

COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE LEVANTAMENTO GEOMÉTRICO: FOTOGRAMETRIA (TERRESTRE E AÉREA) E VARRIMENTO A LASER (ESTÁTICO E MÓVEL)

Juan Nascimento ⁽¹⁾, Patrícia Escórcio ⁽²⁾, José Santos ⁽³⁾

(1) Universidade da Madeira. ORCID: 0009-0005-7412-7690

(2) Universidade da Madeira, Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia, Departamento de Engenharia e Geologia. ORCID: 0000-0002-0038-162X

(3) Universidade da Madeira, Faculdade de Ciências Exatas e Engenharia, Departamento de Engenharia e Geologia. CONSTRUCT-LABEST, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. ORCID: 0000-0002-8134-0925. Email: jmmns@fe.up.pt

Resumo

Este artigo avalia técnicas de levantamento geométrico que utilizam métodos não invasivos para recolher dados detalhados sobre edifícios, estruturas e a sua envolvente. Estas técnicas permitem gerar modelos digitais 3D a partir de nuvens de pontos que representam superfícies e podem incluir propriedades como cores e texturas. Nesta pesquisa é aplicada uma abordagem prática envolvendo diversos casos de estudo, e os resultados qualitativos e quantitativos são analisados e comparados com os da literatura.

Os resultados indicam que, na escolha da técnica mais adequada para obter um modelo preciso e de elevada qualidade, é necessário considerar as características da construção para definir os requisitos do levantamento a realizar. A digitalização a laser apresentou resultados com melhor exatidão e consistência; em contraste, verificou-se que o levantamento fotogramétrico é altamente dependente das condições locais, com uma variação não negligenciável na exatidão, embora tenha sido esta a técnica que apresentou a melhor relação custo-benefício.

1. Introdução

O setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operações (AECO) tem vindo a evoluir significativamente, impulsionado pela crescente necessidade de reabilitação do edificado existente e pela adoção de novas tecnologias de levantamento geométrico. A escassez de informação fiável e atualizada sobre edifícios antigos reforça a importância de métodos capazes de recolher dados precisos de forma rápida, eficiente e não invasiva. Entre estas metodologias, destacam-se o varrimento a laser e a fotogrametria, técnicas que permitem gerar nuvens de pontos tridimensionais representativas da geometria dos edifícios.

Diversos estudos demonstram que o varrimento a laser terrestre apresenta elevada exatidão geométrica, embora envolva custos mais elevados e maior complexidade operacional [3], [7]. Por outro lado, o varrimento a laser terrestre móvel oferece maior versatilidade, sendo frequentemente utilizado como complemento ao varrimento terrestre estático [7]. A fotogrametria destaca-se pela sua flexibilidade, rapidez e menor custo, podendo ser utilizada como técnica principal ou complementar, dependendo dos objetivos do projeto [2], [6]. A qualidade das câmaras, o número de imagens e as condições de iluminação influenciam diretamente a exatidão dos modelos fotogramétricos [3].

Comparações entre técnicas revelam que, embora o varrimento a laser produza modelos mais precisos, a fotogrametria pode alcançar resultados competitivos em determinados contextos, apresentando ainda maior realismo visual [5]. A utilização de drones em levantamentos fotogramétricos permite o acesso a zonas de difícil acesso, ampliando significativamente a recolha de dados [1]. Estudos recentes indicam que a integração de técnicas híbridas, combinando varrimento a laser e fotogrametria, conduz a modelos mais completos e fiáveis do que a aplicação isolada de cada método [3], [4].

Perante a diversidade de técnicas e equipamentos disponíveis, torna-se essencial comparar o seu desempenho e exatidão em diferentes cenários reais, contribuindo para a sistematização de resultados e para uma escolha mais informada das metodologias de levantamento geométrico. Deste modo, o objetivo deste estudo é quantificar a exatidão dos modelos 3D, obtidos com as seguintes técnicas de levantamento: Fotogrametria Terrestre/Aérea e Varrimento a Laser Terrestre Estático/Móvel, assim como avaliar os fatores que mais influenciam os resultados dos levantamentos obtidos.

2. Metodologia

A metodologia adotada (Figura 1) começou pela pesquisa de equipamentos e *software* disponíveis para o teste, assim como de estudos académicos semelhantes. Em seguida, passou-se à seleção dos espaços a levantar, à escolha dos equipamentos, à execução dos levantamentos, e ao processamento dos dados. Finalmente, procedeu-se à análise interna e externa dos resultados obtidos, para se poder concluir das vantagens e desvantagens de cada técnica. Por falta de espaço, este artigo foca mais as duas últimas fases.

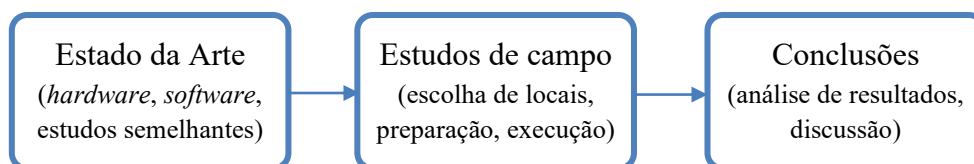


Figura 1: Metodologia do estudo.

3. Campanha experimental

Foram realizados quatro estudos de caso, cada um dividido em vários testes que variaram em termos das técnicas implementadas e da forma como a informação necessária foi obtida para gerar os modelos 3D finais. A partir destes modelos, foram extraídas informações e medições

que foram depois comparadas com medições de referência, para permitir uma avaliação da exatidão dos modelos em termos de digitalização dos vários espaços e elementos envolventes. Em cada caso de estudo foram definidas 18 medições de referência, seis em cada direção (X, Y e Z). A exatidão do modelo foi determinada pelo cálculo dos erros absolutos obtidos da comparação entre as medições feitas nos modelos finais e as medições de referência obtidas pela medição manual com ajuda de um medidor laser e fita métrica (com erro expectável inferior a 5 milímetros).

3.1 Procedimento

O procedimento utilizado para a avaliação prática consistiu nas seguintes etapas:

1. Definição dos estudos de caso, em ambientes exteriores e interiores.
2. Definição das técnicas, com base nos equipamentos disponíveis para cada caso de estudo.
3. Definição dos testes a realizar para cada caso e das variáveis a considerar.
4. Definição das dimensões de referência.
5. Medição das dimensões de referência reais, utilizando técnicas manuais no local.
6. Execução do levantamento digital.
7. Processamento de dados e criação das nuvens de pontos.
8. Análise qualitativa de cada nuvem de pontos.
9. Medição das dimensões de referência nas nuvens de pontos.
10. Comparação das dimensões e cálculo dos erros médios absolutos.

3.2 Casos de estudo

Os casos de estudo foram escolhidos para permitir uma avaliação da qualidade dos modelos 3D gerados e da exatidão destes modelos com a aplicação de diversas técnicas, de forma a identificar as limitações da sua utilização em levantamentos geométricos de edifícios existentes. Os locais escolhidos para os estudos de caso estão ilustrados na Figura 2. Os Casos de Estudo 1 (mais uniforme) e 3 (mais irregular e colorido) envolvem espaços interiores, enquanto os Casos de Estudo 2 e 4 consistem em espaços exteriores, o que permitiu uma avaliação das limitações de cada técnica de levantamento em ambos os tipos de espaço.



Figura 2: Casos de Estudo: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3, (d) Caso 4.

A Tabela 1 resume as condições dos levantamentos realizados, bem como as técnicas e equipamentos utilizados em cada um dos ensaios. As fotografias foram recolhidas a uma distância média de cerca de 2.5m ao objeto e com uma sobreposição global de cerca de 80%.

Tabela 1: Descrição dos casos de estudo

Casos	Testes	Tipo de espaço	Técnica de levantamento	Equipamento	Condições iniciais	Tempo de levantamento (min)	Nuvem pontos (pts)	Tamanho ficheiro (MB)
Caso 1	1.1	Interior	Fotogrametria Terrestre	<i>iPhone 11</i>	Boa iluminação	2	5,2 M	118
	1.2		Fotogrametria Terrestre	<i>iPhone 11</i>	Mais fotografias; Boa iluminação	8	10,7 M	238
	1.3		Fotogrametria Terrestre	<i>iPhone 11</i>	Mais fotografias; Post-its como pontos de controlo; Baixa iluminação	12	5,6 M	132
	1.4		Fotogrametria Terrestre	<i>iPhone 11</i>	Mais fotografias; Post-its como pontos de controlo; Boa iluminação	10	9,5 M	213
	1.5		Fotogrametria Terrestre	<i>Xiaomi Redmi 12C</i>	Fotografias semelhantes ao Teste 1.4 mas com equipamento diferente	10	26,6 M	620
Caso 2	2.1	Exterior	Fotogrametria Terrestre	<i>iPhone 11</i>	Boa iluminação; Baixo fluxo de pessoas	5	11,2 M	257
	2.2		Fotogrametria Terrestre	<i>Xiaomi Redmi 12C</i>	Boa iluminação; Baixo fluxo de pessoas; Uso de outro equipamento	7	9,6 M	230
Caso 3	3.1	Interior	Fotogrametria Terrestre	<i>RICOH THETA Z1</i>	Modelo existente	-	-	-
	3.2		Fotogrametria Terrestre	<i>iPhone 11</i>	Condições de iluminação média	5	2,5 M	57
	3.3		Fotogrametria Terrestre	<i>Xiaomi Redmi 12C</i>	Condições de iluminação média	5	7,1 M	163
	3.4		Laser Estático	<i>BLK360</i>	Condições de iluminação média	16	101,4 M	4 217
	3.5		Laser Móvel	<i>BLK2GO</i>	Condições de iluminação média	7	31,8 M	686
Caso 4	4.1	Exterior	Fotogrametria Terrestre	<i>iPhone 11</i>	Boa iluminação; Acessibilidade do perímetro da capela	5	3,9 M	89
	4.2		Fotogrametria Terrestre	<i>Xiaomi Redmi 12C</i>	Boa iluminação; Acessibilidade do perímetro da capela	5	18,1 M	408
	4.3		Fotogrametria Aérea	<i>DJI Mavic 3 Classic</i>	Boa iluminação; Acessibilidade do perímetro e da cobertura da capela	60	12,3 M	279
	4.4		Laser Estático	<i>BLK360</i>	Boa iluminação; Acessibilidade do perímetro da capela	32	66,7 M	1 333
	4.5		Laser Móvel	<i>BLK2GO</i>	Boa iluminação; Acessibilidade do perímetro da capela	14	19,2 M	373

3.3 Equipamentos e software

Os levantamentos executados foram feitos com os equipamentos disponíveis, com ajuda do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) da Ilha da Madeira, que forneceu os equipamentos, assim como o apoio em campo necessário para o levantamento e obtenção da nuvem de pontos dos casos de estudo 3 e 4. Os equipamentos usados para os casos de estudo são os ilustrados na Figura 3.

Para cada caso de estudo, foram usados diversos *softwares* de apoio para a obtenção dos modelos digitais finais. Estes *softwares* foram usados em diversas funções, como a modelação a partir de fotogrametria, visualização e medição dos modelos, armazenamento das nuvens de pontos, apoio no acompanhamento dos levantamentos em campo, pós-processamento no escritório das nuvens de pontos obtidas, entre outras. Os *softwares* usados no desenvolvimento deste estudo são os que se mencionam na Tabela 2.



Figura 3: Equipamentos utilizados: Medição manual: fita métrica *DEXTER* (a) e laser *KIPRIM LD50E* (b); Varrimento a laser terrestre estático: *BLK360* (c); Varrimento a laser terrestre móvel: *BLK2GO* (d); Fotogrametria Terrestre: *Iphone 11* (e) e *Redmi 12C* (g); Fotogrametria aérea: *Mavic 3 Classic* (f).

Tabela 2: *Softwares* utilizados

<i>Software</i>	<i>Empresa</i>	<i>Técnica</i>	<i>Função</i>
<i>Metashape</i>	<i>Agisoft</i>	Fotogrametria	Modelação e Medição
<i>Cyclone FIELD 360</i>	<i>Leica Geosystems</i>	Varrimento a Laser	Gestão em campo
<i>BLK 2 GO Live</i>	<i>Leica Geosystems</i>	Varrimento a Laser	Gestão em campo
<i>Cyclone REGISTER 360 PLUS</i>	<i>Leica Geosystems</i>	Varrimento a Laser	Armazenamento e Processamento
<i>ReCap</i>	<i>Autodesk</i>	Varrimento a Laser	Visualização e Medição

4. Resultados e Discussão

Ao comparar as técnicas de levantamento implementadas, foram considerados não só a exatidão dos resultados, mas também os tempos de execução de cada fase de trabalho, a viabilidade económica expectável para o levantamento, a qualidade nos modelos finais, comparando os resultados obtidos entre as diversas variações implementadas para a criação de cada modelo.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos em cada um dos casos, tanto qualitativos como quantitativos, determinando assim quais são as melhores técnicas a executar num levantamento geométrico com os recursos disponíveis e o que mais influencia a tomada de decisão ao executar este tipo de trabalho.

4.1 Resultados Qualitativos

Aspetos como os vazios e as obstruções nas nuvens de pontos, a correta representação geométrica dos elementos no espaço, o realismo visual, a orientação e localização das superfícies que o integram, são alguns pontos a considerar nesta análise. A Figura 4 apresenta as melhores nuvens de pontos obtidas em cada caso de estudo.

Avaliando a qualidade das nuvens de pontos obtidas, pode-se referir que, de uma forma geral, a técnica de Varrimento a Laser obtém, na maioria dos casos, um resultado melhor, com nuvens de pontos mais bem definidas, sem grandes vazios, sem incompatibilidades e sobreposições entre os elementos que integram o espaço. Por outro lado, os modelos obtidos do Levantamento Fotogramétrico possuem cores e texturas mais próximas da realidade, sendo estes os mais fotorrealistas.

Contudo, o Teste 4.3 com Fotogrametria Aérea superou as expectativas, sendo a nuvem de pontos mais bem definida, com cores e texturas idênticas ao aspeto real da capela, sem problemas de vazios nem de erros de sobreposição dos elementos e superfícies, e sendo o único teste do Caso 4 capaz de captar as superfícies do telhado da capela, sem perda de exatidão.

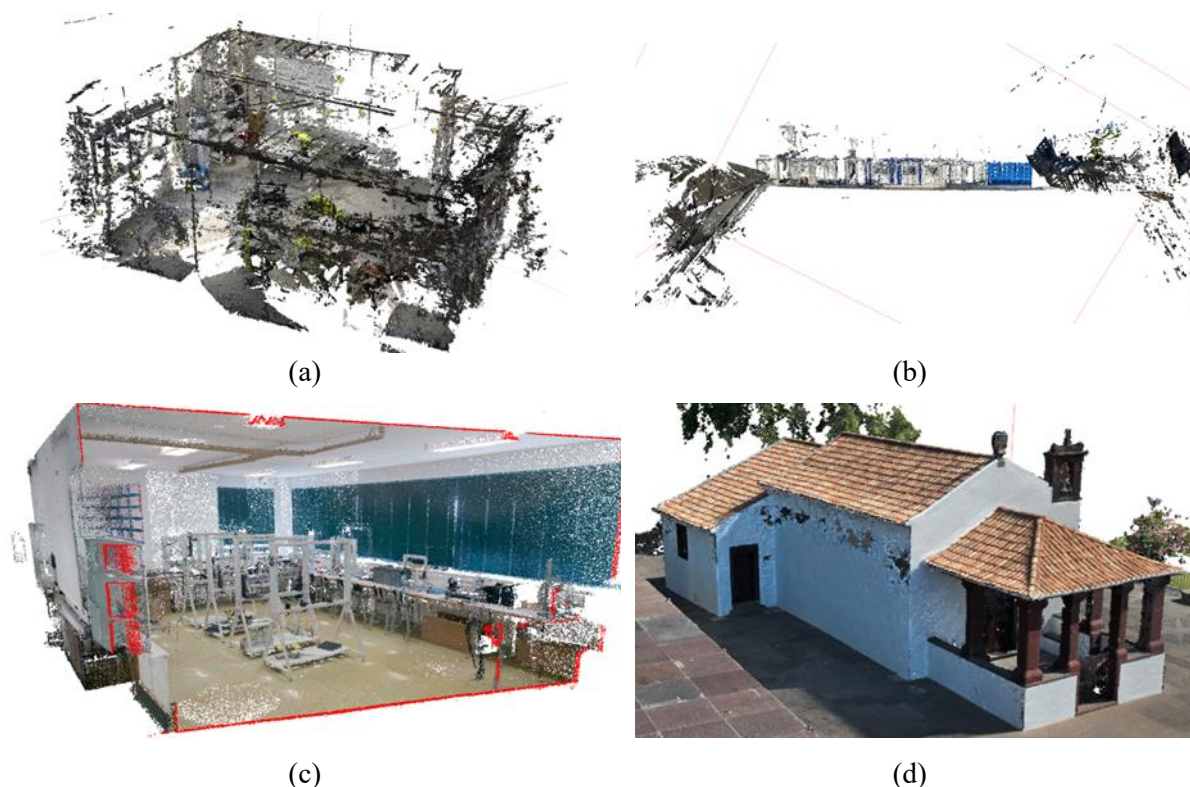


Figura 4: Algumas nuvens de pontos: (a) Teste 1.4; (b) Teste 2.1; (c) Teste 3.4; (d) Teste 4.3.

4.2 Resultados Quantitativos

Além de uma breve apreciação qualitativa, a Tabela 3 apresenta os resultados quantitativos de cada teste dos vários casos de estudo, em particular a exatidão das medições, tempo de levantamento, tamanho dos arquivos finais, densidade da nuvem de pontos, entre outros.

4.2.1 Exatidão

A exatidão geométrica das nuvens de pontos foi avaliada através do erro médio absoluto das dimensões de referência, comparadas com medições manuais em campo. O menor erro registou-se no caso de estudo 4, com a Fotogrametria Aérea, obtendo-se um erro médio absoluto de 4,0 cm, sendo esta a nuvem de pontos mais completa e precisa. Globalmente, e excluindo testes não conclusivos, obteve-se um erro médio de 6,3 cm. A Fotogrametria apresentou um

erro médio de 7,3 cm, enquanto o Varrimento a Laser registou 4,4 cm, revelando uma diferença de 2,9 cm a favor do Varrimento a Laser. Note-se que os fabricantes de equipamentos apontam para erros de apenas poucos milímetros (varrimento a laser) a poucos centímetros (fotogrametria), contudo estes resultam de testes em condições ideais.

Tabela 3: Resultados qualitativos e quantitativos

Testes	Técnica de levantamento	Equipamento	Condições iniciais	Resultado qualitativo	Erro médio (cm)	Erro mínimo (cm)	Erro máximo (cm)	Custo (€)	Tempo de levantamento (min)	Nuvem de pontos (pts)	Tamanho do arquivo (MB)
1.1	Fotogrametria Terrestre	<i>Iphone 11</i>	- Boa iluminação	Mau	5,2	0,6	30,5	E: 850 S: 179	2	5 263 794	118
1.2	Fotogrametria Terrestre	<i>Iphone 11</i>	- Mais fotos - Boa iluminação	Mau	6,2	0,0	30,6	E: 850 S: 179	8	10 773 055	238
1.3	Fotogrametria Terrestre	<i>Iphone 11</i>	- Mais fotos - Pontos de controle - Baixa iluminação	Muito mau	9,2	0,4	45,6	E: 850 S: 179	12	5 664 040	132
1.4	Fotogrametria Terrestre	<i>Iphone 11</i>	- Mais fotos - Pontos de controle - Boa iluminação	Médio	4,8	0,0	15,4	E: 850 S: 179	10	9 526 189	213
1.5	Fotogrametria Terrestre	<i>Xiaomi Redmi 12C</i>	- Fotos semelhantes aos do Teste 1.4 - Uso de outro equipamento	Médio	4,1	0,4	14,5	E: 200 S: 179	10	26 643 792	620
2.1	Fotogrametria Terrestre	<i>Iphone 11</i>	- Boa iluminação - Pouco fluxo de pessoas	Muito mau	-	-	-	E: 850 S: 179	5	11 283 253	257
2.2	Fotogrametria Terrestre	<i>Xiaomi Redmi 12C</i>	- Fotos semelhantes aos do Teste 2.1 - Uso de outro equipamento	Muito mau	-	-	-	E: 200 S: 179	7	9 683 099	230
3.1	Fotogrametria Terrestre	<i>RICOH THETA Z1</i>	- Modelo existente	-	10,4	1,5	45,9	E: 1 300 S: 107	-	-	-
3.2	Fotogrametria Terrestre	<i>Iphone 11</i>	- Condições médias de iluminação	Muito mau	-	-	-	E: 850 S: 179	5	2 583 572	57
3.3	Fotogrametria Terrestre	<i>Xiaomi Redmi 12C</i>	- Condições médias de iluminação	Muito mau	-	-	-	E: 200 S: 179	5	7 151 570	163
3.4	Laser Terrestre	<i>BLK360</i>	- Condições médias de iluminação	Bom	4,3	0,1	35,1	E: 24 000 S: 4 173	16	101 440 000	4 217
3.5	Laser Móvel	<i>BLK2GO</i>	- Condições médias de iluminação	Bom	5,0	0,1	37,5	E: 42 000 S: 4 173	7	31 810 000	686
4.1	Fotogrametria Terrestre	<i>Iphone 11</i>	- Boa iluminação - Acessibilidade da periferia da capela	Bom	14,2	0,3	42,2	E: 850 S: 179	5	3 946 543	89
4.2	Fotogrametria Terrestre	<i>Xiaomi Redmi 12C</i>	- Boa iluminação - Acessibilidade da periferia da capela	Mau	-	-	-	E: 200 S: 179	5	18 179 211	408
4.3	Fotogrametria Aérea	<i>DJI Mavic 3 Classic</i>	- Boa iluminação - Acessibilidade da periferia e cobertura da capela	Muito bom	4,0	0,3	23,6	E: 1 299 S: 179	60	12 309 777	279
4.4	Laser Terrestre	<i>BLK360</i>	- Boa iluminação - Acessibilidade da periferia da capela	Bom	4,3	0,5	28,2	E: 24 000 S: 4 173	32	66 760 000	1 333
4.5	Laser Móvel	<i>BLK2GO</i>	- Boa iluminação - Acessibilidade da periferia da capela	Bom	4,2	0,1	26,9	E: 42 000 S: 4 173	14	19 260 000	373

E: Equipamento, S: *Software*

4.2.2 Tempo de levantamento

O tempo de execução do levantamento geométrico varia conforme a técnica utilizada, a dimensão do espaço e o nível de detalhe pretendido. Os resultados demonstram que técnicas com equipamentos portáteis, como a Fotogrametria Terrestre e o Varrimento a Laser Terrestre Móvel, apresentam tempos de execução mais reduzidos, devido à maior versatilidade na sua utilização. Por outro lado, o uso de equipamentos mais especializados aumenta o tempo de levantamento, devido à necessidade de preparação prévia, controlo rigoroso e cuidados adicionais no posicionamento e nivelamento.

4.2.3 Custos

Os custos apresentados na Tabela 3 resultam de consulta ao mercado. Existe uma diferença significativa nos custos de aquisição de equipamentos e *software* entre o Varrimento a Laser e o Levantamento Fotogramétrico, sendo o primeiro mais dispendioso devido ao uso de equipamentos e *softwares* especializados. A Fotogrametria apresenta-se como uma solução mais acessível, embora os custos possam aumentar com a aquisição de câmaras ou drones mais avançados, permitindo, no entanto, melhores resultados em termos de qualidade.

4.2.4 Versatilidade e acessibilidade

Nos casos de estudo realizados em espaços interiores foram utilizadas soluções estáticas e móveis, ambas adequadas desde que exista espaço suficiente para a manobrabilidade dos equipamentos. Os dispositivos móveis destacam-se pela versatilidade e rapidez, permitindo levantamentos completos num curto espaço de tempo, ao contrário dos equipamentos estáticos, que exigem equipamentos fixos. Em espaços exteriores, além das soluções estáticas e móveis, foi possível aplicar a fotogrametria aérea, permitindo o levantamento de zonas inacessíveis ou mal captadas pelos equipamentos terrestres.

4.3 Comparação com outros autores

Na Tabela 4 são comparados os resultados obtidos neste artigo com os resultados obtidos por outros autores na aplicação das diversas técnicas de levantamento geométrico e em diferentes tipos de espaço. A diferença média entre a exatidão obtida por outros autores e a exatidão obtida neste artigo apresenta uma diferença média de 0.9 cm.

Tabela 4: Comparação de exatidão entre o estudo próprio e outros autores

Técnica de levantamento	Tipo de espaço	Erro médio (cm)			
		Próprio	Outros autores		Diferença
Fotogrametria Aérea	Exterior	4,0	1,8	[1][2]	+ 2,2
Fotogrametria Terrestre	Exterior	14,2	13,1	[3][4][2]	+ 1,1
	Interior	6,6	2,1	[5][6]	+ 4,5
Varrimento a Laser Terrestre	Exterior	4,3	1,2	[3][7][1][2]	+ 3,1
Estático	Interior	4,3	5,4	[6]	- 1,1
Varrimento a Laser Terrestre	Exterior	4,2	9,0	[7]	- 4,8
Móvel	Interior	5,0	16,1	[5]	- 11,1

De uma forma global, os resultados obtidos com o Varrimento a Laser têm melhor exatidão do que os da técnica de Fotogrametria. No entanto, a Fotogrametria Aérea continua a ser a melhor opção para o levantamento geométrico em exteriores, tendo a melhor exatidão do conjunto de

casos considerados. Ainda que as diferenças sejam reduzidas e teoricamente independentes do tipo de espaço, verificou-se que o Varrimento a Laser Terrestre Móvel teve melhor exatidão em espaços exteriores do que nos interiores. De igual forma, o Varrimento a Laser Terrestre Estático teve também melhor exatidão em espaços exteriores. Os resultados demonstram a eficiência e praticidade destas técnicas na obtenção de informação real da localização precisa dos elementos que integram o espaço.

5. Conclusões

Como resultado do trabalho desenvolvido neste artigo podem referir-se as seguintes conclusões:

- Existe uma ampla diversidade de técnicas, equipamentos e *softwares* para o levantamento geométrico do edificado, sendo a escolha da metodologia fortemente dependente do tipo de edifício, da escala e do objetivo final do modelo *BIM*.
- Cada técnica apresenta vantagens e limitações próprias, pelo que a seleção da abordagem deve considerar simultaneamente exatidão, tempo, custo e qualidade exigida para o processo *Scan-to-BIM*.
- As condições do local de levantamento (iluminação, acessibilidade, interferências e segurança) influenciam diretamente a qualidade das nuvens de pontos e, consequentemente, a fiabilidade dos modelos *BIM*.
- O Levantamento Fotogramétrico destaca-se pela sua versatilidade e baixo custo, sendo adequado para edifícios simples e projetos onde o foco é a documentação visual; contudo, a sua dependência das condições de iluminação pode introduzir vazios e erros geométricos que afetam a qualidade do modelo *BIM*.
- O Varrimento a Laser apresentou os melhores resultados em termos de exatidão e completude, sendo especialmente indicado para edifícios complexos, espaços interiores densos e projetos *Scan-to-BIM* que exijam maior rigor geométrico.
- O Varrimento a Laser Terrestre Móvel permite levantamentos rápidos, sendo adequado para campanhas expeditas, embora com ligeira perda de exatidão face ao Varrimento a Laser Terrestre Estático, o que pode limitar o nível de detalhe dos modelos *BIM*.
- A Fotogrametria Aérea revelou-se particularmente eficaz para levantamentos exteriores e elementos não acessíveis, como coberturas e fachadas altas, contribuindo para modelos *BIM* mais completos e com menos lacunas de informação.
- O uso de drones aumenta a segurança e a cobertura do levantamento, mas depende de condições regulamentares e operacionais adequadas.
- Nos casos de estudo, a Fotogrametria apresentou um erro médio de 7,3 cm e o Varrimento a Laser de 4,4 cm, confirmando que maiores níveis de exatidão resultam em modelos *BIM* mais fiáveis e com menor ambiguidade na modelação.
- O Varrimento a Laser Terrestre Estático mostrou melhor exatidão do que o Móvel (4,3 cm vs. 4,6 cm), sendo mais indicado para modelos *BIM* que suportem decisões técnicas ou intervenções de reabilitação.
- A Fotogrametria Aérea apresentou melhor desempenho do que a Fotogrametria Terrestre (4,0 cm vs. 7,7 cm), reforçando a sua recomendação para levantamentos exteriores.
- Fatores como a propagação de erros no alinhamento das nuvens de pontos, a acumulação da deriva inercial em algoritmos *SLAM*, a dilatação da incerteza posicional no ajustamento

fotogramétrico e as características radiométricas heterogéneas das superfícies registadas levam a que os erros reais sejam superiores aos indicados pelos fabricantes.

- A combinação de técnicas de Varrimento a Laser e Fotogrametria será a abordagem mais eficaz para processos *Scan-to-BIM*, permitindo aliar exatidão geométrica e realismo visual, resultando em modelos *BIM* mais completos e adequados a diferentes tipos de edifícios e usos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (Madeira) todo o apoio prestado durante a campanha experimental.

O terceiro autor agradece o Financiamento - UID/04708 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P./ MCTES, através de fundos nacionais.

Referências

- [1] R. R. Cunha, C. T. Arrabal, M. M. Dantas, and H. R. Bassanelli, “Laser scanner and drone photogrammetry: A statistical comparison between 3-dimensional models and its impacts on outdoor crime scene registration,” *Forensic Sci. Int.*, vol. 330, p. 111100, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.forsciint.2021.111100.
- [2] S. Gonizzi Barsanti, F. Remondino, and D. Visintini, “Photogrammetry and Laser Scanning for Archaeological Site 3D Modeling-Some Critical Issues,” *CEUR Workshop Proc.*, vol. 948, pp. B1–B10, 2012.
- [3] H. El-Din Fawzy, “3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards a better accuracy,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 58, no. 4, pp. 1191–1204, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.aej.2019.10.003.
- [4] R. Kadobayashi, N. Kochi, H. Otani, and R. Furukawa, “Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage,” *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35, 2004, Accessed: Jan. 04, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228606743_Comparison_and_evaluation_of_laser_scanning_and_photogrammetry_and_their_combined_use_for_digital_recording_of_cultural_heritage
- [5] A. Masiero, F. Fissore, A. Guarnieri, F. Pirotti, D. Visintini, and A. Vettore, “Performance Evaluation of Two Indoor Mapping Systems: Low-Cost UWB-Aided Photogrammetry and Backpack Laser Scanning,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 3, p. 416, Mar. 2018, doi: 10.3390/app8030416.
- [6] A. Guarnieri *et al.*, “Digital Photogrammetry and Laser Scanning in Cultural Heritage Survey,” 2004. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/2943023>
- [7] L. Mulè *et al.*, “Comparação de três equipamentos distintos baseados em LiDAR para levantamento de edifícios existentes,” in *4o congresso português de ‘Building Information Modelling’ vol. 2 - ptBIM*, UMinho Editora, 2022, pp. 459–469. doi: 10.21814/uminho.ed.77.40.