

Quantificação e Qualificação da Biomassa Florestal com LiDAR

Dr. Eric Bastos Gorgens
FUNCATE/INPE
GET-LiDAR/USP - ESALQ

Piracicaba
2015

Fundamentação

O acrônimo LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), em português, significa a “amplificação da luz por emissão estimulada de radiação”. O laser é um tipo de luz que possui características muito peculiares quanto à intensidade, concentração, comprimento de onda e organização.

Figura 1. Criação de uma luz monocromática e coerente (Fonte: Beaty, 2004 em <http://amasci.com/miscon/coherenc.html>)

O laser tem característica monocromática (comprimento de onda bem definido) e por isso pode ser propagado como um feixe de luz coerente e unidirecional.

Laser com diferentes comprimentos de ondas podem ser criados. Os tipos mais comuns de laser utilizados no sensoriamento são aqueles com comprimento de onda próximo do azul/verde (532 nanômetros) para estudos batimétricos e o comprimento de onda próximo ao infravermelho (1064 nanômetros) para estudos de vegetação. Esta região do infravermelho próximo é uma região de alta reflectância para a vegetação. A escolha sobre qual comprimento de onda utilizar

depende do objetivo do levantamento. Porém, por se tratar de uma região do infravermelho próximo, ela não assegura bons resultados diante condições climáticas adversas como chuva, nuvem, neblinas, fumaça e outros.

Figura 2. Efeito do aumento de área de vegetação não fotossintética na reflectância do dossel de vegetação (Fonte: Asner, 2014)

Sensores remotos de escaneamento a laser são classificados como ativos porque emitem energia eletromagnética própria sobre os alvos. Esta característica confere a vantagem da produção de informações independente da condição de luminosidade do ambiente, podendo inclusive operar durante o período noturno.

O equipamento ALS

Os equipamentos que compõem um sistema ALS (Airborne Laser Scanning - Escaneamento Laser Aerotransportado) são:

- a) unidade de emissão e recebimento laser acoplado à aeronave;

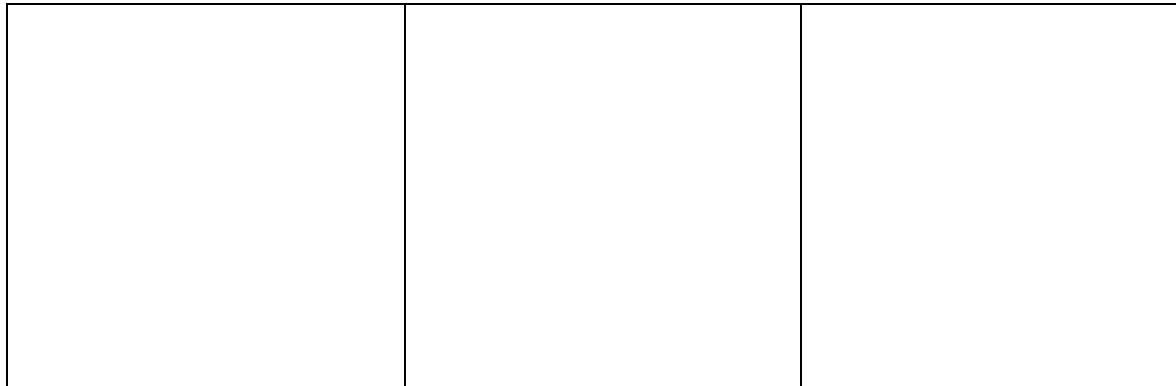


Figure 3. Airborne laser scanner (RIEGL, 2015), VANT laser scanner (arq. Pessoal) e LiDAR lite (<https://www.sparkfun.com/products/13167>)

- b) unidades de posicionamento global (GPS) no avião e no solo;
- c) sensor inercial acoplado à unidade laser para mensuração de movimentos do avião: rolamento, arfada e guinada e;
- d) um computador para controlar e armazenar os dados do levantamento (Figura 5).

Görgens, E. B. (2015)

Figure 4. Conjunto de equipamentos que vão acoplados em uma aeronave para levantamento laser aerotransportado. Fonte: <http://www.leica-geosystems.us/>

Figure 5. Avião especificamente ajustado para levantamentos laser aerotransportado. Fonte: <http://www.flitelevel.tv/>

Figura 6. Esquema básico do funcionamento de um sistema de

escaneamento a laser aerotransportado. Adaptado de Reutebuch; Andersen e McGaughey (2005), e Diaz (2011). Fonte: Silva, 2014.

Para que os pulsos lasers possam explorar a superfície durante um sobrevoo, o módulo laser possui um sistema de varredura que pode assumir três configurações básicas: espelho oscilante, polígono ou palma. O sistema de varredura redireciona o laser emitido para o solo, a medida que o avião se desloca.

Figura 7. Mecanismos de varredura presente nos equipamentos laser aerotransportados. (A) espelho oscilante, (B) polígono rotatório, (C) varredura palmer e (D) varredura de fibras rotatórias. (Adaptado de Wehr e Lohr (1999)).

Os atuais escaneadores a laser emitem cerca de 530 mil pulsos por segundo, iluminando qualquer superfície que se interponha no seu caminho. A frequência de emissão é um dos componentes de maior importância para o sucesso da tecnologia ALS.

O tempo entre a emissão de um pulso laser, interceptação e reflexão por um objeto, e o seu retorno ao equipamento sensor é utilizado para estimar a distância entre o alvo e a aeronave.

O IMU (abreviação para inertial measurement units), ou o INS (abreviação para inertial navigation systems), consiste num

equipamento eletrônico capaz de determinar a velocidade e orientação de uma aeronave (Figure 8). Quando combinado com um GPS, o computador de bordo consegue calcular a posição atual baseado na velocidade e tempo.

Figura 8. Movimento de uma aeronave em função de seus eixos.

Como produto deste conjunto tem-se a nuvem tridimensional de pontos georreferenciada (Figura 9). Um sistema laser pode armazenar as informações em formato de ondas completas (full waveform) e de retornos discretos (discrete return), sendo que a última opção é a forma mais comum.

Figura 9. Representação em três dimensões de nuvens de pontos ALS. Software de visualização utilizado: Fusion LiDAR Data Viewer (Fonte: Silva, 2014)

Outras propriedades importantes do sistema laser podem ser citadas: ângulo de varredura ou ângulo de visada (FOV- Field of View), frequência de escaneamento, altura e velocidade do sobrevoo, divergência do feixe e diâmetro do laser no solo (footprint). Todos são fundamentais para a composição do custo associados ao levantamento.

O ângulo de varredura do equipamento de escaneamento a laser é o intervalo fora do nadir no qual o equipamento consegue emitir e receber pulsos de forma consistente. As propriedades de ângulo de visada e altura de sobrevoo resultam na largura da faixa de cobertura do aerolevantamento. Quanto maior o ângulo de visada e maior a altura do voo, maior será a largura da faixa.

A frequência de escaneamento está associada ao número de vezes por unidade de tempo que o sistema de varredura varre a área de visada. De forma semelhante, a frequência de emissão equivale a quantidade de pulsos emitidos por unidade de tempo. Geralmente as frequências são apresentadas em Hz que, equivale a ciclos por segundo.

O footprint é o diâmetro com que o pulso laser atinge o solo. Quanto maior a divergência do feixe e altura de sobrevoo, maior o footprint (Figura 2). Devido à sua coerência (organização do feixe), quando o pulso laser atinge parcialmente um objeto, o montante de energia não refletida é capaz de continuar seu percurso até ser interceptada por um objeto seguinte. Esta propriedade de decompor o pulso, faz que um pulso laser gere um ou mais retornos, em função da quantidade de objetos interceptados ao longo de todo o caminho do pulso. Se durante seu caminho, parte da pegada é interceptada por uma folha de uma árvore, e outra parte é interceptada pelo solo, este laser emitido irá resultar dois retornos.

Assim, a densidade de retornos também pode ser alterada de acordo com a complexidade e permeabilidade vertical da paisagem. Por exemplo, existirão mais pontos refletidos em uma área com cobertura

florestal do que em uma área urbana, se mantidas todas as outras propriedades do escaneamento constantes.

A frequência de escaneamento, frequência de emissão do pulso, altura do sobrevoo, associados à velocidade do avião e altitude de voo, estão relacionados com a quantidade de pulsos que serão emitidos por unidade de áreas. Como resultado do processo de emissão do pulso e interação do mesmo com a superfície e seus objetos determinam a quantidade de retornos resultante por unidade de área.

A captura do retorno do pulso laser é feito por um equipamento chamado de fotodetector, ou receptor. Este equipamento é capaz de registrar parte da energia que retornou após interagir com os objetos ao longo do trajeto.

A sensibilidade de detecção é um dos parâmetros que precisa ser calibrado. Quanto maior a sensibilidade do sensor, maior a probabilidade de algum sinal ser captado. No entanto, maior também será a incidência de ruído nos dados armazenados.

As funções básicas de um sistema de escaneamento a laser aerotransportado e as configurações de sobrevoo podem ser devidamente planejadas por meio de relações matemáticas entre as propriedades descritas.

Parametrização do voo

Footprint

O pulso laser sai do avião com um diâmetro (D) de 10 cm. No entanto, sabendo que há uma divergência ao longo do seu trajeto, e que ela é igual a 1 mrad (milaradiano = 0,001 rad), o footprint (D_c) pode ser calculado.

Ao tocar o chão, o pulso terá um footprint de 60 centímetros.

Avanço do avião por segundo

A partir da velocidade do avião (v) em quilômetros por hora (km/h) é possível determinar a distância que ele avança a cada segundo do voo:

Voando a 220 km/h um avião percorre a cada segundo 61,11 metros. As unidades serão sempre baseadas em segundo para ficarem compatíveis com as frequências de emissão e de escaneamento para permitir o cálculo direto da densidade de pulsos por metro quadrado, conforme os passos seguintes.

Pulsos por ciclo de escaneamento

A frequência de emissão é dada em hertz e indica a quantidade de pulsos por segundo que são emitidos pelo sensor em direção ao solo. Nos equipamentos atuais este valor pode chegar a 200 KHz, ou 200.000 pulsos por segundo. A frequência de escaneamento determina quanto padrões por segundo será registrado pelo equipamento.

Sabendo que o equipamento LiDAR a ser utilizado possui frequência de emissão de 100kHz, o que equivale a 100.000 pulsos por segundo e que a frequência de escaneamento é de 1.5 ciclos de escaneamento por segundo:

Indicando que ao longo de cada ciclo de escaneamento serão emitidos 66666,67 pulsos.

Faixa imageada

A largura da faixa imageada depende da altitude de voo e do angulo de visada (ou angulo de escaneamento). Supondo que o levantamento será realizado a 950 metros de altura (h), e um ângulo completo de visada () de 30° (equivalente a meio angulo de 15°). Baseado nestes dois parâmetros é possível determinar a largura de visada do escaner.

Primeiro, é preciso lembrar que uma linha reta que sai o avião em direção ao solo divide o ângulo de escaneamento em duas partes formando um triângulo retângulo.

Assim, tangente de metade do angulo de escaneamento cheio, equivale à metade da faixa dividida pela altura do voo:

Isolando o termo com a Faixa de Escaneamento:

Calculando a tangente de 15° obtém-se 0,2679 o que resulta em:

Uma faixa de escaneamento de 509 metros de largura.

Densidade de pulsos por metro quadrado

Com os elementos calculados anteriormente, é possível determinar a densidade de pulsos por metro quadrado do voo configurado com as características acima. A área sobrevoada em um segundo equivale a:

e em um segundo, o equipamento é capaz de enviar 100.000 pulsos, assim a densidade pode ser obtido por:

Combinado as fórmulas acima,

leva ao resultado de 3,21 pulsos por metro quadrado como a densidade média. Os cálculos acima estão disponíveis na planilha Excel (ALS pulse density.xlsx).

Registro das informações ALS

Atribui-se a cada pulso emitido a posição XYZ da aeronave, um ângulo associado ao feixe e o tempo de voo de cada um dos retornos. Conhecendo-se a altitude e coordenadas da aeronave, o tempo de voo e o ângulo do laser ao sair do equipamento LiDAR é possível determinar o ponto no espaço no qual o retorno se originou. Ao se registrar um retorno, registra-se também a intensidade do sinal, qual o número do retorno em relação ao pulso emitido e outras informações relevantes.

Intensidade

Durante a trajetória de um pulso laser, este pode interagir com diferentes objetos. Esta interação causa reflexão de parte da energia que o atingiu. Se este pico for superior ao limiar, o fotorreceptor entende como um retorno e armazena a informação.

A intensidade do retorno vem de uma complicada interação da energia eletromagnética com diferentes atores. Supondo que a energia transmitida (E_t) seja de 2.000 W. A energia que incidirá sobre o objeto depende do coeficiente de transmissão atmosférica (M). Sendo a transmissão atmosférica 80%, o valor da energia incidente sobre o objeto é de 1.600 W.

A capacidade de refletir a energia depende de diversos fatores e segue modelo Lambertiano, e pode ser calculado pela formula:

Onde A = footprint , h = altitude de voo e ρ = reflectância.

Considerando que 100% do pulso atingiu um objeto com reflectância de 50%, dos 2000 W emitidos, apenas 6518 nW (ou $6,52 \times 10^{-6}$ W) serão recebidos pelo fotorreceptor.

Cada objeto terá uma reflectância diferente para cada comprimento de onda. Para um comprimento de onda de 900 nm, é possível

encontrar objetos como a neve que reflete 85% da energia incidente, até o asfalto que reflete somente 17%.

Os primeiros equipamentos LiDAR eram capazes de armazenar apenas um retorno por pulso. Com o desenvolvimento tecnológico o primeiro e o último pulso passaram a ser armazenados. Geralmente o primeiro retorno está relacionado ao ponto mais alto de um objeto (ex: topo de uma árvore) e o último retorno normalmente está relacionado ao solo.

Atualmente os equipamentos são capazes de armazenar além do primeiro e último retorno, também os retornos intermediários. A quantidade de pulsos intermediários capazes de serem armazenados depende de cada equipamento, podendo variar de um a muitos. Sendo muito frequente o armazenamento de 3 a 5 retornos intermediários.

Altura

Para obter a elevação o princípio é bastante simples. Sendo a velocidade da luz conhecida e o tempo entre a emissão e recepção também, através da fórmula de velocidade é possível saber a distância. Esta distância é então facilmente transformada em elevação baseando-se na altitude do avião.

em que d = distância, t = tempo e c = velocidade da luz.

O intervalo entre a emissão e a recepção é usado para computar a distância percorrida entre a unidade laser e o solo. O cálculo é bastante simples. Sendo a velocidade da luz ($c = 299.792.458 \text{ m/s}$) e o tempo entre a emissão e recepção (t) são conhecidos, através da fórmula de velocidade é possível saber a distância (d). A divisão por dois vem do fato do tempo ser registrado para o caminho de ida e volta do laser.

Supondo que o tempo que um pulso laser levou da aeronave até tocar em um objeto e parte da sua energia retornar ao sensor

(emissão/recepção) tenha sido de 0.0032 milissegundos (0.0000032 s). Assim, a distância percorrida durante o trajeto de emissão (avião-objeto) pode ser calculado por:

$$d=299.792.458 * (0.0000032/2)$$

Resultado: 480 metros

Supondo que o avião voava a uma altitude de 500 metros acima do solo e que o pulso laser foi emitido ao nadir, o objeto imageado estava a 20 metros acima do solo.

Armazenamento da nuvem

O arquivo binário de extensão '.las' foi criado pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ASPRS). Este tipo de formato foi desenvolvido principalmente para padronizar e facilitar a troca de arquivos entre provedores de serviço, desenvolvedores de software e usuários. Os arquivos de extensão '.las' podem armazenar maior diversidade de informações do que arquivos de texto ASCII ('.xyz' e '.txt').

Atualmente, existem 5 versões (original e 4 revisões) de arquivos com extensão '.las' sendo a versão mais atual a de número 1.4 (15 de Julho de 2013). De acordo com ASPRS (2013), o arquivo combina dados provenientes de GPS, unidade de medição inercial (UMI) e as informações provenientes do emissor/receptor a laser, para compor a nuvem tridimensional de pontos.

Produtos e subprodutos da nuvem ALS

O produto primário de um levantamento laser aerotransportado é a nuvem de retornos baseada na elevação dos pontos em relação à um geoide de referência. A nuvem original tem pouca utilidade para o analista florestal. Por isto é fundamental o processamento desta em subprodutos como:

- Modelo digital de superfície
- Modelo digital de terreno
- Nuvem de retornos normalizada
- Modelo digital de altura de dossel

Modelo digital de superfície (MDS) é a superfície que tangencia os pontos superiores de uma nuvem não normalizada. Sua elevação é a distância de cada objeto em relação ao datum vertical de referência que no Brasil, o mais utilizado é o marégrafo de Imbituda (SC).

Modelos digitais de elevação (MDE) são também conhecidos como

modelos digitais de terreno (MDT). A principal vantagem de se obter um MDE com a tecnologia ALS é o menor custo de produção em relação às técnicas de agrimensura convencionais.

Descontando a elevação do terreno, obtido através do modelo digital de elevação, da nuvem de pontos original, obtém-se a nuvem retornos normalizada. Neste caso, o valor de Z passa a representar a altura dos objetos em relação ao terreno.

Contratando um levantamento laser aerotransportado

A contratação do voo deve ser pautada por especificações claras e precisas que nortearão a negociação, contratação e validação do serviço prestado. As principais especificações que não devem ser negligenciadas durante o processo de contratação e execução dos serviços são:

Especificação	Observação
Densidade de retornos registrados	Lâminas de água ou outras áreas com baixa refletividade devem ser excluídas do requisito.
Diâmetro do pulso no alvo	Normalmente utilizado ângulo de divergência do pulso entre 0.1 – 0.3 mrad.
Ângulo de varredura	Quando mais aberto o angulo, mais longo será o caminho do pulso até o chão, tendo maior probabilidade do mesmo ser interceptado antes. A redução de pontos do solo pode levar a problemas na criação do modelo digital de terreno.
Sobreposição de faixas	Levantamento <i>wall-to-wall</i> devem ser planejados com uma sobreposição mínima de 50% afim de assegurar uma densidade de pontos homogênea sobre toda a área imageada.
Cobertura completa	Não serão aceitas coberturas de áreas com vazios acima dos limites estabelecidos justificadas pela presença de nuvens, falhas na instrumentação, ou qualquer outra situação.
Exatidão horizontal	Exatidão avaliada comparando pontos de

absoluta (1 sigma) das posicionamento conhecidos com os medidas lidar	respectivos retornos da nuvem.
Exatidão vertical	Exatidão avaliada comparando pontos de
absoluta (1 sigma) das	posicionamento conhecidos com os
medidas lidar	respectivos retornos da nuvem.
Exatidão horizontal	Exatidão avaliada a partir de um mesmo
relativa (1 sigma) entre	ponto imageado em duas faixas diferentes.
faixas	
Exatidão vertical	Exatidão avaliada a partir de um mesmo
relativa (1 sigma) entre	ponto imageado em duas faixas diferentes.
faixas	
Utilização dos mesmos instrumentos	Variações nos instrumentos e nas
	e características do voo (altura, velocidade,
	características do voo etc.) podem gerar problemas na comparação
	para todas as áreas.
aquisições	

Como resultado da contratação do serviço, nuvens contento as informações obtidas durante o voo serão disponibilizadas pela empresa contratada. É essencial que os produtos entregues também sigam especificações claras. Abaixo segue uma tabela que pode ser utilizada como exemplo:

Especificações	Observação
Datum horizontal	Fundamental para incorporar os dados à um sistema de informações geográficas e combinar com informações obtidas por outros levantamento como por exemplo as parcelas de campo.
Datum vertical	Geralmente no Brasil adota-se como

referência o marégrafo de Imbituba, SC	
Projeção	UTM
Unidades	Em metros (UTM)
Relatório do levantamento para cada área de interesse	O relatório deve incluir os responsáveis técnicos e equipe envolvida; os métodos do levantamento e processamento dos dados; os equipamentos e softwares utilizados; a documentação da referência geográfica e compensação geoidal; avaliação da exatidão das medidas incluindo precisão interna e exatidão absoluta; o formato dos arquivos com nomes e unidades das variáveis entregues; convenção para os nomes dos arquivos, <i>tiling scheme</i> , e diagrama mostrando a localização dos arquivos.
Trajetória da aeronave: Arquivos SBET	Posição (coordenadas UTM e altitude) a altitude (<i>heading, pitch, roll</i>) coordenada com o tempo GPS em intervalos regulares (máximo de 1 segundo). Outros atributos podem ser incluídos.
Registro de todos os retornos (point cloud)	Todos os retornos válidos em formato LAS. Cada retorno deve incluir o número do pulso; número do retorno; coordenadas X, Y e Z; intensidade do retorno; ângulo de varredura; <i>GPS time</i> ; e código para classificação (terreno e vegetação). Outras informações podem ser incluídas.

		<p>Existem outros formatos, no entanto deve-se dar preferência para os formatos internacionalmente aceitos e que apresentem compatibilidade com o software que será utilizado para processamento dos dados. Vale destacar aqui o formato LAZ (nuvem de pontos compactada).</p>
Modelo digital do terreno		Raster da superfície utilizando interpolação de uma rede irregular triangulado dos pontos do terreno filtrados. Formato <i>ESRI Floating point grid, 1 m cell size</i> . Não serão aceitas coberturas com vazios. Lâminas de água ou outras áreas com baixa refletividade estão excluídas e receberão um código específico (identificado nos metadados) para áreas sem dados.
Lista de pontos do terreno filtrados		Lista de todos os pontos utilizados para produzir o modelo digital do terreno. Formato ASCII (Número do pulso, retorno, X, Y, Z, intensidade).
Propriedade intelectual		Deve ser definido em contrato claramente a quem os dados pertencem e quais serão as responsabilidades do prestador de serviço após término do contrato.
Tiling e convenção para os nomes dos arquivos	1 x 1 km para LAS, pontos do terreno filtrados, e modelo digital do terreno. A convenção para os nomes dos arquivos está anexada às especificações.	

É fundamental que o relatório a ser entregue pela contratada contenha pelo menos as seguintes informações:

Item	Dados preenchidos pelo vendedor
Nome da área de interesse	
Técnico responsável/CREA	
Data(s) de aquisição dos dados	
Data de entrega	
Quantidade de arquivos LAS entregues	
Fuso UTM (e.g. 22S)	
Total de área adquirido (ha)	
Média de densidade de todos os retornos (No. m²)	
Média de densidade dos primeiros retornos (No. m²)	
Altitude média de aquisição (acima do solo)	
Instrumento lidar utilizado (fabricante, modelo e número de série)	
Última data de manutenção e calibração do lidar, empresa responsável pela manutenção e calibração	
Ângulo de varredura	

Frequência de escaneamento	
Frequência do sistema (PRF; kHz)	
Divergência do pulso (mrad) e diâmetro do pulso no alvo (cm)	
Instrumento GNSS utilizado (fabricante, modelo e número de série)	* Para instrumentos com GNSS e/ou IMU integrados, não haverá necessidade de descrições separadas para estes instrumentos.
Frequência do GNSS (Hz)	
Última data de manutenção e calibração do GNSS, empresa responsável pela manutenção e calibração	* Para instrumentos com GNSS e/ou IMU integrados, não haverá necessidade de descrições separadas para estes instrumentos.
Instrumento IMU utilizado (fabricante, modelo e numero de serie)	* Para instrumentos com GNSS e/ou IMU integrados, não haverá necessidade de descrições separadas para estes instrumentos.
Frequência do IMU (kHz)	
Última data de manutenção e calibração do IMU, responsável pela manutenção e calibração	* Para instrumentos com GNSS e/ou IMU integrados, não haverá necessidade de descrições separadas para estes instrumentos.

Softwares utilizados no processamento dos dados (versão)

Recobrimento das linhas de voo (% overlap)

A quantidade de informações geradas pelos levantamentos laser aerotransportados são imensas. E regras claras para organização, nomenclatura e armazenamento são fundamentais. Recomenda-se que as nuvens de retornos sejam armazenadas em quadrantes (tiles) de 1 km por 1km, partindo sempre de vértices com coordenadas redondas de 1000 metros. Os nomes de cada quadrante devem ser formados por um acrônimo da área sobrevoada (COD) e de numeração sequencial de linhas (L) e colunas (C), seguindo por exemplo:

CODL0001 C0001	CODL0001 C0002	CODL0001 C0003	CODL0001 C0004	CODL0001 C0005	CODL0001 C0006
CODL0002 C0001	CODL0002 C0002	CODL0002 C0003	CODL0002 C0004	CODL0002 C0005	CODL0002 C0006

Processamento da nuvem ALS

Com relação à quantificação e qualificação da biomassa florestal, a tecnologia ALS tem utilidade porque fornece inúmeras variáveis independentes (métricas) que podem ser testadas e modeladas juntamente com outros atributos de interesse da floresta.

Um modelo gerado a partir de estatísticas do conjunto de retornos LiDAR tem a vantagem de poder ser extrapolado espacialmente para toda a área compreendida pela nuvem, desde que o conjunto esteja devidamente representado nas amostras.

A modelagem de variáveis florestais com uso da tecnologia ALS envolve duas abordagens principais:

- i) Baseada em árvore, em que as estatísticas são computadas considerando-se cada árvore separadamente.
- ii) Baseada em área (ou povoamento), onde as informações são representadas por um conjunto indivisível de árvores (parcela).

As métricas provenientes de uma nuvem de pontos podem ser classificadas de acordo com três grandes grupos: métricas topográficas, métricas de intensidade e métricas de altura. Como exemplo de métricas topográficas, citam-se as seguintes: declividade do terreno e aspecto da face (direção da face). Métricas de intensidade dizem respeito ao conjunto de estatísticas relacionadas à quantidade de energia refletida pelo feixe laser em cada objeto interceptado. O grupo de métricas de altura engloba o portfólio de estatísticas mais frequentemente utilizadas para quantificação e qualificação da biomassa florestal.

As estatísticas do grupo de altura podem ainda dividir-se em três subcategorias: métricas de posição, métricas de dispersão e métricas de densidade (ou proporção). Métricas de posição são aquelas diretamente relacionadas à mensuração de alturas, como, por exemplo, percentis, alturas mínimas e máximas, mediana da altura e moda da altura. O subgrupo das estatísticas de dispersão é composto por: desvio padrão da altura, variância da altura, curtose, assimetria, desvio absoluto médio (MAD), entre outras métricas. Por último, as estatísticas de densidade (ou proporção) compreendem as razões de quantidades de retornos presentes nos diferentes estratos da nuvem de pontos. Por exemplo: quantidade de pontos acima de 2 metros de altura dividida pela quantidade total de retornos da amostra.

Além do atributo de altura, variáveis geradas pelo sistema ALS também puderam estimar corretamente o volume, área basal e índice de área foliar em povoamentos florestais, a partir de modelos calibrados com informações coletadas no campo.

Embora já consolidada em países desenvolvidos, a tecnologia de escaneamento a laser aerotransportado é ainda incipiente no Brasil. Alguns trabalhos desenvolvidos com plantios florestais, nos últimos anos são: Gorgens et al. (2015), Gorgens (2014), Silva (2013), Packalén; Mehtätalo e Maltamo (2011), Oliveira (2011), Zonete; Rodriguez e Packalén (2010), Macedo (2009), Zandoná; Lingnau e Nakajima (2007).

Métricas de contagem

Consistem apenas na contagem de determinado padrão, como por exemplo: contagem de primeiros retornos, total de retornos, etc.

Métricas de posição

- Tendência central
 - Média (mean)

- Média quadrática (quadratic mean)
- Média cúbica (cubic mean)
- Moda (mode). Consiste no valor que ocorre com maior frequência nos dados.
- Mediana (median). Elemento que divide uma série ordenada de valores em duas partes de tamanhos iguais. Sendo uma série de n elementos e n ímpar, a moda será o elemento:

Sendo uma série de n elementos e n par, a moda será a média simples dos elementos:

- Separatrizes
 - Percentis (percentiles). Percentil é o termo que divide uma série ordenada de valores de acordo com uma proporção de 1 a 100%. Ex: percentil 10, é o valor que separa 10% dos dados abaixo do seu valor e os demais acima. Mediana = percentil 50. Quartil 1 = percentil 25. Quartil 2 = Mediana = percentil 50. Quartil 3 = percentil 75.

Métricas de Dispersão

- Absoluta
 - Mínimo (minimum). Valor mínimo dos dados. Primeiro valor de uma série ordenada crescente.
 - Máximo (maximum). Valor máximo dos dados.

Último valor de uma série ordenada crescente.

- Desvio Quartil (Interquartile distance).
, em que $Q =$ quartil
- Desvio Padrão (standard deviation)

- Variância (Variance)

- Desvio médio absoluto (Mean Absolut Deviation)

- Mediana dos desvios absolutos da mediana (Median Absolut deviation from median)

- Mediana dos desvios absolutos da moda (Median absolut deviation from mode)

Métrica de assimetria

- Curtose (Kurtosis)

- Assimetria (Skewness)

Métricas de momento-L

- Primeira ordem
- Segunda ordem
- Terceira ordem
- Quarta ordem

Métricas de proporção

- Relativo aos primeiros retornos

- Acima de uma altura X
- Acima da média
- Acima da moda
- Relativo a todos os retornos
 - Acima de uma altura X
 - Acima da média
 - Acima da moda
- Razão de relevo de copa

Mapas de predição

Um mapa é uma representação visual bidimensionais de um espaço tridimensional. Os mapas também são uma expressão da necessidade humana de conhecer e representar o seu espaço.

Eles são muito úteis quando formam uma base adequada para inferir valores dos parâmetros que descrevem as populações neles

representadas.

Dupla amostragem

O Inventário florestal tem por objetivo a quantificação e qualificação dos atributos florestais existentes em uma área, sendo uma peça importante dentro do manejo florestal.

Diferentes delineamentos amostrais existem para melhor estimar o valor de um determinado parâmetro populacional e a sua variação. O erro amostral () é determinado a partir do erro padrão da média (), que nada mais é que uma medida de variabilidade da média quando repetidas amostras são tomadas da população.

Na amostragem casual simples (ACS), todos os elementos da população possuem a mesma probabilidade de pertencer à amostra. A principal limitação da ACS é que o lançamento aleatório das parcelas

pode resultar na não representação de todos os estratos da floresta, resultando assim em estimativas imprecisas da população. Neste caso, quando a população pode ser dividida em estratos homogêneos, emprega-se a amostragem casual estratificada (ACE). Os estratos devem ser representados na amostra na mesma proporção com que existem na população. Quanto mais estratificada a floresta e consequentemente mais homogêneo os estratos, o erro amostral tende a diminuir, uma vez que o erro padrão da média também diminui.

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

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

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

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

(1)

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

(2)

(3)

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

(4)

Na amostragem casual estratificada, sendo a média dos volumes das unidades de amostra do j-ésimo estrato, o número de parcelas no j-ésimo estrato, o número de parcelas possível no j-ésimo estrato, o número de unidades de amostra possíveis na população e a variância do j-ésimo estrato, a média estratificada (Equação 5) e a variância da média estratificada (Equação 6) podem ser estimadas através de (SHIVER; BORDERS, 1996):

(5)

(6)

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

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

(7)

em que = coeficientes do modelo e = erro aleatório.

Já na DA II, foram utilizadas duas variáveis auxiliares (percentil 90 – P90 e porcentagem de retornos acima da média dos primeiros retornos – ARMFR) em uma regressão linear múltipla (Equação 8) para relacionar essas duas métricas LiDAR (1^a fase) com a variável de interesse VTCC (2^a fase).

(8)

em que = coeficientes do modelo e = erro aleatório.

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

(9)

Em que n_1 e n_2 = número de parcelas na 1^a e 2^a fase, respectivamente e pode ser calculado a partir do coeficiente de determinação ajustado do modelo (SHIVER; BORDERS, 1996):

(10)