



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Avaliação da Acurácia Posicional de Sensor LiDAR Incorporado em Smartphones

Enrico Moreira Gonçalves¹, Fabio Luiz Albarici²

¹ Graduando em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Inconfidentes, Praça Tiradentes, 416, CENTRO, CEP 37576000 - Inconfidentes, MG - Brasil, (35) 34641200, Ramal: 305, enrico.goncalves@alunos.ifsuldeminas.edu.br. ² Dr. em transportes. Professor do Ensino Básico Técnico e Tecnológico, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Inconfidentes, Praça Tiradentes, 416, CENTRO, CEP 37576000 - Inconfidentes, MG - Brasil, (35) 34641200, Ramal: 305, fabio.albarici@ifsuldeminas.edu.br.

Artigo recebido em 16/04/2024 e aceito em 19/07/2024

RESUMO

Recentemente foram introduzidos pela Apple Inc., dispositivos móveis com sensor LiDAR incorporado. Esses dispositivos podem oferecer uma alternativa econômica e versátil, superando algumas das limitações dos sistemas tradicionais baseados em LiDAR. Nesse contexto, este trabalho avaliou a precisão de nuvens de pontos gerados por Smartphones com a tecnologia LiDAR incorporada. A metodologia empregada envolveu a análise das coordenadas tridimensionais de pontos de interesse na nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais dos mesmos pontos levantadas por meio de uma estação total. Os testes numéricos demonstraram consistência nas coordenadas, com discrepâncias absolutas abaixo de 8,5 cm e uma distribuição normal das discrepâncias em torno da média. A acurácia média dos pontos foi de 2 cm, com a maioria dos pontos apresentando precisão entre 1,6 cm e 2,5 cm. Esses resultados indicam que os dispositivos móveis equipados com LiDAR são capazes de produzir modelos digitais de terreno com precisão suficiente para aplicações na maioria dos trabalhos em engenharia e geociências, fornecendo uma alternativa acessível e conveniente em relação aos levantamentos com laser Scanner topográfico.

Evaluation of The Positional Accuracy of Built-in LiDAR Sensor in Smartphones

ABSTRACT

Recently, Apple Inc. introduced mobile devices with built-in LiDAR sensors. These devices can offer an economical and versatile alternative, overcoming some of the limitations of traditional LiDAR-based systems. In this context, this study evaluated the accuracy of point clouds generated by Smartphones with integrated LiDAR technology. The methodology involved analyzing the three-dimensional coordinates of points of interest in the point cloud with the three-dimensional coordinates of the same points surveyed using a total station. Numerical tests demonstrated consistency in the coordinates, with absolute discrepancies below 8.5 cm and a normal distribution of discrepancies around the mean. The average accuracy of the points was 2 cm, with most points showing precision between 1.6 cm and 2.5 cm. These results indicate that mobile devices equipped with LiDAR can produce digital terrain models with sufficient accuracy for most engineering and geoscience applications, providing an affordable and convenient alternative to topographic laser Scanner surveys.

Introdução

LiDAR é uma técnica comum para medir distâncias cronometrando o tempo em que um pulso laser emitido por um transmissor leva para atingir o alvo e retornar ao sensor. Essas medições de distância, bem como do ângulo de varredura, das posições e altitude da plataforma, e das medidas de calibração entre todos os componentes do sistema, permitem a determinação das coordenadas

tridimensionais de diversos pontos. Como resultado, tem-se uma nuvem de pontos 3D.

Apesar de os Scanners a laser terrestres que utilizam essa técnica serem precisos, seu alto custo muitas vezes não compensa os benefícios que oferecem (Rutkowski & Lipecki, 2023). Além disso, eles exigem operadores capacitados e dependem de uma linha de visão desobstruída, o que limita as posições de varredura disponíveis e

dificulta o acesso em áreas de terreno irregular (Luetzenburg et al., 2021). Uma outra aplicação prática em que se torna inviável a utilização dos Scanners a laser terrestres estáticos é em ambientes de pequenas dimensões, como corredores estreitos ou cômodos pequenos, onde a restrição de espaço dificulta a movimentação e o posicionamento adequado do equipamento (Oliveira et al., 2021).

A tecnologia LiDAR pode estar embarcada em diferentes tipos de plataforma, sendo as mais comuns as plataformas terrestres, denominadas Terrestrial Laser Scanning (TLS), e as aerotransportadas, conhecidas como Airborne Laser Scanning (ALS). No nível terrestre, um dos desafios do TLS é o efeito de oclusão nos dados. Já os Mobile Laser Scanners (MLS), instalados em plataformas móveis, combinam Scanners a laser com uma unidade de medição inercial (IMU) e um Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), mas a precisão dos dados MLS é geralmente inferior à dos TLS. A vantagem do MLS, no entanto, é a mitigação dos efeitos de oclusão e o aumento da área escaneada.

Recentemente, uma inovação importante foi a introdução de sistemas de varredura a laser móveis portáteis, conhecidos como Hand-Held Mobile Laser Scanners (HMLS), que utilizam a movimentação do operador como plataforma. Esses dispositivos representam uma solução mais acessível e com menos oclusões, mas ainda são pouco utilizados em geociências. A partir de 2020, o avanço dessa tecnologia deu um salto com o lançamento de dispositivos móveis com LiDAR incorporado, como o iPad Pro e o iPhone 12 Pro da Apple Inc., tornando o mapeamento 3D muito mais acessível a uma ampla gama de usuários (Luetzenburg et al., 2021; Hakim et al., 2023).

O sensor LiDAR do iPhone 12 Pro possui um alcance de até 5 metros, permitindo medir distâncias com precisão nessa faixa. Além disso, ele alcança uma resolução de até 1 milhão de pontos por segundo, o que possibilita a criação de um mapa 3D detalhado do ambiente ao redor. Essa tecnologia opera de forma extremamente rápida, capturando dados 3D em tempo real (Błaszczak-Bąk et al., 2023).

Além de possuir baixo consumo de energia, com impacto mínimo na duração da bateria do dispositivo, os sensores LiDAR de Smartphones, introduzidos pela Apple Inc. em 2020 nos modelos iPad Pro e iPhone Pro, já foram testados para inventário e documentação em diversos cenários, como em florestas (Gollob et al., 2021; Mokroš et al., 2021), penhascos

(Luetzenburg et al., 2021), e no monitoramento de profundidade de neve (King, Kelly e Fletcher, 2022), oferecendo uma alternativa inovadora, econômica e eficiente em termos de tempo em comparação a métodos tradicionais de levantamento topográfico, como o TLS.

A versatilidade desses dispositivos permite a criação de modelos tridimensionais de baixo custo, com maior facilidade de uso, tornando o mapeamento 3D acessível para uma ampla gama de aplicações. Além disso, o uso do LiDAR em Smartphones tem se mostrado eficaz em áreas como transporte ferroviário (Ren et al., 2022), silvicultura (Mikita et al., 2022; Tatsumi et al., 2022) e investigações forenses (Kottner et al., 2023).

Os sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) incorporados em Smartphones marcam um ponto de inflexão importante no mapeamento 3D. Esses sensores trouxeram a tecnologia LiDAR para o cotidiano de profissionais e amadores. Antes dessa incorporação, o uso do LiDAR estava restrito a plataformas caras e complexas usados por profissionais em geociências, engenharia e construção civil. Agora, essa ferramenta está disponível em um dispositivo que cabe no bolso e oferece recursos 3D em tempo real.

A principal diferença entre o LiDAR em Smartphones e as versões mais robustas em equipamentos profissionais está no alcance. O LiDAR em Smartphones geralmente é projetado para curtas distâncias, ideal para aplicações internas e externas em curtos alcances. No entanto, essa tecnologia é mais do que suficiente para muitas aplicações, como captura de ambientes fechados, medições de superfícies planas, ou até mesmo para a geração de plantas baixas de edificações.

Uma das principais aplicações do LiDAR em Smartphones é o mapeamento de interiores. Com o sensor LiDAR, é possível escanear rapidamente ambientes internos e gerar modelos tridimensionais. Essa tecnologia tem sido utilizada por arquitetos e engenheiros para criar plantas de edifícios e visualizar os ambientes em escala real, sem a necessidade de ferramentas de medição tradicionais. A precisão dos dados gerados pelo LiDAR em Smartphones reduz significativamente o tempo necessário para levantamentos de campo.

O LiDAR é fundamental para aprimorar experiências de Realidade Aumentada (AR). A profundidade e a precisão do sensor permitem que aplicativos de AR integrem objetos virtuais em ambientes reais de maneira mais precisa e realista.

Isso tem implicações em diversas áreas, desde o entretenimento até o comércio eletrônico, onde consumidores podem visualizar móveis ou outros objetos em suas casas antes de efetuar uma compra.

Nas geociências, a versatilidade do smartphone facilita a realização de levantamentos topográficos rápidos em terrenos de difícil acesso, conforme destacado por Murtiyoso e Grussenmeyer (2021).

Essa acessibilidade oferece aos pesquisadores e profissionais uma alternativa rápida e econômica para a coleta inicial de dados, que pode ser complementada por medições mais detalhadas em etapas posteriores. Embora o LiDAR em Smartphones tenha transformado o mapeamento 3D, existem limitações que precisam ser consideradas. A curta distância de alcance é uma das principais limitações em comparação com sistemas LiDAR dedicados, que podem mapear distâncias muito maiores e com mais precisão. Além disso, a qualidade dos dados pode ser afetada por superfícies reflexivas ou muito brilhantes, o que pode introduzir ruídos nos dados de profundidade capturados.

Outro desafio é o processamento dos dados. O poder computacional de um smartphone é limitado, e a geração de modelos 3D detalhados pode exigir uma quantidade considerável de recursos, especialmente em aplicativos que dependem de processamento em tempo real. No entanto, muitas dessas limitações estão sendo mitigadas por avanços na inteligência artificial e no uso de computação em nuvem, que permitem que parte do processamento seja feito remotamente, melhorando a eficiência e a precisão dos resultados.

O uso de sensores LiDAR em Smartphones é um campo de constante evolução. Com cada nova geração de dispositivos, os sensores estão se tornando mais precisos e eficientes, e a integração com software mais avançado está abrindo novas possibilidades para os usuários. Entre as tendências futuras, destaca-se o uso de algoritmos de IA para melhorar a precisão dos mapas 3D gerados e a capacidade de Smartphones de fusão de dados de diferentes sensores (como GPS, giroscópio e câmeras), criando modelos tridimensionais ainda mais detalhados.

A integração de Smartphones com LiDAR em fluxos de trabalho tradicionais, como na construção civil e no planejamento urbano, promete reduzir custos e melhorar a eficiência em tarefas como levantamento de terrenos, monitoramento de obras e inspeções de

infraestrutura. Também há uma tendência crescente de combinar o LiDAR de Smartphones com dados capturados por drones, criando soluções híbridas que podem oferecer uma visão mais ampla e detalhada de grandes áreas.

Além disso, a popularização dessa tecnologia está democratizando o acesso a ferramentas de mapeamento tridimensional que antes eram restritas a especialistas. Isso tem implicações diretas para profissionais que trabalham com design de interiores, urbanismo, planejamento de infraestrutura e monitoramento ambiental, entre outras áreas. Com o avanço das tecnologias LiDAR (Light Detection and Ranging) incorporadas em Smartphones, surge a oportunidade de explorar o uso desses dispositivos portáteis para a criação de modelos tridimensionais de alta precisão.

Em particular, a capacidade de dispositivos como o iPhone 13 Pro Max de gerar dados espaciais, sem a necessidade de equipamentos tradicionais de levantamento topográfico, abre novas possibilidades tanto para o mercado de consumo quanto para profissionais da área de geociências. No entanto, a questão central que guia este estudo é a seguinte: até que ponto os modelos 3D gerados por Smartphones equipados com LiDAR podem ser considerados precisos e confiáveis em comparação com os dados obtidos por equipamentos topográficos de alta precisão?

O mapeamento 3D com Smartphones tem potencial para transformar muitas áreas, principalmente naquelas onde o custo de equipamentos especializados tem sido um impeditivo. No entanto, desafios permanecem, como a precisão limitada em comparação com equipamentos profissionais, o processamento intensivo de dados, a sensibilidade às condições de iluminação e a dependência de linha de visão. Esses fatores podem impactar a qualidade dos mapas gerados. Mesmo assim, as tendências indicam que o uso crescente de algoritmos de inteligência artificial (IA) pode ajudar a melhorar a precisão e a eficiência dos modelos 3D em Smartphones. Além disso, a combinação de dados de drones com informações de Smartphones pode oferecer mapas 3D ainda mais detalhados, e precisos, conforme estudo de Gonçalves et al. (2024), ampliando o espectro de aplicações.

Dessa forma, a pesquisa sobre a viabilidade e a confiabilidade do mapeamento 3D com Smartphones ganha uma importância crescente, à medida que esses dispositivos, equipados com sensores avançados como LiDAR,

têm se mostrado promissores para uso em diversas áreas. Com a capacidade de capturar dados espaciais de forma rápida e acessível, os Smartphones estão emergindo como ferramentas potenciais em setores como a engenharias, arquitetura, arqueologia e quaisquer outras áreas que necessitam de Geoinformação e exigem a precisão desses modelos (Oliveira et al., 2021).

No entanto, a precisão e a confiabilidade desses dados ainda precisam ser amplamente validadas, especialmente quando comparados com equipamentos topográficos convencionais, que continuam sendo o padrão em levantamentos de alta precisão. Assim, investigar até que ponto a tecnologia embarcada nesses dispositivos pode substituir ou complementar equipamentos profissionais é fundamental, especialmente em contextos em que o custo e a mobilidade são fatores determinantes.

Material e métodos

Para avaliar a precisão de um modelo digital de terreno ou de superfície, é comum utilizar a determinação de pontos de controle com coordenadas tridimensionais distribuídas ao longo da área de interesse, empregando uma técnica de levantamento de alta precisão. Esses dados podem ser coletados por meio de uma estação total, possibilitando a análise das discrepâncias entre os

A presente pesquisa tem como objetivo investigar a acurácia posicional dos modelos tridimensionais criados com um iPhone 13 Pro Max, utilizando seu sensor LiDAR, e compará-los com medições de campo realizadas por equipamentos topográficos de referência. A hipótese central do estudo é que, embora os Smartphones com LiDAR ofereçam uma alternativa acessível e prática, há uma diferença na precisão dos dados em comparação com os

métodos tradicionais de levantamento. Validar ou refutar essa hipótese permitirá avaliar o potencial de uso desses dispositivos em aplicações geocientíficas, onde a precisão dos dados é crítica. Essa análise também será essencial para guiar profissionais no uso de tecnologias emergentes, ajudando a equilibrar a acessibilidade com a confiabilidade dos dados.

valores das coordenadas obtidas e suas respectivas acurácias.

Com isso em mente, a metodologia utilizada neste trabalho segue uma abordagem semelhante à descrita por esses autores. O fluxograma apresentado na Figura 1 ilustra o processo metodológico adotado.

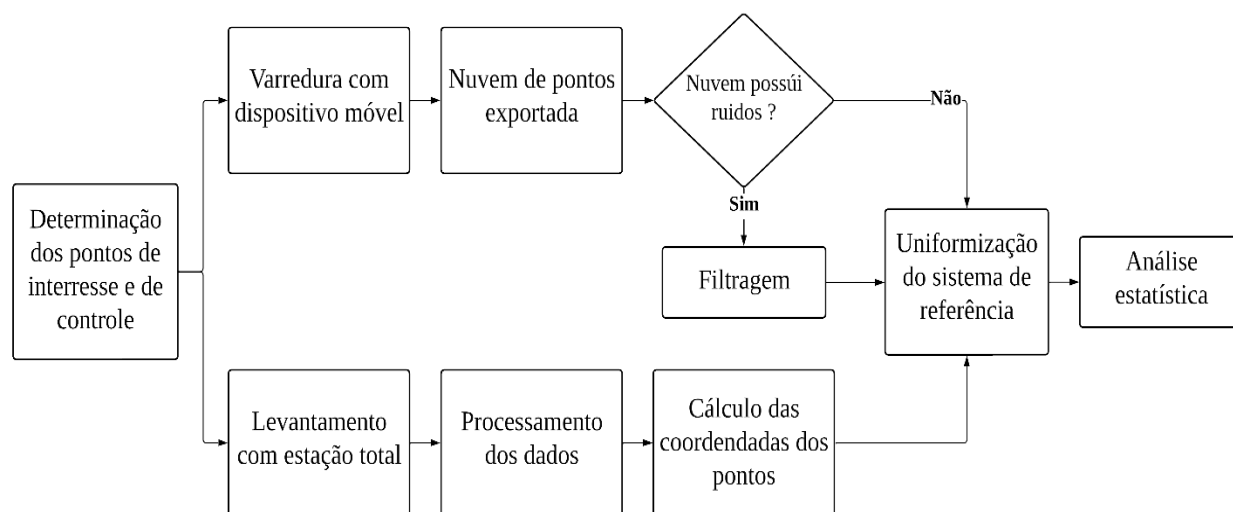


Figura 1. Fluxograma da metodologia

Determinação dos pontos de interesse e de controle

A metodologia proposta utilizou-se do campo de calibração do setor de engenharia de Agrimensura e Cartográfica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS) – Campus Inconfidentes/MG. Utilizado para aferição, ajustamento e calibração de equipamentos relacionados à topografia e engenharia, o campo foi útil a este estudo por conter marcas permanentes e claras em parede vertical, garantindo, dessa forma, a invariabilidade, precisão e segurança dos pontos que servirão de base para a pesquisa. A Figura 2 apresenta o campo de calibração.

O campo de calibração consiste em uma área retangular pintada em uma parede vertical de cor diferente de seus arredores. Nessa área, estão localizados 45 pontos, materializados por parafusos fixados na parede e devidamente sinalizados com tinta preta, em contraste com o fundo. Para simplificar as análises, decidiu-se não utilizar todos os pontos; dos 45 disponíveis, 21 foram selecionados para o estudo. A fim de controlar as distâncias de referência a serem

utilizadas, foi definido um esquema de numeração para cada ponto. A Figura 2(b) apresenta uma esquematização do campo de calibração, ilustrando os pontos considerados no estudo e suas respectivas numerações.

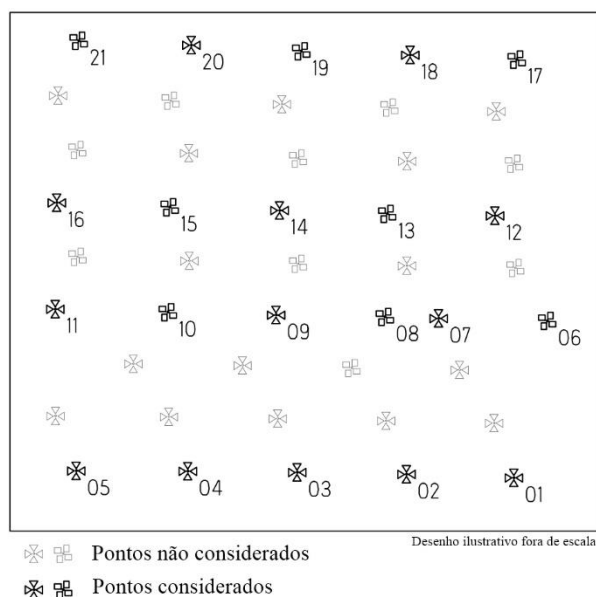
Além dos pontos no campo de calibração, foram determinados pontos de controle no solo na área adjacente. Materializados devidamente, foram sinalizados de forma a se tornarem visíveis tanto para o levantamento com a estação total quanto para a varredura com dispositivo móvel.

Levantamento com estação total

Para a determinação das coordenadas de cada ponto do campo de calibração, foi realizado um levantamento da área adjacente ao campo e de cada ponto considerado no estudo por meio de uma poligonal topográfica. Para isso, utilizou-se uma estação total, modelo TS06, fabricada pela Leica Geosystems. Os pontos de controle previamente sinalizados serviram como origem, orientação e checagem, permitindo a uniformização dos sistemas de referência. A Tabela 1 apresenta as especificações do equipamento utilizado:



(a)



(b)

Figura 2. Campo de calibração (a), ilustração e numeração dos pontos (b)

Tabela 1. Especificações técnicas da estação total.

Modelo	Fabricante	Alcance	Precisão Angular	Precisão Linear
TS06	Leica Geosystems	500 m s/ prisma	5"	5 mm + 5 ppm

A poligonal topográfica teve início em um ponto E0, definido como a origem do sistema ($X=150000$ m; $Y=250000$ m; $Z=100$ m). A partir desse ponto, foram coletadas medidas de cada um dos 21 pontos selecionados. Em seguida, com referência (RE) em E1, foi realizada a medição em E2, onde novas medições dos pontos foram feitas, com o objetivo de obter medidas redundantes que pudessem aprimorar a precisão das coordenadas de cada ponto. A partir de E2, o ponto E3 foi mirado com referência em E0, visando obter um ponto no solo para verificação e consolidação do sistema de referência adotado. O processamento envolveu o cálculo das coordenadas cartesianas tridimensionais (X , Y e Z) de cada ponto do campo de calibração, além dos pontos da poligonal, que foram considerados como pontos de controle do sistema de referência. Também foi realizado um controle de qualidade da poligonal através do

cálculo da propagação da variância. É importante destacar que, apesar da precisão do equipamento e da atenção ao detalhe no levantamento, erros sistemáticos e aleatórios podem ocorrer, resultando em pequenas discrepâncias entre as observações redundantes. Assim, as coordenadas dos pontos do campo de calibração foram calculadas pela média entre a primeira medição (realizada a partir de E0) e a segunda (realizada a partir de E2). As Tabelas 2 e 3 a seguir apresentam, respectivamente, as coordenadas dos pontos de controle e as coordenadas dos 21 pontos do campo de calibração. A partir dessas coordenadas, foram computadas todas as distâncias teóricas possíveis entre os pontos, conforme detalhado nas Tabela 4 e 5.

Tabela 2. Coordenadas dos pontos de controle (vértices da poligonal) e respectivos desvios

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)	σ_x	σ_y
E0	150000,000	250000,000	100,000	-	-
E1	150000,000	250008,663	100,129	-	-
E2	149993,384	249994,102	100,179	0,004	0,003
E3	149999,205	249993,475	99,914	0,006	0,003

Tabela 3. Coordenadas dos pontos do campo de calibração (Estação Total)

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
01	149990,535	249997,459	101,486
02	149990,527	249996,854	101,492
03	149990,516	249996,250	101,491
04	149990,509	249995,648	101,491
05	149990,499	249995,047	101,491
06	149990,532	249997,644	102,403
07	149990,520	249997,038	102,398
08	149990,515	249996,739	102,401
09	149990,508	249996,131	102,396
10	149990,499	249995,529	102,398
11	149990,490	249994,925	102,398
12	149990,522	249997,349	103,004
13	149990,515	249996,744	103,000
14	149990,507	249996,142	103,002
15	149990,497	249995,540	103,001
16	149990,488	249994,933	103,001
17	149990,524	249997,457	103,913
18	149990,514	249996,859	103,913

Tabela 4. Distâncias entre os pontos (Pontos 01-21 a 01-10)

Para	De	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
01		0,000									
02		0,604	0,000								
03		1,209	0,604	0,000							
04		1,811	1,207	0,603	0,000						
05		2,412	1,808	1,203	0,601	0,000					
06		0,936	1,206	1,666	2,195	2,753	0,000				
07		1,005	0,925	1,201	1,660	2,188	0,607	0,000			
08		1,164	0,917	1,033	1,421	1,921	0,905	0,298	0,000		
09		1,610	1,158	0,912	1,026	1,412	1,513	0,906	0,608	0,000	
10		2,135	1,606	1,159	0,915	1,027	2,116	1,509	1,210	0,603	0,000
11		2,693	2,132	1,605	1,159	0,915	2,720	2,112	1,814	1,206	0,604
12		1,522	1,591	1,869	2,277	2,755	0,670	0,681	0,858	1,361	1,919
13		1,674	1,512	1,587	1,865	2,271	1,080	0,670	0,599	0,861	1,356
14		2,009	1,671	1,515	1,590	1,866	1,618	1,081	0,848	0,607	0,861
15		2,446	2,002	1,669	1,514	1,589	2,189	1,615	1,341	0,847	0,603
16		2,945	2,443	2,003	1,670	1,514	2,777	2,189	1,903	1,342	0,847
17		2,427	2,495	2,706	3,023	3,417	1,522	1,572	1,674	2,015	2,452
18		2,500	2,421	2,497	2,708	3,025	1,702	1,525	1,516	1,682	2,016
19		2,709	2,494	2,420	2,495	2,705	2,053	1,705	1,587	1,521	1,678
20		3,030	2,707	2,497	2,424	2,498	2,504	2,057	1,866	1,594	1,522
21		3,426	3,026	2,708	2,499	2,425	3,009	2,506	2,273	1,869	1,593
	19			149990,507			249996,253			103,912	
	20			149990,501			249995,649			103,915	
	21			149990,490			249995,044			103,916	

Tabela 5. Distâncias entre os pontos (Pontos 11-21 a 11-21)

Para	De	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
11		0,000										
12		2,499	0,000									
13		1,916	0,605	0,000								
14		1,359	1,207	0,603	0,000							
15		0,861	1,810	1,205	0,602	0,000						
16		0,603	2,416	1,811	1,209	0,606	0,000					
17		2,951	0,916	1,158	1,600	2,124	2,684	0,000				
18		2,457	1,033	0,920	1,159	1,604	2,131	0,598	0,000			
19		2,014	1,423	1,036	0,916	1,157	1,604	1,204	0,606	0,000		
20		1,681	1,929	1,427	1,037	0,920	1,161	1,809	1,210	0,604	0,000	
21		1,523	2,479	1,931	1,428	1,040	0,922	2,413	1,815	1,209	0,605	0,000

Varredura com dispositivo móvel

Lançado em maio de 2021, o Iphone 13 Pro Max fabricado pela empresa multinacional norte-americana Apple Inc. apresenta um sensor de profundidade baseado em LiDAR e uma interface de programação de aplicativos (application programming interface - API) para realidade aumentada (augmented reality - AR) (Apple Inc., 2021). O dispositivo representa uma opção economicamente viável em comparação com as soluções de hardware disponíveis atualmente.

Embora não faça a varredura superficial com precisão milimétrica como os dispositivos

TLS, ele é capaz de gerar uma nuvem de pontos coloridos em escala real (Hakim et al., 2023).

As especificações do dispositivo, detalhadas em Apple Inc. (2021), incluem um sensor LiDAR integrado para mapeamento de profundidade, proporcionando a captura de dados tridimensionais. O sistema de câmeras de 12 MP oferece a capacidade de capturar imagens e vídeos em alta qualidade. Equipado com um processador A15 Bionic, o dispositivo pode lidar com análises de dados em tempo real, facilitando a execução de tarefas complexas de maneira eficiente. Além disso, possui suporte para tecnologias de realidade aumentada, ampliando suas funcionalidades. A Figura 3 apresenta o dispositivo móvel.



Figura 3. Iphone PRO 13 Max

Neste estudo, são analisadas as capacidades essenciais do sensor LiDAR do iPhone 13 Pro Max, tais como a acurácia e precisão posicional dos modelos tridimensionais obtidos com o dispositivo, com o intuito de compreender melhor sua aplicabilidade em tarefas de engenharia. Para realizar a varredura do campo de calibração e da área adjacente, empregou-se o aplicativo 3d Scanner App. De acordo com o desenvolvedor, este aplicativo gratuito possibilita a captura rápida de espaços e objetos em 3D. Ele é apresentado como uma solução de digitalização LiDAR voltada para o mercado imobiliário, de arquitetura, anúncios, entre outros (3d Scanner App, 2024).

Realizou-se a varredura de maneira minuciosa, com o intuito de evitar oclusões e falhas sempre

que possível. Foi dada ênfase aos pontos de controle previamente marcados, visto que são essenciais para o alinhamento entre o produto resultante da varredura e o levantamento topográfico de referência. Após a conclusão do trabalho em campo, o processamento dos dados ocorre de forma rápida dentro do próprio aplicativo. O resultado é apresentado e examinado em busca de imperfeições ou erros durante a varredura. Confirmada a qualidade da varredura, a nuvem de pontos é exportada em um dos formatos disponíveis, sendo neste estudo, escolhido o formato “.las”. A Figura apresenta a nuvem de pontos resultante da varredura com Iphone 13 Pro Max sem pós-processamento.



Figura 4. Nuvem de pontos resultante de varredura com Iphone PRO 13 Max

A nuvem foi importada para o software AutoDesk RECAP para ser pós-processada. De maneira geral, as nuvens de pontos frequentemente contêm pontos considerados "ruídos", como pontos que não representam adequadamente a superfície do objeto ou da cena. Esse processo envolve a seleção da área de interesse e a remoção de pontos desnecessários, como aqueles fora da área de estudo ou sem relevância para a análise. Essas operações visam aprimorar a eficiência da nuvem de pontos, diminuindo seu volume e dimensões por meio de métodos como filtragem e reamostragem.

Uniformização do sistema de referência

A nuvem de pontos foi carregada no software Cloud Compare no qual foi alinhada com os pontos de controle provenientes do levantamento topográfico. Desse modo a nuvem de pontos foi transladada, rotacionada e escalada para que os sistemas de referência da nuvem de pontos e do levantamento topográfico coincidissem,

considerando o ponto E0 como origem e E1 como orientação.

A nuvem de pontos foi, então, carregada no software AutoDesk Civil 3D, onde foram realizadas análises para verificação do sistema de coordenadas, distâncias e outros parâmetros. Além disso, foram delineadas feições como a poligonal, os pontos de controle e as linhas de visada. A Figura 5 ilustra a nuvem de pontos subposta aos elementos mencionados. Com a uniformização do sistema de referência, foi possível calcular as coordenadas de cada ponto do campo de calibração a partir da nuvem de pontos. A Tabela 6 apresenta as coordenadas de cada ponto calculadas. Em seguida, com essas coordenadas, foram determinadas todas as distâncias teóricas possíveis entre os pontos, similarmente ao processo conduzido com os dados da estação total. As Tabelas 7 e 8 evidenciam as distâncias obtidas.

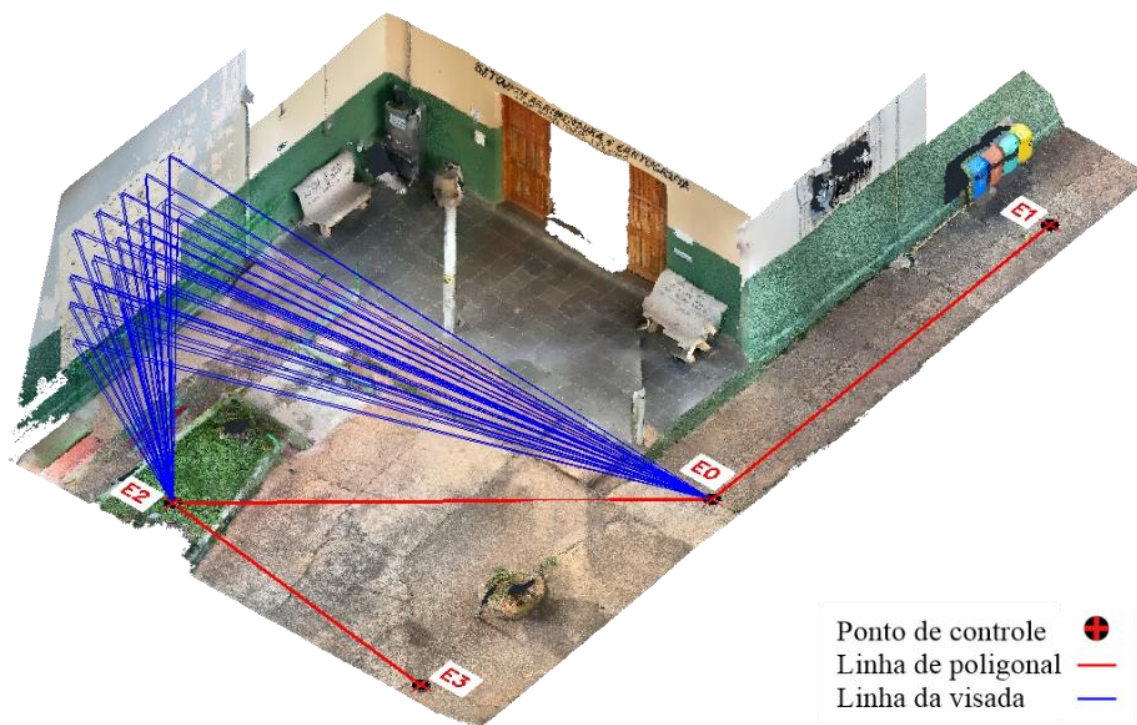


Figura 5. Nuvem de pontos, poligonal (em vermelho) e linhas de visada (em azul)

Tabela 6. Coordenadas dos pontos do campo de calibração (Nuvem de pontos)

Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)
01	149990,521	249997,483	101,441
02	149990,522	249996,893	101,463
03	149990,512	249996,229	101,438
04	149990,511	249995,613	101,426
05	149990,491	249995,005	101,441
06	149990,513	249997,674	102,365
07	149990,506	249997,069	102,368
08	149990,495	249996,687	102,340
09	149990,486	249996,104	102,335
10	149990,488	249995,511	102,329
11	149990,476	249994,911	102,329
12	149990,495	249997,327	102,935
13	149990,489	249996,734	102,965
14	149990,489	249996,117	102,968
15	149990,487	249995,482	102,956
16	149990,400	249994,907	102,944
17	149990,502	249997,445	103,894
18	149990,501	249996,849	103,876
19	149990,483	249996,236	103,892
20	149990,475	249995,613	103,897
21	149990,471	249995,015	103,876

Tabela 7. Distâncias entre os pontos (Pontos 01-21 a 01-10)

Para	De	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
01		0,000									
02		0,590	0,000								
03		1,254	0,665	0,000							
04		1,870	1,281	0,616	0,000						
05		2,478	1,888	1,224	0,609	0,000					
06		0,944	1,193	1,717	2,265	2,825	0,000				
07		1,015	0,922	1,253	1,734	2,263	0,605	0,000			
08		1,201	0,901	1,012	1,410	1,907	0,987	0,383	0,000		
09		1,644	1,177	0,906	1,033	1,417	1,571	0,966	0,583	0,000	
10		2,163	1,631	1,145	0,909	1,022	2,163	1,559	1,176	0,593	0,000
11		2,721	2,163	1,591	1,144	0,893	2,763	2,159	1,776	1,193	0,600
12		1,502	1,535	1,857	2,284	2,761	0,668	0,623	0,874	1,362	1,914
13		1,698	1,511	1,609	1,904	2,305	1,115	0,685	0,627	0,891	1,378
14		2,049	1,694	1,534	1,622	1,889	1,670	1,125	0,848	0,633	0,881
15		2,510	2,055	1,692	1,536	1,588	2,270	1,693	1,353	0,879	0,628
16		2,985	2,480	2,007	1,678	1,509	2,829	2,240	1,882	1,346	0,866
17		2,453	2,493	2,741	3,074	3,460	1,546	1,572	1,729	2,056	2,488
18		2,516	2,413	2,516	2,744	3,054	1,722	1,524	1,545	1,712	2,045
19		2,750	2,517	2,454	2,544	2,743	2,098	1,737	1,616	1,563	1,723
20		3,087	2,750	2,535	2,471	2,530	2,568	2,112	1,892	1,637	1,571
21		3,467	3,058	2,724	2,522	2,435	3,059	2,548	2,271	1,887	1,625

Tabela 8. Distâncias entre os pontos (Pontos 11-21 a 11-21)

Para	De	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
11		0,000										
12		2,491	0,000									
13		1,931	0,594	0,000								
14		1,365	1,210	0,617	0,000							
15		0,848	1,845	1,252	0,635	0,000						
16		0,620	2,422	1,829	1,214	0,582	0,000					
17		2,978	0,966	1,170	1,619	2,176	2,712	0,000				
18		2,480	1,055	0,918	1,166	1,648	2,156	0,596	0,000			
19		2,049	1,451	1,052	0,932	1,202	1,635	1,209	0,613	0,000		
20		1,718	1,966	1,458	1,057	0,950	1,188	1,832	1,236	0,623	0,000	
21		1,550	2,496	1,946	1,428	1,032	0,941	2,430	1,834	1,221	0,598	0,000

Análise estatística

Para estimar a precisão das coordenadas obtidas, foi adotada a mesma metodologia empregada para produtos gerados por TLS. As coordenadas da nuvem de pontos foram utilizadas para calcular as distâncias entre cada par de alvos, e, em seguida, avaliou-se a discrepância em relação às mesmas distâncias determinadas a partir das coordenadas de referência, obtidas por meio do levantamento com estação total. Vale destacar que, embora o estudo proposto não tenha sido realizado com um TLS, a mesma metodologia foi aplicada devido à semelhança entre os produtos gerados. A acurácia pode ser determinada pela equação 1, apresentada a seguir:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(D_{NUV_{ij}} - D_{ET_{ij}})^2}{2}}. \quad (1)$$

σ_i é o erro nas coordenadas do i-ésimo ponto;

$D_{NUV_{ij}}$ e $D_{ET_{ij}}$ são as distâncias das linhas de base entre um ponto i para um ponto j, medidas a partir da nuvem de pontos e a partir da referência, respectivamente.

Para a análise por meio de comparação direta das coordenadas obtidas pelo dispositivo móvel com as coordenadas referência obtidas com a estação total, existe a necessidade de alteração do sistema de referência das coordenadas da nuvem de pontos (intersecção dos eixos horizontal, vertical e de colimação do instrumento) para um sistema de

referência comum. Assim, só foi possível estimar a precisão das coordenadas da nuvem de pontos devido à alteração do sistema de referência das coordenadas da nuvem para o mesmo sistema de referência arbitrado para o levantamento com a estação total, realizado coincidindo os pontos de controle comuns em ambos os levantamentos.

Resultados e discussão

Considerando as coordenadas obtidas na nuvem de pontos e por levantamento topográfico com estação total, considerou-se as coordenadas estabelecidas pelo equipamento topográfico como referência. Desse modo computou-se as discrepâncias entre cada coordenada de cada ponto a fim de entender a qualidade dos dados. O Gráfico 1 mostra as discrepâncias em cada coordenada para cada ponto.

O Gráfico 1 aponta que as discrepâncias em cada coordenada se mantiveram dentro do intervalo de aproximadamente -88 mm até 39 mm. Ainda, dos dados, obtiveram-se os valores para a média das discrepâncias e o desvio padrão, respectivamente, -19 mm e 18 mm para X, -16 mm e 27 mm para Y e -45 mm e 17 mm para Z. Além disso, Os histogramas apresentados no Gráfico 2 esclarecem que os dados seguem uma distribuição normal.

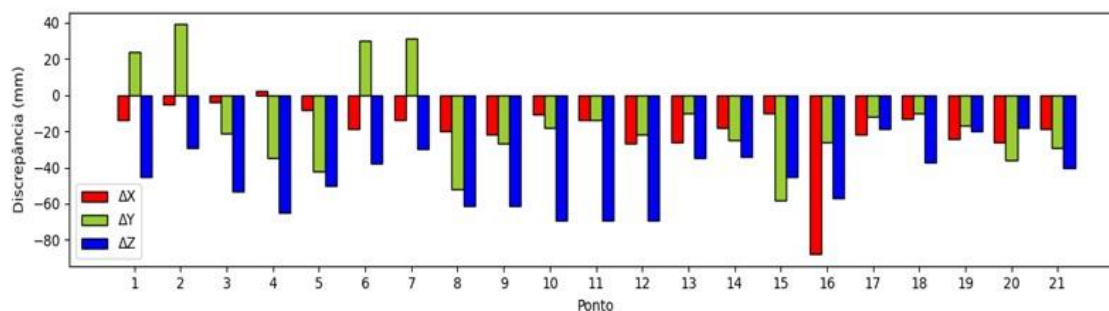


Gráfico 1. Discrepância Individual nas Coordenadas X, Y e Z para Cada Ponto

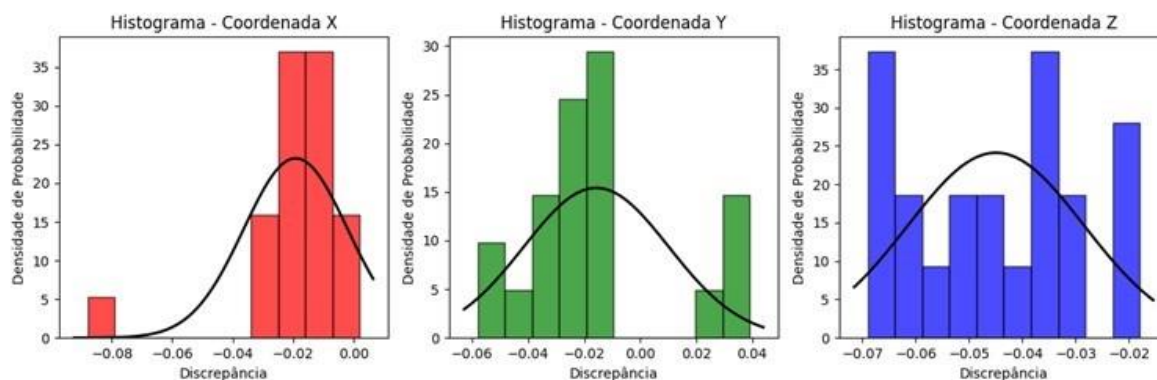


Gráfico 2. Histogramas das Discrepâncias nas Coordenadas X, Y e Z

No Gráfico 2, observa-se uma distribuição aparentemente não normal para a coordenada Z. Contudo, ao aplicar o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, conhecido por sua sensibilidade a diversas distribuições, obtém-se um valor-p de aproximadamente 0,199. De acordo com Luz Melo et al. (2021), quando o valor-p é maior que o nível de significância α , pode-se afirmar que a amostra provém de uma população com distribuição normal. Portanto, considerando o nível de significância padrão de $\alpha = 0,05$, não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, indicando que os dados seguem uma distribuição normal.

Além disso, as acurácias verticais de dados obtidos por varredura *laser* são piores quando comparadas as horizontais, uma vez que esses dados são afetados por elementos como a influência da cobertura do solo, declividade, presença ou

ausência de folhagens nas vegetações existentes no terreno e posição do sensor. Com as coordenadas isoladas avaliadas, foi aplicada a equação 1, permitindo estimar a acurácia das coordenadas da nuvem de pontos. Para isso, realizou-se uma análise comparativa de todas as possíveis distâncias entre os pontos da nuvem em relação à referência. Dessa maneira, foram obtidos 20 valores de acurácia para cada ponto, considerando que o cálculo se baseia na linha base entre dois pontos. Como a amostra em estudo continha 21 pontos, foram computadas 20 linhas base para cada ponto (uma a menos que o total, pois a distância de um ponto consigo mesmo não é considerada). Assim, para estimar a acurácia, foi calculada a média dos 20 valores de acurácia obtidos para cada ponto. Neste estudo, será adotado o termo "acurácia do ponto", referindo-se, na verdade, à média da acurácia do ponto. O Gráfico 3 ilustra o resultado dessa análise comparativa, destacando as discrepâncias encontradas.

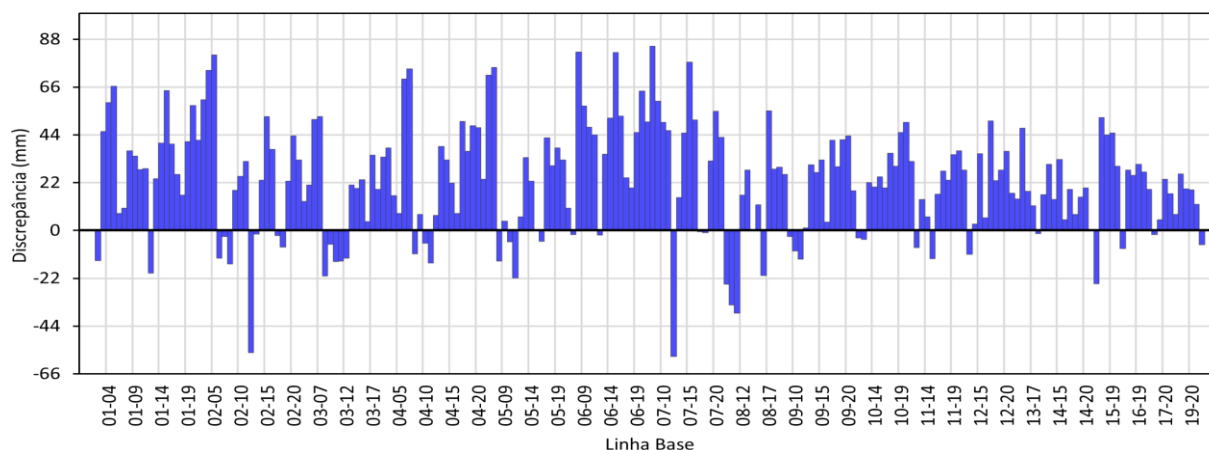


Gráfico 3. Discrepâncias nas distâncias entre os pontos na nuvem de pontos em relação a referência

As discrepâncias apresentadas no Gráfico 3 variam de um valor mínimo de -58 mm a um máximo de 85 mm. A média dessas discrepâncias é de 23 mm, com um desvio padrão de 26 mm. A

Tabela 9 apresenta os valores das acurácias dos pontos, bem como os desvios padrões médios para cada ponto. Adicionalmente, o Gráfico 4 mostra a distribuição da acurácia.

Tabela 9. Acurácia média das coordenadas dos pontos na nuvem de pontos

Ponto	Acurácia (mm)	Desvio padrão médio (mm)
01	25	12
02	22	16
03	18	11
04	23	17
05	21	18
06	31	17
07	30	19
08	21	16
09	18	12
10	18	11
11	16	09
12	14	13
13	15	08
14	14	10
15	26	15
16	16	10
17	19	12
18	14	08
19	21	09
20	25	10
21	15	09

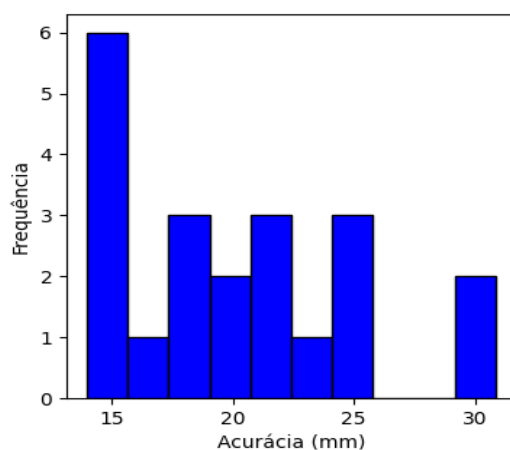


Gráfico 4. Acurácia média das coordenadas dos pontos na nuvem de pontos

Na Tabela 9, vê-se que as acurácias assumiram valor relativamente baixo, levando em consideração a maioria das aplicações em engenharia, isto é, variam de 14 mm até 31 mm, aproximadamente. Fazendo-se a média das acurácias de cada ponto, apresentadas na Tabela 9, afere-se que a acurácia média dos pontos é de 20 milímetros. Além disso, do Gráfico 4, entende-se

Gonçalves, E. M., Albarici, F. L.

que a maior parte dos pontos obteve uma acurácia entre 16mm e 25mm, da totalidade 6 pontos ficaram com uma acurácia abaixo de 16mm e apenas 3 atingiram uma acurácia maior ou igual a 26 mm.

Vale ressaltar que a fabricante não disponibiliza informações acerca da precisão nominal do sensor LiDAR incorporado ao dispositivo móvel, visto que, segundo Apple Inc.

(2024), o sensor faz parte do sistema de câmeras do dispositivo e foi inicialmente idealizado para melhorias nas fotografias. Assim não é possível realizar o ajustamento e propagação das variâncias para as coordenadas e inviabiliza estudos mais aprofundados acerca da precisão desses dados.

Em conclusão, atividades que exigem uma precisão menor, na faixa de centímetros, correspondem a cerca de 90 a 95% da eficácia total de um projeto, enquanto projetos que demandam alta precisão, na escala milimétrica, representam apenas 5 a 10% dessa eficácia (MundoGeo, 2022). Os dados obtidos por meio de varreduras com dispositivos móveis mostram a consistência das coordenadas e oferecem informações relevantes para aplicações em engenharia e áreas correlatas, uma vez que as discrepâncias absolutas em cada coordenada ficaram abaixo de 85 mm

Considerações finais

Embora a tecnologia LiDAR seja amplamente reconhecida por sua precisão e fidelidade ela apresenta limitações notáveis, como o alto custo e a necessidade de equipamentos especializados e operadores qualificados, o que restringe sua acessibilidade e aplicação em certas situações. No entanto, o surgimento de dispositivos móveis, como Smartphones equipados com sensores LiDAR, tem o potencial de transformar essa realidade. Esses dispositivos oferecem uma alternativa mais econômica e versátil, superando algumas das limitações associadas aos sistemas LiDAR tradicionais. Estudos recentes já demonstraram a capacidade desses dispositivos para aplicações em áreas como geociências, gestão de riscos e engenharia.

A presente pesquisa ressalta a importância de avaliar a acurácia posicional dos modelos tridimensionais gerados por Smartphones, a fim de verificar sua viabilidade e confiabilidade em comparação com equipamentos topográficos convencionais.

Uma parte da discrepância observada pode ser atribuída a erros de pontaria ao selecionar pontos no software de gerenciamento de nuvens de pontos, um problema comum em representações tridimensionais, que pode levar a medidas ligeiramente diferentes das obtidas por estações totais. Além disso, ajustes realizados nas nuvens de pontos para adaptar a um novo sistema de referência podem introduzir erros adicionais. No

entanto, vale destacar que a maior parte da eficácia de um projeto está relacionada a atividades que demandam precisão na ordem dos centímetros, enquanto tarefas que exigem alta precisão milimétrica representam uma parcela menor da eficácia global.

Os dados obtidos por dispositivos móveis confirmam a consistência das coordenadas, oferecendo informações valiosas para aplicações em engenharia e áreas correlatas, visto que as discrepâncias absolutas em cada coordenada permaneceram abaixo de 85 mm.

Os histogramas indicam que as discrepâncias seguem uma distribuição normal, sugerindo uma simetria em torno da média. A acurácia das coordenadas foi estimada por meio de uma análise comparativa das distâncias entre os pontos, resultando em uma acurácia média de 20 mm. A distribuição das acurácias mostra que a maioria dos pontos apresenta precisão entre 16 mm e 25 mm, com poucos pontos exibindo acurácia inferior (maior que 26 mm) em relação aos demais.

É importante observar que o sensor LiDAR integrado nos dispositivos móveis, projetado principalmente para melhorar a qualidade das fotos, não fornece informações detalhadas sobre precisão do fabricante. Isso limita a capacidade de ajustar as coordenadas e restringe a análise da precisão.

Os dados deste estudo fornecem uma visão sobre a qualidade das coordenadas em uma nuvem de pontos gerada por sensores LiDAR incorporados em dispositivos móveis. Embora ainda existam desafios, como a necessidade de estudos mais abrangentes sobre sua viabilidade e avaliação da precisão em diferentes cenários, esses dispositivos móveis equipados com LiDAR representam uma tendência promissora para pesquisas em geociências e áreas relacionadas.

Agradecimento

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - IFSULDEMINAS. O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Bolsa à Iniciação Científica e Tecnológica Institucional (PIBIC) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG)

Referências

Apple Inc. (2021). iPhone 13 Pro Max - Especificações técnicas - Suporte da Apple (BR). Apple Support.

- https://support.apple.com/kb/SP848?locale=pt_BR
- Błaszczak-Bąk, W., Janicka, J., Dumalski, A., & Masiero, A. (2023). Integration of terrestrial *laser* scanning and smartphone *LiDAR*: The case study of Lidzbark Castle. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48, 51–56. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-51-2023>
- Gonçalves, E. M., Albarici, F. L., Oliveira, H. C. de, & Reberte, J. C. B. (2024). Análise do registro de nuvens de pontos obtidas por SVLT e por VANT para aplicação no cadastro territorial multifinalitário. Revista Brasileira de Cartografia, 76, Article 70655. <https://doi.org/10.14393/rbcv76n0a-70655>
- Luz Melo, L. F., de Melo Fagundes, L. J., de Melo Torres, M. T. G., de Araujo, M. S., de Oliveira, J. E. F., Soares, A. M. F., ... & de Oliveira, S. T. (2021). Estudo aplicado ao *software* ACIC Normalidade 2.0. Brazilian Journal of Development, 7(5), 45014–45038. <https://doi.org/10.34117/bjd.v7i5.29354>
- Geosystems. (2023). Estação total manual Leica FlexLine TS03. Leica-Geosystems.com. <https://leica-geosystems.com/pt-br/products/total-stations/manual-total-stations/leica-flexline-ts03>
- Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A., & Nothdurft, A. (2021). Measurement of forest inventory parameters with Apple iPad Pro and integrated *LiDAR* technology. Remote Sensing, 13(16). <https://doi.org/10.3390/rs13163129>
- Hakim, N. N. A. N. A., Razali, R., Mohd Said, M. S., Muhamad, M. A. H., Abdul Rahim, H., & Mokhtar, M. A. (2023). Accuracy assessment on detail survey plan using iPhone 13 Pro Max *LiDAR* sensor. International Journal of Geoinformatics, 19, 79–86. <https://doi.org/10.52939/ijg.v19i5.2665>
- King, F., Kelly, R., & Fletcher, C. G. (2022). Evaluation of *LiDAR*-derived snow depth estimates from the iPhone 12 Pro. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 19, 1–5. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2022.3166665>
- Kottner, S., Thali, M. J., & Gascho, D. (2023). Using the iPhone's *LiDAR* technology to capture 3D forensic data at crime and crash scenes. Forensic Imaging, 32, 200535. <https://doi.org/10.1016/j.fri.2023.200535>
- Luetzenburg, G., Kroon, A., & Bjørk, A. A. (2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro *LiDAR* for an application in geosciences. Scientific Reports, 11, 22221. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>
- Mikita, T., Krausková, D., Hrůza, P., Cibulka, M., & Patočka, Z. (2022). Forest road wearing course damage assessment possibilities with different types of *laser* scanning methods including new iPhone *LiDAR* scanning apps. Forests, 13(11), 1763. <https://doi.org/10.3390/f13111763>
- Murtiyoso, A., & Grussenmeyer, P. (2021). Experiments using smartphone-based videogrammetry for low-cost cultural heritage documentation. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 46(M-1–2021). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-487-2021>
- MundoGeo. (2022). Matterport Axis, MC250 Pro2 Câmera e MC300 Pro3 *Laser Scanner*. [Www.youtube.com. https://youtu.be/d79hk2NQtvY](https://www.youtube.com/watch?v=d79hk2NQtvY)
- Oliveira, P. H. S. M., Albarici, F. L., de Oliveira, H. C., & Ribeiro, L. H. R. (2021). Análise da integração de nuvens de pontos obtidas por varredura *LASER* terrestre estática e varredura de luz estruturada cinemática. Revista Brasileira de Geomática, 9(4), 273–293. <https://doi.org/10.3895/rbgeo.v9n4.13601>
- Ren, Y., Dai, Z., Lu, P., Ai, C., Huang, Y., & Tolliver, D. (2022). Rail gage-based risk detection using iPhone 12 Pro. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 237(4), 429–437. <https://doi.org/10.1177/09544097221093753>
- Rutkowski, W., & Lipecki, T. (2023). Use of the iPhone 13 Pro *LiDAR Scanner* for inspection and measurement in the mineshaft sinking process. Remote Sensing, 15(21), 5089. <https://doi.org/10.3390/rs15215089>
- Tatsumi, S., Yamaguchi, K., & Furuya, N. (2022). ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with *LiDAR*-equipped iPhone and iPad. Methods in Ecology and Evolution, 14(8), 1603–1609. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.14009>
- 3D Scanner App. (2024). 3D Scanner App. 3dScannerapp.com. <https://3dScannerapp.com>