



Medições diretas vs LiDAR vs Fotogrametria: Comparação na criação de modelos 3D de árvores e no cálculo de biomassa

Rafael FRANCISCO*¹, Miguel TAVARES¹, Ana Maria PAUSEIRO¹, Inês LANCASTRE¹, Ana Paula FALCÃO², João Gomes FERREIRA², Rita MACHETE²

(rafael.francisco@tecnico.ulisboa.pt; miguelsousatavares@tecnico.ulisboa.pt; ines.lancastre@tecnico.ulisboa.pt; anamariapauseiro@tecnico.ulisboa.pt; ana.p.falcao@tecnico.ulisboa.pt; joao.gomes.ferreira@tecnico.ulisboa.pt; rita.f.machete@tecnico.ulisboa.pt)

Palavras-chave: medição direta, LiDAR, TLS, fotogrametria, drone, diâmetro à altura do peito, altura, biomassa

Resumo: De acordo com a Agência Internacional da Energia, as emissões de CO₂ (dióxido de carbono) aumentaram 0.9% em 2022, relativamente ao ano anterior, alcançando um novo recorde de 36.8 giga toneladas. De acordo com a diretiva 2018/2001, publicada pelo Parlamento Europeu e do Conselho, que se foca na promoção da utilização de fontes de energia renovável, a biomassa surge como um composto biodegradável derivado de resíduos da agricultura, florestais e outros produtos industriais e resíduos, permitindo a redução destas emissões. A estimativa da biomassa é fulcral na determinação da quantidade máxima de armazenamento de carbono nas árvores, durante o seu período de vida, e na gestão das florestas. As equações alométricas surgem como forma alternativa de recolha dos níveis de biomassa, face aos métodos tradicionais de natureza intrusiva e destrutiva. Estas equações apresentam como variáveis de entrada os valores de determinadas características das árvores como o diâmetro do tronco e a altura da árvore. A densidade da copa também apresenta influência na quantidade de biomassa produzida. O objetivo deste estudo é comparar a recolha destas grandezas através de medições diretas, da tecnologia LiDAR (*light detection and ranging*), mais especificamente TLS (*terrestrial laser scanning*), utilizando o equipamento FARO Focus S70, e da fotogrametria com recurso a um drone DJI Mini 3 para recolher as imagens.

A zona de estudo engloba uma seleção de três árvores (A, B e C) no Jardim do Pavilhão de Química do Instituto Superior Técnico, na Universidade de Lisboa, numa área com cerca de 10x10 m². As árvores A e C pertencem à espécie *Prunus cerasifera* e árvore B à espécie *Ligustrum lucidum*. A árvore A apresenta uma copa relevante. As restantes apresentam copas sem grande relevância para o estudo (praticamente ou mesmo inexistentes). Primeiramente, foram realizadas medições com fita métrica (com uma incerteza de leitura associada de ± 0.05 m) do perímetro do tronco a uma altura igual a 1.30 m, de acordo com a literatura e depois convertidas para diâmetro, assumindo uma forma perfeitamente circular do tronco. Nas árvores B e C, devido às ramificações dos respetivos troncos antes de 1.30 m de altura, medi-se imediatamente antes das bifurcações. A altura foi obtida recorrendo ao método clássico com uma estação total. De seguida, com o *laser scanner* foram recolhidos quatro scans a cobrir a zona de estudo, com o auxílio de três alvos esféricos. A resolução escolhida para cada foi 7.7 mm a 10 m (1/5) e selecionou-se que seriam emitidos três pulsos, demorando cerca de seis minutos cada *scan*. As nuvens de pontos foram fundidas numa, no software *Recap Photo* da Autodesk. Finalmente, com o drone, foram capturadas 115 fotografias e transferidas para o software *Meshroom*, da qual resultou uma nuvem de pontos.

Após serem efetuadas as medições, foram analisados os resultados obtidos em termos de precisão, qualidade e densidade, para cada uma das três árvores. Na árvore A, os resultados da fotogrametria revelaram-se ineficazes, uma vez que apresentavam baixa precisão, devido à densidade da folhagem das árvores e à impossibilidade de obter uma nuvem de pontos aceitável, privilegiando a tecnologia LiDAR. Nas árvores B e C, as nuvens de pontos geradas pela fotogrametria e pelo LiDAR foram bem-sucedidas, no entanto, o segundo método revelou-se novamente mais satisfatório nos parâmetros. Relativamente à altura da árvore, o LiDAR foi aquele que apresentou melhores resultados, também como se esperava.

No cálculo da biomassa, a tecnologia LiDAR, foi aquela que permitiu obter medidas mais próximas dos valores calculados tendo como base a literatura, devido ao elevado nível de detalhe oferecido. Como expectável, a árvore A com maior copa e altura apresentou o maior valor de biomassa, tendo em conta que os diâmetros dos troncos eram semelhantes. Por outro lado, devido à menor precisão na reprodução das copas, a fotogrametria revelou-se um método fiável apenas na biomassa proveniente dos troncos.



1. Introdução

O presente artigo explora a utilização de tecnologias inovadoras, como o Terrestrial Laser Scanning (TLS) e a Fotogrametria, para a gestão eficiente de ambientes e locais de construção, enquadrando-se na perspetiva da Construção 4.0. Este conceito visa aumentar a eficiência, desmaterializando processos e promovendo práticas mais sustentáveis na Engenharia Civil e Ambiental. Algumas aplicações incluem o Building Information Model (BIM) (Ferreira, 2023), as estimativas da biomassa, os ciclos de carbono e as alterações climáticas.

O TLS, um dos métodos do LiDAR (*light detection and ranging*), destaca-se pela capacidade de medição precisa de distâncias e pela criação de representações 3D detalhadas. Os drones (UAVs) têm revolucionado a recolha e análise de dados, permitindo a obtenção de imagens aéreas e dados TLS para análises precisas. Estes drones são frequentemente utilizados na Fotogrametria, com softwares especializados (Autodesk ReCap®, RealityCapture® e Meshroom®).

Ao longo do artigo é destacada a importância da biomassa na redução das emissões de CO₂, tendo por base as diretrizes europeias de promoção de fontes de energia renovável. A produção sustentável de energia a partir de biomassa depende do ciclo natural do carbono, sendo crucial para diminuir as concentrações de CO₂, na atmosfera. A monitorização global das florestas, torna-se crucial para a mitigação das mudanças climáticas.

O relatório compara os resultados obtidos pelo TLS, Fotogrametria e métodos clássicos de topografia, com foco no diâmetro à altura do peito da árvore (DBH) e altura da árvore (TH). A análise visa avaliar as vantagens e desvantagens associados a cada método, considerando como variantes o sinal GPS na Fotogrametria e a ordem dos scans no TLS. O estudo foi realizado em três árvores no jardim do Pavilhão de Química do Instituto Superior Técnico, em Lisboa, com o objetivo de fornecer resultados relevantes para avaliações precisas, praticidade na recolha de dados e diversidade nos testes realizados.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

A área de estudo situa-se no Jardim de Química, do Instituto Superior Técnico. Foram recolhidos dados de três árvores distintas (A, B, C). Na **Figura 1**, estão representadas as árvores A e C, que pertencem à espécie *Prunus cerasifera nigra* e a árvore B da espécie *Ligustrum lucidum*.

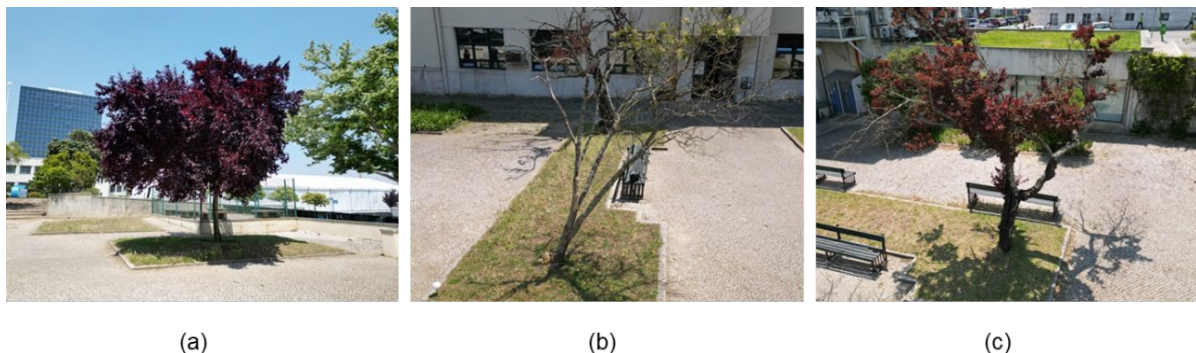


Figura 1 – Fotografias das três árvores, recolhidas durante o voo do drone (DJI Mini 3) (a) árvore A (b) árvore B e (c) árvore C

2.2 Recolha e processamento de dados

2.1.1 Métodos clássicos

Neste estudo, utilizou-se os levantamentos clássicos como método de aquisição de dados. Para determinar o perímetro à altura do peito (PBH) das três árvores selecionadas, foi utilizada uma fita métrica ($\pm 0,05$ m). Para determinar a altura de cada árvore (TH) foi utilizada uma estação total., conforme o procedimento ilustrado na Figura 2. Os métodos clássicos da topografia apresentam uma boa relação custo-benefício e são bastante adaptáveis, no entanto é um método mais demorado, suscetível a erros humanos e recomendado apenas para amostras pequenas.

A medição padrão do DBH, geralmente feita a 1,3 metros de altura do peito (BH) (Wieser et al, 2017), foi ajustada devido às formas irregulares dos troncos neste estudo. Após a medição do PBH, converteu-se em diâmetro, assumindo que o tronco é semelhante a uma forma circular (Equação 1). As medições serão comparadas com estimativas para avaliar a precisão do método.



$$DBH = PBH \times \pi \tag{1}$$

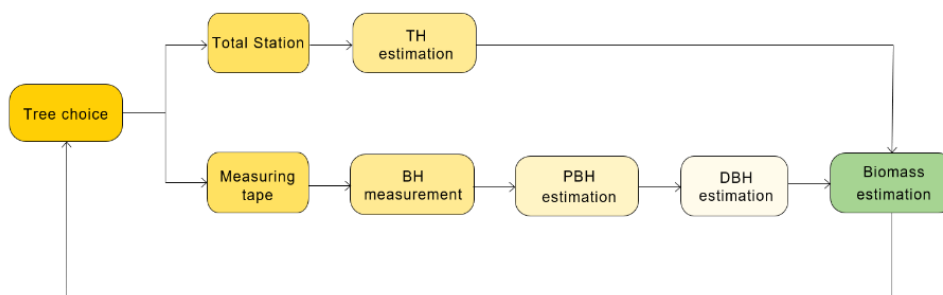


Figura 2 – Esquema representativo da abordagem nos métodos clássicos.

2.1.2 LiDAR

No início, foram realizados quatro scans em posições distintas utilizando o FARO Focus S70 para obter a nuvem de pontos em 3D. Ao longo do jardim, foram posicionados três alvos esféricos, visíveis em cada scan. Posteriormente, um scan adicional foi obtido no mesmo local do scan 2, mas com maior qualidade. O procedimento foi detalhado em um fluxograma (Figura 3), e a localização de cada scan foi identificada numericamente.

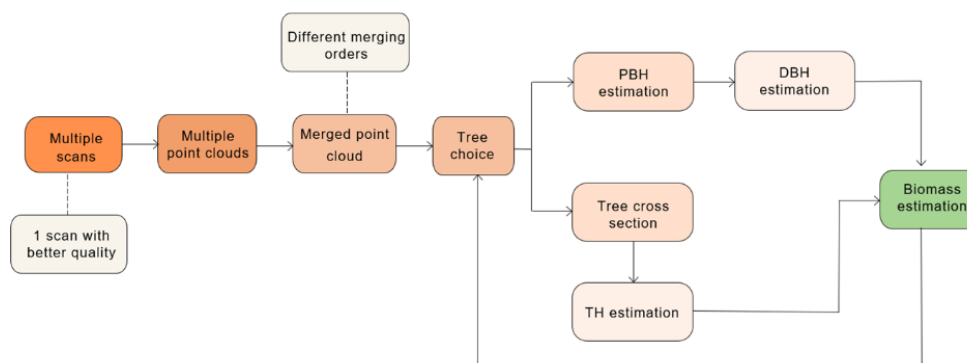


Figura 3 – Esquema representativo da abordagem no TLS.

Os primeiros quatro scans (1, 2, 3, 4) visam cobrir todas as árvores seleccionadas, considerando um alcance de 20 metros devido ao tamanho relativamente pequeno do jardim, resolução igual a 7,7 mm a 10 m (1/5) e 3 pulsos em cada ponto, demorando cerca de 6 minutos cada scan. A resolução e duração de cada scan fora alterada para 6.1 mm a 10 m (1/4) e 4 pulsos em cada ponto, demorando cerca de 11 minutos, e o scan 5 foi obtido. Em seguida, os dados foram transformados em uma nuvem de pontos 3D usando o software Autodesk ReCap® e diferentes configurações de agregação das nuvens de pontos foram testadas (Figura 4). Os resultados são discutidos na próxima secção.

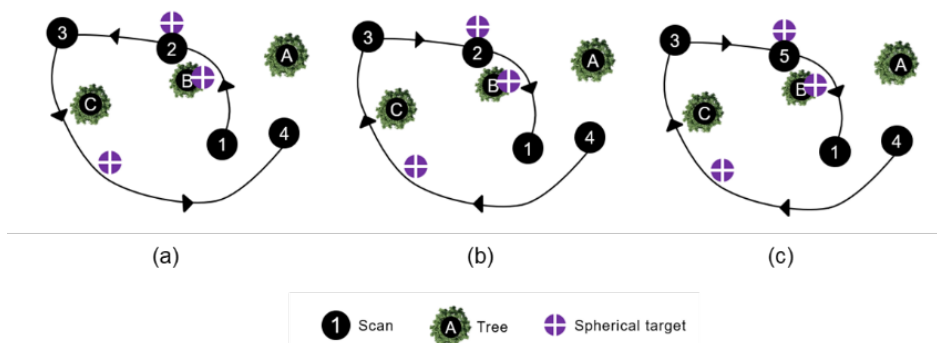


Figura 4 – Representação dos três métodos de agregação dos scans (a) TLS1 (b) TLS2 (c) TLS3.



Posteriormente, cada nuvem de pontos foi transferida para o Autodesk Revit® para estimar PBH, DBH e TH, sendo estes essenciais para calcular os níveis de biomassa. Foi também obtida uma secção transversal de cada árvore. O TH corresponde à distância entre o topo do solo e o ponto mais alto da árvore. É necessário identificar estas duas componentes no Autodesk Revit®, para medir esta distância.

2.1.3 Fotogrametria

No primeiro método (PG1), foram capturadas 115 fotos com um drone, o DJI Mini 3, para obter a nuvem de pontos em 3D. As fotos foram tiradas em diferentes pontos de vista de cada árvore para garantir a máxima cobertura e sobreposição. O esquema representado na Figura 5, resume todos os procedimentos efetuados.

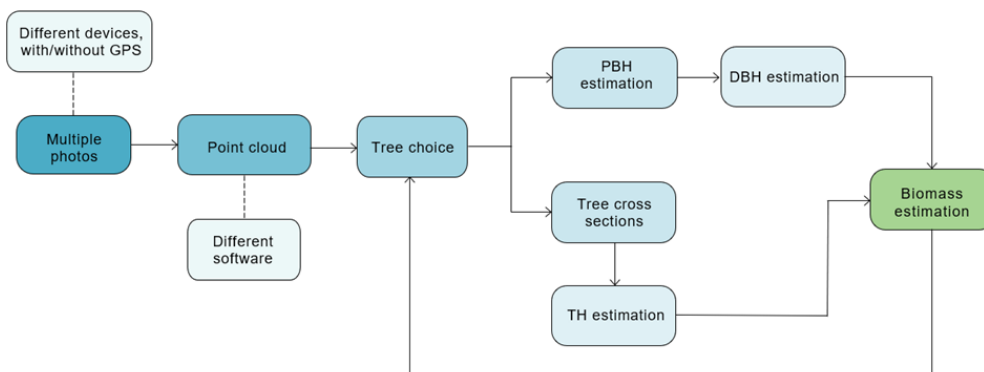


Figura 5 – Esquema representativo da abordagem na fotogrametria.

Três softwares diferentes (Autodesk ReCap®, RealityCapture® e Meshroom®) foram testados para avaliar sua influência na nuvem de pontos final. Após a obtenção da nuvem de pontos e a seleção de cada árvore, o procedimento para obter o DBH é o mesmo que explicado na secção 3.1.2. Cada software pode apresentar diferentes tempos de processamento e, conseqüentemente, um número diferente de pontos. O RealityCapture® tem o menor tempo de processamento, mas pode obter um número elevado de pontos. Por outro lado, Autodesk ReCap® tem um tempo de processamento mais longo, mas não necessariamente um maior número de pontos. Já o Meshroom® oferece um menor número de pontos e um tempo de processamento mais longo comparativamente com o Autodesk ReCap® (Qureshi et al, 2022).

3. Resultados e discussão

3.1 Métodos clássicos

Para a árvore A, o PBH foi medido à altura do peito de 1,20 m, enquanto para as árvores B e C, esta medição foi realizada onde o tronco começou a bifurcar (a 0,70 e 0,95 m, respetivamente). O Quadro 1 apresenta estes valores e os de TH. Naturalmente, podem ser afetados por eventuais erros de leitura.

Quadro 1 – Valores obtidos para cada árvore através dos métodos clássicos.

Parâmetro	Árvore A	Árvore B	Árvore C
BH (m)	1.200	0.700	0.950
PBH (m)	0.570	0.610	1.050
DBH (m)	0.181	0.194	0.334
TH (m)	6.425	4.209	6.270



3.2 LiDAR

As nuvens de pontos obtidas para TLS1, TLS2 e TLS3 eram compostas por 39 849 876, 39 916 357 e 43 817 296 pontos, respetivamente. A Figura 6 mostra um exemplo de nuvem de pontos obtida para TLS3. A secção transversal de cada árvore foi obtida e o PBH foi medido no valor de BH definido (Figura 7). Algumas partes da copa das árvores (especialmente as Árvores A e C) estão em falta devido à folhagem densa na primeira e à falta de mais scans para obter uma nuvem de pontos mais densa em ambas.

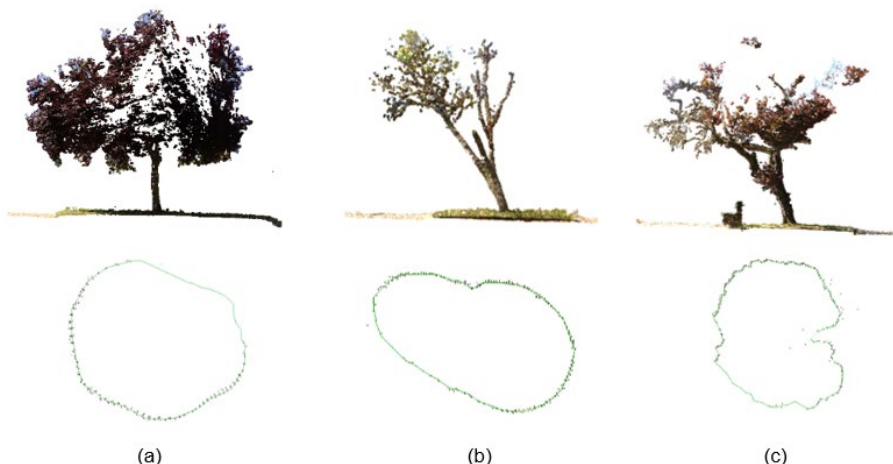


Figura 6 – Perfis transversais das árvores e respetivos contorno de tronco para TLS3 (a) Árvore A (b) Árvore B (c) Árvore C.

O Quadro 2 apresenta os valores obtidos valores e a conversão para DBH. Devido à sua natureza, a maioria dos troncos não tem uma forma regular. Neste caso, quando se refere DBH, trata-se de uma simplificação para uma forma circular que permite a extração desse valor para calcular a biomassa (mais evidente nos troncos B e C).

Quadro 2 – Valores obtidos para cada árvore através do TLS.

Parâmetro	Árvore A			Árvore B			Árvore C		
	TLS1	TLS2	TLS3	TLS1	TLS2	TLS3	TLS1	TLS2	TLS3
BH (m)	1.200	1.200	1.200	0.700	0.700	0.700	0.950	0.950	0.950
PBH (m)	0.558	0.549	0.584	0.611	0.605	0.594	1.262	1.272	1.233
DBH (m)	0.178	0.175	0.186	0.194	0.193	0.189	0.402	0.405	0.392
TH (m)	6.490	6.511	6.556	4.288	4.273	4.305	5.917	5.271	5.985

Analisando os resultados obtidos, pode-se verificar que o PBH se mantém praticamente constante entre diferentes testes na mesma árvore. É difícil analisar a influência de cada ordem de agregação e qualidade dos scans nesse parâmetro, porque o TLS3 apresenta o valor mais alto na Árvore A, o valor médio na Árvore B e o valor mais baixo na Árvore C, em comparação com o TLS1 e o TLS2. Mostra também que, para a mesma árvore, os valores de TH obtidos variam significativamente usando diferentes tipos de abordagens. A altura de uma árvore tende a aumentar quando são utilizados scans com maior qualidade e precisão, pois é possível visualizar mais pontos em cada nuvem. No entanto, não é possível tirar conclusões sobre a influência direta de uma ordem de agregação diferente (TLS2), porque, nas Árvores A e B, TLS2 apresenta resultados mais próximos de TLS3 do que TLS1, mas para a Árvore C, acontece o oposto. Em suma, os resultados para a tecnologia LiDAR (em particular o TLS) mostram que o uso de scans com melhor qualidade não tem grande influência no valor de DBH, mas tem importância significativa durante a determinação de TH. Também é importante referir que, a alteração da ordem de agregação dos scans, não permitiu chegar a uma conclusão óbvia sobre o efeito nos resultados. Uma vez que se trata de uma área de estudo



relativamente pequena e o ambiente envolvente não é muito complexo, provavelmente esta mudança não tem um grande impacto nos resultados. No entanto, talvez fosse interessante testar estes fatores numa área maior.

3.3 Fotogrametria

Os testes realizados com o Autodesk ReCap® e o Meshroom® não corresponderam às expectativas, uma vez que não foi possível obter uma nuvem de pontos clara que reproduzisse com suficiente precisão a realidade. A nuvem de pontos obtida com o RealityCapture® possui 3 708 990, não havendo resultados a apresentar para a Árvore A, relativamente ao DBH e à TH. Note-se que esta nuvem de pontos apresenta muito menos que as obtidas com o TLS, bem como uma densidade de pontos inferior, como era de esperar. Pelo que é previsto que interfira a proximidade dos valores de fotogrametria com os do TLS. A Figura 7 representa a secção transversal das árvores B e C para a fotogrametria e os seus respetivos troncos ao valor de BH. Comparando estes com os das 6, é possível perceber que a folhagem da árvore A não foi detetada. O movimento das folhas (devido ao vento) impede o reconhecimento por parte do software. Neste caso, os contornos dos troncos eram mais incertos, porque não havia pontos suficientes ao longo do contorno.

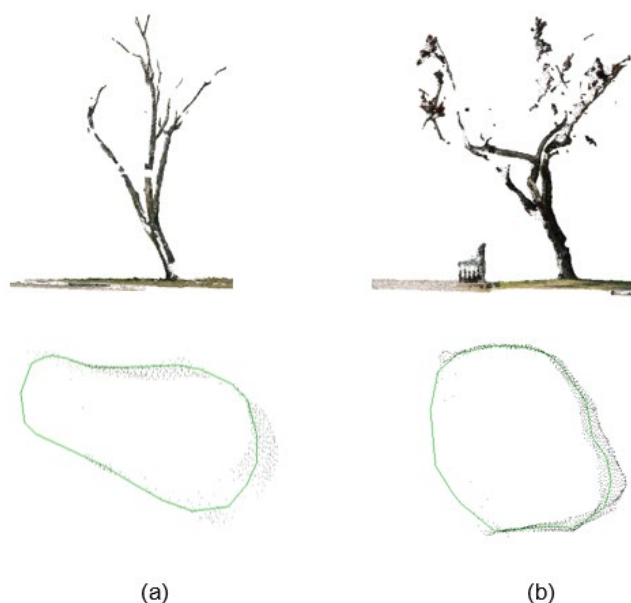


Figura 7 – Perfis transversais das árvores e respetivos contorno de tronco para PG1 (a) árvore A (b) árvore B (c) árvore C.

O Quadro 3 reúne os valores das medições e conversão para DBH para a fotogrametria, tendo em conta as mesmas hipóteses adotadas para o TLS.

Quadro 3 – Valores obtidos para cada árvore através da fotogrametria.

Parâmetro	Árvore A	Árvore B	Árvore C
BH (m)	-	0.700	0.950
PBH (m)	-	0.672	1.169
DBH (m)	-	0.214	0.372
TH (m)	-	4.085	5.481



3.4 Comparação entre as três abordagens

Na comparação dos métodos clássicos, TLS e fotogrametria para a análise de árvores e troncos, surgem considerações específicas ao examinar as árvores A, B e C, em termos da precisão, qualidade e densidade das nuvens de pontos obtidas e facilidade de implementação. Para a árvore A, que tinha uma copa e um número de folhas maiores, obter uma nuvem de pontos com fotogrametria provou-se ser desafiador, devido à densa folhagem e às condições de vento. Com um maior número de fotografias recolhidas de diferentes ângulos, a precisão e o grau de completação do modelo 3D resultante poderiam ser alcançadas. No entanto, dadas as condições específicas e limitações encontradas no presente estudo, é difícil determinar o alcance da melhoria. Assim, este facto torna o TLS uma escolha preferível ao recolher modelos 3D detalhados e precisos de árvores. Quanto às árvores B e C, nuvens de pontos foram obtidas com sucesso usando tanto a fotogrametria baseada em UAV quanto o TLS, e foi observado que as nuvens de pontos geradas a partir do primeiro método tinham uma densidade menor em comparação com aquelas obtidas do segundo. A menor densidade das nuvens de pontos da fotogrametria pode ser atribuída a fatores como resolução de imagem limitada, a presença de folhagem densa, o número e distribuição de imagens recolhidas de diferentes ângulos e variações nas condições de iluminação. Esses fatores podem impactar a precisão e o nível de detalhe na nuvem de pontos resultante. É importante considerar essas limitações e desafios potenciais ao recorrer à fotogrametria para criar nuvens de pontos, especialmente ao lidar com estruturas complexas, como árvores. Por outro lado, o TLS produziu consistentemente nuvens de pontos altamente detalhadas e precisas para ambas as árvores B e C, capturando medidas precisas e fornecendo representações fiéis das estruturas das árvores, como esperado. Em termos de facilidade de implementação, os métodos clássicos são relativamente simples e acessíveis. Por outro lado, utilizar UAV e TLS requer conhecimento técnico e equipamentos específicos para aquisição e processamento de dados. Por fim, em relação aos resultados para cada parâmetro das árvores, o TLS revela valores de TH mais precisos em comparação com os resultados da Fotogrametria. Para as medições de DBH, o TLS revelou novamente uma maior precisão para as árvores A e B, enquanto as medições clássicas da árvore C apresentam um valor mais próximo à abordagem da fotogrametria.

3.5 Estimativa da biomassa

Na área da Engenharia Civil, a biomassa representa uma fonte de energia muito promissora, servindo como um ótimo substituto para os combustíveis fósseis. Além disso, é reconhecida como um material de construção sustentável, mitigando o impacto ambiental que os materiais tradicionais conferem, estando alinhada com os princípios da economia circular e gestão de resíduos. Para determinar o valor da biomassa acima do solo de cada árvore na área de estudo (em toneladas/ha), foi necessário utilizar a Equação (2) (Gonçalves et al, 2019).

$$B = 0.45 \times \pi \times \left(\frac{DBH}{2}\right)^2 \times TH \times \rho \quad (2)$$

Onde B representa a biomassa e ρ a densidade da árvore.

Conforme estudos anteriores indicam, a densidade de *Prunus cerasifera nigra* pode ser considerada igual a 0,69 g/cm³ (Monteoliva et al., 2013), e a densidade de *Ligustrum lucidum* igual a 0,75 g/cm³ (Keeler, 2005). Para os métodos clássicos, obteve-se os resultados representados no Quadro 4. Os valores mais próximos que se obteve foram os determinados com recurso a TLS (Quadro 5).

Quadro 4 – Valores obtidos para a biomassa de cada árvore, para os métodos clássicos.

Parâmetro	Árvore A	Árvore B	Árvore C
DBH [m]	0.180	0.190	0.330
TH [m]	6.425	4.209	6.270
ρ [g/cm ³]	0.692	0.750	0.692
AGB [kg]	51.331	41.990	170.574



Quadro 5 – Valores obtidos para a biomassa de cada árvore, para o TLS.

Parâmetro	Árvore A	Árvore B	Árvore C
DBH [m]	0.180	0.183	0.397
TH [m]	6.520	4.240	5.730
ρ [g/cm ³]	0.692	0.750	0.692
AGB [kg]	51.516	37.638	220.235

3. Conclusões

O presente estudo teve como objetivo comparar três métodos para extração de características de árvores: métodos clássicos, Clássico, TLS e fotogrametria (com UAV), revelando conclusões valiosas sobre suas respectivas vantagens e limitações. O TLS provou ser o mais eficaz na obtenção de parâmetros com maior precisão. A alteração da ordem de agregação dos scans não se mostrou relevante para obter os valores desejados. A melhoria da qualidade de um scan permitiu obter uma nuvem de pontos mais densa e com tempos de recolha e tratamento de dados mais longos. Quanto ao UAV, este método ofereceu uma abordagem alternativa, possibilitando a recolha eficiente de dados em áreas maiores. Embora as nuvens de pontos obtidas por fotogrametria tivessem uma densidade menor em comparação com o TLS, ainda forneceram informações geométricas valiosas. No entanto, a sua qualidade e precisão foram impactadas por fatores como resolução limitada de imagem e folhagem densa. Uma recolha mais cuidadosa de fotos, especialmente na árvore A, poderia apresentar melhores resultados. Além disso, verificou-se que o software utilizado para o processamento de dados pode ser decisivo na nuvem de pontos obtida. O método clássico, apesar de servir como base, teve limitações na recolha de informações geométricas detalhadas em comparação com o TLS e a fotogrametria. Medições manuais de parâmetros como DBH e TH funcionaram como referência ao longo do estudo. Quanto à estimativa de biomassa, o método TLS, com suas medições precisas e modelos 3D abrangentes, destacou-se como a opção com maior grau de confiança para as árvores A e B. Embora a fotogrametria possa fornecer estimativas, os seus resultados podem ser ligeiramente menos precisos devido à menor densidade de nuvem de pontos e/ou outros detalhes geométricos limitados.

Referências Bibliográficas

- Ferreira, J. G. (2023) Construction 4.0 background, current state, and future perspectives. Support material for the course in Digital Technologies in Civil Engineering, Master in Civil Engineering, Instituto Superior técnico, University of Lisbon.
- Wieser, M.; Mandlbauer, G.; Hollaus, M.; Otepka, J.; Glira, P.; Pfeifer, N. (2017) A Case Study of UAS Borne Laser Scanning for Measurement of Tree Stem Diameter. *Remote Sensing*. 9(11):1154. <https://doi.org/10.3390/rs9111154>
- Qureshi, A. H.; Alaloul, W. S.; Murtiyoso, A.; Saad, S.; Manzoor, B. (2022) Comparison of photogrammetry tools considering rebar progress recognition, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B2-2022, 141–146. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-141-2022>
- Gonçalves, M.; Falcão, A.P.; Matias, M.; Mendes, M. P. (2019). The use of Sentinel-1 and Sentinel-2 images in Biomass estimation: first results applied to the Laurisilva forest in the Island of Madeira. Milan, 13th – 17th of May.
- Monteoliva, S.; Refort, M.; Keil, G.; Schauman, S. (2013) Potential uses of wood from an invasive species: *Ligustrum lucidum* (in Spanish).
- Keeler, H. L. (2005) *Our Native Trees and How to Identify Them: A Popular Study of Their Habits and Peculiarities*, The Kent State University Press, pp. 119–122. ISBN-10 0873388380