



Potencial da tecnologia LiDAR terrestre na área florestal

Quétilla Souza Barros^{1*}, Nívea Maria Mafra Rodrigues², Romário de Mesquita Pinheiro¹, Evandro José Linhares Ferreira¹

¹Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Núcleo de Pesquisas do Acre, Rio Branco, Acre, Brasil, ²Doutoranda da Universidade Federal do Espírito Santo, Pós-graduação em Ciências Florestais, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. *quetilabarros@gmail.com

Recebido em: 27/01/2023

Aceito em: 21/05/2023

Publicado em: 31/07/2023

DOI: <https://doi.org/10.29327/269504.5.1-29>

RESUMO

As técnicas de sensoriamento remoto permitem que os manejadores e gestores florestais colem de forma eficiente, rápida e precisa variáveis difíceis de obter em larga escala. O LiDAR terrestre é uma tecnologia com alto potencial para coleta de dados florestais, como a medição da biomassa, estrutura e diversidade florestal. Diante disso, o objetivo do trabalho foi apresentar uma revisão bibliográfica sobre o potencial da tecnologia LiDAR terrestre como uma ferramenta alternativa de sensoriamento remoto na obtenção de dados e informações florestais. Os scanners terrestres (TLS) permitem que sejam realizadas representações 3D da distribuição espacial dos elementos do dossel florestal, além de fornecer métricas sem amostragem destrutiva das árvores, especialmente útil para estudos de levantamento de biomassa. Entretanto, a sua utilização tem sido limitada devido a falta de recursos financeiros para investir em tecnologias de ponta, falta de capacitação e treinamento para operar e analisar os dados coletados, infraestrutura insuficiente para armazenamento e processamento de grandes volumes de dados e custo elevado. Para superar essas limitações, é importante que haja maior investimento em pesquisa e desenvolvimento. Com o aumento da conscientização sobre a importância do monitoramento florestal, espera-se que essas limitações possam ser superadas no futuro.

Palavras-chave: Estrutura tridimensional. Aplicações florestais. Inventário florestal aprimorado.

Potential of terrestrial LiDAR technology in the forest area

ABSTRACT

Remote sensing techniques allow managers and forest managers to efficiently, quickly and accurately collect variables that are difficult to obtain on a large scale. Terrestrial LiDAR is a technology with high potential for forest data collection, such as measuring biomass, forest structure and diversity. Therefore, the objective of this work was to present a bibliographic review on the potential of terrestrial LiDAR technology as an alternative tool for remote sensing in obtaining forest data and information. Terrestrial scanners (TLS) allow 3D representations of the spatial distribution of forest canopy elements to be performed, in addition to providing metrics without destructive sampling of trees, especially useful for biomass survey studies. However, its use has been limited due to lack of financial resources to invest in cutting-edge technologies, lack of qualification and training to operate and analyze the collected data, insufficient infrastructure for storage and processing of large volumes of data and high cost. To overcome these limitations, it is important that there is greater investment in research and development. With increasing awareness of the importance of forest monitoring, it is hoped that these limitations can be overcome in the future.

Keywords: Three-dimensional structure. Forestry applications. Enhanced forest inventory.

INTRODUÇÃO

Os estudos que visam compreender os processos de sustentação das florestas estão continuamente evoluindo. No entanto, a escassez de métodos eficientes para determinar a estrutura da floresta limitam a concepção da relação entre a estrutura florestal e suas características funcionais em escalas espaciais compatíveis (FALK et al., 2022). Portanto, é necessário utilizar técnicas de sensoriamento remoto para realizar o levantamento da estrutura florestal (SCHULT, 2014).

As técnicas de sensoriamento remoto permitem que os manejadores e gestores florestais colem de forma eficiente, rápida e precisa variáveis difíceis de obter em larga escala (LECHNER et al., 2020). Nesse sentido, surge o “LiDAR” considerado uma técnica de sensoriamento remoto ativo. O termo “LiDAR” foi criado por Ring (1963), combinando as palavras “luz” e “radar”. A interpretação mais comum é como *Light Detection And Ranging* (semelhante ao desenvolvimento original do termo radar de "*Radio Detection And Ranging*") (DONG; CHEN, 2017). Inicialmente, o LiDAR foi utilizado na década de 80 para aplicação em inventários florestais (LIM et al., 2003).

Ao utilizar o LiDAR, é possível coletar dados emitindo luz própria, independentemente da presença de uma fonte de luz externa, ao contrário dos sensores passivos, como fotografias aéreas e imagens de satélite. O seu princípio consiste em emitir um pulso de luz direcionado para uma superfície ou objeto, e quando atinge o alvo, a luz é refletida de volta para o sistema laser. Seguindo os princípios de triangulação ou da medição do tempo de retorno do pulso refletido (*Time-of-Flight*), o sistema LiDAR calcula a distância entre o sensor e o objeto (WAGNER et al., 2004).

O LiDAR pode realizar uma varredura a partir de uma plataforma terrestre fixa ou móvel (veículo automotor), aeronave ou um sistema orbital (satélite ou estação espacial) (WAGNER et al., 2004; NASA, 2014). Ele é uma importante fonte de aquisição de dados de detecção remota em inventários florestais modernos e permite medir as alturas de árvores individuais, atributos de copa e até mesmo diâmetros. A utilização mais comum do LiDAR é por meio de um scanner a laser acoplado a uma aeronave (ou possivelmente um satélite) (DONG; CHEN, 2017). Nos últimos anos, novas plataformas têm sido utilizadas com sensores LiDAR, como o terrestre e o acoplado a Vant's e drones (KUMAR, 2017)

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre o potencial da tecnologia LiDAR terrestre como uma ferramenta alternativa de sensoriamento remoto na obtenção de dados e informações florestais.

METODOLOGIA

Este estudo foi elaborado a partir de um Levantamento bibliográfico em livros, artigos e dissertações de sensoriamento remoto na área florestal. Foram realizadas pesquisas em trabalhos que adotam metodologias e experiências na utilização do sensor LiDAR terrestre, considerando as especificações técnicas e aplicações dessa ferramenta tecnológica no avanço das pesquisas em ciências florestais.

REFERENCIAL TEÓRICO

LiDAR terrestre: princípios e caracterização

De acordo com Barber (2003), o sistema de Varredura Laser Terrestre (TLS) é uma ferramenta que utiliza um laser para mensurar as coordenadas tridimensionais de uma área ou superfície de um objeto de forma automática. Os dados obtidos são designados como nuvem de pontos que fornecem as coordenadas X, Y, Z dos pontos levantados na superfície escaneada, assim como a intensidade do retorno do sinal.

A pesquisa sobre o uso do LiDAR na área florestal tem sido intensa devido ao alto potencial da tecnologia de coletar dados tridimensionais precisos. O TLS pode ser utilizado para medições de inventário florestal (altura das árvores, diâmetro a altura do peito, densidade, área basal estimativas de volume de madeira) e caracterização do dossel (projeções, número de clareiras, distribuição das árvores). Além disso, o sensor terrestre também auxilia na obtenção de dados ecológicos (propriedades físicas das folhas, processos de transpiração e diversidade de micro-habitat) (DASSOT et al., 2011).

O TLS é um scanner empregado como forma de avaliação de parâmetros florestais de modo não destrutivo, permitindo que objetos sejam digitalizados de forma rápida e precisa, gerando nuvem de pontos tridimensionais (3D) (RICHARDSON et al., 2014). A tecnologia TLS, apresenta alto potencial para pesquisas ecológicas e de dinâmica florestal (TROCHTA et al., 2017).

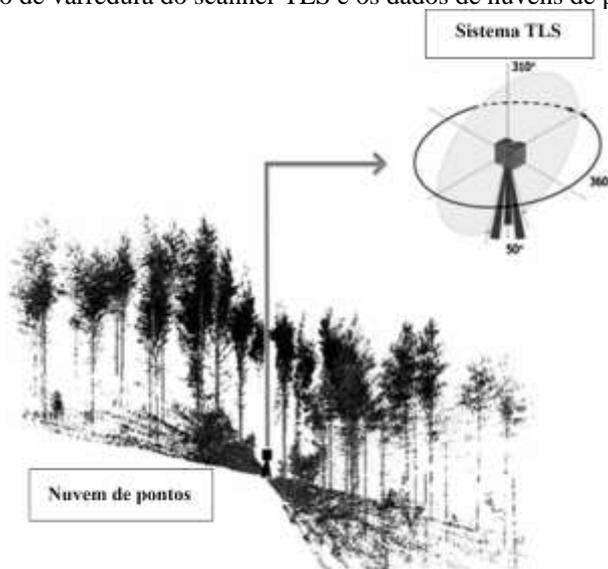
Os equipamentos laser scanner terrestre geralmente são montados em um tripé ou plataforma estável. O pulso a laser é emitido horizontalmente movimentando-se em pequenos intervalos angulares. A cada incremento no sentido horizontal através de um

telescópio ou espelho giratório, o equipamento lança pulsos verticais em intervalos angulares determinados, de modo que calcule as coordenadas dos pontos que reproduzem o sinal. Por esta razão, a precisão de cada equipamento para gerar coordenadas dos pontos depende da exatidão na medição de ângulos e distâncias (MÁRQUEZ, 2010).

A motivação inicial para o uso da tecnologia TLS em inventários florestais foi aumentar a eficiência do trabalho nas parcelas, substituindo a medição manual das árvores por medições automatizadas. Entre as aplicações na área de inventário, estão a coleta de atributos das árvores, como o diâmetro à altura do peito (DAP) e a posição sociológica (MURPHY et al., 2010).

Liang et al., (2016) ilustram como a tecnologia TLS funciona por meio da Figura 1. Em um instrumento TLS comum, o ambiente é escaneado através de uma rápida rotação vertical e uma rotação mais lenta do instrumento na direção horizontal. Na direção vertical, o feixe de laser é iniciado da posição mais alta do scanner e gira para a posição mais baixa. Logo após, o feixe do laser continua para o zênite do scanner, na outra direção do instrumento. No sentido horizontal, o scanner gira 180 ° e digitaliza ambos os lados do instrumento simultaneamente.

Figura 1 – O mecanismo de varredura do scanner TLS e os dados de nuvens de pontos.



Fonte: Liang et al., (2016).

Estudos e aplicações florestais

Yao et al., (2011) utilizaram dados TLS para estimar a biomassa em três florestas de coníferas na Austrália e observaram que o método apresentou uma margem de acerto

que explicou 85% da variância do levantamento realizado em campo. De acordo com Dassot et al. (2011), equipamentos com altas resoluções aumentam o peso dos dados e o tempo necessário de processamento. É importante registrar a nuvem de pontos, combinando varreduras múltiplas em um único arquivo, para aumentar a cobertura dos pontos das árvores, reduzir os efeitos do sombreamento e melhorar a qualidade dos dados coletados (ZHAO et al., 2011). A precisão do levantamento TLS sofre influência direta da dimensão do local, altura das árvores, ventos e presença de sub-bosque (CIFUENTES et al., 2014).

Cifuentes et al., (2014) avaliaram o potencial da tecnologia TLS em estudos estruturais da floresta e o percentual de clareiras em três áreas florestais na Bélgica, totalizando 7,4 hectares de área amostrada. Os resultados demonstraram que o TLS é recomendado para estimar as clareiras em florestas jovens, mas não é recomendado em florestas intermediárias e maduras devido aos altos custos envolvidos e baixa melhoria nos resultados em comparação com amostragens realizadas in loco. Embora possua alto detalhamento, o conjunto de dados TLS pode apresentar medições errôneas devido a fatores como vento e interferência de luz no ambiente.

Calders et al., (2015) desenvolveram modelos para estimar a biomassa de povoamentos de eucalipto na Austrália utilizando dados de nuvens de pontos TLS. Os resultados mostraram que o levantamento com TLS apresentou uma superestimação de 9,7%, enquanto que quando as equações alométricas tradicionais foram utilizadas com dados de inventário de campo, houve uma subestimação de 2,9%. Isso indica que as estimativas de biomassa do TLS não exigem o emprego de equações alométricas e podem ser realizadas independentemente do tamanho da árvore.

Astrup et al., (2014) estimaram o volume de madeira em 12 povoamentos florestais no Sul da Noruega, usando dados coletados com TLS. As estimativas de volume das árvores individuais foram realizadas de três maneiras: i) por meio do DAP e das alturas medidas, empregando equações de volume para árvore individual para os dados coletados com TLS; ii) um software que forneceu uma lista com todas as árvores detectadas com diâmetros em intervalos de 10 cm e, iii) aparelho coletor das medições. O volume estimado com TLS apresentou bons resultados em comparação com as outras abordagens.

Almeida (2015) utilizou o LiDAR terrestre para avaliar a suscetibilidade e impactos dos incêndios florestais em áreas de terras firme e de Igapó na Amazônia Central. Foram estudadas três áreas ao longo de 10 transectos. Segundo o autor, o LiDAR

terrestre portátil demonstrou ser eficiente para levantamento dos danos causados pelos incêndios florestais e que as informações sobre os atributos estruturais da floresta após o fogo foram obtidas de forma rápida e eficaz.

Pesck (2015) conduziu uma pesquisa utilizando LiDAR terrestre no estado do Paraná, com o objetivo de aplicar a tecnologia para contar o número de árvores individuais em plantios clonais de *Eucalyptus* spp. empregando um algoritmo de distância máxima para obtenção dos diâmetros e considerou dois tipos de varreduras, simples e múltiplas, de acordo com a dimensão das unidades amostrais. Para registrar a nuvem de pontos LiDAR dos levantamentos com varreduras múltiplas, foram posicionados cinco alvos esféricos acoplados em tripés em diferentes alturas em cada unidade amostral estudada, a fim de garantir a precisão na localização e escaneamento das árvores (Figura 2). A varredura simples apresentou melhores resultados, tendo conseguido localizar 100% das árvores nos povoamentos com dois anos de idade. Porém, nos povoamentos com 2, 4 e 5,5 anos, a varredura simples foi menos eficaz, não conseguindo identificar 100% das árvores. Conforme o diâmetro aumentou, a acurácia do equipamento diminuiu (PESCK, 2015).

Figura 2 – Alvos posicionados para o registro da nuvem de pontos.



Fonte: Pesck, (2015).

Olagoke et al., (2016) estimaram o volume da biomassa de árvores da espécie *A. germinans* em floresta de mangue na Guiana Francesa por meio de dados LiDAR terrestre do sistemas FARO focus 3D X330. Os dados foram processados unindo todas as varreduras realizadas, a vegetação ao redor foi filtrada ou removida e gerou-se a nuvem de pontos das árvores de interesse. O volume do tronco foi estimado diretamente a partir

da nuvem de pontos com base na altura e diâmetro da base e topo da árvore. O resultado da estimativa da biomassa apresentou coeficiente de determinação (R^2) = 0,96 e RMSE = 48,50 kg (13,5%), demonstrando ser uma técnica de alta precisão para estimativa da biomassa.

Rosa (2016) utilizou dados TLS para levantamento da estrutura do dossel e sazonalidade do índice de área foliar em ambientes de terra firme na Amazônia Central-Brasil. O sensor LiDAR foi empregado com visada vertical e forneceu uma nuvem bidimensional de últimos retornos (x,z), x foi a distância percorrida com o sensor e z a altura acima do solo, com precisão ± 25 mm e alcance de 200 m. Para realizar a varredura, o sensor LiDAR foi conectado a uma haste e mantido a um metro do solo. O sistema foi completado com uma bateria de 12 v e um computador resistente à chuva. Foram necessários dois operadores para a operação do sistema, um para caminhar a uma velocidade constante pela área e outro para gerenciar a gravação, salvando os dados no computador (Figura 3).

Figura 3 – Sistema LiDAR portátil terrestre: (a) sensor LiDAR, (b) computador (Toughbook) e (c) sistema completo e operadores.

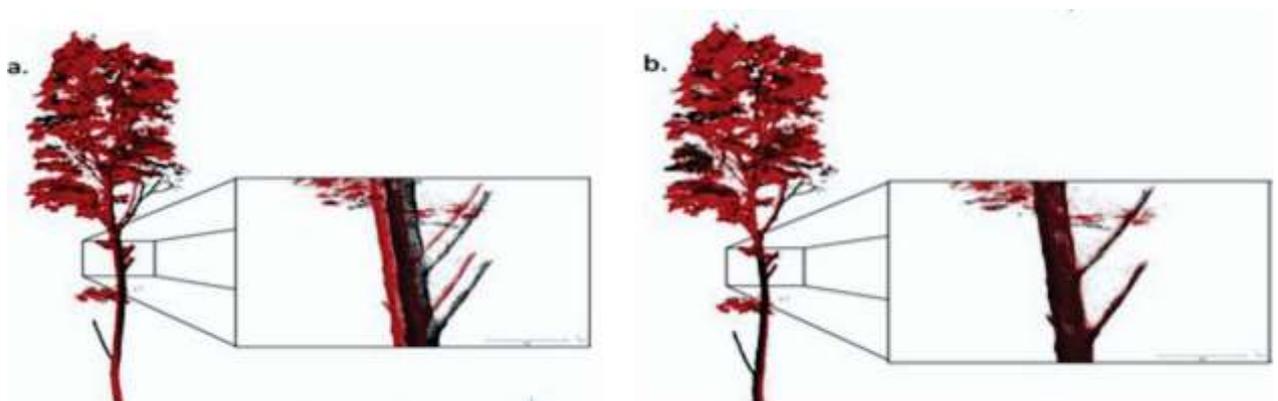


Fonte: Rosa, (2016).

Os seguintes atributos estruturais do dossel foram obtidos: altura máxima por transecto; as 150 alturas máximas por intervalo de 1 cm; três medidas de abertura do dossel; perfil vertical de densidade da área foliar e fração do índice de área foliar. O LiDAR portátil terrestre (LPT) apresentou sensibilidade para detectar variações temporais na quantidade de folhas (LAI) no dossel dos ambientes analisados. O aparelho também foi sensível a diferenças espaciais na distribuição vertical e horizontal da densidade de folhas (LAD) e apresentou resultados satisfatórios para levantamento da estrutura do dossel e distribuição vertical das folhas (ROSA, 2016).

Olivier et al., (2017) desenvolveram um método para quantificar a estrutura das copas das árvores de duas espécies florestais em relação a abertura de clareiras no Canadá, por meio de um algoritmo baseado em levantamentos de dados TLS. Neste estudo, as árvores concorrentes próximas foram derrubadas para abertura de clareiras e após o procedimento de liberação das árvores elas foram escaneadas com um equipamento Faro Foco 3D. No verão de 2013, cada árvore foi alinhada através de seis alvos esféricos. Posteriormente, no verão de 2015, as mesmas árvores passaram por novo processo de digitalização. Os dados dos levantamentos foram pré-processados e geradas nuvens de pontos para cada árvore. As nuvens de pontos foram exportadas como arquivos ASCII e processadas no software CloudCompare. Foram obtidas as coordenadas da base da copa de cada árvore. O alinhamento da nuvem de pontos nos anos de medição foi um passo importante para reduzir o viés na quantificação das alterações na copa (Figura 4).

Figura 4 – Diferenças entre a precisão do alinhamento automático e manual. a. Alinhamento automático realizado com algoritmo ICP CloudCompare. b. Alinhamento manual realizado com ferramentas manuais do CloudCompare. *A unidade de escala é em metros.



Fonte: Olivier et al., (2017).

Ainda de acordo com Olivier et al. (2017), foram quantificadas as mudanças na copa entre os dois anos de levantamentos por meio dos cálculos de expansão global, expansão horizontal, expansão vertical, deslocamento de biomassa e expansão horizontal relativa. Todos os algoritmos para obtenção dessas informações foram desenvolvidos no programa R. Os autores constataram que o método proposto foi eficaz para quantificar as alterações de curto prazo na estrutura da copa das árvores, sendo facilmente aplicado em estudos de variações estruturais tanto verticais quanto horizontais, e sendo útil para a seleção de tratamentos silviculturais, o que é crucial para a produtividade e qualidade da madeira.

No Brasil, a aplicação do LiDAR terrestre na área florestal é ainda relativamente nova, com avanços tímidos na última década. No entanto, alguns estudos experimentais têm sido realizados para verificar a aplicabilidade do LiDAR terrestre nas florestas.

Almeida et al., (2017) utilizaram a tecnologia para analisar como o efeito de borda altera a estrutura florestal na Amazônia Oriental. Não houve diferença significativa no IAF total entre os três tratamentos. Porém, a distribuição da vegetação ao longo dos estratos do perfil vertical foi diferente. No sub-bosque (< 5m), houve um gradiente crescente Borda-Interior-Contínua significativo no IAF do respectivo estrato. No estrato mediano, entre 5-25 m, o gradiente é invertido significativamente e depois é invertido novamente no estrato superior, acima de 25 m. A altura média do dossel apresentou um gradiente crescente Borda-Interior-Contínua significativo. Os outros dois atributos de altura (altura máxima e rugosidade) não apresentaram diferenças significativas. Porém, para as bordas há tendência de ser mais baixa (p valor = 0,078). O LiDAR terrestre foi capaz de identificar mudanças estruturais no dossel causado por efeitos de borda e fragmentação florestal.

Em uma abordagem mais recente, Viana et al. (2022) utilizaram o LiDAR terrestre para estimar o volume da madeira em florestas secundárias do bioma Mata Atlântica. A média de DAP obtida pelo método convencional foi de 19,58 cm (\pm 98,34%) e a obtida pelo TLS foi de 19,48 cm (\pm 94,99%). A média de HT para o método convencional foi de 13,47m (\pm 7,04%) e a obtida com o TLS foi de 15,36m (\pm 8,63%). A média de HC encontrada pelo método convencional foi de 10,33 m (\pm 46,66%) e a obtida pelo TLS foi de 8,63 m (\pm 51,61%). Os valores de DAP estimados com TLS foram próximos aos obtidos pelo método convencional, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,99. Os valores de HT mostraram um bom ajuste entre eles. Em relação ao volume obtido por

escalonamento, os valores de volume obtidos com os dados coletados pelo método convencional, modelo SH e os obtidos com os dados TLS foram semelhantes.

Vantagens da utilização do sensor LiDAR terrestre em estudos florestais

Os scanners terrestres (TLS) permitem que sejam realizadas representações 3D da distribuição espacial dos elementos do dossel florestal (CÔTÉ et al., 2012). Esses sensores remotos permitem aos usuários obter métricas do dossel sem amostragem destrutiva das árvores, especialmente útil para estudos de levantamento de biomassa (DASSOT et al., 2012; CALDERS et al., 2015). Os dados de levantamentos TLS fornecem acesso a informações até então inacessíveis sobre a estrutura do dossel, como mapeamento 3D completo da densidade de folhas (BÉLAND et al., 2014).

Estudos de Feliciano et al., (2014) nos Estados Unidos e Olagoke et al. (2016) na Guiana Francesa mostraram bons resultados na estimativa da biomassa não destrutiva de árvores em áreas de mangue com o uso de TLS, evidenciando uma vantagem desse sistema de medição. Segundo Liang et al. (2016), a tecnologia TLS é uma ferramenta precisa, com nível de detalhe milimétrico, capaz de fornecer estimativas automáticas, periódicas e rápidas dos elementos do inventário florestal. A principal vantagem do método, segundo os autores, é a sua aplicação em inventários florestais. A tecnologia também pode ser utilizada para estimar o formato da copa das árvores e detectar alterações estruturais nas florestas (LIANG et al., 2012; TROCHTA et al., 2017).

O TLS tem um alto potencial para aquisição de informações espaciais em ambientes florestais, devido à sua alta precisão de medição, tempo de aquisição de dados e nível de detalhamento, superando as capacidades do LiDAR aerotransportado. Isso torna útil para descrever povoamentos florestais a nível de árvore individual (TROCHTA et al., 2017).

Desvantagens da utilização do sensor LiDAR terrestre

Os sistemas de sensores ativos precisam de muita energia para funcionar e não conseguem detectar objetos além de seu alcance máximo por conta das limitações de hardware (CIFUENTES et al., 2014). Uma desvantagem da tecnologia TLS é que à medida que a distância aumenta, os dados coletados tendem a ter maior margem de erro (SILVA et al., 2013). A medição direta da altura da árvore, por meio de TLS, é uma variável de difícil obtenção em vegetação densa, pois as copas das árvores são

sombreadas por outras árvores. Assim, as grandes copas das árvores altas não permitem que um scanner próximo detecte suas copas exatas, o que representa um desafio para a aplicação dos dados TLS nesses casos (LIANG et al., 2016).

De acordo com Tremblay e Béland (2018), a principal limitação da tecnologia TLS na área florestal é o tamanho das equipes necessárias e a dimensão da cobertura florestal que pode ser mapeada por dia. Como os instrumentos TLS são estáticos, geralmente não possuem GPS e unidades inerciais, e o mapeamento completo da cobertura espacial de determinada área utilizando esse sensor é demorado, dependendo da experiência da equipe o tempo gasto na atividade pode ser ainda maior. Por exemplo, o estudo de Calders et al. (2016) no Reino Unido, que mapeou uma área florestal de seis hectares posicionando o TLS em 176 localizações diferentes, levou 11 dias de campo para ser concluído.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do LiDAR terrestre na área florestal tem alto potencial para coleta de dados precisos. No entanto, a análise de publicações mostra que o uso do LiDAR terrestre na área florestal no Brasil não tem acompanhado seu alto potencial de utilização, com poucas pesquisas sendo realizadas. Algumas razões para isto incluem: falta de recursos financeiros, falta de capacitação e treinamento para operar e analisar os dados, falta de infraestrutura para armazenar e processar grandes quantidades de dados, além da logística para acessar áreas remotas e de difícil acesso.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. R. A.; BRANCALION, P. H. S.; ALMEIDA, J. S.; GORGENS, E. B.; NELSON, B. W.; STARK, S. C. LiDAR terrestre para investigação de efeitos de borda e fragmentação florestal em atributos estruturais do dossel na Amazônia Central. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, São Paulo, **Anais [...]**. São Paulo: INPE, 2017. p. 1848-1853. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr/trabalhos/lidar-terrestre-para-investigacao-de-efeitos-de-borda-e-fragmentacao-florestal-e?lang=pt-br>. Acesso em: 20 dez. 2022.

ALMEIDA, D. R. A. **Avaliação de susceptibilidade e impacto de incêndios em floresta alagável (igapó) e terra-firme na Amazônia central por meio de lidar terrestre portátil**. 2015. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2015.

ASTRUP, R.; DUCEY, M. J.; GRANHUS, A.; RITTER, T.; VON LÜPKE, N. Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 44, n. 6, p. 666–676, 2014.

BARBER, D. M.; MILLS, J. P.; BRYAN, P. G. Towards a standard specification for terrestrial laser scanning of cultural heritage. **CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage**, v. 19, p. 619–624, 2003.

BÉLAND, M.; WIDLOWSKI, J. L.; FOURNIER, R. A. A model for deriving voxel-level tree leaf area density estimates from ground-based LiDAR. **Environmental Modelling & Software**, v. 51, p. 184–189, 2014.

CALDERS, K.; NEWNHAM, G.; BURT, A.; MURPHY, S.; RAUMONEN, P.; HEROLD, M.; KAASALAINEN, M. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 6, n. 2, p. 198–208, 2015.

CIFUENTES, R.; VAN DER ZANDE, D.; FARIFTEH, J.; SALAS, C.; COPPIN, P. Effects of voxel size and sampling setup on the estimation of forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 194, p. 230–240, 2014.

CÔTÉ, J. F.; FOURNIER, R. A.; FRAZER, G. W.; NIEMANN, K. O. A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 166–167, p. 72–85, 2012.

DASSOT, M.; COLIN, A.; SANTENOISAE, P.; FOURNIER, M.; CONSTANT. Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 89, p. 86–93, 2012.

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.

DONG, P.; CHEN, Q. **LiDAR Remote Sensing and Applications**. 1. ed.; Florida: CRC Press: 2017.

FALK, D. A.; MILLER, C.; MCKENZIE, D.; BLACK, A. E.; D'ANTONIO, C. M.; GOLUBIEWSKI, N. E.; LAWSON, D. M.; MCBRIDE, J. R.; STODDARD, M. T. Mechanisms of forest resilience. **Forest Ecology and Management**, v. 512, p. 120–129, 2022.

FELICIANO, E. A.; WADOWINSKI, S.; POTTS, M. D. Assessing mangrove aboveground biomass and structure using terrestrial laser scanning: a case study in the Everglades National Park. **Wetlands**, v. 34, n. 5, p. 955–968, 2014.

KUMAR, U. Remote sensing platforms and sensors. **Retrieved February**, v. 5, p. 2017, 2015.

LECHNER, A. M.; FOODY, G. M.; BOYD, D. S. Applications in remote sensing to forest ecology and management. **One Earth**, v. 2, n. 5, p. 405–412, 2020.

LIANG, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; HOLOPAINEN, M.; MELKAS, T. Detecting changes in forest structure over time with bi-temporal terrestrial laser scanning data. **International Journal of Geo-Information**, v. 1, n. 3, p. 242–255, 2012.

LIANG, X.; KANKARE, V.; HYYPPÄ, J.; WANG, Y.; KUKKO, A.; HAGGRÉN, H.; VASTARANTA, M. Terrestrial laser scanning in forest inventories. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 63–77, 2016.

LIANG, X. Detecting changes in forest structure over time with Bi-Temporal terrestrial laser scanning data. **International Journal Geo-Information**, v. 1, n. 3, p. 242–255, 2012.

LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M. A. LiDAR remote sensing of forest structure. **Progress in Physical Geography**, v. 27, n. 1, p. 88–106, 2003.

MÁRQUEZ, A. Un tratado sobre el escáner terrestre TLS. **Mecinca**, v. 1, n. 1, p. 1–30, 2010.

MURPHY, G. E.; ACUNA, M. A.; DUMBRELL, I. Tree value and log product yield determination in radiata pine (*Pinus radiata*) plantations in Australia: comparisons of terrestrial laser scanning with a forest inventory system and manual measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 11, p. 2223–2233, 2010.

NASA. **New NASA Probe Will Study Earth's Forests in 3-D.** Disponível em: <http://www.nasa.gov/content/goddard/new-nasa-probe-will-study-earth-s-forests-in-3-d/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

OLAGOKE, A.; POTT, M. D.; WDOWNSKI, S. Extended biomass allometric equations for large mangrove trees from terrestrial LiDAR data. **Trees**, v. 30, n. 3, p. 935–947, 2016.

OLIVIER, M. D.; ROBERT, S.; FOURNIER, A. R. A method to quantify canopy changes using multi-temporal terrestrial lidar data: Tree response to surrounding gaps. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 237–238, p. 184–195, 2017.

RICHARDSON, J. J.; MOSKAL, L. M.; BAKKER, J. D. Terrestrial laser scanning for vegetation sampling. **Sensors (Basel)**, v. 14, n. 11, 2014.

RING, J. The Laser in Astronomy. **New Scientist**, v. 18, n. 344, p. 672-673, 1963.

ROSA, D. M. **Estrutura do dossel e sazonalidade do índice de área foliar em ambientes de terra firme na Amazônia Central, com uso do LiDAR portátil terrestre.** 2016. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2016.

SCHULT, C. A remote sensing technique for measuring forest composition. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 95, n. 36, p. 332-332, 2014.

SILVA, M. N. S.; FONTANA, D. C.; LINGNAU, C.; FRANCISCON, L. Principais aplicações e princípios do laser scanner terrestre para medições florestais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 6, p. 1143-1152, 2013.

TREMBLAY, J. F.; BÉLAND, M. Towards operational marker-free registration of terrestrial lidar data in forests. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 146, n. 12, p. 430–435, 2018.

TROCHTA, J.; KRÁL, K.; PRAUSE, J.; VACKÁŘ, D. 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. **PLoS ONE**, v. 12, n. 5, p. 1-17, 2017.

VIANA A. B. T.; TORRES, C. M. M. E.; AMARAL, C. H.; FILHO, E. I. F.; SOARES, C. P. B.; SANTANA F. C, TIMO, L. B.; ROCHA, S. Timber Volume Estimation by Using Terrestrial Laser Scanning: Method in Hyperdiverse Secondary Forests. **Revista Árvore**, v. 46, p. 1–12, 2022.

WAGNER, W.; HOLMGREN, J.; HAHN, M.; REUTER, H.; EISANK, C. From single-pulse to full waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. *In: ISPRS CONGRESS INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING*, 2004, Freiburg. **Anais [...]**, Freiburg: ISPRS, 2004, p. 201–206.

YAO, T.; YANG, X.; ZHAO, F.; WANG, Z.; ZHANG, Q.; JUPP, D.; STRAHLER, A. Measuring Forest structure and biomass in New England forest stands using ECHIDNA ground-based lidar. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 11, p. 2965-2974, 2011.

ZHAO, F.; HU, J.; LIU, H. Measuring effective leaf area index, foliage profile, and stand height in New England Forest stands using a full-waveform ground-based LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 15, p. 2954–2964, 2011.