 3). Testaram vários sensores LiDAR utilizando o sistema portátil terrestre numa

sequência de idades de florestas folhosas de dossel fechado, concluindo que o sistema fornece resultados significativos e mais rápido do que os métodos convencionais de levantamento de variáveis florestais em campo.

Staebler e Fitzjarrald, (2005) pesquisaram duas florestas estacionais semidecíduas com terrenos complexos (*Havard Forest* e *Borden Forest Research Station*) utilizando esse sistema para obter variabilidade dos perfis verticais e a densidade de área do dossel ($m^2.m^{-3}$) que é a soma das alturas em cada metro de distância (x) por metro de altura (y). Observaram que em média, 90% de toda a área de copa encontra-se abaixo de 20m, mas alguns elementos do dossel são encontrados acima de 25m. Encontraram que a estrutura do dossel foi altamente variável, tanto espacialmente e sazonalmente.

Corp *et al.*, (2009) estudaram a interação do sistema portátil terrestre LiDAR (PARKER *et al.*, 2004) com um sensor *Hyperspectral* numa floresta estacional decidual mista (Edgewater, M.D., EUA), em que reproduziu a geométrica básica da topografia da vegetação com precisão aceitável, concluindo que os dados LiDAR permitiram prever volume de copa, levando às estimativas mais precisas no monitoramento de *Gross Primary Productivity* e *Light Use Efficiency*, em conjunto com os dados do sensor *Hyperspectral*. Portanto o híbrido “HyperSpec-LiDAR” forneceu uma capacidade de detecção única para analisar interativamente componentes individuais e reforçar a qualidade dos dados, além das capacidades do uso individual dos equipamentos.

Na comparação dos sensores DISTOpro4a laser *rangefinder* (*Leica Geosystems, Switzerland*) e o sistema LiDAR portátil terrestre do tipo *rangefinder* da Riegl (LD90-3100HS), Sumida *et al.* (2009) avaliaram a acurácia dos equipamentos (sensores) da detecção de alvos circulares (1 e 2 cm de diâmetro) e uma placa de alvo com aberturas quadradas (1 e 2 cm na diagonal) em diferentes distâncias em frente de uma parede (10, 15, 20 e 30m), utilizando o método de MacArthur e Horn, (1969). Os erros do LiDAR portátil terrestre da Riegl só ficaram maiores que o DISTOPro4a em alvos circulares de 1cm de diâmetro, numa distância de 30m (Erro relativo de 0,33 para capacidade de variar através de aberturas) e em aberturas de 1cm; logo DISTOPro4a apresentou um feixe suficientemente menor e preciso para obtenção do índice e densidade de área foliar (SUMIDA *et al.*, 2009). O DISTOPro4a custa ¥ 160.000,00 em 2007 (equivalente a US\$ 15.000,00 ou R\$ 36.000,00¹).

Listopad *et al.*, (2011) estudaram o sistema LiDAR portátil terrestre tipo *rangefinder* da Riegl (Figura 3c) comparando com sistema LiDAR aerotransportado de varredura (*small*

¹ Cotação do dólar em outubro de 2014 (R\$ 2,40)

footprint) com um sistema *full-waveform* em florestas de *Pinus spp.*, para fornecer uma compreensão dos pontos fortes e fracos na determinação de diferenças estruturais das florestas em parcelas com diferentes tratamentos de distúrbios (frequências de queimadas) em diferentes épocas dentro de floresta secundária e de parcelas de floresta primária. Concluíram que o sistema da Riegl tem alguns pontos fracos e fortes que são comuns em sistemas terrestres (com mira de baixo para cima a partir do solo): a) Insensibilidade em captar camadas superiores do dossel; b) Impossibilidade logística e financeira de cobrir grandes áreas espaciais ou dificuldade de acesso a terrenos. c) Não possui sistema de georreferenciamento; d) Capacidade de ser mais sensível na detecção de níveis mais baixos do dossel (sub-bosque).

Stark *et al.*, (2012) analisaram as diferenças entre sítios na Reserva Ducke e na Flona do Tapajós (km-67), em abril e agosto de 2009, com um sistema LiDAR aerotransportado de varredura (*small footprint*) com um sistema *full-waveform* e o portátil terrestre da Riegl. Os dados de ambos foram analisados e associados em seções de 10 m de largura em regiões centrais das parcelas florestais (georreferenciadas), para comparação dos perfis de densidade de área foliar inferidas através do método MacArthur e Horn, (1969). Houve correlação entre LiDAR aéreo e o portátil terrestre em todas as parcelas (P-valor < 0,001; média do $R^2 = 0,5$ em todas as parcelas) e observaram que o LiDAR portátil terrestre detectou maiores detalhes dos perfis de densidade de área foliar do sub-bosque.

Saleska *et al.*, (2009) identificaram mudanças no perfil vertical de densidade e a altura do dossel entre os anos de 2003 e 2005 em Santarém/PA, localizada no km 67 (Tapajós), na área de visada de uma torre de fluxo de ~45m de altura, utilizando os dados do LiDAR portátil terrestre, verificaram que ocorreu um aumento do perfil de altura e densidade do dossel, onde essas tendências são consistentes com a dinâmica modelada de distúrbio-regeneração da floresta, significando que a floresta teve uma alta regeneração após os distúrbios (seca) de 2005.

Aiba *et al.*, (2013) obtiveram dados da estrutura do dossel das florestas tropicais e subtropicais de montanhas com dominância de espécies coníferas, utilizando-se do sistema LiDAR portátil terrestre (tipo *rangefinder* da Riegl), onde esse sistema pode provar a maioria das alturas máximas e foi comprovado pelas semelhantes às alturas máximas de árvores medidas por um clinômetro ($R^2=0,93$), com estimativas ligeiramente inferiores em medições LiDAR. Assim, concluíram que esse sistema é uma ferramenta poderosa para caracterizar a estrutura da floresta ao longo de gradientes de altitude em ambas as condições de montanhas tropicais e subtropicais. No entanto, em geral do LiDAR inclusive este sistema, não pode separar as folhas dos outros órgãos (ex. caules e ramos) ou folhas de diferentes espécies (ex. gimnospermas e angiospermas).

Hardiman *et al.*, (2011) combinaram uma década de observações de produtividade primária líquida (NPP) com o monitoramento com os dados do LiDAR portátil terrestre do índice de área foliar (IAF) e a diversidade da copa das árvores em povoamentos florestais com diferentes espécies dominantes (rugosidade do dossel), em 30 parcelas de floresta. Descobriram que os efeitos da complexidade estrutural do dossel estavam fortemente relacionados com o NPP e foram semelhantes em magnitude aos resultados do índice de área foliar total e rugosidade do dossel. Os autores sugerem que o efeito da idade dos povoamentos em NPP é mediado principalmente pelo seu efeito sobre a complexidade estrutural do dossel. Conclui-se que o aumento da complexidade estrutural do dossel fornece um mecanismo para o monitoramento do potencial de produtividade (NPP) no desenvolvimento das florestas.

Schiatti *et al.*, (2013) estimaram a altura média e máxima do dossel com o LiDAR portátil terrestre e relacionaram com as medidas feitas com o hipsômetro Vertex (Laser) numa floresta nativa na Amazônia Central. A altura média do dossel das árvores medidas com o hipsômetro explicou 77% ($R^2=0,77$) da variação na altura média em relação ao sistema LiDAR portátil terrestre, e a altura máxima do dossel das árvores medidas com o hipsômetro explicou 71% ($R^2=0,71$) da variação na altura máxima estimada pelo LiDAR.

Machon, *et al.*, (2015) identificaram que o LiDAR portátil terrestre fornece uma ferramenta conveniente, barata e robusta para fazer as medições de aspectos florestais, principalmente do dossel da floresta. Concluíram que o sistema LiDAR portátil terrestre faz a ponte entre inventários florestais e o sensoriamento remoto, especialmente para extrapolações globais da estrutura da vegetação. Os autores sugerem que os dados LiDAR serão usados para prever trajetórias futuras das estruturas florestais, onde devemos considerar as diversas modalidades e intensidades de perturbação e de gestão no âmbito do processo de validação do sensoriamento remoto clássico.

Almeida *et al.*, (2014), quantificaram as diferenças estruturais no perfil vertical entre as fitofisionomias de igapó e terra firme (n=10 trechos de 250m em cada fitofisionomia), em florestas nativas na Amazônia Central, através desse sistema. Concluíram que as florestas de igapó são 15% mais baixas, possuem quase o triplo de abertura de dossel e uma densidade de vegetação 68% menor no sub-bosque (até 5 m de altura) quando comparada a terra-firme. A altura da árvore mais alta em cada trecho de 250m não foi diferente entre as duas fitofisionomias.

Logo nota-se uma expansão de trabalhos com o uso desse sistema e, ainda existem projetos de dissertação e teses que estão empregando esse sistema para detecção da estrutura florestal e avaliação da dinâmica do índice de área foliar em Santarém (PA), que já encontraram

resultados interessantes sobre a estrutura florestal e a dinâmica do índice de área foliar. Também será avaliado os mesmos parâmetros estruturais em Manaus (AM). E trabalhos que observam distúrbios causados por incêndios em florestas densas de igapó e terra firme próximos ao município de Careiro Castanho (AM), que por sua vez já encontram resultados interessantes sobre as modificações pós incêndios na estrutura vertical da floresta (ALMEIDA *et al.*, 2014).

Portanto, o sistema em questão fornece dados significantes para as diferentes fitofisionomias, sendo considerado adequado para classificação de tipologias florestais e diferenciação de florestas em transição de solo-relevo (toposequências). É uma ferramenta que pode ser utilizada para comparações dos efeitos de distúrbios, desmatamentos e manejo florestal.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contínua evolução da tecnologia dos sistemas LiDAR tornará viável a aplicação em muitas áreas e seguramente proporcionará novos desafios para desenvolvimento de métodos e técnicas de obtenção e análise destes dados. Observa-se as notáveis aplicações com o LiDAR portátil terrestre, do tipo *rangefinder* e que registra os primeiros e últimos retornos, para estudos e análise da estrutura e funcionamento da floresta. As vantagens desse sensor advêm de capturar informações bidimensionais da floresta com rapidez, facilidade e baixo custo, quando comparado com os sensores aerotransportados, em especial em áreas com características complexas (florestas densas), bem como por ser sensor terrestre que capta mais detalhes do sub-bosque por visualizar a floresta de baixo para cima.

É evidente os diversos avanços nos métodos de coleta e processamento de dados provenientes deste sensor (PARKER *et al.*, 2004; LISTOPAD *et al.*, 2011; HARDIMAN *et al.*, 2011; STARK *et al.*, 2012; STARK, 2012), e são muitos os argumentos para o aumento de suas aplicações e usos. São cada vez mais frequentes as aplicações operacionais e práticas na área de pesquisas para gestão florestal. Por ser um sistema relativamente barato, quando comparado aos demais, poderá ser utilizado em aplicações diversas como em amostras pilotos, mensurações florestais, levantamentos de variáveis e aspectos estruturais da floresta nos inventários nacionais e regionais.

O LiDAR portátil terrestre é também adequado para florestas plantadas para monitoramento de seu crescimento e dinâmica, bem como analisar economicamente a utilização de sensores, modo de utilização (sistema) e respectivos refinamentos de escala para verificação de suas relativas vantagens em estudos integrados; testar também formas híbridas

que geram resultados interessantes (Corp *et al.*, 2009). Logo são necessárias mais pesquisas para melhor definir sua aplicabilidade e demonstrar o uso sinérgico do LiDAR.

Os sistemas LiDAR provavelmente vão se integrar com câmeras digitais e sistemas de imagens multiespectrais para compensar a falta de informação de padrão espectral, assim através da integração do LiDAR com sensores ópticos surgirão (Anderson *et al.*, 2008), satisfazendo assim, a ampla gama de requisitos de dados em escalas locais e regionais.

No entanto ainda existem diversos desafios a serem superados pela utilização de sensor LiDAR, uma tecnologia em fase de amadurecendo e expansão, visto que é notado cada vez mais o seu uso na silvicultura e aplicações florestais, bem como em pesquisas, mas ainda pouco aplicado no reconhecimento de florestas para gestão florestal, tornando-se fundamental os avanços das pesquisas, principalmente o aprimoramento e desenvolvimento de métodos e estudos que possam viabilizar sua aplicação em extensas áreas como maior captação de dados e variáveis.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA R. A. de, NELSON B. W., SCHIETTI J. S. de A., GORGENS E. B., RESENDE A. F. **LiDAR-terrestre portátil para atributos estruturais em florestas de igapó e terra-firme na Amazônia.** In: XI Seminário de Atualização de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal. 2014.
- ANDERSON, J. E., PLOURDE, L. C., MARTIN, M. E., BRASWELL, B. H., SMITH, M. L., DUBAYAH, R. O., ... & BLAIR, J. B. **Integrating waveform lidar with hyperspectral imagery for inventory of a northern temperate forest.** *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1856-1870. 2008.
- ANSI - American National Standards Institute. **American National Standard for the Safe Use of Lasers. ANSI Z136.1-1993.** *Laser Institute of America*, Orlando, FL. Disponível em: <https://www.lia.org/PDF/Z136_1_s.pdf>. Acesso em: 01 set. 2014.
- AIBA, S.; AKUTSU, K.; ONODA, Y. **Canopy structure of tropical and sub-tropical rain forests in relation to conifer dominance analysed with a portable LIDAR system.** *Annals of botany*. 2013.
- BORNAZ, L.; RINAUDO, F. **Terrestrial laser scanner data processing.** In: XXth ISPRS Congress Istanbul. 2004.
- BUCK, A. L. B. **Análise de métodos de filtragem em dados laser scanner terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de Pinus spp.** Dissertação (Mestre em Engenharia florestal), Universidade Federal do Paraná-UFPR, Curitiba, Paraná, Brasil. 2011.
- COELHO, A. H.; VARGAS, R. M. A. **Geração de modelos digitais de terreno a partir de dados de laser scanner aerotransportado em área de floresta usando o software livre GRASS.** In: INPE, Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil. INPE. p. 3653-3660. 2007.
- COOMES, D. A., DUNCAN, R. P., ALLEN, R. B., TRUSCOTT, J. **Disturbances prevent stem size-density distributions in natural forests from following scaling relationships.** *Ecology letters*, v. 6, n. 11, p. 980-989, 2003.
- CORP, L. A., CHENG, Y. B., MIDDLETON, E. M., PARKER, G. G., HUENNRICH, K. F., & CAMPBELL, P. K. E. **Hyperspectral-LIDAR system and data product integration for terrestrial applications.** *Proceedings of SPIE*, v. 7457, p. 745705-745705-9, 2009.
- COSTA, D. H. M., SILVA, J. N. M., & CARVALHO, J. O. P. D. **Crescimento de árvores em uma área de terra firme na floresta nacional do tapajós após a colheita de madeira.** *Revista Ciências Agrárias*, Belém, (50), 63-76. 2008.
- DASSOT, M; CONSTANT, T; FOURNIER, M. **The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges.** *Annals of forest science*, v. 68, n. 5, p. 959-974, 2011.

- DANSON, F. M., HETHERINGTON, D., MORSDORF, F., KOETZ, B., & ALLGOWER, B. **Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning.** *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 4(1), 157-160. 2007.
- D'OLIVEIRA, M.V.N.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J.; ANDERSEN, H.E. **Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon.** *Remote Sensing of Environment*, 124: 479-491. 2012.
- DRAKE, J. B., DUBAYAH, R. O., CLARK, D. B., KNOX, R. G., BLAIR, J. B., HOFTON, M. A., & PRINCE, S. **Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint LiDAR.** *Remote Sensing of Environment*, 79 (2), p. 305-319, 2002.
- GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, A.; KIRCHNER, F. F. **LiDAR: princípios e aplicações florestais.** *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 30, n. 63, p. 231, 2010.
- HARDING, D. J.; LEFSKY, M. A.; PARKER, G. G.; BLAIR, J. B. **Laser altimeter canopy height profiles Methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests.** *Remote Sensing of Environment*, v. 76, n. 3, p. 283-297, 2001.
- HARDIMAN, B. S., BOHRER, G., GOUGH, C. M., VOGEL, C. S., & CURTIS, P. S. **The role of canopy structural complexity in wood net primary production of a maturing northern deciduous forest.** *Ecology*, 92(9), 1818-1827. 2011.
- JONES, H.G; VAUGHAN, R.A. **Remote Sensing of Vegetation.** Oxford University Press, New York, NY. 2010.
- KRAUS, K., & PFEIFER, N. **Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data.** *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, 53(4), 193-203. 1998.
- LEFSKY, M. A., COHEN, W. B., PARKER, G. G., & HARDING, D. J. **LiDAR remote sensing for ecosystem studies.** *Bioscience*, 52, 19–30, 2002.
- LEFSKY, M. A., HARDING, D. J., KELLER, M., COHEN, W. B., CARABAJAL, C. C., DEL BOM ESPIRITO-SANTO, F. ... & de OLIVEIRA, R. **Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat.** *Geophysical Research Letters*, v. 32, n. 22, 2005.
- LEFSKY, M. A., Cohen, W. B., Harding, D. J., Parker, G. G., Acker, S. A., & Gower, S. T.. Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes. **Global Ecology and Biogeography**, v. 11, n. 5, p. 393-399, 2002.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation.** No. Ed. 5. John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- LIM, K.; TREITZ, P.; GROOT, A.; ST-ONGE, B. **Estimation of individual tree heights using LiDAR remote sensing.** In: *Proceedings of the Twenty-Third Annual Canadian Symposium on Remote Sensing*, Quebec, QC. 2001.

- 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.
- LISTOPAD, C. M., DRAKE, J. B., MASTERS, R. E., WEISHAMPEL, J. F. **Portable and Airborne Small Footprint LiDAR: Forest Canopy Structure Estimation of Fire Managed Plots**. *Remote Sensing*. 3(7):1284-1307. 2011.
- LINGUA, E. & PIROTTI, F. **Terrestrial laser scanning in forestry**. *Sherwood-Foreste ed Alberi Oggi*, n. 156, p. 27-30, 2009.
- MACARTHUR, R. H. & HORN, J. W. **Foliage profiles by vertical measurements**. *Ecology* 50(5): 802–804. 1969.
- MCCMAHON, S. M., BEBBER, D. P., BUTT, N., CROCKATT, M., KIRBY, K., PARKER, G. G., ... & SLADE, E. M. **Ground based LiDAR demonstrates the legacy of management history to canopy structure and composition across a fragmented temperate woodland**. *Forest Ecology and Management*, 335, 255-260. 2015
- MANUAL RIEGL LD90-3. **RIEGL: Laser Measurement Systems: General data sheet LD90-3 series**. Disponível em: <http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/LD90-3_alldatasheets_for_website_25-03-2010.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2014.
- MAAS, H. G., BIENERT, A., SCHELLER, S., & KEANE, E. **Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data**. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5), 1579-1593. 2008.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto e Metodologia de Aplicação**. UFV: 3ª ed. 2005.
- NELSON, R.; PARKER, G.; HOM, M. **A Portable Airborne Laser System for Forest Inventory**. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 69, n. 3, p. 267-273, 2003.
- NETO, R. P. M.; BUCK, A. L. B.; LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L. M.; SILVA, M. N. S.; PESCK, V. A.; TRENTO, M. J.; FURLAN, R. J. **Uso de diferentes filtros para a geração do MDT em dados de varredura laser terrestre**. In: XI Seminário de Atualização de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal. 2014.
- NILSSON, M. **Estimation of Tree Heights and Stand Volume Using an Airborne LiDAR System**. *Remote Sensing of Environment*, v. 56, p. 1-7, 1996.
- NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto, Aplicações Básicas**. Edgard Blücher Ltda: 2ª ed. 363p. 1998.
- PARKER, R. C.; EVANS, D. L. **LiDAR Forest Inventory with Single-Tree, Double-, and Single-Phase Procedures**. *International Journal of Forestry Research*, 2009.
- PARKER, G. G., HARDING, D. J., BERGER, M. L. **A portable LIDAR system for rapid determination of forest canopy structure**. *Journal of Applied Ecology*, v. 41, n. 4, p. 755-767, 2004.

PARKER, G. G. **Structure and microclimate of forest canopies**. In: Lowman, M., Nadkarni, N. (Eds.), *Forest Canopies — A Review of Research on a Biological Frontier*. Academic Press, San Diego. pp. 73–106, 1995.

PARKER, G. G.; RUSS, M. **The canopy surface and stand development: assessing forest canopy structure and complexity with near-surface altimetry**. *Forest Ecology and Management*, p. 1284–1307, 2004.

POPESCU, S. C., WYNNE, R. H., NELSON, R. F. **Estimating plot-level tree heights with LiDAR: local filtering with a canopy-height based variable window size**. *Computers and Electronics In: Agriculture*. Vol.37 (1-3), pp.71-95, 2002.

PROTOCOLO LiDAR: PPBIO/INPA. SCHIETTI, J. Disponível em: <<http://ppbio.inpa.gov.br/knb/metacat/melo.75.8/ppbio>>. Acesso em: 06 ago. 2014.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>. 2014.

SALESKA, S.; ROCHA, H. da. **Ecosystem carbon fluxes and Amazonian forest metabolism**. *Amazonia and Global Change*, p. 389-407, 2009.

SCHIETTI, J., STARK, S. C., SOUZA, P., MARTINS, D. L., EMILIO, T., LEVIS, C., PINTO, J. L. P. V., SILVA, D. C., COSTA, F. R. C., SCHÖNGART, J., TOMASELLA, J., SALESKA, S. R., MAGNUSSON, W. **Capítulo 3 - Environmental limits to canopy height in Central Amazonia**. Tese (Doutorado em Ecologia) Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Manaus, Amazonas, Brasil; 2013.

SILVA, F. A.; RIBAS, W. K. **Perfilamento laser em áreas densamente florestadas**. In: *Anais do Rio Pipeline Conference & Exposition*. IBP. Rio de Janeiro, Brasil. 2007.

STAEBLER, R.; FITZJARRALD, D. **Measuring canopy structure and the kinematics of subcanopy flows in two forests**. *Journal of Applied Meteorology*, p. 1161–1179, 2005.

STARK, S. C.; LEITOLD, V.; SHIMABUKURO, T.; MICHAEL, A. **Amazon forest carbon dynamics predicted by profiles of canopy leaf area and light environment**. *Ecology letters*, v. 15, n. 12, p. 1406-1414, 2012.

STARK, S. C. **On the mechanistic connection of forest canopy structure with productivity and demography in the Amazon**. Dissertation (Doctor of Philosophy) Department of Ecology and Evolutionary Biology, The University of Arizona, Arizona, Estados Unidos. 2012.

SUMIDA, A.; NAKAI, T.; YAMADA, M.; ONO, K.; UEMURA, S. **Ground-Based Estimation of Leaf Area Index and Vertical Distribution of Leaf Area Density in a *Betula ermanii* Forest**. *Silva Fennica*, v. 43, n. 5, p. 799-816, 2009.

VAN LEEUWEN, M.; NIEUWENHUIS, M. **Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing**. *European Journal of Forest Research*, v. 129, n. 4, p. 749 - 770, 2010.

VASCONCELOS, S. S.; HIGUCHI, N.; OLIVEIRA, M. V. N. **Projeção da distribuição diamétrica de uma floresta explorada seletivamente na Amazônia Ocidental.** Acta Amazônica, Manaus, v. 39, n. 1, p. 71-80, 2009.

WATT, P. J.; DONOGHUE, D. N. M. **Measuring forest structure with terrestrial laser scanning.** International Journal of Remote Sensing, v. 26, n. 7, p. 1437-1446, 2005.

WEHR, A., LOHR, U. **Airborne laser scanning—an introduction and overview.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 54, n. 2, p. 68-82, 1999.