

Aquisição, processamento e controlo de qualidade de nuvens de pontos de LiDAR aéreo

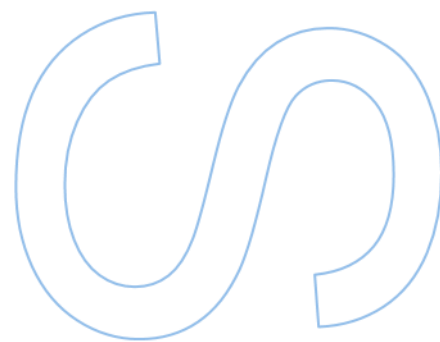
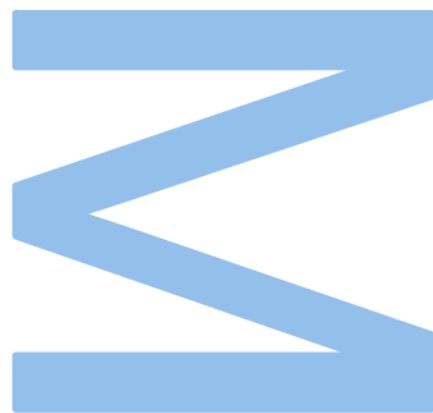
Francisca Alexandra Ferreira

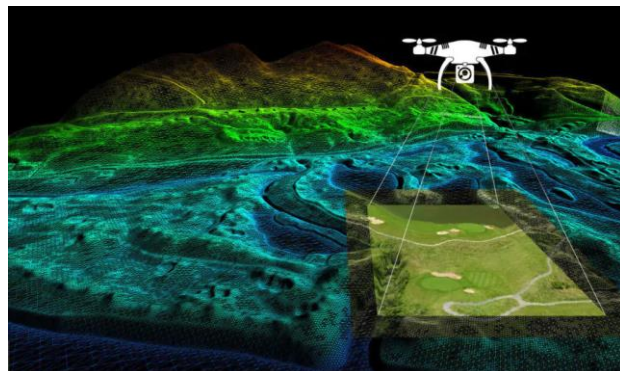
Mestrado em Engenharia Geoespacial

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

2024





Aquisição, processamento e controlo de qualidade de nuvens de pontos de LiDAR aéreo

Francisca Alexandra Ferreira

Relatório de Estágio realizado no âmbito do Mestrado em
Engenharia Geoespacial
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2024

Orientador

José Alberto Gonçalves, Professor Auxiliar, Faculdade de
Ciências da Universidade do Porto

Supervisor externo na Entidade de Acolhimento
Hélder Almeida, Diretor Técnico, Viamapa

Agradecimentos

Neste trabalho, queria agradecer ao meu orientador, o professor José Alberto, por toda a sua disponibilidade. Queria agradecer por estar sempre disponível para marcar reuniões de estágio e por ter acompanhado o desenrolar e a evolução de todo o trabalho. Agradecer, também, o facto de ter disponibilizado todo o equipamento necessário para as diversas atividades exigidas pelo estágio.

Um agradecimento, também, à empresa Viamapa por ter disponibilizado todos os dados necessários à realização do trabalho.

Resumo

Nos últimos anos, as nuvens de pontos 3D tornaram-se um dos temas críticos de pesquisa no campo da visão computacional e têm sido amplamente utilizadas em muitas áreas como, por exemplo, realidade virtual, robótica, gestão de infraestruturas, entre outras. O seu processamento conduz à obtenção de diversos produtos, o que faz com que as nuvens de pontos tenham um vasto conjunto de aplicações. Uma das suas aplicações mais conhecidas e utilizadas é o mapeamento e levantamento 3D. A tecnologia de nuvens de pontos transformou os métodos tradicionais de mapeamento e levantamento. Ao capturar milhões de pontos com *Light Detection and Ranging* (LiDAR) ou fotogrametria, permite a criação de mapas 3D altamente precisos de paisagens, edifícios e infraestruturas.

Este é o foco principal de um dos projetos em que a empresa Viamapa se encontra envolvida, uma vez que ganhou um dos lotes no levantamento LiDAR realizado em Portugal Continental para a Direção-Geral do Território (DGT). Tendo em conta que é uma das duas empresas produtoras, o principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de metodologias expeditas e precisas que permitissem fazer uma validação de algumas nuvens de pontos do projeto em três vertentes essenciais: altimetria, planimetria e qualidade da classificação. De modo a cumprir este objetivo, o trabalho foi dividido essencialmente em três fases. Numa fase inicial, foi feita uma análise e validação de um conjunto de nuvens de pontos do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), uma vez que ainda não havia dados do projeto LiDAR. Para tal, foi realizado um levantamento com drone numa das zonas abrangidas pelas nuvens e foram levantados alguns pontos do terreno. Posteriormente, foi realizada uma validação da altimetria e da planimetria e foi efetuada, ainda, uma avaliação da classificação das nuvens de pontos. Na segunda fase do trabalho, estas metodologias foram aplicadas ao primeiro conjunto de nuvens de pontos do projeto, que eram nuvens sem cor (RGB), nem classificação. Por fim, na terceira e última fase do trabalho, os métodos desenvolvidos foram aplicados ao segundo conjunto de nuvens de pontos do projeto, que eram nuvens mais completas, já com cor e classificação.

No final, concluiu-se que algumas nuvens de pontos apresentaram erros elevados nas diversas vertentes avaliadas. Isto permitiu alertar a empresa, de modo a que esta pudesse corrigir estes dados, contribuindo, assim, para um melhor desenvolvimento do projeto.

Palavras-chave: LiDAR, Fotogrametria, Drone, Nuvens de pontos, Classificação, Altimetria, Planimetria

Abstract

In recent years, 3D point clouds have become one of the research hotspots in the field of computer vision and have been widely used in many fields, such as virtual reality, robotics, management of infrastructures, among others. Its processing leads to obtaining different products, which means that point clouds have a wide range of applications. One of its most known and used applications is 3D mapping and surveying. Point cloud technology has transformed traditional mapping and surveying methods. By capturing millions of points with Light Detection and Ranging (LiDAR) or photogrammetry, it allows the creation of highly accurate 3D maps of landscapes, buildings and infrastructures.

This is the main focus of one of the projects in which the company Viamapa is involved, as it won one of the lots in the LiDAR survey carried out in Mainland Portugal for the General Directorate of Territory (DGT). Taking into account that it is one of the two producing companies, the main objective of this work was the development of expeditious and precise methodologies that would allow the validation of some of the project's point clouds in three essential aspects: altimetry, planimetry and classification quality. In order to achieve this objective, the work was essentially divided into three phases. In an initial phase, an analysis and validation of a set of point clouds from the Institute for the Conservation of Nature and Forests (ICNF) was carried out, as there was no data from the LiDAR project yet. To this end, a drone survey was carried out in one of the areas covered by the clouds and some points of the terrain were surveyed. Subsequently, a validation of altimetry and planimetry was carried out and an evaluation of the classification of point clouds was also carried out. In the second phase of the work, these methodologies were applied to the project's first set of point clouds, which were clouds without color (RGB) or classification. Finally, in the third and final phase of the work, the methods developed were applied to the project's second set of point clouds, which were more complete clouds, already with color and classification.

In the end, it was concluded that some point clouds presented high errors in the different aspects evaluated. This made it possible to alert the company so that it could correct this data, thus contributing to a better development of the project.

Keywords: LiDAR, Photogrammetry, Drone, Point clouds, Classification, Altimetry, Planimetry

Índice

Lista de Tabelas	viii
Lista de Figuras	x
Lista de Abreviaturas	xiv
1. Introdução	1
1.1. Métodos de aquisição de uma nuvem de pontos	1
1.2. Motivação e objetivos do trabalho	1
1.3. Estrutura do relatório	2
2. Estado da Arte	3
3. Materiais e métodos	5
3.1. Primeira fase – Validação das nuvens de pontos do ICNF	7
3.1.1. Validação Altimétrica	10
3.1.2. Validação Planimétrica	11
3.1.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos	13
3.2. Segunda fase – Validação do primeiro conjunto de nuvens do projeto	13
3.2.1. Arcos	13
3.2.1.1. Validação Altimétrica	16
3.2.1.2. Validação Planimétrica	16
3.2.2. Baltar	17
3.2.2.1. Validação Altimétrica	19
3.2.2.2. Validação Planimétrica	20
3.2.3. Valpedre	21
3.2.3.1. Validação Altimétrica	23
3.2.3.2. Validação Planimétrica	24
3.2.4. Foz do Douro	25
3.2.4.1. Validação Altimétrica	26

3.3. Terceira fase - Validação do segundo conjunto de nuvens do projeto	26
3.3.1. Algosó	27
3.3.1.1. Validação Altimétrica	28
3.3.1.2. Validação Planimétrica	29
3.3.1.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos	30
3.3.2. Macedo de Cavaleiros	30
3.3.2.1. Validação Altimétrica	32
3.3.2.2. Validação Planimétrica	33
3.3.2.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos	34
4. Resultados	35
4.1. Primeira fase - Validação das nuvens de pontos do ICNF	35
4.1.1. Validação Altimétrica	35
4.1.2. Validação Planimétrica	37
4.1.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos	39
4.2. Segunda fase - Validação do primeiro conjunto de nuvens do projeto	42
4.2.1. Arcos	43
4.2.1.1. Validação Altimétrica	43
4.2.1.2. Validação Planimétrica	44
4.2.2. Baltar	45
4.2.2.1. Validação Altimétrica	45
4.2.2.2. Validação Planimétrica	47
4.2.3. Valpedre	48
4.2.3.1. Validação Altimétrica	48
4.2.3.2. Validação Planimétrica	50
4.2.4. Foz do Douro	52
4.2.4.1. Validação Altimétrica	52

4.3. Terceira fase - Avaliação do segundo conjunto de nuvens do projeto	54
4.3.1. Algosó	54
4.3.1.1. Validação Altimétrica	54
4.3.1.2. Validação Planimétrica	55
4.3.1.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos	57
4.3.2. Macedo de Cavaleiros	59
4.3.2.1. Validação Altimétrica	59
4.3.2.2. Validação Planimétrica	61
4.3.2.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos	62
Conclusão	67
Referências Bibliográficas	68

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Pontos que apresentaram maiores diferenças negativas e maiores diferenças positivas, em metros, entre a cota do MDS do ICNF e a cota do MDS do drone	36
Tabela 2 – Média (μ), desvio-padrão (σ) e RMS das diferenças entre as cotas para os 122 pontos avaliados	37
Tabela 3 – Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos	37
Tabela 4 – Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre a nuvem de pontos do ICNF, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y	38
Tabela 5 – Cota no MDS do drone, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona de Arcos	43
Tabela 6 – Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 8 pontos avaliados	43
Tabela 7 – Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos	44
Tabela 8 – Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre o MDS da nuvem de pontos, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y	45
Tabela 9 – Cota no MDS do drone, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona de Baltar	46
Tabela 10 – Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 17 pontos avaliados	46
Tabela 11 – Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos	47
Tabela 12 – Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre o MDS da nuvem de pontos, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y	48
Tabela 13 – Cota no MDS do drone, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona de Valpedre	49
Tabela 14 – Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 21 pontos avaliados	49
Tabela 15 – Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos	50

Tabela 16 – Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre o MDS da nuvem de pontos, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y	51
Tabela 17 – Cota do ponto, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona da Foz do Douro	52
Tabela 18 – Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 27 pontos avaliados	53
Tabela 19 – Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos	53
Tabela 20 – Cota no MDS do drone, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona de Algosó	54
Tabela 21 – Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 8 pontos avaliados	54
Tabela 22 – Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos	55
Tabela 23 – Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre o MDS da nuvem de pontos, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y	56
Tabela 24 – Cota no MDS do drone, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona de Macedo de Cavaleiros	60
Tabela 25 – Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 8 pontos avaliados	60
Tabela 26 – Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos	61
Tabela 27 – Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre o MDS da nuvem de pontos, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y	62

Lista de Figuras

Fig. 1 – Divisão de Portugal Continental nos quatro lotes. O lote 1 foi ganho pela empresa Viamapa e os lotes 2, 3 e 4 pela empresa Socarto	5
Fig. 2 – Drone DJI Mavic 3 Enterprise utilizado no levantamento aéreo, juntamente com o controlador	6
Fig. 3 – Recetor SingularXYZ Sfaira One utilizado em todos os levantamentos de pontos do trabalho (fonte da imagem da esquerda: www.singularxyz.com)	6
Fig. 4 – Sete regiões de Portugal Continental abrangidas pelo projeto áGIL do ICNF (fonte da imagem: geocatalogo.icnf.pt/geovisualizador/agil)	8
Fig. 5 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no <i>Agisoft Metashape</i> , relativos ao levantamento com drone efetuado numa zona de Vila Pouca de Aguiar	9
Fig. 6 – MDS gerado a partir das nuvens de pontos do ICNF relativas à zona do levantamento do drone e respetiva escala de cores	9
Fig. 7 – Linhas representativas de algumas das estradas presentes no Ortomosaico do drone	10
Fig. 8 – Pontos criados ao longo das linhas com o <i>plugin QChainage</i> . A distância entre pontos é de 20 metros	11
Fig. 9 – Exemplo de dois dos sete polígonos desenhados em zonas de telhados sobre a nuvem de pontos do ICNF. Estes polígonos foram utilizados para determinar a translação necessária para ajustar a nuvem de pontos ao MDS do drone	12
Fig. 10 – Planeamento do voo efetuado em Arcos na aplicação DJI Pilot 2	14
Fig. 11 – Fotografias do levantamento com drone e do levantamento dos pontos efetuados em Arcos	14
Fig. 12 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no <i>Agisoft Metashape</i> , relativos ao levantamento com drone efetuado na região de Arcos	15
Fig. 13 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona de Arcos e respetiva escala de cores	15
Fig. 14 – Pontos levantados no campo sobrepostos ao MDS gerado a partir do drone, para a região de Arcos	16
Fig. 15 – Exemplo de dois dos quatro polígonos desenhados em zonas de telhados sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos da região de Arcos do projeto LiDAR	

nacional	17
Fig. 16 – Planeamento do voo efetuado em Baltar na aplicação DJI Pilot 2	18
Fig. 17 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no <i>Agisoft Metashape</i> , relativos ao levantamento com drone efetuado na região de Baltar	18
Fig.18 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona de Baltar e respetiva escala de cores	19
Fig. 19 – Pontos levantados no campo sobrepostos ao MDS gerado a partir do drone, para a região de Baltar	20
Fig. 20 – Exemplo de dois dos quatro polígonos desenhados em zonas de telhados sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos da região de Baltar do projeto LiDAR nacional	21
Fig. 21 – Planeamento do voo efetuado em Valpedre na aplicação DJI Pilot 2	21
Fig. 22 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no <i>Agisoft Metashape</i> , relativos ao levantamento com drone efetuado na região de Valpedre	22
Fig. 23 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona de Valpedre e respetiva escala de cores	23
Fig. 24 – Pontos levantados no campo sobrepostos ao MDS gerado a partir do drone, para a região de Valpedre	24
Fig. 25 – Exemplo de dois dos quatro polígonos desenhados em zonas de telhados sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos da região de Valpedre do projeto LiDAR nacional	25
Fig. 26 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona da Foz do Douro e respetiva escala de cores	25
Fig. 27 – Pontos levantados no campo sobrepostos ao MDS gerado a partir da nuvem de pontos, para a região da Foz do Douro	26
Fig. 28 – Planeamento do voo efetuado em Algosó na aplicação DJI Pilot 2	27
Fig. 29 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no <i>Agisoft Metashape</i> , relativos ao levantamento com drone efetuado na região de Algosó	28
Fig. 30 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona de Algosó e respetiva escala de cores	28
Fig. 31 – Pontos sobrepostos ao MDS gerado a partir do drone, para a região de Algosó. Os três pontos localizados mais à direita são os pontos levantados no campo e os restantes são os pontos que foram acrescentados	29

Fig. 32 – Exemplo de dois dos quatro polígonos desenhados em zonas de telhados sobre a nuvem de pontos da região de Algos do projeto LiDAR nacional	30
Fig. 33 – Planeamento do voo efetuado em Macedo de Cavaleiros na aplicação DJI Pilot 2	31
Fig. 34 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no <i>Agisoft Metashape</i> , relativos ao levantamento com drone efetuado na região de Macedo de Cavaleiros	31
Fig. 35 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona de Macedo de Cavaleiros e respetiva escala de cores	32
Fig. 36 – Pontos levantados no campo sobrepostos ao MDS gerado a partir do drone, para a região de Macedo de Cavaleiros	33
Fig. 37 – Exemplo de dois dos quatro polígonos desenhados em zonas de telhados sobre a nuvem de pontos da região de Macedo de Cavaleiros do projeto LiDAR nacional	34
Fig. 38 – Exemplo de um ponto que apresentou uma cota no MDS do drone (imagem da esquerda) e uma cota no MDS do ICNF (imagem da direita) muito discrepantes devido à diferença de posição de uma árvore em ambos os MDS	35
Fig. 39 – Polígonos mostrados na figura 9, mas sobre o MDS do drone	38
Fig. 40 – Exemplo de um erro encontrado na classificação da nuvem de pontos do ICNF, em que pontos pertencentes às bordas dos telhados de alguns edifícios foram classificados como vegetação	40
Fig. 41 – Exemplo de outro erro encontrado na classificação da nuvem de pontos do ICNF, em que pontos pertencentes às chaminés dos telhados de alguns edifícios foram classificados como vegetação	41
Fig. 42 – Exemplo de mais um erro encontrado na classificação da nuvem de pontos do ICNF, em que pontos de solo e vegetação foram classificados como ruído	42
Fig. 43 – Polígonos mostrados na figura 15, mas sobre o MDS do drone	44
Fig. 44 – Polígonos mostrados na figura 20, mas sobre o MDS do drone	47
Fig. 45 – Polígonos mostrados na figura 25, mas sobre o MDS do drone	50
Fig. 46 – Polígonos mostrados na figura 32, mas sobre o MDS do drone	56
Fig. 47 – Exemplo de um erro encontrado na classificação da nuvem de pontos de Algos, em que pontos, neste caso, de uma pedra foram classificados como edifício, em vez de solo	58
Fig. 48 – Exemplo de outro erro encontrado na classificação da nuvem de pontos de Algos, em que pontos de solo e vegetação foram classificados como ruído	58
Fig. 49 – Exemplo de uma classificação incompleta, em que alguns pontos ainda estão	

por classificar, estando representados a cinzento	59
Fig. 50 – Polígonos mostrados na figura 37, mas sobre o MDS do drone	61
Fig. 51 – Exemplo de um erro encontrado na classificação da nuvem de pontos de Macedo de Cavaleiros, em que pontos, neste caso, de estátuas foram classificados como solo (castanho) e vegetação (azul turquesa)	63
Fig. 52 – Exemplo de outro erro encontrado na classificação da nuvem de pontos de Macedo de Cavaleiros, em que pontos pertencentes ao telhado de uma casa são classificados como solo	64
Fig. 53 – Exemplo de mais um erro encontrado na classificação da nuvem de pontos de Macedo de Cavaleiros, em que pontos de solo foram classificados como ruído	65

Lista de Abreviaturas

DGT	DIREÇÃO-GERAL DO TERRITÓRIO
FCUP	FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DO PORTO
GPS	GLOBAL POSITIONING SYSTEM
ICNF	INSTITUTO DA CONSERVAÇÃO DA NATUREZA E DAS FLORESTAS
IMU	INERTIAL MEASUREMENT UNIT
LIDAR	LIGHT DETECTION AND RANGING
MDE	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO
MDS	MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE
MDT	MODELO DIGITAL DE TERRENO
NASA	NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION
RENEP	REDE NACIONAL DE ESTAÇÕES PERMANENTES GNSS
RMS	ERRO MÉDIO QUADRÁTICO

1. Introdução

O processamento de nuvens de pontos é, nos dias de hoje, um tema de pesquisa muito interessante e importante. Deste modo, tem havido uma necessidade crescente de obter métodos inovadores que permitam o tratamento e análise destas nuvens e, consequentemente, a sua classificação [1]. Através de uma nuvem de pontos é possível gerar diversos produtos, como modelos digitais de terreno (MDT) e modelos digitais de superfície (MDS), por exemplo, que são frequentemente utilizados em várias áreas como cadastro, agronomia, estudos de relevo e declividade, entre outras. A utilização destes produtos em conjunto com a classificação da nuvem de pontos que lhes deu origem, pode ter diversas aplicações e ser muito importante em determinados campos, como a agronomia e os incêndios. Por exemplo, se tivermos uma nuvem de pontos que possui uma zona classificada como vegetação e houver pontos que estejam na sua proximidade e que tenham sido classificados como linhas elétricas, um modelo digital de superfície pode ajudar a estudar o risco de incêndio naquela área uma vez que, se tivermos as alturas da vegetação e das linhas elétricas, podemos avaliar a diferença de alturas e vir a prevenir a ocorrência de um incêndio.

1.1. Métodos de aquisição de uma nuvem de pontos

Relativamente à obtenção de uma nuvem de pontos, existem dois métodos principais, o LiDAR e a fotogrametria. O LiDAR captura nuvens de pontos com maior exatidão [2]. Esta técnica utiliza pulsos laser de luz infravermelha para medir distâncias. Quando estes pulsos chegam novamente ao sensor, ele mede quanto tempo levou para eles regressarem. Os *scanners* podem emitir até 100 000 pulsos por segundo, o que fornece uma visão incrivelmente detalhada da área que está a ser mapeada. Já a fotogrametria é um método comum para gerar nuvens de pontos e utiliza um drone para tirar diversas fotografias do local de interesse. Como o drone usa uma câmara, normalmente é necessário ajustar as suas configurações tendo em conta as condições do local a mapear, de modo a obter melhores resultados. Nesta técnica, são necessários vários ângulos para capturar uma visão completa da paisagem. Depois de todas as fotografias serem tiradas, pode-se usar uma plataforma de processamento para as sobrepor e, ao unir as imagens, pode-se desenvolver uma nuvem de pontos [3].

1.2. Motivação e objetivos do trabalho

Em Portugal Continental, está a ser desenvolvido um levantamento LiDAR aéreo, que visa obter nuvens de pontos em território nacional. Mais concretamente, o levantamento

LiDAR de Portugal Continental está a ser desenvolvido por empresas na sequência de um concurso público (CP/3957/2022), promovido pela DGT.

No que diz respeito a este projeto, foi efetuado um levantamento no qual o país foi dividido em quatro lotes e a empresa Viamapa ganhou o lote mais a Norte. Relativamente a este projeto, tinham de ser entregues diversos produtos, como nuvens de pontos, MDT, MDS e ortomosaicos, que têm de passar por um processo de controlo de qualidade para poderem ser aceites pela entidade contratante. Estes produtos devem ser avaliados em diversos aspetos como a densidade e classificação dos dados LiDAR e a completude e exatidão posicional dos ortomosaicos, como descrito no caderno de encargos do levantamento [4]. No que toca à classificação dos pontos, foram tidas em conta diversas classes, como terreno, vegetação (baixa, média e alta), construções, ruído, entre outras, sendo que cada classe tinha de incluir uma série de objetos e infraestruturas (veículos, contentores, túneis, bancos de areia, ...). Uma vez que a empresa é uma das duas empresas produtoras deste projeto, o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de metodologias expeditas que permitissem validar algumas das nuvens de pontos que seriam utilizadas no projeto. Desta forma, poderia-se verificar se as mesmas possuíam o rigor pretendido, tanto em altimetria, como em planimetria e classificação, antes de serem utilizadas para gerar os produtos que seriam entregues à empresa fiscalizadora. Para além disso, as metodologias propostas deveriam contribuir não só para este, como para futuros projetos em que a empresa se encontre envolvida.

1.3. Estrutura do relatório

Este relatório encontra-se estruturado em 4 capítulos, sendo o primeiro a introdução em que se introduz o problema, estabelecem-se os objetivos e se descreve a estrutura do relatório. O segundo capítulo faz uma revisão do estado da arte da tecnologia utilizada neste trabalho. O terceiro capítulo descreve as metodologias desenvolvidas de forma mais aprofundada e todo o trabalho de campo realizado. Por fim, o quarto e último capítulo apresenta, de forma detalhada, todos os resultados obtidos e ilações retiradas ao longo do trabalho.

2. Estado da Arte

Como referido anteriormente, o processamento e classificação de nuvens de pontos é um tema importante que tem vindo a ganhar cada vez mais relevância ao longo dos anos e tem sido amplamente utilizado em diversas áreas. Assim sendo, vários estudos no âmbito deste tema têm sido publicados ao longo dos anos. Artigos como "A Review of Point Clouds Segmentation and Classification Algorithms", "Aerial Point Cloud Classification with Deep Learning and Machine Learning Algorithms" [5] e "Deep Learning-based 3D Point Cloud Classification: A Systematic Survey and Outlook" [6], que estão referenciados na bibliografia deste relatório, são exemplos de trabalhos publicados que tiveram como principal intuito explorar e aprofundar o conhecimento relativo às nuvens de pontos e à sua classificação.

As nuvens de pontos avaliadas neste trabalho foram adquiridas por LiDAR. O LiDAR é uma técnica de deteção remota ativa, que permite coletar dados de elevação muito densos e precisos. É similar ao radar, mas usa pulsos de luz laser em vez de ondas de rádio. A aquisição de dados de elevação com LiDAR apresenta diversas vantagens relativamente à maioria das outras técnicas. Algumas dessas vantagens são: a alta precisão, a elevada densidade de pontos, as grandes áreas de cobertura e a capacidade dos utilizadores de reamostrar áreas de forma rápida e eficiente. Tudo isto, fornece a possibilidade de mapear alterações discretas numa resolução muito alta, cobrir grandes áreas de maneira uniforme e precisa e produzir resultados de forma rápida. Para além disso, ao fornecer dados 3D altamente precisos, a técnica LiDAR facilita a segmentação e a classificação de nuvens de pontos com alta densidade. Devido às diversas vantagens que confere, o LiDAR possui muitas aplicações, como a atualização e criação de mapas de taxas de seguro contra inundações, o estudo de florestas e árvores, o mapeamento de alterações de zonas costeiras, entre outras [2].

Na técnica LiDAR, são emitidos feixes de luz intensos e focados e é medido o tempo que o sensor demora a detetar as reflexões destes pulsos. Esta informação é, depois, utilizada para determinar distâncias a objetos. As coordenadas 3D destes objetos são calculadas a partir da diferença de tempo entre a emissão e a receção do pulso, do ângulo em que este pulso foi emitido e da localização absoluta do sensor na ou acima da superfície terrestre.

Devido ao facto de ser uma técnica que oferece diversas vantagens e aplicações em inúmeras áreas, o LiDAR tem sido cada vez mais utilizado e tem vindo a ganhar mais importância ao longo dos anos. Esta é uma técnica que foi desenvolvida há mais de 50

anos e, inicialmente, era usada para mapear partículas da atmosfera. Nesta aplicação terrestre, havia muito menos complexidade posicional comparativamente ao mapeamento aéreo que se realiza atualmente [2].

O termo LiDAR foi utilizado pela primeira vez em 1963, sendo uma combinação das palavras luz e radar. Durante a década de 70, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) iniciou a deteção remota baseada em laser, que se concentrou nos protótipos aéreos para posterior implementação do sensor LiDAR. A sua principal funcionalidade era medir as propriedades das águas oceânicas e da atmosfera. Para além disso, também ajudou a examinar as camadas de gelo e a cobertura florestal, para o mapeamento topográfico. Desde então, os usos científicos do LiDAR foram evoluindo [7].

Em meados da década de 80, faltava um sistema comercial viável *Global Positioning System / Inertial Measurement Unit* (GPS/IMU). Isto fez com que houvesse muitas pesquisas no sentido de encontrar soluções para o sistema de posicionamento do sensor. O facto de haver uma necessidade cada vez maior de sensores em fotogrametria aérea, levou, finalmente, ao desenvolvimento do LiDAR, que provou ser o melhor sensor para trabalhar com este tipo de fotogrametria. No entanto, não foi possível obter dados precisos de imagens LiDAR até à chegada de equipamentos de GPS e IMU, disponíveis comercialmente no final da década de 80 [7].

No início da década de 90, deu-se o desenvolvimento da IMU e viu-se a capacidade de começar a alcançar precisões na ordem do decímetro. Algumas das primeiras aplicações aéreas não batimétricas estavam relacionadas com o estudo dos glaciares e das suas mudanças. O LiDAR terrestre começou, também, a ser usado como uma maneira de mapear de forma densa a natureza tridimensional das feições e superfícies do solo, com um nível de precisão extremamente elevado (na ordem do centímetro) [2].

Atualmente, o avanço da tecnologia tornou o LiDAR um sensor bastante popular. Esta técnica é utilizada amplamente, nos dias de hoje, num vasto conjunto de aplicações, conferindo diversas vantagens para os utilizadores. O LiDAR é, agora, usado no campo da automação, agricultura, arqueologia e, também, na quantificação de vários componentes atmosféricos [7].

3. Materiais e métodos

Como mencionado anteriormente, o principal objetivo deste trabalho foi a avaliação de alguns dos dados utilizados no âmbito do projeto LiDAR nacional. Neste projeto, Portugal Continental foi dividido em quatro lotes, sendo que a Viamapa ganhou o lote mais a Norte, ou seja, o lote 1. Na figura 1, encontram-se representados estes quatro lotes.

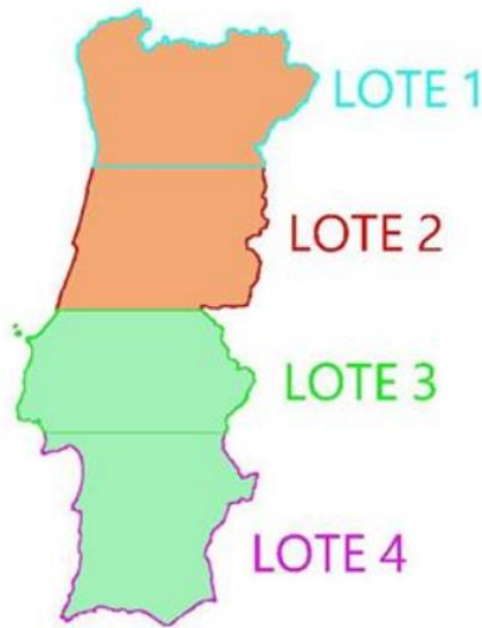


Fig. 1 – Divisão de Portugal Continental nos quatro lotes. O lote 1 foi ganho pela empresa Viamapa e os lotes 2, 3 e 4 pela empresa Socarto.

De modo a cumprir o objetivo, foram realizados levantamentos com o drone DJI Mavic 3 Enterprise em algumas zonas do lote 1. A figura 2, mostra o drone utilizado nos levantamentos do trabalho e o respetivo controlador.



Fig. 2 – Drone DJI Mavic 3 Enterprise utilizado no levantamento aéreo, juntamente com o controlador.

Para além disso, foram levantados, nestas zonas, alguns pontos do terreno com o recetor SingularXYZ Sfaira One. A figura 3, mostra o recetor utilizado.



Fig. 3 – Recetor SingularXYZ Sfaira One utilizado em todos os levantamentos de pontos do trabalho (fonte da imagem da esquerda: www.singularxyz.com).

Em todos os levantamentos com o drone e dos pontos do terreno, tanto o drone, como o recetor foram sempre ligados à estação da Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS (ReNEP) mais próxima do local, uma vez que era algo que estava estipulado no caderno de encargos do projeto LiDAR.

O trabalho foi dividido em três fases. Na primeira fase, quando ainda não havia dados do projeto, as metodologias desenvolvidas foram usadas para avaliar um conjunto de

nuvens de pontos do ICNF, nas três vertentes pretendidas: altimetria, planimetria e qualidade da classificação das nuvens. Na segunda fase, foram avaliadas as primeiras nuvens de pontos do projeto, ainda sem cor, nem classificação. Não possuindo classificação, estas foram apenas avaliadas em duas vertentes: altimetria e planimetria. Por fim, na terceira e última fase do trabalho, as metodologias foram utilizadas para avaliar as segundas nuvens de pontos do projeto, já com cor e classificação, novamente nas três vertentes.

No caderno de encargos do projeto, encontram-se indicadas as tolerâncias estabelecidas para os erros relativos a cada vertente da validação. Em termos altimétricos, esperava-se que: a exatidão vertical absoluta dos dados LiDAR fosse melhor do que 10 cm e que 95% dos erros altimétricos fossem inferiores a 20 cm, com um erro máximo admissível de 40 cm para todos os pontos avaliados. No que toca à planimetria, esperava-se que: a exatidão planimétrica absoluta dos dados LiDAR fosse melhor do que 30 cm e que 95% dos erros fossem inferiores a 60 cm, com um erro máximo admissível de 1,20 m para todos os pontos avaliados. Quanto à classificação, esperava-se que: não houvesse mais de 1% de pontos pertencentes ao solo mal classificados, nem mais de 10% de pontos pertencentes às restantes classes mal classificados.

3.1. Primeira fase – Validação das nuvens de pontos do ICNF

Tal como mencionado, numa fase mais inicial, ainda não havia dados do projeto LiDAR e, como tal, foram utilizados dados do ICNF. Os dados utilizados são dados LiDAR adquiridos no âmbito do projeto áGIL. Este projeto foi financiado pelo ICNF através do Fundo Florestal Permanente, tendo tido início em abril de 2020 e terminado em junho de 2021. O seu objetivo essencial foi gerar produtos cartográficos, a partir de dados de sensor LiDAR aerotransportado, para apoio à gestão das florestas e dos fogos rurais. Os dados disponíveis são ficheiros LiDAR de sete regiões diferentes de Portugal Continental: Vila Pouca de Aguiar, Serras da Lousã, Poença-a-Nova (Oleiros), Pombal, Mafra, Sintra (Cascais) e Parque Florestal de Monsanto [8]. Na figura 4, encontram-se representadas estas sete regiões.

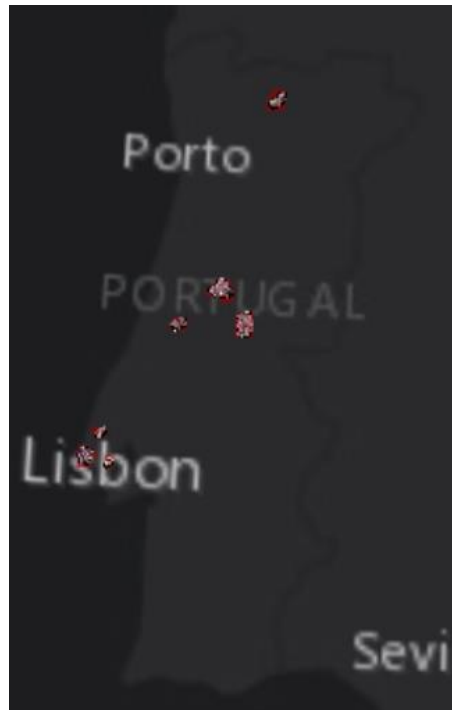


Fig. 4 – Sete regiões de Portugal Continental abrangidas pelo projeto áGIL do ICNF (fonte da imagem: geocatalogo.icnf.pt/geovisualizador/agil).

Das sete regiões abrangidas pelo projeto áGIL, apenas a região de Vila Pouca de Aguiar se encontra localizada no lote 1 do projeto LiDAR nacional, tornando-se a escolha lógica para a primeira fase do trabalho.

Depois de escolhida a região, selecionou-se uma pequena zona da mesma para se efetuar um levantamento com drone, tendo-se escolhido um local com uma grande variabilidade de classes (terreno, vegetação baixa, média e alta, construções, ...), para que se pudesse fazer uma melhor e mais completa avaliação da classificação. Depois de selecionada a zona, foi efetuado, então, o levantamento. Foram feitas, no total, 530 fotografias com o drone e, de seguida, importaram-se as mesmas para um projeto do *Agisoft Metashape*. Posteriormente, gerou-se uma nuvem de pontos a partir das mesmas. Para terminar o processamento no *Agisoft Metashape*, foi gerado um MDS e um Ortomosaico, estando estes dois modelos representados na figura 5.

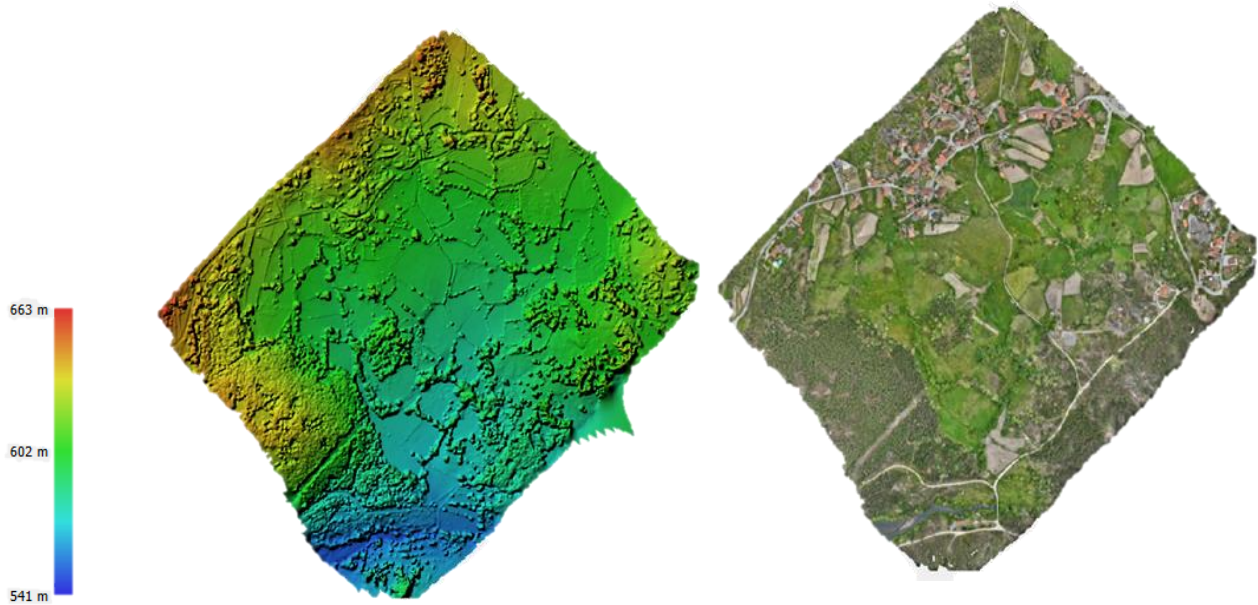


Fig. 5 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no *Agisoft Metashape*, relativos ao levantamento com drone efetuado numa zona de Vila Pouca de Aguiar.

Posto isto, criou-se outro projeto *Agisoft Metashape* e começou-se por importar as nuvens de pontos do ICNF que continham a zona levantada pelo drone. De seguida, fez-se um *merge* dessas nuvens, ficando-se apenas com uma nuvem e, a partir da mesma, gerou-se um MDS. O modelo obtido encontra-se representado na figura 6, juntamente com a respetiva escala de cores.

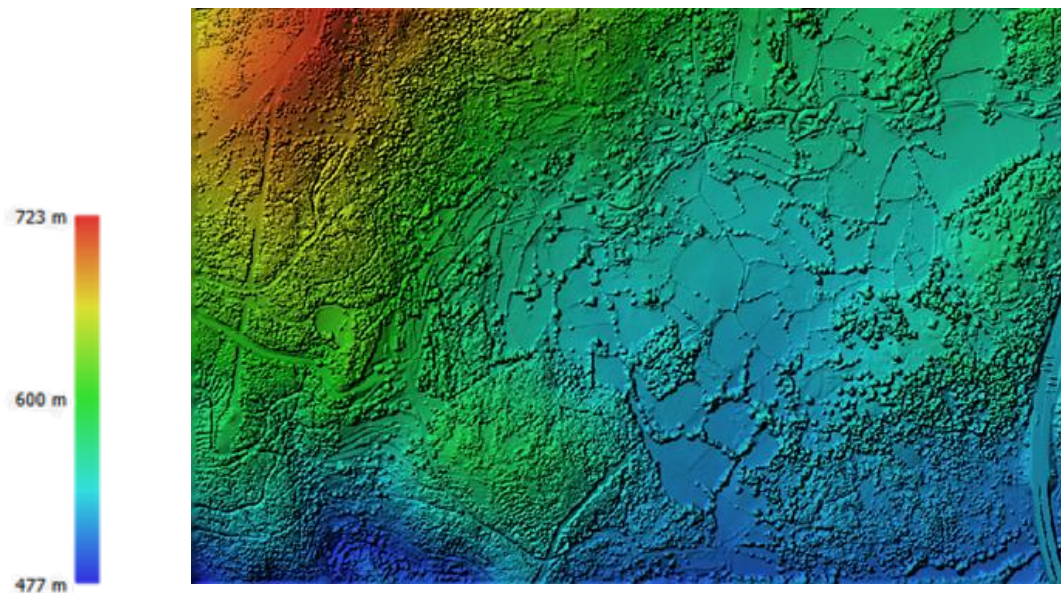


Fig. 6 – MDS gerado a partir das nuvens de pontos do ICNF relativas à zona do levantamento do drone e respetiva escala de cores.

3.1.1. Validação Altimétrica

O próximo passo, foi a avaliação em termos altimétricos das nuvens de pontos do ICNF. Para tal, utilizou-se o MDS do drone, que é um modelo bastante rigoroso, para comparar com o MDS obtido a partir das nuvens de pontos do ICNF.

Assim sendo, começou-se por importar para o QGIS o Ortomosaico relativo ao levantamento com drone e gerado no *Agisoft Metashape*. De seguida, criou-se uma *shapefile* de linhas vazia e adicionou-se à mesma três linhas representativas de algumas estradas presentes no Ortomosaico. O resultado encontra-se representado na figura 7.



Fig. 7 – Linhas representativas de algumas das estradas presentes no Ortomosaico do drone.

Posteriormente, utilizou-se o *plugin QChainage* (*plugin* que permite criar pontos ao longo de linhas, com distância entre os mesmos definida pelo utilizador, de forma fácil e rápida) para criar pontos ao longo das linhas, tendo-se definido para o parâmetro relativo à distância entre pontos um valor de 20 metros. O resultado foi uma *shapefile* com 139 pontos que se encontra representada na figura 8.



Fig. 8 – Pontos criados ao longo das linhas com o *plugin QChainage*. A distância entre pontos é de 20 metros.

Subsequentemente, importou-se para o QGIS o MDS relativo ao levantamento com drone e o MDS gerado a partir das nuvens de pontos do ICNF. De modo a efetuar a validação altimétrica, utilizou-se o *plugin Point Sampling Tool* para extrair as cotas dos MDS do drone e do ICNF a partir dos pontos de amostragem gerados pelo *QChainage*. Este plugin permite comparar rapidamente as alturas extraídas de diferentes camadas, proporcionando uma análise eficiente da precisão altimétrica. O resultado foi uma *shapefile* com 139 pontos, sendo que, a cada ponto, estava associada uma cota extraída a partir do MDS do drone e uma cota extraída a partir do MDS das nuvens de pontos do ICNF. Para terminar a parte da validação altimétrica, calculou-se a diferença entre estas duas cotas para cada ponto.

3.1.2. Validação Planimétrica

Relativamente à validação em termos planimétricos, recorreu-se a uma metodologia desenvolvida por Gonçalves e Morgado [9] que se traduz através de um programa em linguagem C, que determina a translação necessária para ajustar uma nuvem de pontos a um modelo digital de elevação (MDE). Este programa usa um MDE, que, neste caso, era o MDS resultante do drone (por ser o MDE de referência), e um ficheiro de texto com pontos XYZ de uma pequena área de uma nuvem de pontos, ou seja, neste caso, das nuvens de pontos do ICNF. Como a área selecionada deve ter declives em várias direções, todas as áreas escolhidas diziam respeito a telhados com inclinações em pelo

menos 3 direções. O programa determina a translação a aplicar à nuvem para que esta se encaixe no MDE.

Deste modo, começou-se por importar para o QGIS o MDS resultante do drone, a nuvem de pontos do ICNF, gerada no *Agisoft Metashape* pela junção das nuvens que continham a zona levantada pelo drone e, ainda, o MDS gerado a partir dessa nuvem. De seguida, criou-se uma *shapefile* de polígonos vazia e adicionou-se à mesma um polígono numa zona de um telhado, digitalizado sobre a nuvem de pontos do ICNF. Repetiu-se este processo mais seis vezes, obtendo, no final, sete *shapefiles*, cada uma contendo um polígono. De notar que todos os polígonos foram desenhados sobre a nuvem de pontos do ICNF com triangulação e que os vértices dos mesmos foram colocados nas bordas dos telhados. É importante referir ainda que os polígonos foram bem espalhados pela área abrangida pelos MDS. Na figura 9, encontram-se representados dois dos sete polígonos desenhados.

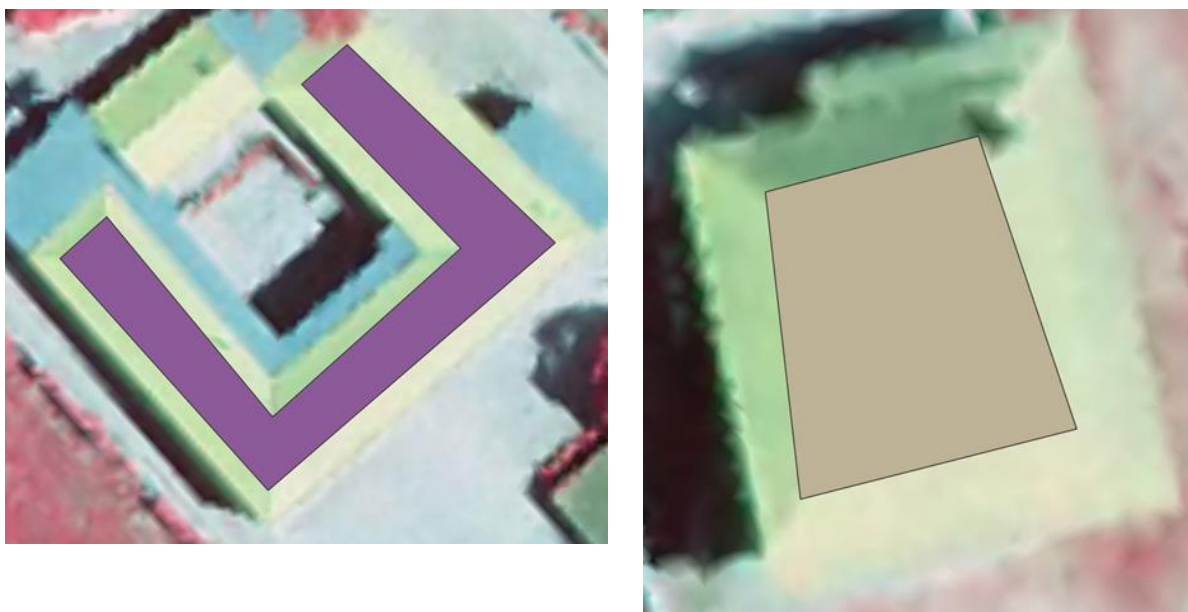


Fig. 9 – Exemplo de dois dos sete polígonos desenhados em zonas de telhados sobre a nuvem de pontos do ICNF. Estes polígonos foram utilizados para determinar a translação necessária para ajustar a nuvem de pontos ao MDS do drone.

Posteriormente, utilizou-se a ferramenta *lasclip* do *Lastools* para extrair os pontos da nuvem do ICNF contidos em cada polígono. Assim sendo, para cada polígono foi guardado um ficheiro de texto com as coordenadas XYZ de cada um destes pontos. Por fim, para cada polígono, determinou-se a translação que era necessário aplicar à nuvem de pontos do ICNF para que esta se encaixasse no MDS do drone.

3.1.3. Avaliação da Classificação da nuvem de pontos

Para terminar a primeira fase do trabalho, fez-se uma avaliação da classificação da nuvem de pontos. Para tal, utilizou-se algumas funcionalidades do QGIS, como o *Elevation Profile*, que é uma ferramenta que permite traçar perfis e visualizar dados de elevação ao longo dos mesmos. Para além disso, usou-se o ortomosaico gerado a partir do drone como base, de modo a verificar se os pontos estariam ou não bem classificados. Recorreu-se, ainda, a uma outra funcionalidade do QGIS, que permite aumentar o tamanho dos pontos de uma ou mais classes, destacando-os dos restantes e foi-se analisando diversas zonas da nuvem para encontrar erros de classificação que precisassem de ser corrigidos. Para além do QGIS, utilizou-se, também, o Google Earth Pro em algumas situações, de modo a identificar mais facilmente alguns objetos e infraestruturas presentes no ortomosaico e a perceber a que classe é que os mesmos pertenceriam.

3.2. Segunda fase – Validação do primeiro conjunto de nuvens de pontos do projeto LiDAR nacional

Na segunda fase do trabalho, as metodologias desenvolvidas foram aplicadas a um primeiro conjunto de nuvens de pontos do projeto LiDAR nacional. Para tal, começou-se por selecionar quatro zonas bem espalhadas pelo lote 1 do projeto, dentro da informação que a empresa dispunha no momento, e de fácil acesso, tendo-se escolhido a região de Arcos (concelho de Vila do Conde), Baltar (concelho de Paredes), Valpedre (concelho de Penafiel) e Foz do Douro (concelho do Porto). De seguida, solicitou-se à empresa as nuvens de pontos correspondentes a estas quatro regiões. Como estas nuvens ainda não possuíam classificação, apenas foi possível efetuar uma avaliação em duas vertentes: altimetria e planimetria.

3.2.1. Arcos

No caso de Arcos, em Vila do Conde, começou-se por efetuar um levantamento com o drone, tendo sido feitas 430 fotografias. Na figura 10, encontra-se representada a cobertura deste voo, que foi planeado no controlador do drone, com a aplicação DJI Pilot 2.

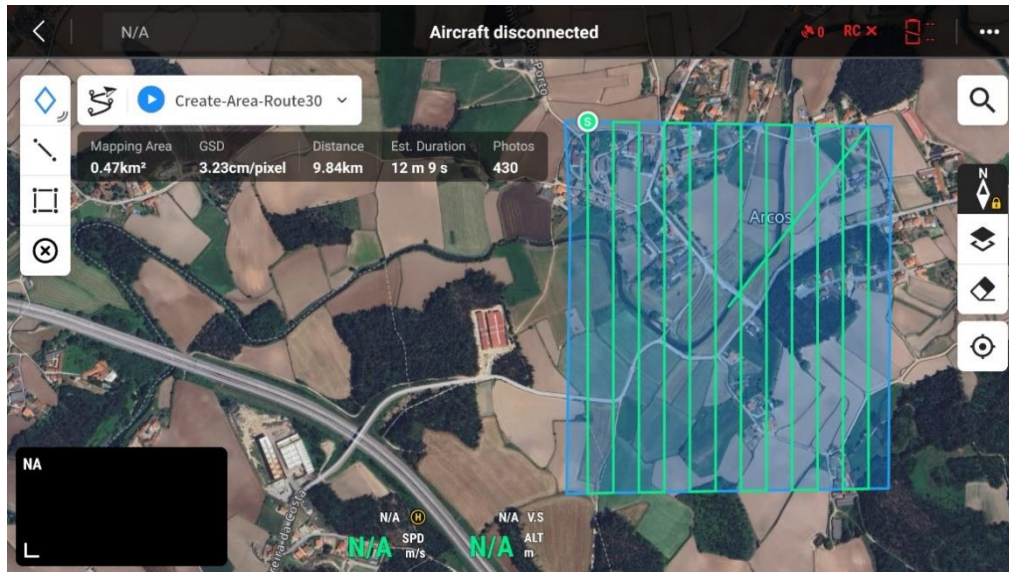


Fig. 10 – Planeamento do voo efetuado em Arcos na aplicação DJI Pilot 2.

Posteriormente, levantaram-se alguns pontos do terreno com o recetor. No total, foram levantados 8 pontos.

Como exemplo dos trabalhos de campo, encontram-se representadas, na figura 11, duas fotografias, uma do levantamento com drone e outra do levantamento dos pontos efetuados em Arcos.



Fig. 11 – Fotografias do levantamento com drone e do levantamento dos pontos efetuados em Arcos.

Tendo terminado o trabalho de campo relativo a esta zona, importaram-se as fotografias para o *Agisoft Metashape* e gerou-se a nuvem de pontos a partir das mesmas. Posto isto, foi gerado um MDS e um Ortomosaico, estando estes dois modelos representados na figura 12.

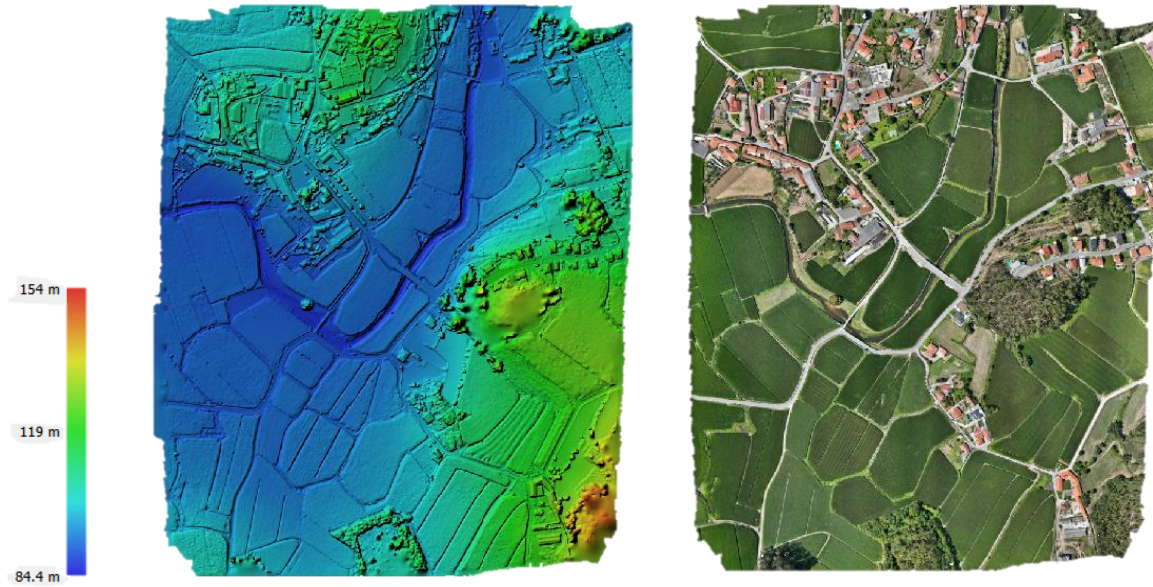


Fig. 12 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no *Agisoft Metashape*, relativos ao levantamento com drone efetuado na região de Arcos.

Posteriormente, criou-se outro projeto *Agisoft Metashape* e importou-se a nuvem de pontos do projeto LiDAR correspondente à zona de Arcos. De seguida, gerou-se um MDS a partir da mesma. O modelo obtido encontra-se representado na figura 13, juntamente com a respetiva escala de cores.

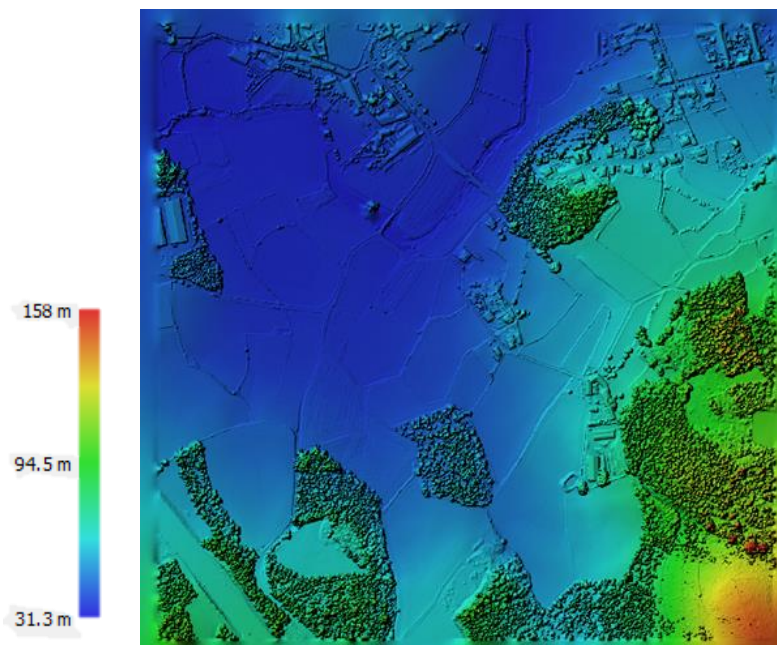


Fig. 13 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona de Arcos e respetiva escala de cores.

3.2.1.1. Validação Altimétrica

O próximo passo, foi a avaliação em termos altimétricos da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional da região de Arcos. Para tal, efetuou-se uma comparação entre o MDS do drone e o MDS gerado a partir desta nuvem.

Assim sendo, começou-se por importar para o QGIS estes dois MDS. Para além disso, importaram-se, também, os 8 pontos levantados no campo. Estes pontos encontravam-se bem espalhados pela área abrangida por ambos os MDS. Na figura 14, encontram-se representados os pontos sobrepostos ao MDS do drone.

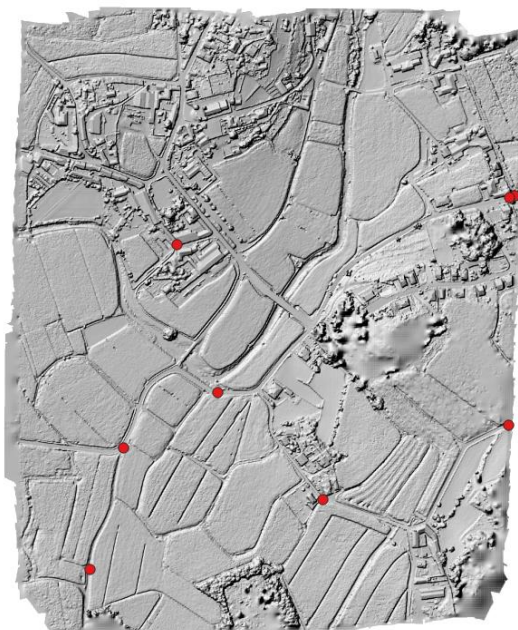


Fig. 14 – Pontos levantados no campo sobrepostos ao MDS gerado a partir do drone, para a região de Arcos.

Posteriormente, de forma análoga ao que se fez para os dados do ICNF, utilizou-se o *plugin Point Sampling Tool* para efetuar a validação altimétrica. O resultado foi uma *shapefile* com 8 pontos, sendo que, a cada ponto, estava associada uma cota extraída a partir do MDS do drone e uma cota extraída a partir do MDS da nuvem de pontos. Como, neste caso, foram levantados pontos no terreno, não foi necessário recorrer ao *plugin QChainage* para criar pontos, ao contrário do que aconteceu na primeira fase do trabalho. Para terminar a parte da validação altimétrica, calculou-se a diferença entre as duas cotas para cada ponto.

3.2.1.2. Validação Planimétrica

No que toca à validação em termos planimétricos, utilizou-se a mesma metodologia que se usou para validar as nuvens do ICNF. Deste modo, começou-se por importar para o QGIS o MDS resultante do drone, a nuvem de pontos do projeto LiDAR e, ainda, o MDS

gerado a partir dessa nuvem. Posto isto, criou-se uma *shapefile* de polígonos vazia e adicionou-se à mesma um polígono numa zona de um telhado. Neste caso, repetiu-se este processo mais três vezes, obtendo, no final, quatro *shapefiles*, cada uma contendo um polígono. Tal como se fez para os dados do ICNF, todos os vértices dos polígonos foram colocados nas bordas dos telhados e os quatro polígonos foram bem espalhados pela área abrangida pelos MDS. No entanto, como neste caso a nuvem não possuía cor (RGB), as bordas dos telhados não se conseguiam distinguir na nuvem de pontos com triangulação e, portanto, os polígonos foram desenhados sobre o MDS gerado a partir da mesma. Na figura 15, encontram-se representados dois dos quatro polígonos desenhados.

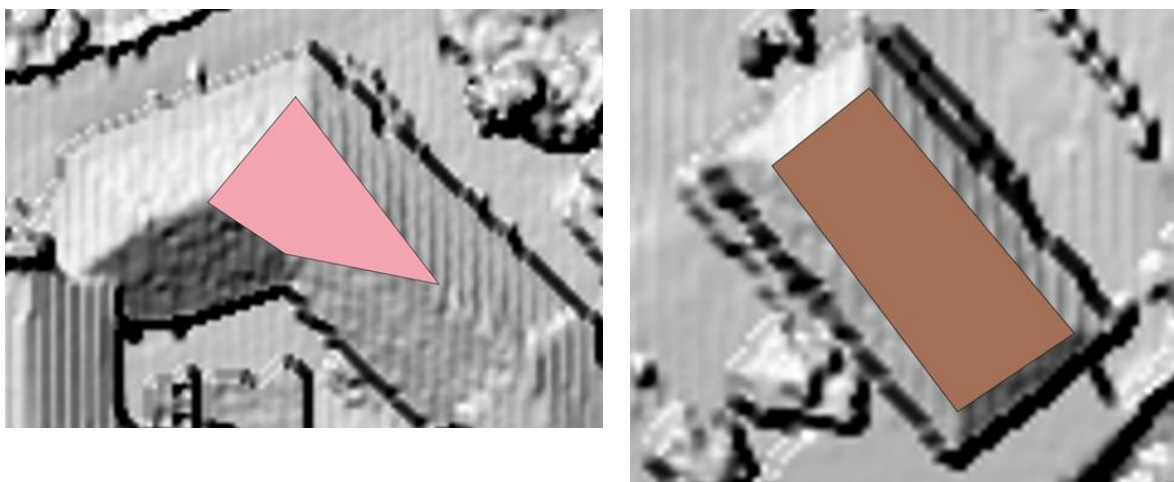


Fig. 15 – Exemplo de dois dos quatro polígonos desenhados em zonas de telhados sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos da região de Arcos do projeto LiDAR nacional.

De seguida, mais uma vez utilizou-se a ferramenta *lasclip* do *Lastools* para extrair os pontos da nuvem contidos em cada polígono. Assim sendo, para cada polígono foi guardado um ficheiro de texto com as coordenadas XYZ de cada um destes pontos. Por fim, para cada polígono, determinou-se a translação que era necessário aplicar à nuvem de pontos do projeto para que esta se encaixasse no MDS do drone.

3.2.2. Baltar

Tal como se fez para Arcos, também em Baltar se começou por efetuar um levantamento com o drone, tendo sido feitas 266 fotografias. Na figura 16, encontra-se representada a cobertura deste voo.

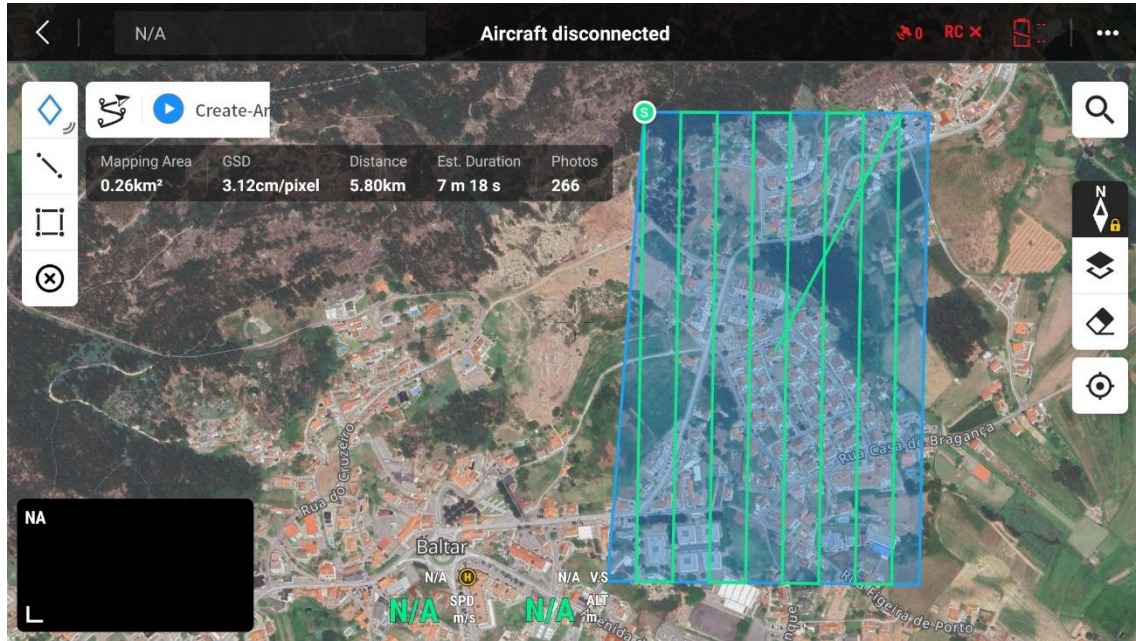


Fig. 16 – Planeamento do voo efetuado em Baltar na aplicação DJI Pilot 2.

Para além disso, também se levantaram alguns pontos do terreno, tendo sido levantados, no total, 17 pontos.

Em gabinete, foram repetidos os passos efetuados para Arcos, tendo-se gerado, no *Agisoft Metashape*, um MDS e um Ortomosaico, a partir das fotografias do drone. Estes dois modelos encontram-se representados na figura 17.

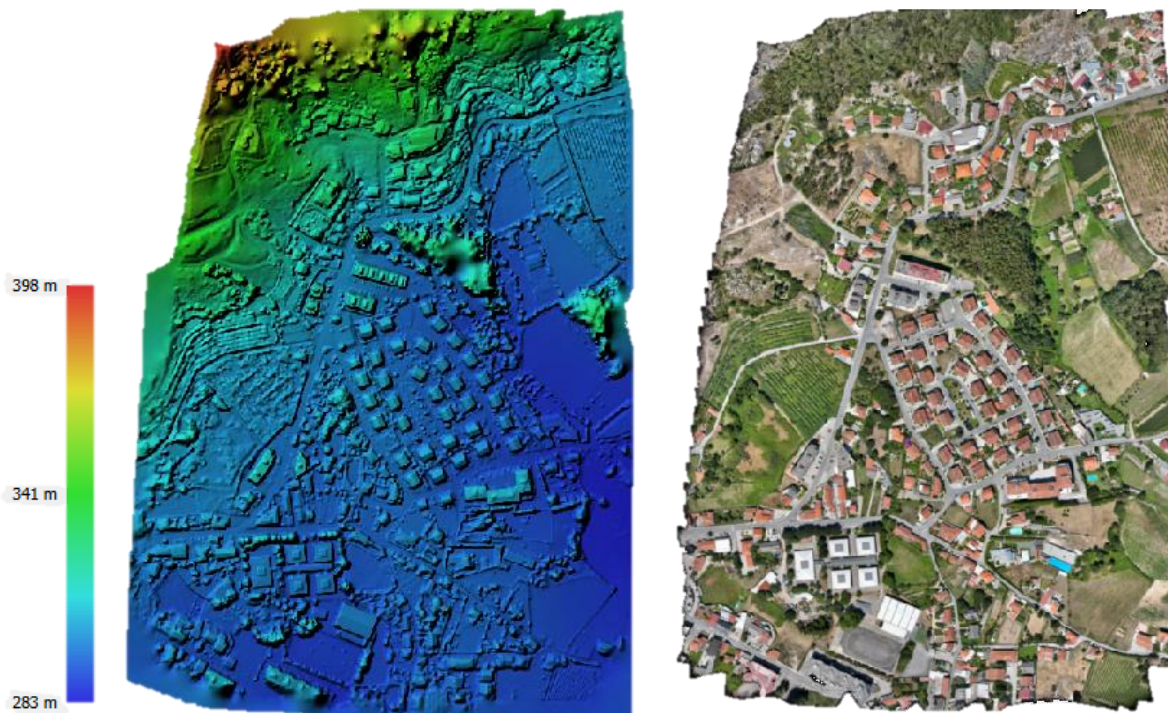


Fig. 17 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no *Agisoft Metashape*, relativos ao levantamento com drone efetuado na região de Baltar.

Posto isto, de forma análoga ao que se fez para Arcos, criou-se outro projeto *Agisoft Metashape* e importou-se a nuvem de pontos do projeto LiDAR correspondente à zona de Baltar. De seguida, gerou-se um MDS a partir da mesma. O modelo obtido encontra-se representado na figura 18, juntamente com a respetiva escala de cores.

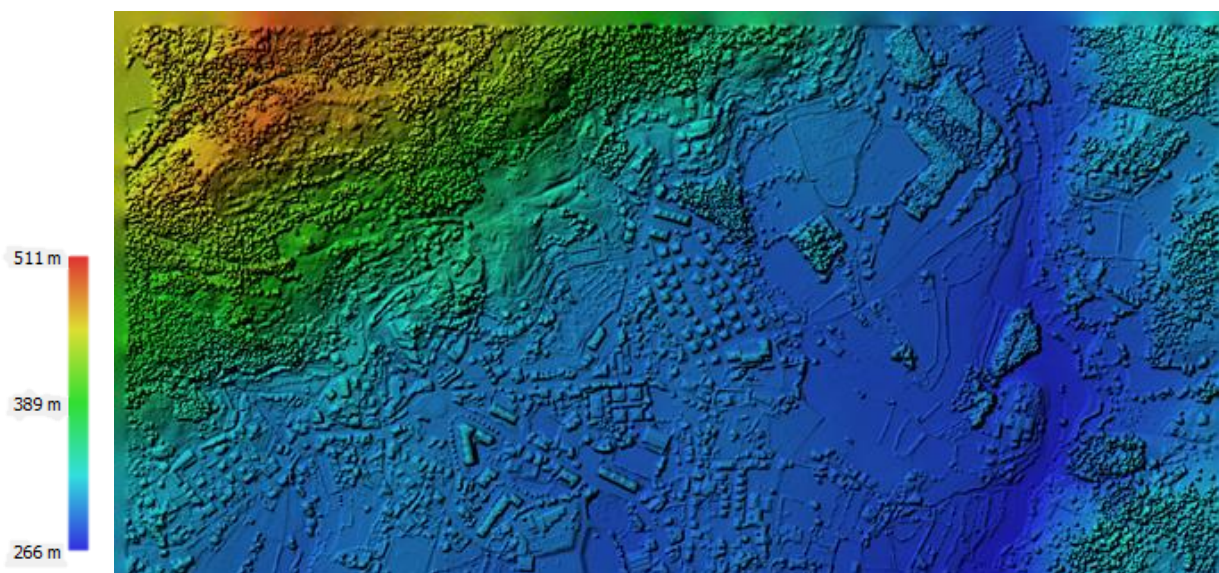


Fig.18 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona de Baltar e respetiva escala de cores.

3.2.2.1. Validação Altimétrica

No que diz respeito à avaliação em termos altimétricos, efetuou-se, tal como para as zonas anteriores, uma comparação entre o MDS do drone e o MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR, mas, desta vez, para a zona de Baltar.

Assim sendo, importaram-se para o QGIS estes dois MDS e os pontos levantados no campo. Na figura 19, encontram-se representados os pontos sobrepostos ao MDS do drone.

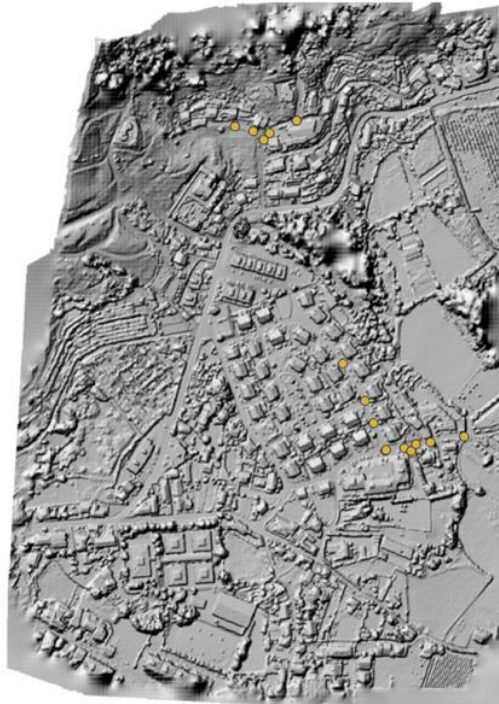


Fig. 19 – Pontos levantados no campo sobrepostos ao MDS gerado a partir do drone, para a região de Baltar.

Posto isto, repetiram-se as etapas efetuadas para Arcos, utilizando-se o *plugin Point Sampling Tool* para efetuar a validação altimétrica. O resultado foi, novamente, uma *shapefile*, desta vez com 17 pontos, estando associada, a cada ponto, uma cota extraída a partir do MDS do drone e uma cota extraída a partir do MDS da nuvem de pontos. Por fim, calculou-se, uma vez mais, a diferença entre estas duas cotas para cada um dos pontos.

3.2.2.2. Validação Planimétrica

Relativamente à validação em termos planimétricos, repetiu-se a metodologia usada para Arcos e para os dados do ICNF. Tal como para Arcos, foram criadas quatro *shapefiles*, cada uma contendo um polígono, sendo que cada polígono foi desenhado sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos. Na figura 20, encontram-se representados dois dos quatro polígonos desenhados.

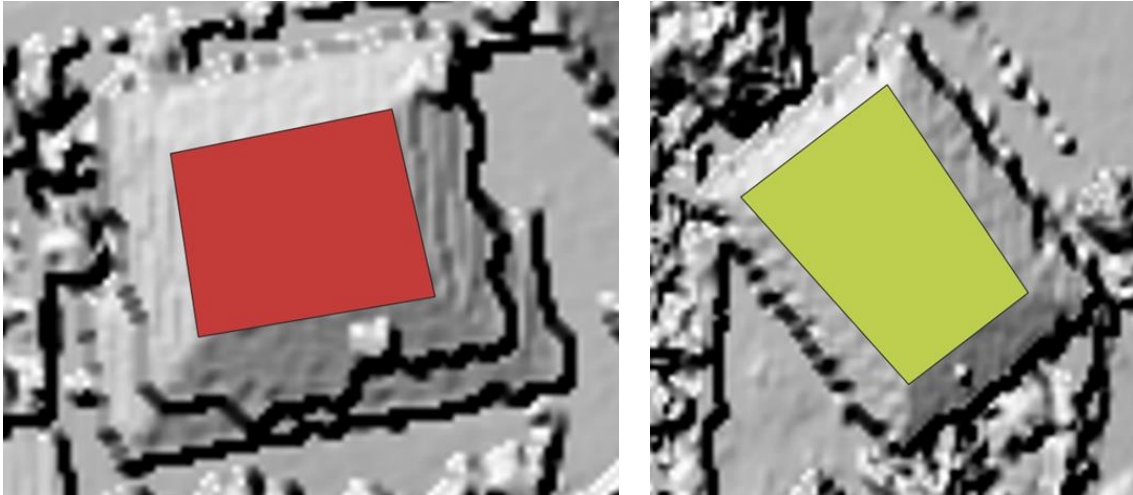


Fig. 20 – Exemplo de dois dos quatro polígonos desenhados em zonas de telhados sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos da região de Baltar do projeto LiDAR nacional.

Para terminar, para cada polígono, determinou-se, novamente, a translação que era necessário aplicar à nuvem de pontos do projeto para que esta se encaixasse no MDS do drone.

3.2.3. Valpedre

Tal como se fez para Arcos e Baltar, também em Valpedre se começou por efetuar um levantamento com o drone, tendo sido tiradas 175 fotografias. Na figura 21, encontra-se representada a cobertura deste voo.



Fig. 21 – Planeamento do voo efetuado em Valpedre na aplicação DJI Pilot 2.

Além disso, também se levantaram alguns pontos do terreno, tendo sido levantados, no total, 21 pontos.

Findo o trabalho de campo, foram repetidos os passos efetuados para as duas zonas anteriores, tendo-se gerado, no *Agisoft Metashape*, um MDS e um Ortomosaico, a partir das fotografias do drone. Estes dois modelos estão representados na figura 22.

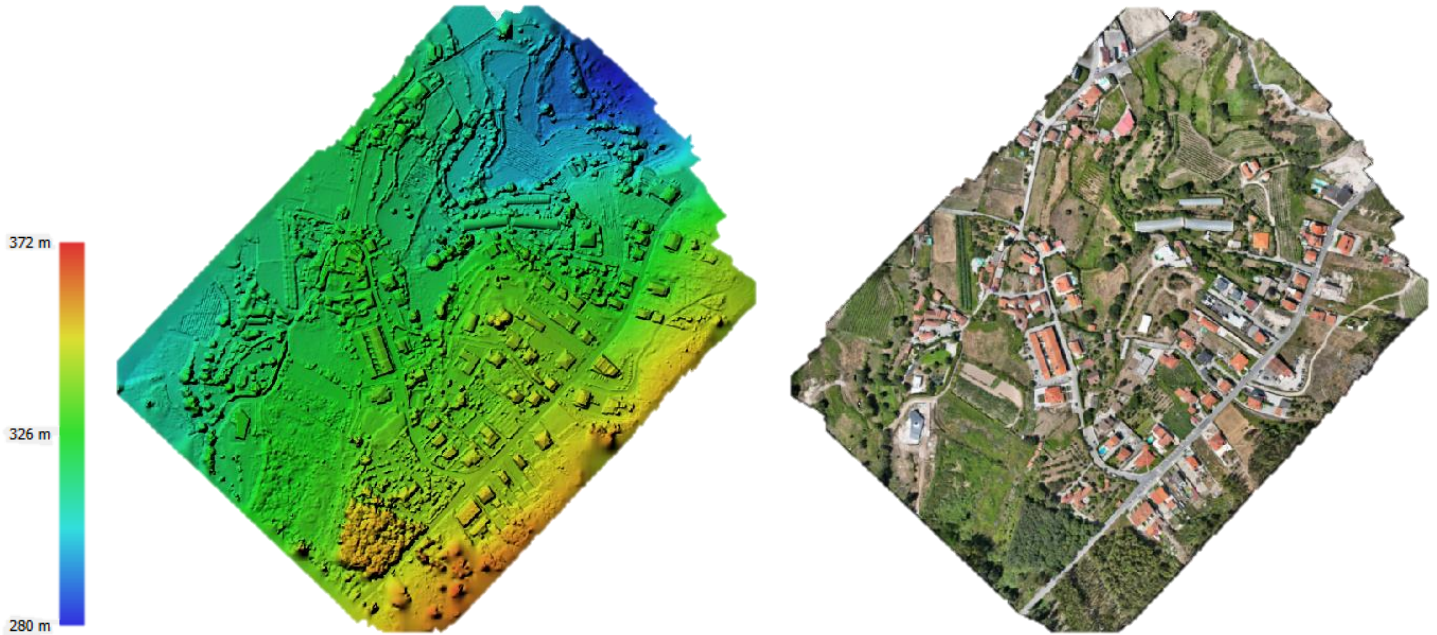


Fig. 22 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no *Agisoft Metashape*, relativos ao levantamento com drone efetuado na região de Valpedre.

Subsequentemente, de forma análoga ao que se fez anteriormente, criou-se outro projeto *Agisoft Metashape* e importou-se a nuvem de pontos do projeto LiDAR correspondente à zona de Valpedre. De seguida, gerou-se um MDS a partir da mesma. O modelo obtido encontra-se representado na figura 23, juntamente com a respetiva escala de cores.

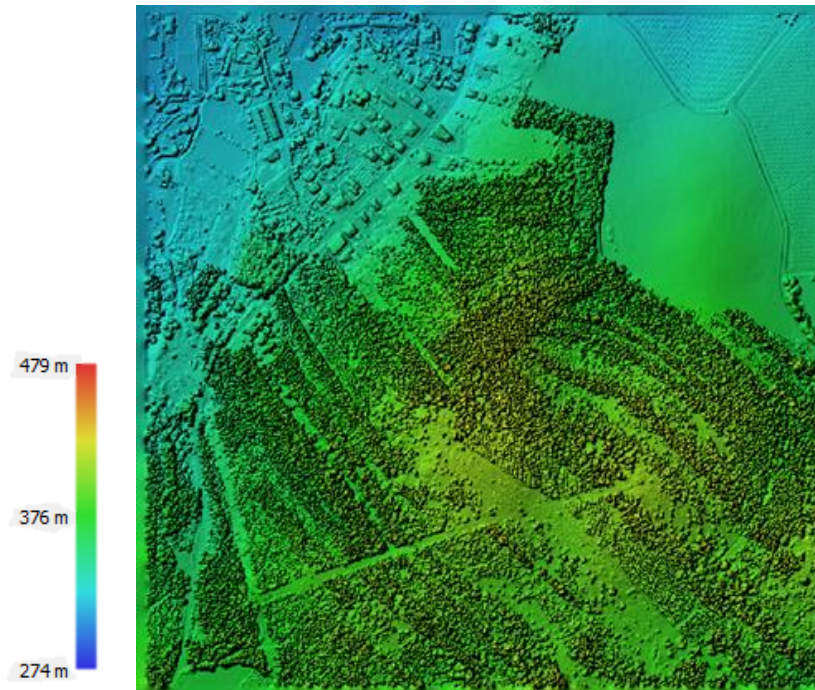


Fig. 23 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona de Valpedre e respetiva escala de cores.

3.2.3.1. Validação Altimétrica

No que toca à avaliação em termos altimétricos, efetuou-se, tal como anteriormente, uma comparação entre o MDS do drone e o MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR.

Assim sendo, importaram-se para o QGIS estes dois MDS e os pontos levantados no campo. Na figura 24, encontram-se representados os pontos sobrepostos ao MDS do drone.

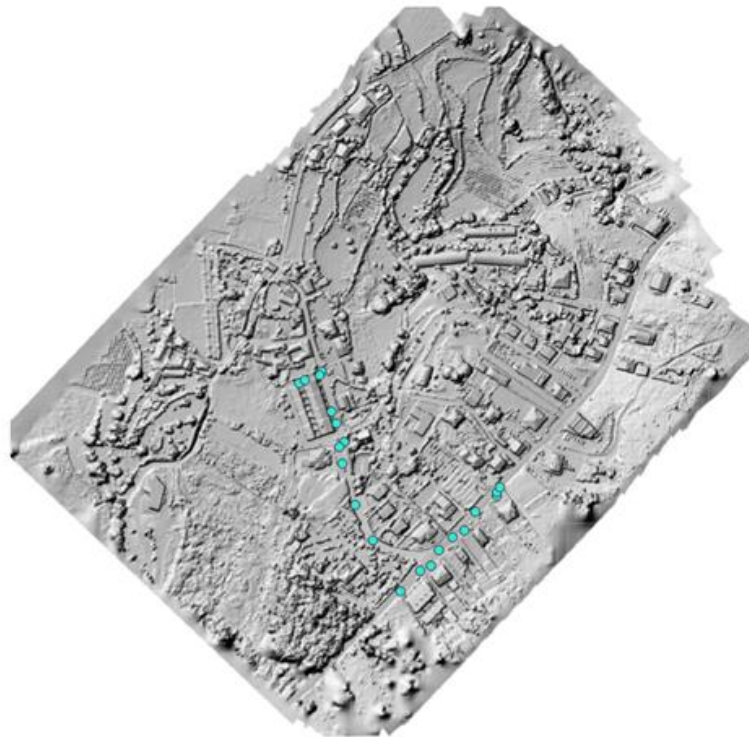


Fig. 24 – Pontos levantados no campo sobrepostos ao MDS gerado a partir do drone, para a região de Valpedre.

Posto isto, repetiram-se as etapas efetuadas para Arcos e Baltar, utilizando-se o *plugin Point Sampling Tool* para efetuar a validação altimétrica. O resultado foi, novamente, uma *shapefile*, desta vez com 21 pontos, estando associada, a cada ponto, uma cota extraída a partir do MDS do drone e uma cota extraída a partir do MDS da nuvem de pontos. Por fim, calculou-se, uma vez mais, a diferença entre estas duas cotas para cada um dos pontos.

3.2.3.2. Validação Planimétrica

No que diz respeito à validação em termos planimétricos, repetiu-se a metodologia usada para as regiões anteriores. Tal como para Arcos e Baltar, foram criadas quatro *shapefiles*, cada uma contendo um polígono, sendo que cada polígono foi desenhado sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos. Na figura 25, encontram-se representados dois dos quatro polígonos desenhados.

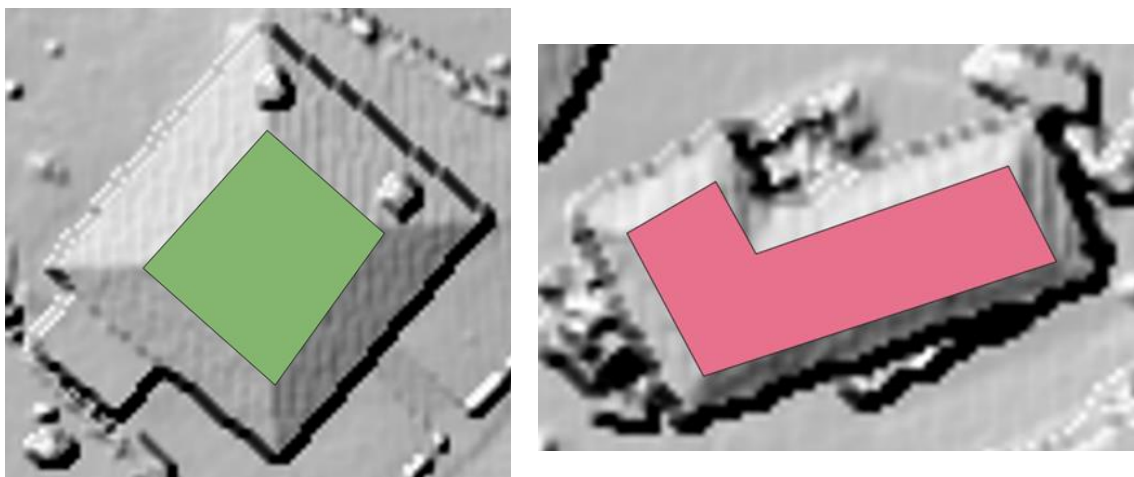


Fig. 25 – Exemplo de dois dos quatro polígonos desenhados em zonas de telhados sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos da região de Valpedre do projeto LiDAR nacional.

Para finalizar, determinou-se, uma vez mais, a translação que era necessário aplicar à nuvem de pontos do projeto para que esta se encaixasse no MDS do drone.

3.2.4. Foz do Douro

No caso da Foz do Douro, levantaram-se apenas alguns pontos, não se tendo efetuado nenhum levantamento com drone, visto que esta é uma zona com algumas restrições por ter sempre bastante gente. Para esta zona, foram levantados 27 pontos.

De seguida, tal como foi feito anteriormente, criou-se um projeto *Agisoft Metashape* e importou-se a nuvem de pontos do projeto LiDAR correspondente a esta zona. Posto isto, gerou-se um MDS a partir da mesma. O modelo obtido encontra-se representado na figura 26, juntamente com a respetiva escala de cores.

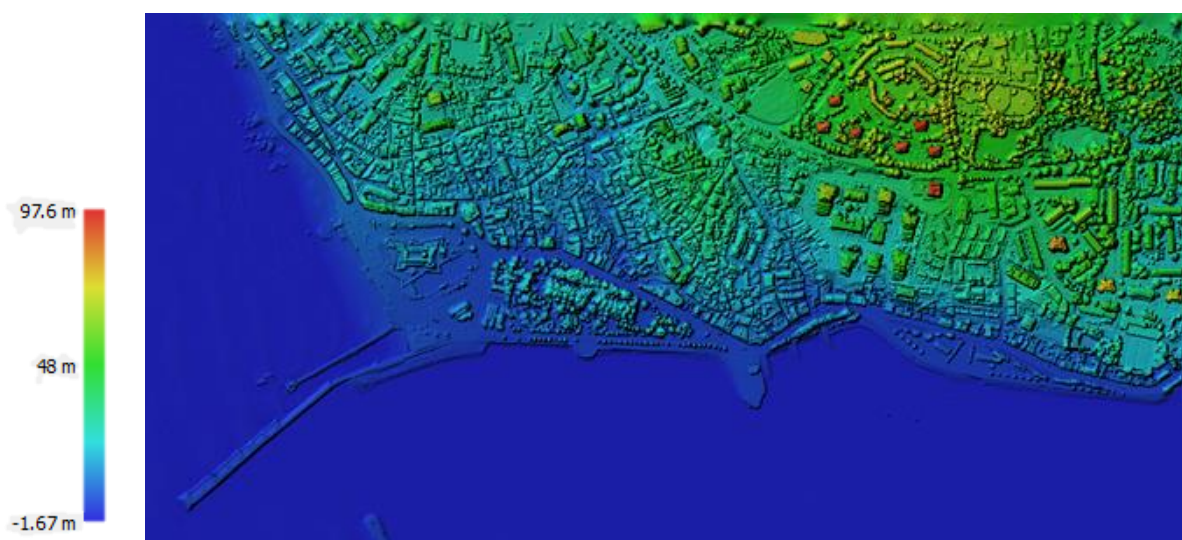


Fig. 26 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona da Foz do Douro e respetiva escala de cores.

Neste caso, como não foi efetuado nenhum levantamento com drone, não foi gerado o MDS, nem o ortomosaico a partir das fotografias do mesmo. Não tendo o MDS do drone, apenas foi possível fazer a validação na vertente altimétrica.

3.2.4.1. Validação Altimétrica

Relativamente à avaliação em termos altimétricos, efetuou-se uma comparação entre as cotas dos pontos levantados no campo e o MDS gerado a partir da nuvem de pontos.

Deste modo, começou-se por importar tanto o MDS, como os pontos para o QGIS. Na figura 27, encontram-se representadas estas duas camadas sobrepostas.

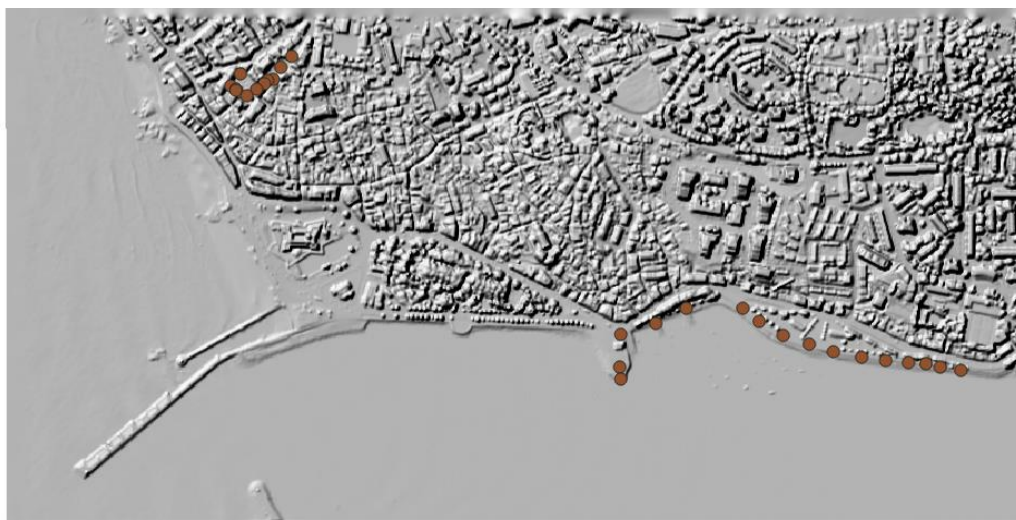


Fig. 27 – Pontos levantados no campo sobrepostos ao MDS gerado a partir da nuvem de pontos, para a região da Foz do Douro.

Posteriormente, repetiram-se as etapas efetuadas para as restantes regiões, utilizando-se o *plugin Point Sampling Tool* para efetuar a validação altimétrica. No entanto, desta vez, o resultado foi uma shapefile com 27 pontos, estando associada, a cada ponto, uma cota extraída a partir do MDS da nuvem de pontos e a cota do próprio ponto. Por fim, calculou-se, novamente, a diferença entre estas duas cotas para cada um dos pontos.

3.3. Terceira fase – Validação do segundo conjunto de nuvens de pontos do projeto LiDAR nacional

Na terceira e última fase do trabalho, as metodologias desenvolvidas foram aplicadas a um segundo conjunto de nuvens de pontos do projeto LiDAR nacional. Para tal, selecionaram-se mais duas regiões, tendo-se escolhido duas zonas de Trás-os-Montes, Macedo de Cavaleiros e Algosó. Estes são dois locais afastados dos quatro outros selecionados, o que permitiu que as seis regiões escolhidas estivessem bem

espalhadas pelo lote 1 do projeto, dentro, obviamente, do que a empresa dispunha no momento. De seguida, solicitou-se à empresa as nuvens de pontos correspondentes a estas duas regiões. Como estas nuvens já possuíam classificação, foi possível efetuar uma avaliação nas três vertentes: altimetria, planimetria e qualidade da classificação das nuvens de pontos.

3.3.1. Algosó

Da mesma forma que foi feito nas outras duas fases do trabalho, o primeiro passo foi a elaboração de um levantamento com o drone, tendo sido feitas, neste caso, 652 fotografias. Na figura 28, encontra-se representada a cobertura deste voo.



Fig. 28 – Planeamento do voo efetuado em Algosó na aplicação DJI Pilot 2.

Posto isto, foram levantados 3 pontos do terreno. No caso de Algosó, foram levantados poucos pontos uma vez que não havia muitos locais para efetuar o seu levantamento.

Findo o trabalho de campo, iniciou-se o trabalho de gabinete, tendo-se gerado, no *Agisoft Metashape*, uma nuvem de pontos a partir das fotografias do drone. De seguida, a partir da mesma, foi gerado um MDS e um Ortomosaico, estando estes dois modelos representados na figura 29.

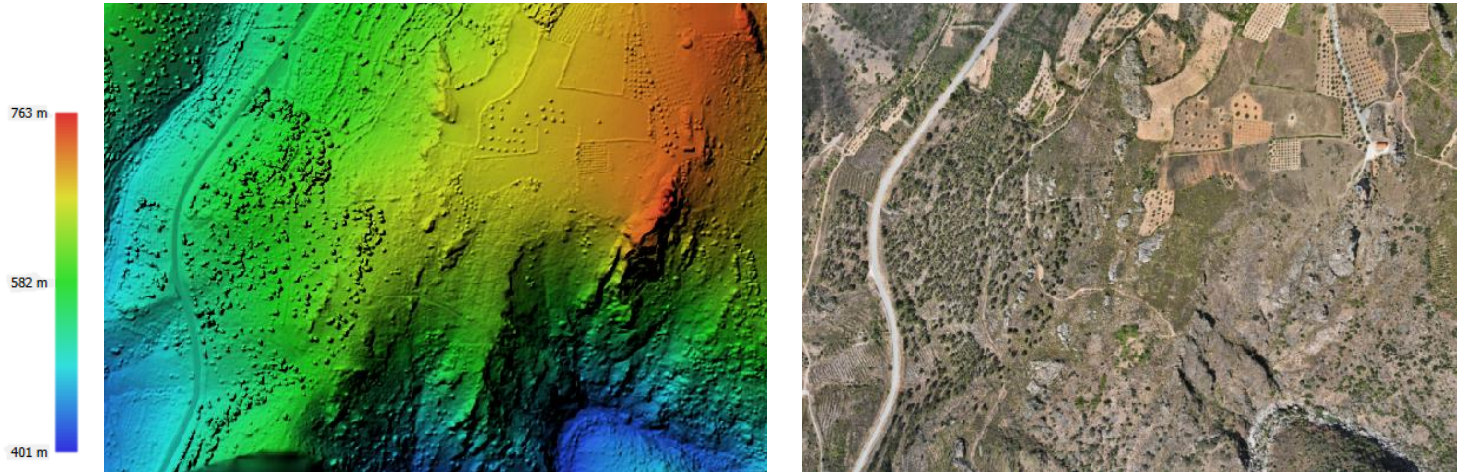


Fig. 29 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no *Agisoft Metashape*, relativos ao levantamento com drone efetuado na região de Algosó.

O próximo passo, foi a criação de outro projeto *Agisoft Metashape* e a importação da nuvem de pontos do projeto LiDAR correspondente à zona de Algosó. Posteriormente, gerou-se um MDS a partir da mesma. O modelo obtido encontra-se representado na figura 30, juntamente com a respetiva escala de cores.

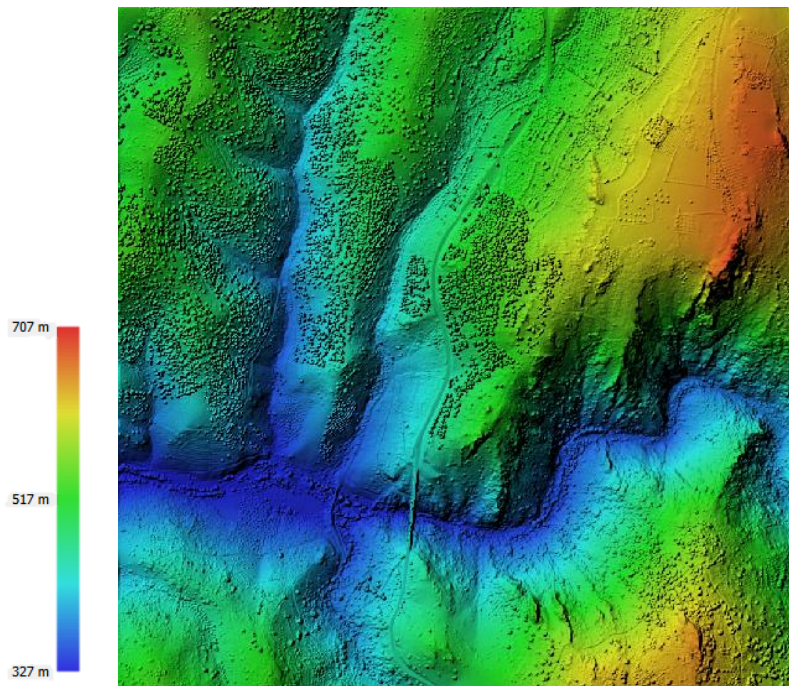


Fig. 30 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona de Algosó e respetiva escala de cores.

3.3.1.1. Validação Altimétrica

Relativamente à validação altimétrica, efetuou-se, uma vez mais, uma comparação entre o MDS do drone e o MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR.

Assim sendo, importaram-se para o QGIS estes dois MDS e os pontos levantados no campo. Como apenas foram levantados 3 pontos e estes se encontravam muito juntos, exportaram-se os mesmos para uma *shapefile* e, de seguida, acrescentaram-se a esta 5 outros pontos, mais bem distribuídos pela área abrangida por ambos os MDS. Na figura 31, encontram-se representados estes pontos sobrepostos ao MDS do drone.

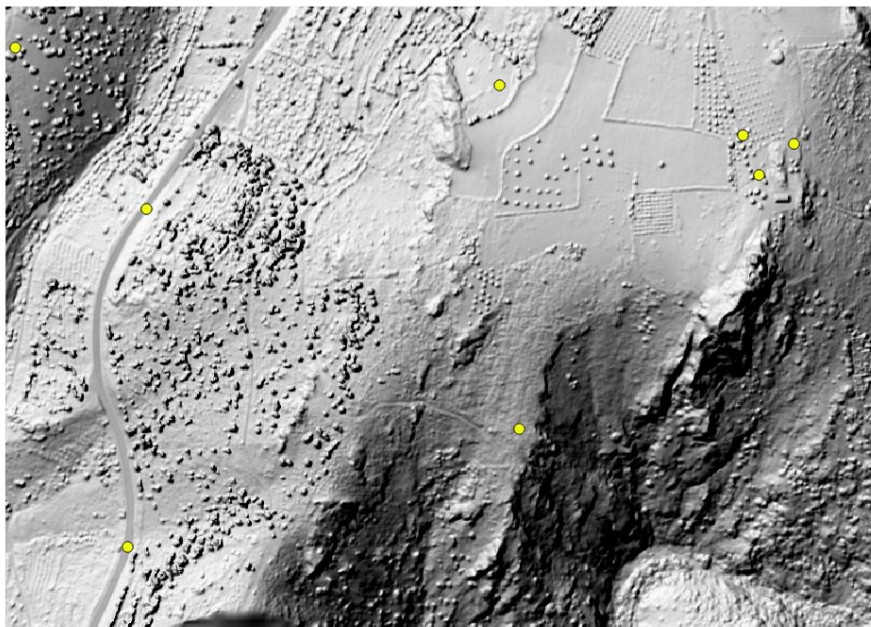


Fig. 31 – Pontos sobrepostos ao MDS gerado a partir do drone, para a região de Algosó. Os três pontos localizados mais à direita são os pontos levantados no campo e os restantes são os pontos que foram acrescentados.

Subsequentemente, recorreu-se, novamente, ao *plugin Point Sampling Tool* para efetuar a validação altimétrica. O resultado foi uma *shapefile* com 8 pontos, estando associada, a cada ponto, uma cota extraída a partir do MDS do drone e uma cota extraída a partir do MDS da nuvem de pontos. Finalmente, calculou-se, uma vez mais, a diferença entre estas duas cotas para cada um dos pontos.

3.3.1.2. Validação Planimétrica

No que toca à planimetria, criou-se, novamente, quatro *shapefiles*, cada uma com um polígono. Tal como as nuvens de pontos do ICNF, esta nuvem também já possuía cor (RGB) e, como tal, foi possível desenhar os polígonos sobre a nuvem com triangulação, como foi feito na primeira fase do trabalho. De referir que a zona de Algosó abrangida pelos MDS é uma zona com muita vegetação e campos agrícolas e com muito poucas casas. Assim sendo, não foi possível desenhar todos os polígonos em telhados indicados, isto é, telhados bem distribuídos pela região abrangida e com declives em 3 ou mais direções. Na figura 32, encontram-se representados dois dos quatro polígonos desenhados.

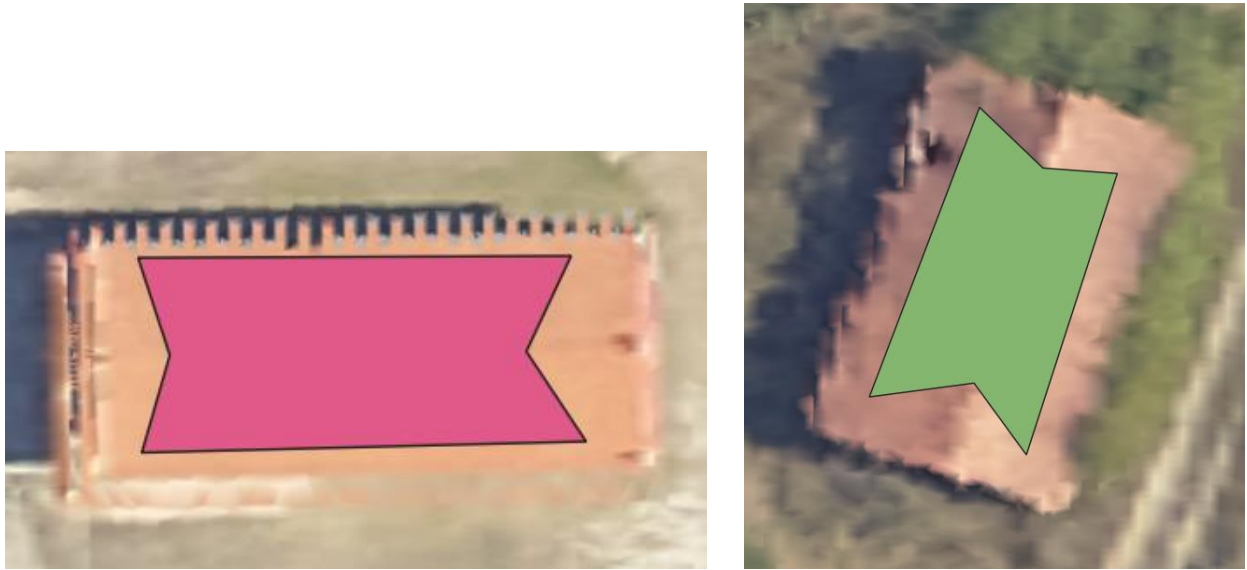


Fig. 32 – Exemplo de dois dos quatro polígonos desenhados em zonas de telhados sobre a nuvem de pontos da região de Algosó do projeto LiDAR nacional.

Para terminar, determinou-se a translação que era necessário aplicar à nuvem de pontos do projeto para que esta se encaixasse no MDS do drone.

3.3.1.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos

Para terminar a parte do trabalho que diz respeito a Algosó, fez-se uma avaliação da classificação da nuvem de pontos. De forma análoga ao que foi feito na primeira fase do trabalho, recorreu-se a algumas funcionalidades do QGIS, como o *Elevation Profile* e o aumento do tamanho dos pontos pertencentes a algumas classes. Para além disso, recorreu-se, novamente, ao Google Earth Pro e utilizou-se, uma vez mais, o ortomosaico do drone como base, para verificar a existência ou não de erros de classificação.

3.3.2. Macedo de Cavaleiros

Tal como se fez para Algosó, também em Macedo de Cavaleiros se começou por efetuar um levantamento com o drone, tendo sido tiradas 364 fotografias. Na figura 33, encontra-se representada a cobertura deste voo.

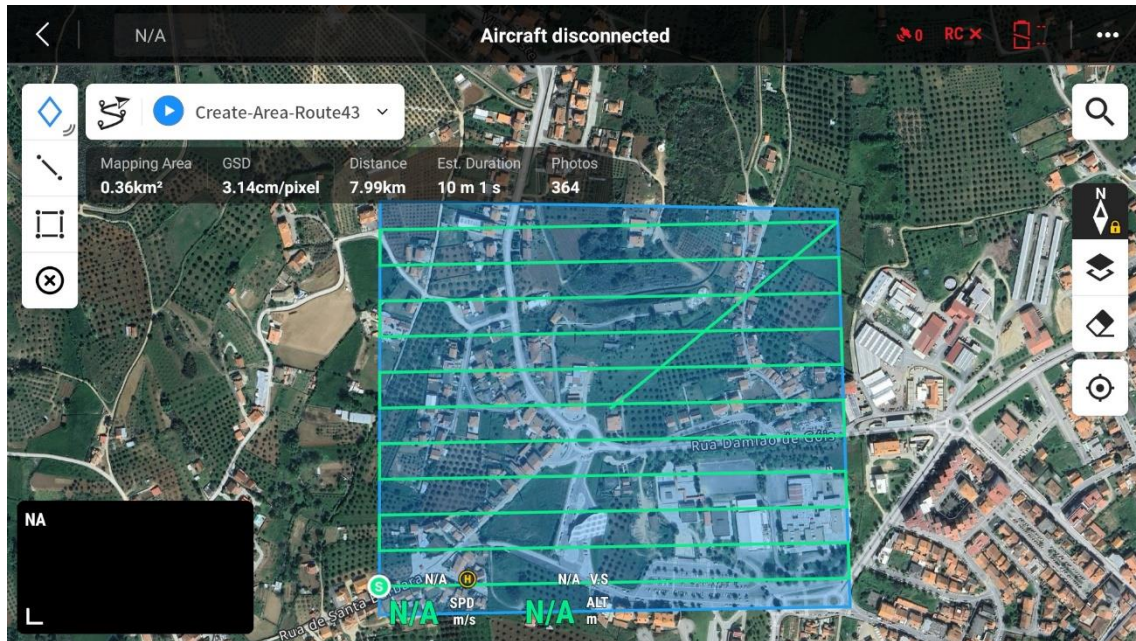


Fig. 33 – Planeamento do voo efetuado em Macedo de Cavaleiros na aplicação DJI Pilot 2.

Posteriormente, foram levantados 8 pontos do terreno, estando estes bem espalhados pela zona abrangida pelo levantamento efetuado com o drone.

Em gabinete, foram repetidos os passos efetuados para as restantes regiões, tendo-se gerado, no *Agisoft Metashape*, uma nuvem de pontos a partir das fotografias do drone. Posto isto, a partir da mesma, foi gerado um MDS e um Ortomosaico, estando estes dois modelos representados na figura 34.

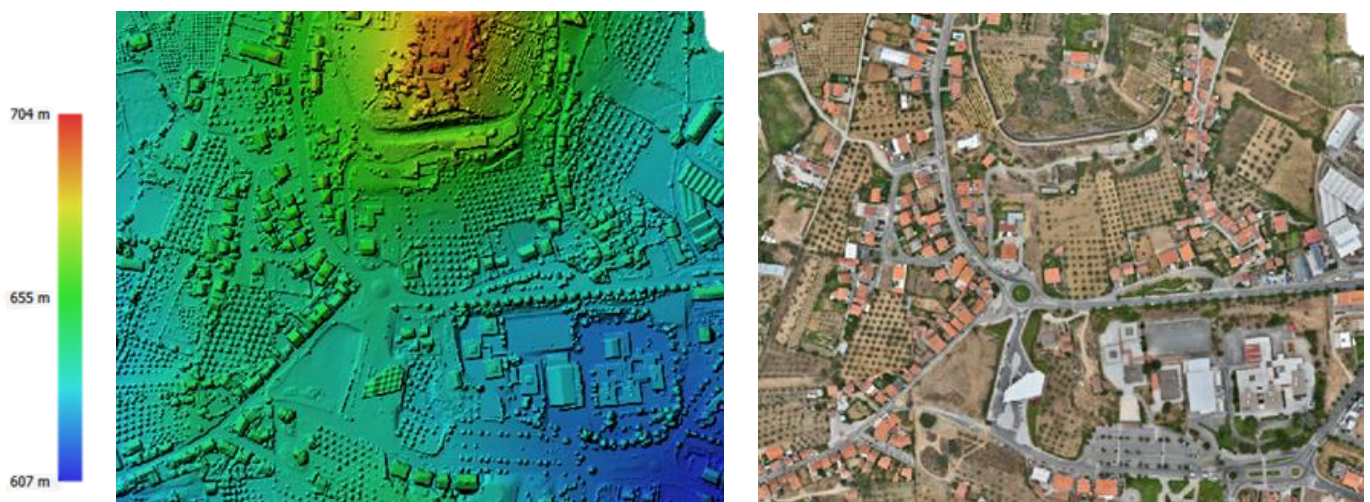


Fig. 34 – MDS e respetiva escala de cores (imagem da esquerda) e Ortomosaico (imagem da direita) gerados no *Agisoft Metashape*, relativos ao levantamento com drone efetuado na região de Macedo de Cavaleiros.

Subsequentemente, de forma análoga ao que se fez anteriormente, criou-se outro projeto *Agisoft Metashape* e importou-se a nuvem de pontos do projeto LiDAR correspondente à zona de Macedo de Cavaleiros. De seguida, gerou-se um MDS a partir

da mesma. O modelo obtido encontra-se representado na figura 35, juntamente com a respetiva escala de cores.

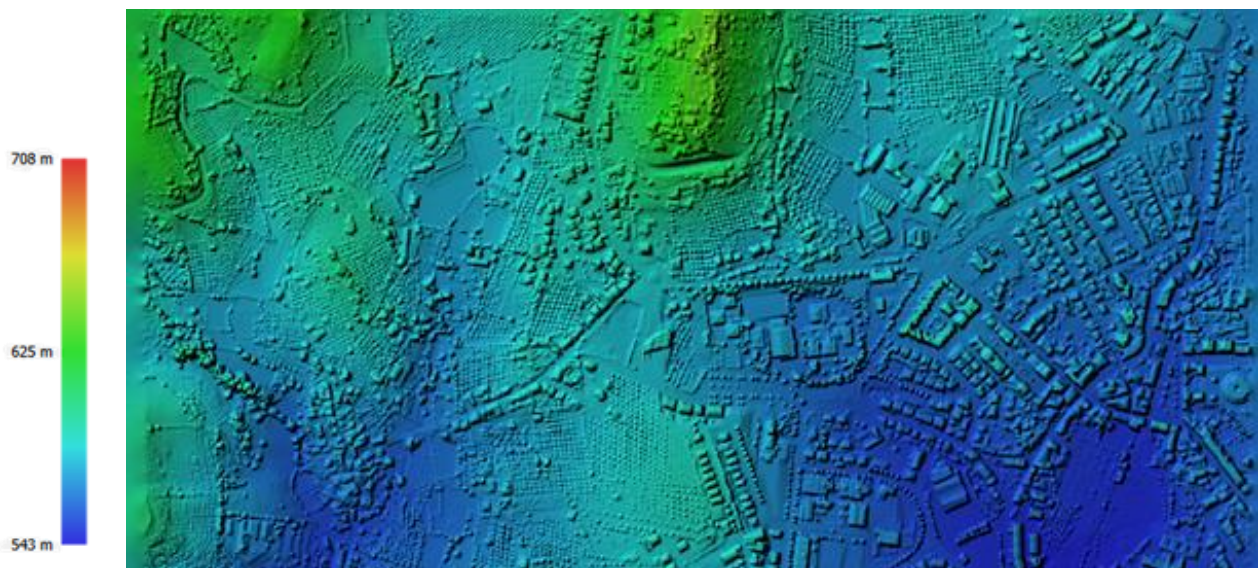


Fig. 35 – MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR nacional relativa à zona de Macedo de Cavaleiros e respetiva escala de cores.

3.3.2.1. Validação Altimétrica

Em termos de validação altimétrica, efetuou-se, tal como para Algosó e para as restantes zonas, uma comparação entre o MDS do drone e o MDS gerado a partir da nuvem de pontos do projeto LiDAR.

Assim sendo, importaram-se para o QGIS estes dois MDS e os pontos levantados no campo. Na figura 36, encontram-se representados os pontos sobrepostos ao MDS do drone.

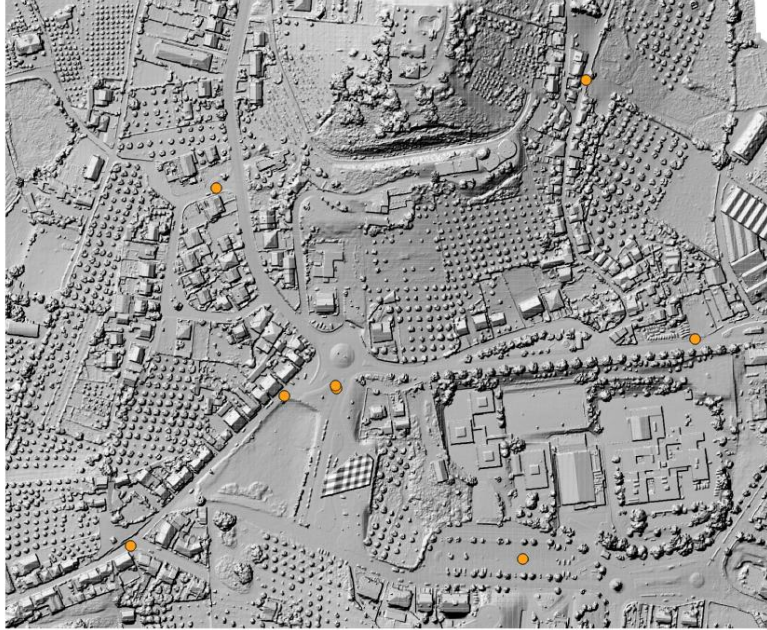


Fig. 36 – Pontos levantados no campo sobrepostos ao MDS gerado a partir do drone, para a região de Macedo de Cavaleiros.

Posteriormente, utilizou-se, novamente, o *plugin Point Sampling Tool* para efetuar a validação altimétrica. O resultado foi uma *shapefile* com 8 pontos, estando associada, a cada ponto, uma cota extraída a partir do MDS do drone e uma cota extraída a partir do MDS da nuvem de pontos. Para terminar, calculou-se, uma vez mais, a diferença entre estas duas cotas para cada um dos pontos.

3.3.2.2. Validação Planimétrica

Em termos planimétricos, repetiu-se a metodologia usada anteriormente, criando-se quatro *shapefiles*, cada uma com um polígono, sendo que cada polígono foi desenhado sobre a nuvem de pontos com triangulação. Na figura 37, encontram-se representados dois dos quatro polígonos desenhados.

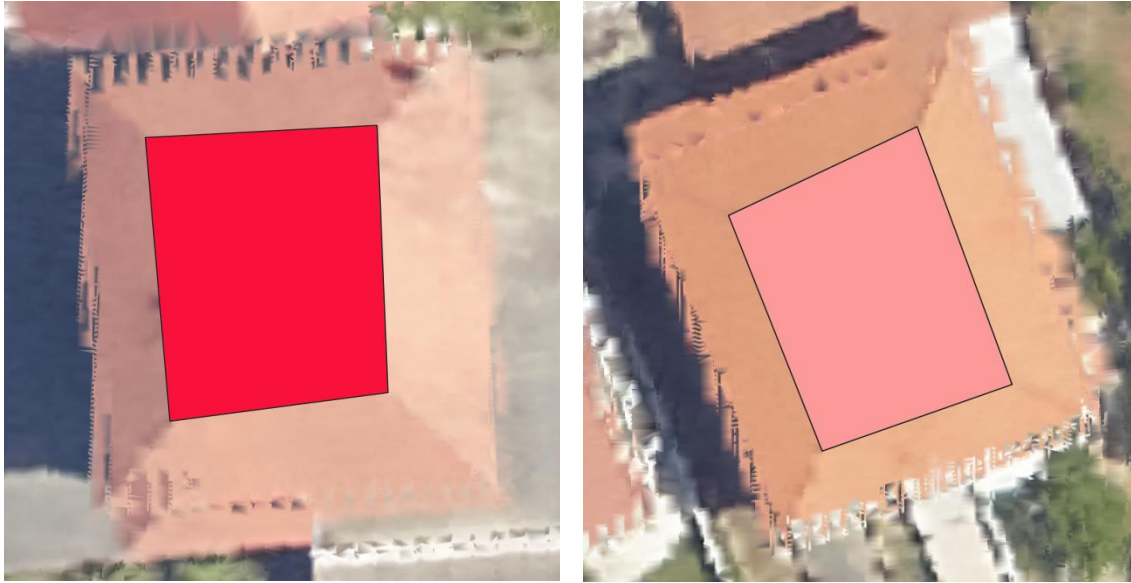


Fig. 37 – Exemplo de dois dos quatro polígonos desenhados em zonas de telhados sobre a nuvem de pontos da região de Macedo de Cavaleiros do projeto LiDAR nacional.

De seguida, determinou-se, novamente, a translação que era necessário aplicar à nuvem de pontos do projeto para que esta se encaixasse no MDS do drone.

3.3.2.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos

No que toca à classificação da nuvem de pontos, recorreu-se às mesmas metodologias utilizadas para as nuvens de pontos de Algos e do ICNF, de modo a encontrar pontos mal classificados e zonas que precisassem de ser revistas e corrigidas.

4. Resultados

Tendo realizado a avaliação dos produtos das três fases do trabalho nas três vertentes, é possível analisar os resultados obtidos e perceber se todos cumprem os requisitos delineados para o projeto LiDAR nacional.

4.1. Primeira fase – Validação das nuvens de pontos do ICNF

Relativamente à primeira fase do trabalho, foram avaliadas nuvens de pontos do ICNF da região de Vila Pouca de Aguiar nas três vertentes: altimetria, planimetria e qualidade da classificação.

4.1.1. Validação Altimétrica

Como referido na metodologia, o resultado da validação planimétrica das nuvens de pontos do ICNF foi uma *shapefile* com 139 pontos, sendo que, a cada ponto, estava associada uma cota extraída a partir do MDS do drone e uma cota extraída a partir do MDS das nuvens. Assim sendo, recorreu-se ao *Excel* para criar uma tabela com estas cotas e calcular a diferença entre elas para cada ponto. As diferenças calculadas variavam entre os -3,228 m e os 15,880 m. Este foi um resultado expectável, visto que os dados do ICNF foram adquiridos em 2020/2021, ao passo que os dados do drone foram adquiridos este ano. O facto dos dados terem 3/4 anos de diferença fez com que as discrepâncias entre as cotas de alguns pontos fossem elevadas. Isto aconteceu, sobretudo, em locais onde existiam árvores num MDS e as mesmas já não existiam ou tinham tamanho e/ou posição diferentes no outro MDS. Na figura 38, encontra-se representado um dos pontos que apresentou uma discrepância entre cotas bastante elevada devido à diferença de posição de uma árvore em ambos os MDS.

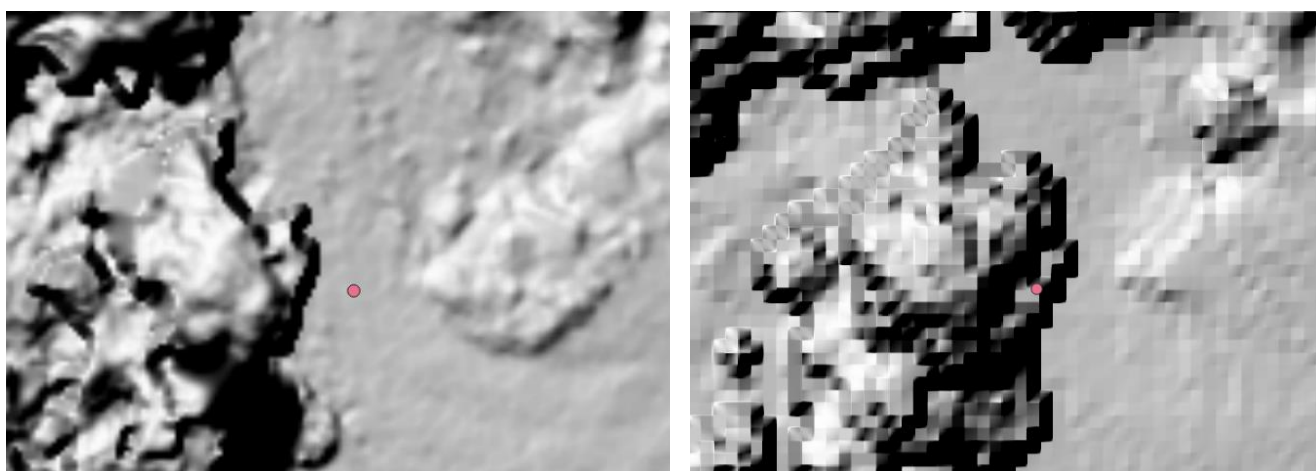


Fig. 38 – Exemplo de um ponto que apresentou uma cota no MDS do drone (imagem da esquerda) e uma cota no MDS do ICNF (imagem da direita) muito discrepantes devido à diferença de posição de uma árvore em ambos os MDS.

O ponto presente na figura 37 apresentou uma cota de 526,769 m no MDS do drone e uma cota de 538,208 m no MDS do ICNF, o que levou a uma diferença entre cotas de 11,439 m.

Para além deste ponto, houve outros que, pelo mesmo motivo, apresentaram diferenças entre cotas um pouco elevadas. Assim sendo, os mesmos não foram tidos em conta nas estatísticas da validação altimétrica das nuvens do ICNF. Nestas estatísticas, foram considerados 122 dos 139 pontos. A tabela 1 encontra-se ordenada pela diferença entre as cotas e mostra, dos 122 pontos que foram avaliados, os 10 que apresentaram maiores diferenças negativas e os 10 que apresentaram maiores diferenças positivas, em metros.

Tabela 1

Pontos que apresentaram maiores diferenças negativas e maiores diferenças positivas, em metros, entre a cota do MDS do ICNF e a cota do MDS do drone.

Ponto	Cota drone (m)	Cota ICNF (m)	Dif cotas (m)
86	519,530	519,360	-0,170
53	559,181	559,040	-0,141
128	553,580	553,440	-0,140
100	506,260	506,140	-0,120
136	563,438	563,320	-0,119
134	558,825	558,709	-0,116
101	509,084	508,970	-0,114
125	550,902	550,800	-0,102
113	527,221	527,120	-0,101
42	562,315	562,220	-0,095
...	...	...	...
19	563,936	564,000	0,065
28	556,306	556,380	0,073
92	511,642	511,720	0,077
15	571,267	571,350	0,083
12	578,405	578,490	0,085
63	537,928	538,020	0,092
14	573,514	573,610	0,096
85	520,394	520,510	0,116
32	552,866	552,990	0,124
13	575,934	576,070	0,136

Pela análise da tabela 1, é perceptível que os 122 pontos avaliados apresentaram diferenças entre as cotas entre os -17 cm e os 13,6 cm e que 110 destes pontos apresentaram diferenças abaixo dos 10 cm, em módulo. Em termos estatísticos, calculou-se a média, o desvio-padrão e o erro médio quadrático (RMS) das diferenças

entre as cotas para os 122 pontos. Na tabela 2, encontram-se representados estes valores.

Tabela 2

Média (μ), desvio-padrão (σ) e RMS das diferenças entre as cotas para os 122 pontos avaliados.

μ (m)	σ (m)	RMS (m)
-0,019	0,057	0,060

Analisando a tabela 2, verifica-se que a média deu um valor muito próximo de zero. Isto é algo expectável uma vez que, se traçássemos uma curva das diferenças, esta curva seguiria, aproximadamente, uma distribuição normal. Relativamente ao desvio-padrão e ao RMS, obtiveram-se valores pequenos para ambos, de 5,7 cm e 6 cm, respetivamente, que são valores aceitáveis, tendo em conta as tolerâncias estipuladas no projeto LiDAR.

Para terminar a validação altimétrica das nuvens de pontos do ICNF, determinou-se a percentagem de pontos que apresentaram diferenças entre $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$. Tendo em conta que a curva das diferenças entre as cotas deveria seguir, de forma aproximada, uma distribuição normal, estas percentagens deveriam ser próximas de 68%, 95% e 99%, respetivamente. Na tabela 3, encontram-se indicados os valores dos três intervalos e o número de pontos e respetiva percentagem que estavam contidos nos mesmos.

Tabela 3

Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos.

Intervalos	Valores (m)		Número de pontos contidos no intervalo	%
$\mu \pm \sigma$	-0,075	0,038	89	72,95
$\mu \pm 2\sigma$	-0,132	0,095	115	94,26
$\mu \pm 3\sigma$	-0,189	0,151	122	100

Tal como seria de esperar, as percentagens de pontos contidos em cada um dos intervalos são próximas das estipuladas numa distribuição normal, não sendo exatamente iguais já que a curva das diferenças entre as cotas não segue, de forma exata, esta distribuição. Caso seguisse, a média teria de ser zero.

4.1.2. Validação Planimétrica

No que toca à validação planimétrica, foram criados 7 polígonos sobre a nuvem de pontos do ICNF com triangulação. Na figura 39, encontram-se representados os dois polígonos mostrados na metodologia na figura 9, mas sobre o MDS do drone.

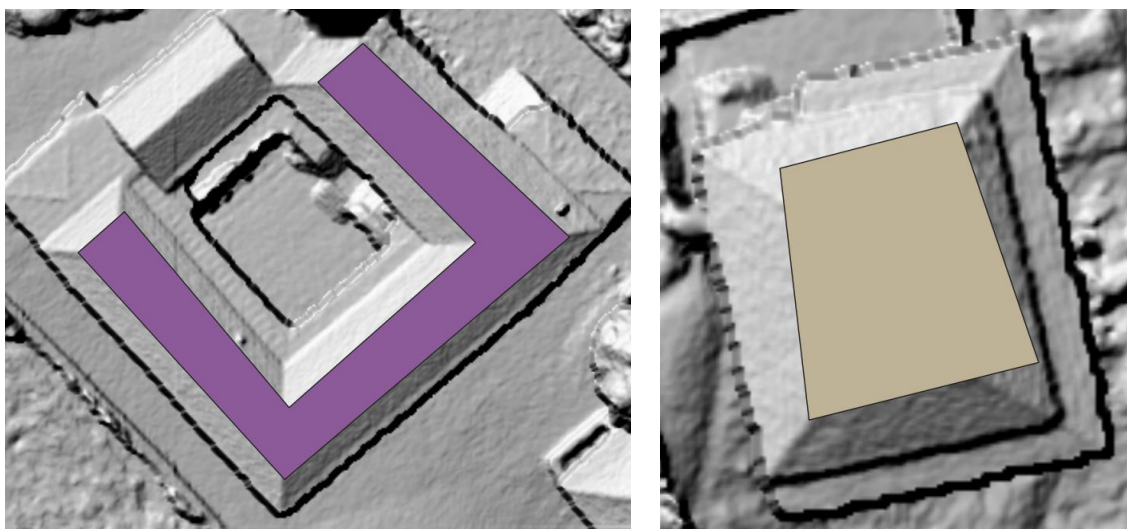


Fig. 39 – Polígonos mostrados na figura 9, mas sobre o MDS do drone.

Em termos visuais, parece que o polígono da imagem da direita está mais longe de encaixar no MDS do drone do que o polígono da imagem da esquerda, necessitando, assim, de um maior ajuste. Porém, será perceptível, de seguida, que isto não é necessariamente verdade. Tal como foi referido na metodologia, de modo a determinar a translação necessária para ajustar a nuvem de pontos do ICNF ao MDS do drone, recorreu-se a uma metodologia desenvolvida por Gonçalves e Morgado (2008) que se traduz através de um programa em linguagem C. Deste modo, o resultado foi uma tabela que contém, para cada polígono, o ajuste necessário em x e em y, em metros. Na tabela 4, encontram-se os resultados obtidos e a média e desvio-padrão calculados para x e y.

Tabela 4

Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre a nuvem de pontos do ICNF, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y.

Polígono	x (m)	y (m)
1	-0,534	-0,672
2	-0,481	-0,656
3	-0,547	-0,712
4	-0,525	-0,666
5	-0,462	-0,606
6	-0,603	-0,634
7	-0,537	-0,634
Média (m)	-0,527	-0,654
Desvio-padrão (m)	0,046	0,034

Pela observação da tabela 4, verifica-se que o polígono que apresentou um menor valor de ajuste em x foi o 5, com um valor de 46,2 cm, em módulo. Por outro lado, o polígono que apresentou maior valor de ajuste em x foi o 6, com um valor de 60,3 cm, em módulo. Já em y, o polígono que apresentou menor valor de ajuste foi o 5, com um valor de 60,6 cm, em módulo, e o polígono que apresentou maior valor de ajuste foi o 3, com um valor

de 71,2 cm, em módulo. De notar que os polígonos presentes nas figuras 9 e 39, são o 2 (imagem da esquerda) e o 4 (imagem da direita), para os quais foram obtidos valores de ajuste próximos tanto em x, como em y, apesar de o polígono 2 ter apresentado valores ligeiramente mais pequenos. No geral, pode afirmar-se que os valores obtidos tanto em x, como em y foram bastante elevados e, tendo em conta que mais de metade dos valores foram superiores a 60 cm, em módulo, conclui-se que, neste caso, as tolerâncias estipuladas para o projeto não foram cumpridas.

No que diz respeito à média, obtiveram-se valores também elevados para ambas as coordenadas, de -52,7 cm em x e -65,4 cm em y. Pelo contrário, o desvio-padrão apresentou valores pequenos, de 4,6 cm para x e 3,4 cm para y. Isto indica que não existe grande dispersão entre os valores, tanto para uma coordenada, como para a outra, o que significa que existe um erro sistemático que faz com que os valores dos ajustes sejam todos elevados. Uma possível razão para isto ter sucedido é o facto dos dados, apesar de estarem na mesma projeção cartográfica, poderão ter um datum diferente, ou seja, os dados do drone têm o datum ETRS89, enquanto que os dados do ICNF poderão ter o datum ITRF de alguma época.

4.1.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos

Relativamente à classificação da nuvem de pontos, foram encontrados diversos erros. Em diversos locais da nuvem havia pontos pertencentes às bordas dos telhados dos edifícios que foram classificados como vegetação. Na figura 40, encontra-se representado um exemplo deste erro, com o respetivo gráfico da ferramenta *Elevation Profile* do QGIS. As setas pretas indicam os pontos classificados de forma errada, tanto na imagem, como no gráfico.

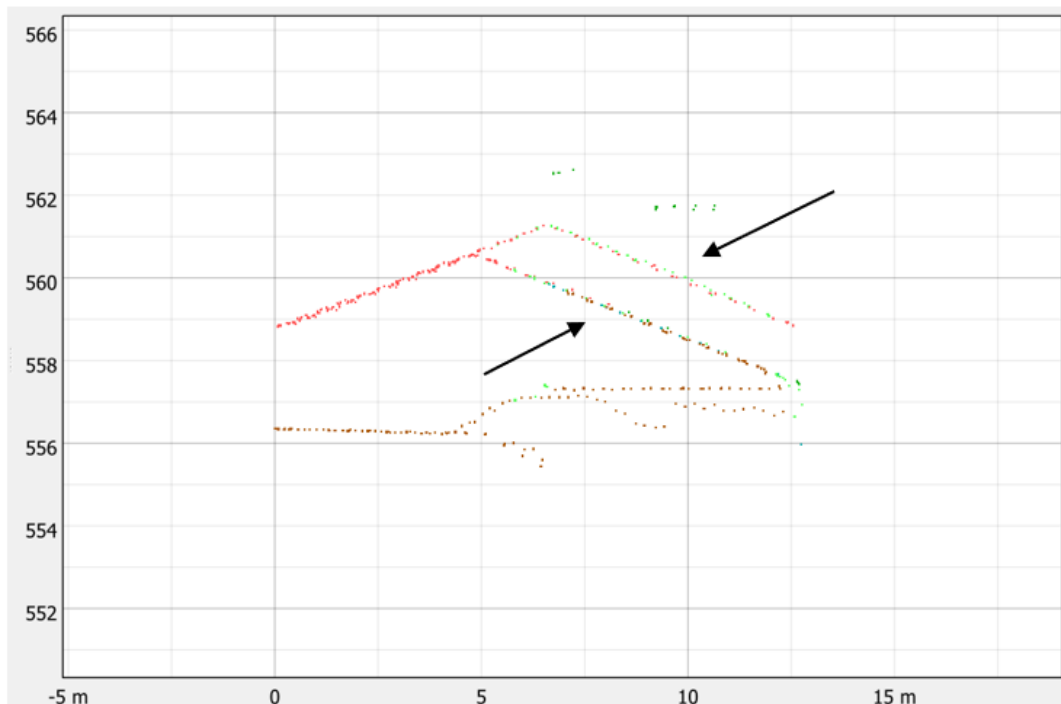
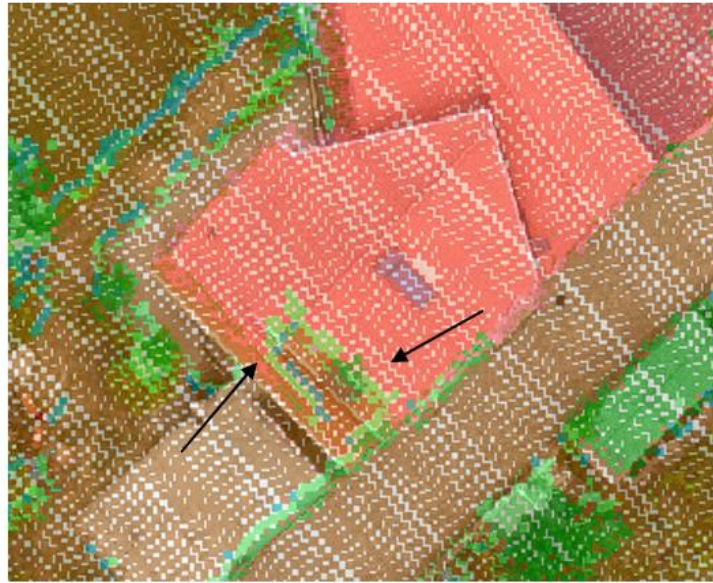


Fig. 40 – Exemplo de um erro encontrado na classificação da nuvem de pontos do ICNF, em que pontos pertencentes às bordas dos telhados de alguns edifícios foram classificados como vegetação.

Como é perceptível tanto na imagem, como no gráfico da figura 40, existem diversos pontos que pertencem ao telhado da casa, mas foi-lhes atribuído cor verde clara ou verde escura, tendo sido classificados como vegetação, em vez de edifício.

Outro erro de classificação encontrado em algumas zonas da nuvem de pontos foram as chaminés, que em alguns casos foram classificadas como vegetação ou solo. Na figura 41, está representado um exemplo deste erro, com o respetivo gráfico da ferramenta *Elevation Profile*. De forma análoga ao que foi feito na figura 40, foram

colocadas setas pretas a indicar os pontos mal classificados, tanto na imagem, como no gráfico.

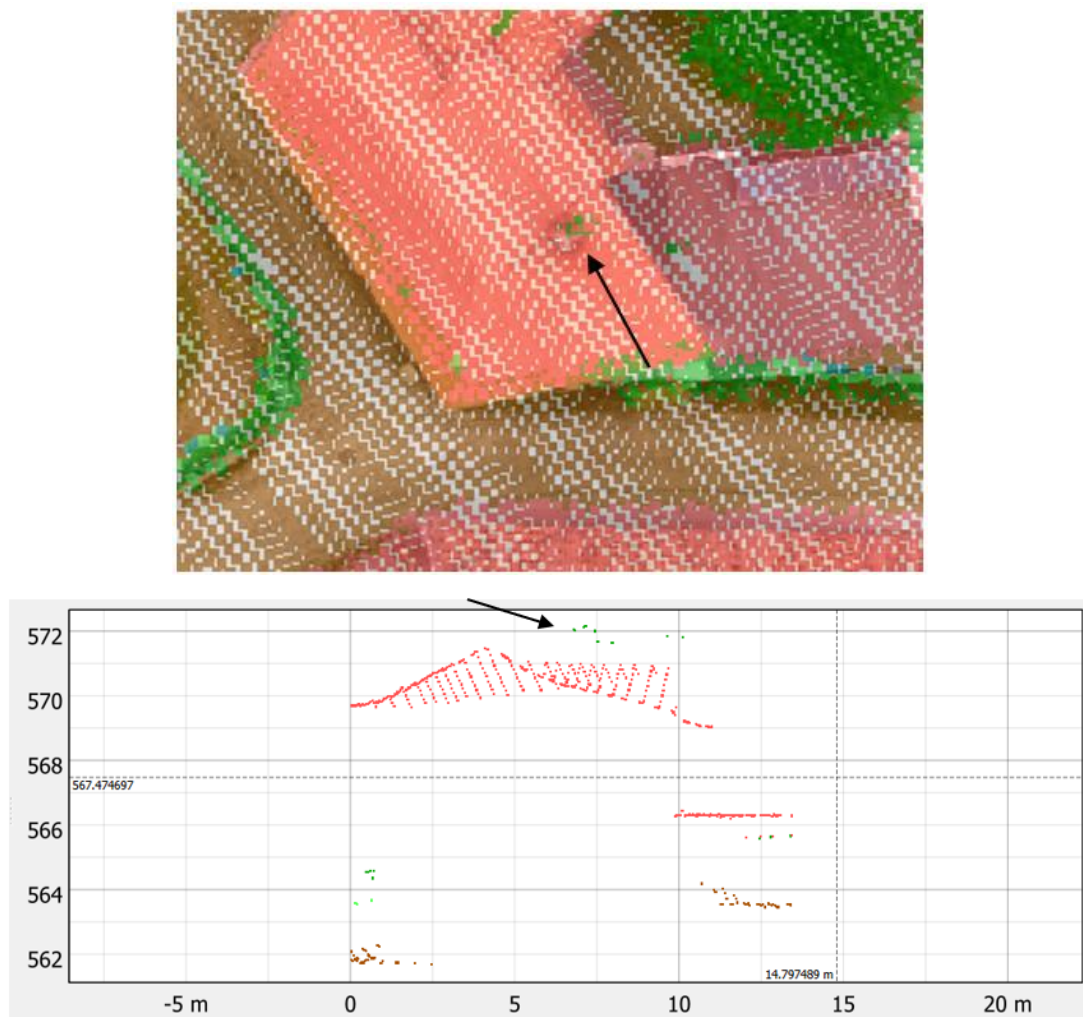


Fig. 41 – Exemplo de outro erro encontrado na classificação da nuvem de pontos do ICNF, em que pontos pertencentes às chaminés dos telhados de alguns edifícios foram classificados como vegetação.

Tal como se vê na imagem e é confirmado pelo gráfico da figura 41, os pontos pertencentes à chaminé da casa foram classificados como vegetação (cor verde escura), em vez de serem classificados como edifício.

Mais um erro encontrado na classificação de algumas partes da nuvem diz respeito a pontos do solo e/ou vegetação que são classificados como ruído. Na figura 42, estão representados diversos pontos que foram colocados, de forma errada, nesta classe.



Fig. 42 – Exemplo de mais um erro encontrado na classificação da nuvem de pontos do ICNF, em que pontos de solo e vegetação foram classificados como ruído.

Na imagem da figura 42, deixou-se selecionada apenas a classe do ruído e, como é perceptível, há vários pontos que deveriam ter sido classificados como solo ou vegetação, mas foram colocados nesta classe erradamente.

Para além dos três erros apresentados, foram identificados outros, como pontos de muros e portões que foram classificados como solo ou vegetação, pontos representativos de terraços de casas que foram classificados como vegetação e pontos de carros que foram colocados em classes erradas. No geral, a classificação não está mal, mas seria necessário rever e corrigir diversas zonas da nuvem de pontos, de modo a atender às necessidades do projeto.

4.2. Segunda fase – Validação do primeiro conjunto de nuvens de pontos do projeto LiDAR nacional

Na segunda fase do trabalho, foram avaliadas as primeiras nuvens de pontos do projeto em que a empresa se encontra envolvida. Para tal, foram selecionadas nuvens de quatro regiões: Arcos, Baltar, Valpedre e Foz do Douro. No caso de Arcos, Baltar e Valpedre, a avaliação foi efetuada em duas vertentes: altimetria e planimetria e no caso da Foz do Douro, a mesma foi efetuada apenas na vertente altimétrica, uma vez que não foi realizado nenhum levantamento com o drone. Como nenhuma destas quatro nuvens possuía classificação, não foi possível avaliar a qualidade da mesma em nenhum dos casos.

4.2.1. Arcos

4.2.1.1. Validação Altimétrica

Como foi mencionado na metodologia, o resultado da validação altimétrica de Arcos foi uma *shapefile* com 8 pontos, sendo que, a cada ponto, estava associada uma cota extraída a partir do MDS do drone e uma cota extraída a partir do MDS da nuvem de pontos. Deste modo, tal como se fez na primeira fase do trabalho, recorreu-se ao *Excel* para determinar as diferenças entre estas cotas para cada ponto. Na tabela 5, encontram-se representadas, para cada ponto, ambas as cotas e a diferença entre elas.

Tabela 5

Cota no MDS do drone, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona de Arcos.

Arcos			
Pontos	Cota drone (m)	Cota LiDAR (m)	dif cotas (m)
1	35,763	35,633	-0,131
2	39,849	39,782	-0,067
3	34,894	34,748	-0,146
4	49,718	49,602	-0,116
5	71,613	71,683	0,070
6	50,051	50,074	0,023
7	49,969	49,992	0,023
8	37,754	37,682	-0,071

Analisando a tabela 5, verifica-se que as diferenças obtidas estão entre os -14,6 cm e os 7 cm, ou seja, que todos os pontos apresentaram diferenças abaixo dos 20 cm, em módulo. Estatisticamente, calculou-se a média, o desvio-padrão e o RMS das diferenças entre as cotas para os 8 pontos. Na tabela 6, encontram-se representados estes valores.

Tabela 6

Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 8 pontos avaliados.

μ (m)	σ (m)	RMS (m)
-0,052	0,081	0,092

Pela observação da tabela 6, verifica-se que a média não deu um valor muito afastado de zero, mas deveria dar mais próximo, já que, como mencionado na primeira fase do trabalho, se traçássemos uma curva das diferenças, esta curva seguiria, aproximadamente, uma distribuição normal. Relativamente ao desvio-padrão e ao RMS, estes deram valores de 8,1 cm e 9,2 cm, respetivamente, que, apesar de não serem valores tão pequenos como os obtidos para as nuvens do ICNF, continuam a ser valores aceitáveis, tendo em conta as tolerâncias estipuladas para o projeto.

A última etapa da validação altimétrica no que diz respeito à região de Arcos, foi a determinação da percentagem de pontos que apresentaram diferenças entre $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$. Na tabela 7, encontram-se indicados os valores dos três intervalos e o número de pontos e respetiva percentagem que estavam contidos nos mesmos.

Tabela 7

Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos.

Intervalos	Valores (m)		Número de pontos contidos no intervalo	%
$\mu \pm \sigma$	-0,133	0,029	6	75
$\mu \pm 2\sigma$	-0,214	0,110	8	100
$\mu \pm 3\sigma$	-0,295	0,191	8	100

Neste caso, as percentagens de pontos contidos em cada um dos intervalos já estão um pouco mais afastadas das estipuladas numa distribuição normal, embora não muito.

4.2.1.2. Validação Planimétrica

No que toca à validação planimétrica de Arcos, foram criados 4 polígonos sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos. Na figura 43, encontram-se representados os dois polígonos mostrados na metodologia na figura 15, mas sobre o MDS do drone.

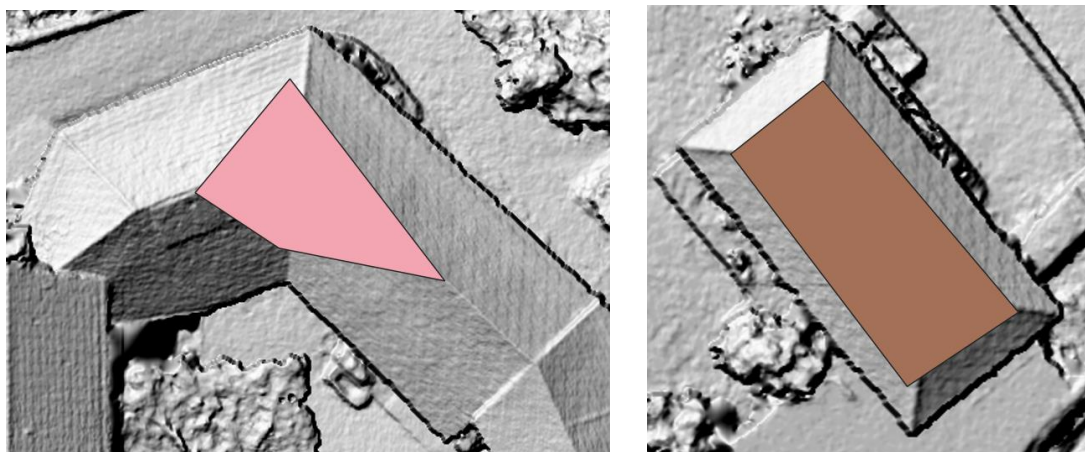


Fig. 43 – Polígonos mostrados na figura 15, mas sobre o MDS do drone.

Em termos visuais, parece que o polígono da imagem da esquerda está mais longe de encaixar no MDS do drone do que o polígono da imagem da direita, necessitando, assim, de um maior ajuste. A tabela 8, mostra, para cada polígono, o ajuste necessário a efetuar em x e em y, para que a nuvem de pontos encaixe no MDS do drone. Esta tabela também inclui a média e o desvio padrão calculados para ambas as coordenadas.

Tabela 8

Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre o MDS da nuvem de pontos, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y.

Arcos		
Polígono	x (m)	y (m)
1	0,075	0,028
2	0,075	0,200
3	-0,006	0,066
4	-0,128	0,069
Média (m)	0,004	0,091
Desvio-padrão (m)	0,096	0,075

Analisando a tabela 8, verifica-se que o polígono que apresentou um menor valor de ajuste em x foi o 3, com um valor de apenas 0,6 cm, em módulo. Por outro lado, o polígono que apresentou maior valor de ajuste em x foi o 4, com um valor de 12,8 cm, em módulo. Já em y, o polígono que apresentou menor valor de ajuste foi o 1, com um valor de 2,8 cm, e o polígono que apresentou maior valor de ajuste foi o 2, com um valor de 20 cm. De notar que os polígonos presentes nas figuras 15 e 43, são o 1 (imagem da esquerda) e o 2 (imagem da direita), para os quais foi obtido um valor de ajuste em x igual. Em y, no entanto, o polígono 1 foi o que apresentou menor ajuste, enquanto que o polígono 2 foi o que apresentou maior ajuste, o que significa que este segundo polígono precisa de sofrer uma maior translação de modo a encaixar no MDS do drone. No geral, pode afirmar-se que os valores obtidos tanto em x, como em y foram valores satisfatórios, todos bastante inferiores a 60 cm, em módulo.

No que toca à média e ao desvio-padrão, os valores obtidos foram todos inferiores a 10 cm, o que satisfaz os objetivos do projeto em termos planimétricos.

4.2.2. Baltar

4.2.2.1. Validação Altimétrica

Para Baltar, em termos de validação altimétrica, repetiram-se os passos efetuados para Arcos. Na tabela 9, encontram-se representadas, para os 17 pontos levantados no terreno, a cota do MDS do drone, a cota do MDS da nuvem de pontos e a diferença entre elas.

Tabela 9

Cota no MDS do drone, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona de Baltar.

Baltar			
Pontos	Cota drone (m)	Cota LiDAR (m)	dif cotas (m)
1	329,094	329,414	0,320
2	329,097	329,414	0,317
3	323,759	324,117	0,358
4	322,536	322,854	0,318
5	324,388	324,705	0,318
6	325,284	325,631	0,347
7	290,648	290,903	0,256
8	290,688	290,921	0,233
9	289,546	289,796	0,250
10	289,271	289,533	0,262
11	289,209	289,483	0,273
12	288,826	289,103	0,277
13	287,916	288,186	0,270
14	286,406	286,738	0,332
15	291,889	292,147	0,258
16	292,928	293,185	0,257
17	293,859	294,158	0,299

Pela análise da tabela 9, verifica-se que as diferenças obtidas estão entre os 23,3 cm e os 35,8 cm e que nenhum dos pontos apresentou diferenças abaixo dos 20 cm. Tendo em conta que todas as diferenças foram superiores a 20 cm, pode afirmar-se que os valores obtidos foram bem mais elevados do que aquilo que seria expectável. Em termos estatísticos, calculou-se, novamente, a média, o desvio-padrão e o RMS das diferenças entre as cotas para os 17 pontos. Na tabela 10, encontram-se representados estes valores.

Tabela 10

Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 17 pontos avaliados.

μ (m)	σ (m)	RMS (m)
0,291	0,038	0,293

Pela observação da tabela 10, verifica-se que, neste caso, a média deu um valor completamente díspar de zero, sendo um valor de 29,1 cm. O desvio-padrão, por outro lado, deu um valor pequeno, de 3,8 cm. Por fim, o valor obtido para o RMS foi, também, um valor elevado, que não atende às expectativas do projeto. O facto da média e do RMS terem dado valores elevados e do desvio-padrão ter dado um valor pequeno, é sinal de que existiu um erro sistemático que fez com que todos os valores das diferenças entre as cotas fossem elevados. Não é possível saber que erro foi cometido ao certo, já que existe uma grande diversidade de erros que justificariam estes valores elevados

como, por exemplo, não descontar o centro de fase do GPS, não utilizar o modelo do geóide português, mas sim um modelo global, entre outros.

Para finalizar a validação altimétrica no que diz respeito à região de Baltar, determinou-se a percentagem de pontos que apresentaram diferenças entre $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$. Na tabela 11, encontram-se indicados os valores dos três intervalos e o número de pontos e respetiva percentagem que estavam contidos nos mesmos.

Tabela 11

Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos.

Intervalos	Valores (m)		Número de pontos contidos no intervalo	%
$\mu \pm \sigma$	0,253	0,328	12	70,59
$\mu \pm 2\sigma$	0,216	0,366	17	100
$\mu \pm 3\sigma$	0,178	0,403	17	100

Neste caso, as percentagens de pontos contidos nos três intervalos não estão muito afastadas das estipuladas numa distribuição normal.

4.2.2.2. Validação Planimétrica

No que diz respeito à validação planimétrica, de forma análoga ao que foi feito para Arcos, também para Baltar foram criados 4 polígonos sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos. Na figura 44, encontram-se representados os dois polígonos mostrados na metodologia na figura 20, mas sobre o MDS do drone.

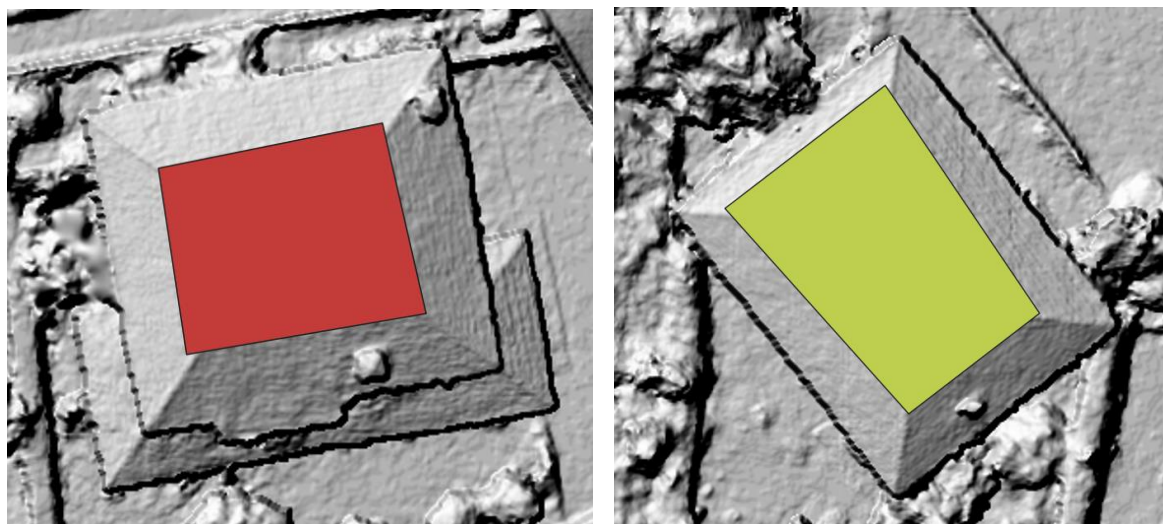


Fig. 44 – Polígonos mostrados na figura 20, mas sobre o MDS do drone.

À primeira vista, parece que nenhum dos polígonos precisa de um grande ajuste, de modo a ficar encaixado no MDS do drone. A tabela 12, mostra, para cada polígono, o

ajuste necessário a efetuar em x e em y, para que a nuvem de pontos encaixe no MDS do drone. Esta tabela também inclui a média e o desvio padrão calculados para ambas as coordenadas.

Tabela 12

Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre o MDS da nuvem de pontos, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y.

Baltar		
Polígono	x (m)	y (m)
1	-0,294	-0,122
2	-0,594	0,141
3	0,056	-1,153
4	0,363	-0,103
Média (m)	-0,117	-0,309
Desvio-padrão (m)	0,416	0,575

Analisando a tabela 12, verifica-se que o polígono que apresentou um menor valor de ajuste em x foi o 3, com um valor de 5,6 cm. Por outro lado, o polígono que apresentou maior valor de ajuste em x foi o 2, com um valor de 59,4 cm, em módulo. Já em y, o polígono que apresentou menor valor de ajuste foi o 4, com um valor de 10,3 cm, em módulo, e o polígono que apresentou maior valor de ajuste foi o 3, com um valor de 115,3 cm, em módulo. De notar que os polígonos presentes nas figuras 20 e 44, são o 3 (imagem da esquerda) e o 2 (imagem da direita), para os quais foram obtidos valores muito discrepantes. Em x, o polígono 3 apresentou um valor de ajuste, em módulo, bastante menor, enquanto que em y, o polígono 2 apresentou um valor, em módulo, bastante menor. No geral, pode afirmar-se que os valores obtidos tanto em x, como em y foram satisfatórios, visto que apenas um destes valores foi superior a 60 cm, em módulo.

4.2.3. Valpedre

4.2.3.1. Validação Altimétrica

Relativamente a Valpedre, no que toca à validação da altimetria, repetiram-se os passos efetuados anteriormente. Na tabela 13, encontram-se representadas, para os 21 pontos levantados no terreno, a cota do MDS do drone, a cota do MDS da nuvem de pontos e a diferença entre elas.

Tabela 13

Cota no MDS do drone, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona de Valpedre.

Valpedre			
Pontos	Cota drone (m)	Cota LiDAR (m)	dif cotas (m)
1	326,409	326,227	-0,182
2	325,919	325,710	-0,209
3	324,624	324,431	-0,193
4	324,706	324,493	-0,213
5	324,994	324,774	-0,220
6	324,886	324,701	-0,185
7	327,884	327,673	-0,211
8	328,457	328,271	-0,186
9	330,056	329,839	-0,218
10	333,334	333,151	-0,183
11	337,233	337,028	-0,205
12	343,009	342,783	-0,226
13	342,937	342,701	-0,237
14	342,214	342,033	-0,181
15	341,947	341,770	-0,177
16	341,232	341,082	-0,150
17	341,071	340,913	-0,158
18	341,005	340,858	-0,147
19	341,608	341,413	-0,195
20	342,576	342,378	-0,197
21	343,507	343,292	-0,216

Pela análise da tabela 13, verifica-se que as diferenças obtidas estão entre os 14,7 cm, em módulo, e os 23,7 cm, em módulo, e que 9 dos 21 pontos apresentaram diferenças acima dos 20 cm. Tendo isto em conta, pode afirmar-se que os valores obtidos foram mais elevados do que aquilo que seria expectável, apesar de não terem sido tão elevados como para Baltar. Em termos estatísticos, calculou-se, uma vez mais, a média, o desvio-padrão e o RMS das diferenças entre as cotas para os 21 pontos. Na tabela 14, encontram-se representados estes valores.

Tabela 14

Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 21 pontos avaliados.

μ (m)	σ (m)	RMS (m)
-0,195	0,024	0,196

Observando a tabela 14, verifica-se que aconteceu algo muito semelhante a Baltar, ou seja, a média deu um valor completamente díspar de zero, sendo um valor de 19,5 cm, em módulo. Para além disso, o desvio-padrão deu um valor pequeno, de 2,4 cm. Finalmente, o valor obtido para o RMS foi, também, um valor elevado, que não atende às expectativas do projeto. Da mesma forma que aconteceu para Baltar, o facto da média e do RMS terem dado valores elevados e do desvio-padrão ter dado um valor pequeno, é sinal de que existiu um erro sistemático que fez com que todos os valores das diferenças entre as cotas fossem elevados.

O último passo da validação altimétrica no que diz respeito à região de Valpedre, foi a determinação da percentagem de pontos que apresentaram diferenças entre $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$. Na tabela 15, encontram-se indicados os valores dos três intervalos e o número de pontos e respetiva percentagem que estavam contidos nos mesmos.

Tabela 15

Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos.

Intervalos	Valores (m)		Número de pontos contidos no intervalo	%
$\mu \pm \sigma$	-0,219	-0,170	16	76,19
$\mu \pm 2\sigma$	-0,243	-0,146	21	100
$\mu \pm 3\sigma$	-0,268	-0,122	21	100

Neste caso, a percentagem de pontos contidos no terceiro intervalo está muito próxima da estipulada numa distribuição normal. Já as percentagens de pontos contidos no primeiro e segundo intervalos, estão um pouco mais afastadas, mas não muito.

4.2.3.2. Validação Planimétrica

Quanto à validação planimétrica, de forma análoga ao que foi feito para Arcos e Baltar, também para Valpedre foram criados 4 polígonos sobre o MDS gerado a partir da nuvem de pontos. Na figura 45, encontram-se representados os dois polígonos mostrados na metodologia na figura 25, mas sobre o MDS do drone.

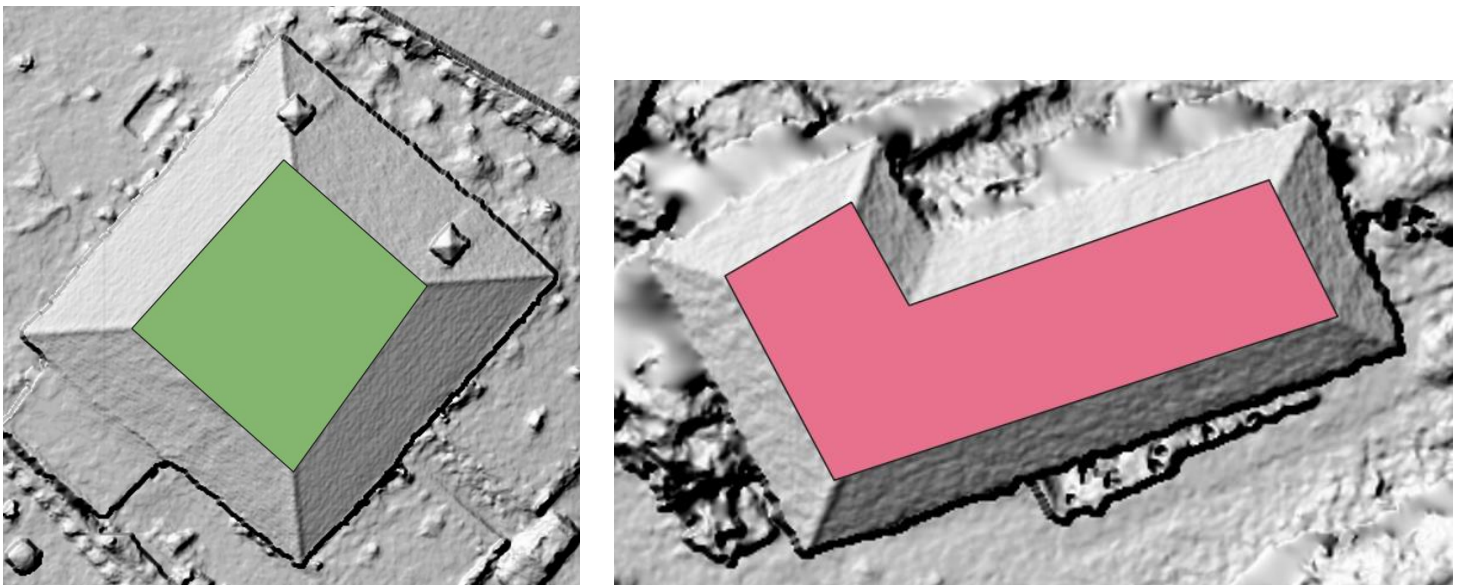


Fig. 45 – Polígonos mostrados na figura 25, mas sobre o MDS do drone.

Em termos visuais, parece que nenhum dos polígonos precisa de um grande ajuste, de modo a ficar encaixado no MDS do drone. A tabela 16, mostra, para cada polígono, o

ajuste necessário a efetuar em x e em y, para que a nuvem de pontos encaixe no MDS do drone. Esta tabela também inclui a média e o desvio padrão calculados para ambas as coordenadas.

Tabela 16

Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre o MDS da nuvem de pontos, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y.

Valpedre		
Polígono	x	y
1	0,081	0,491
2	0,128	0,100
3	-0,194	-0,597
4	0,291	0,197
Média (m)	0,077	0,048
Desvio-padrão (m)	0,202	0,461

Pela análise da tabela 16, é perceptível que o polígono que apresentou um menor valor de ajuste em x foi o 1, com um valor de 8,1 cm. Por outro lado, o polígono que apresentou maior valor de ajuste em x foi o 4, com um valor de 29,1 cm. Já em y, o polígono que apresentou menor valor de ajuste foi o 2, com um valor de 10 cm, e o polígono que apresentou maior valor de ajuste foi o 3, com um valor de 59,7 cm, em módulo. De notar que os polígonos presentes nas figuras 25 e 45, são o 1 (imagem da esquerda) e o 3 (imagem da direita), sendo que o primeiro apresentou valores menores de ajuste tanto em x, como em y. Apesar disto, este polígono precisa de sofrer uma grande translação em y, de modo a encaixar no MDS do drone. No geral, pode afirmar-se que os valores obtidos tanto em x, como em y foram satisfatórios, visto que nenhum destes valores ultrapassa os 60 cm, em módulo.

No que toca à média, foram obtidos valores pequenos, inferiores a 10 cm, tanto em x, como em y. Porém, o desvio-padrão foi elevado em ambos os casos, de 20,2 cm, em x, e de 46,1 cm, em y. Quer isto dizer que, apesar da média ser pequena, os valores estão muito dispersos entre si, ou seja, como se vê na tabela, há valores negativos muito elevados, que são compensados por valores positivos também muito elevados. No entanto, apesar de não serem valores pequenos, todos os valores obtidos encontram-se dentro das tolerâncias estipuladas para o projeto LiDAR, em termos de planimetria.

4.2.4. Foz do Douro

4.2.4.1. Validação Altimétrica

Como mencionado anteriormente, na zona da Foz do Douro apenas foram levantados pontos do terreno, ou seja, apenas foi possível fazer a avaliação da altimetria. Como não foi efetuado nenhum levantamento com o drone, foram comparadas as cotas dos pontos, obtidas com o recetor, com as cotas dos mesmos no MDS da nuvem de pontos do projeto LiDAR. Assim sendo, na tabela 17, encontram-se representadas, para os 27 pontos levantados, a cota do ponto, a cota do MDS da nuvem de pontos e a diferença entre elas.

Tabela 17

Cota do ponto, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona da Foz do Douro.

Foz do Douro			
Pontos	Cota ponto (m)	Cota LiDAR (m)	dif cotas (m)
1	3,627	3,384	-0,243
2	3,645	3,404	-0,241
3	3,664	3,435	-0,229
4	3,668	3,450	-0,218
5	3,632	3,423	-0,209
6	3,637	3,408	-0,229
7	3,645	3,435	-0,210
8	3,705	3,499	-0,206
9	3,734	3,533	-0,201
10	3,705	3,513	-0,192
11	3,678	3,509	-0,169
12	3,511	3,321	-0,190
13	3,102	2,878	-0,224
14	4,494	4,299	-0,195
15	4,351	4,152	-0,199
16	4,289	4,076	-0,213
17	29,623	29,473	-0,150
18	28,603	28,442	-0,161
19	25,607	25,414	-0,193
20	24,322	24,128	-0,194
21	23,279	23,105	-0,174
22	21,040	20,884	-0,156
23	19,488	19,209	-0,279
24	16,473	16,314	-0,159
25	17,571	17,404	-0,167
26	17,480	17,314	-0,166
27	18,633	18,561	-0,072

Analisando a tabela 17, é possível observar que as diferenças obtidas estão entre os 7,2 cm, em módulo, e os 27,9 cm, em módulo, e que, neste caso, 12 dos 27 pontos apresentaram diferenças acima dos 20 cm. Assim sendo, pode concluir-se que os

resultados obtidos não foram muito satisfatórios. Estatisticamente, calculou-se, novamente, a média, o desvio-padrão e o RMS das diferenças entre as cotas para os 27 pontos. Na tabela 18, encontram-se representados estes valores.

Tabela 18

Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 27 pontos avaliados.

μ (m)	σ (m)	RMS (m)
-0,194	0,039	0,198

Pela análise da tabela 18, é possível afirmar que aconteceu algo muito semelhante a Baltar e Valpedre, ou seja, a média deu um valor muito afastado de zero, sendo um valor de 19,4 cm, em módulo. Por outro lado, o desvio-padrão deu um valor pequeno, de 3,9 cm. Finalmente, o valor obtido para o RMS foi, também, um valor elevado, que não atende às expectativas do projeto. Da mesma forma que aconteceu para Baltar e Valpedre, o facto da média e do RMS terem dado valores elevados e do desvio-padrão ter dado um valor pequeno, é sinal de que existiu um erro sistemático que fez com que todos os valores das diferenças entre as cotas fossem elevados.

Para terminar a validação da altimetria no que diz respeito à região da Foz do Douro, determinou-se a percentagem de pontos que apresentaram diferenças entre $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$. Na tabela 19, encontram-se indicados os valores dos três intervalos e o número de pontos e respetiva percentagem que estavam contidos nos mesmos.

Tabela 19

Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos.

Intervalos	Valores (m)		Número de pontos contidos no intervalo	%
$\mu \pm \sigma$	-0,233	-0,155	22	81,48
$\mu \pm 2\sigma$	-0,272	-0,116	25	92,59
$\mu \pm 3\sigma$	-0,312	-0,076	26	96,30

Neste caso, a percentagem de pontos contidos no primeiro intervalo está um pouco afastada da estipulada numa distribuição normal. Já as percentagens de pontos contidos no segundo e terceiro intervalos, não andam muito longe das percentagens deste tipo de distribuição.

4.3. Terceira fase – Validação do segundo conjunto de nuvens de pontos do projeto LiDAR nacional

Na terceira fase do trabalho, foram avaliadas as segundas nuvens de pontos do projeto em que a empresa se encontra envolvida. Para tal, foram selecionadas nuvens de duas regiões: Algosó e Macedo de Cavaleiros. Em ambas as regiões, a avaliação foi realizada em três vertentes: altimetria, planimetria e qualidade da classificação da nuvem de pontos, tal como foi feito na primeira fase do trabalho.

4.3.1. Algosó

4.3.1.1. Validação Altimétrica

No que toca a Algosó, em termos de validação da altimetria, foram repetidos os passos efetuados nas duas primeiras fases do trabalho. Na tabela 20, encontram-se representadas, para os 8 pontos levantados no terreno, a cota do MDS do drone, a cota do MDS da nuvem de pontos e a diferença entre elas.

Tabela 20

Cota no MDS do drone, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona de Algosó.

Algosó			
Pontos	Cota drone (m)	Cota LiDAR (m)	dif cotas (m)
1	672,148	672,140	-0,008
2	670,730	670,717	-0,013
3	665,320	665,354	0,033
4	597,014	596,998	-0,015
5	559,358	559,412	0,055
6	450,948	451,029	0,081
7	484,843	484,912	0,069
8	515,465	515,581	0,116

Pela observação da tabela 20, é perceptível que as diferenças obtidas estão entre os 0,8 cm, em módulo, e os 11,6 cm, logo todos os pontos apresentaram diferenças abaixo dos 20 cm, em módulo. Tendo em conta isto, pode afirmar-se que os valores obtidos estão dentro do que é expectável para o projeto em questão. Em termos estatísticos, calculou-se, uma vez mais, a média, o desvio-padrão e o RMS das diferenças entre as cotas para os 8 pontos. Na tabela 21, encontram-se representados estes valores.

Tabela 21

Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 8 pontos avaliados.

μ (m)	σ (m)	RMS (m)
0,040	0,049	0,061

Analisando a tabela 21, é possível afirmar que a média deu um valor próximo de zero, de 4 cm, como já seria de esperar. Para além disso, o desvio-padrão também deu um valor pequeno, de 4,9 cm, o que significa que os valores não dispersam muito entre si. Por fim, o RMS também deu um valor pequeno, de 6,1 cm, ou seja, os resultados foram semelhantes aos obtidos na primeira fase do trabalho, sendo resultados satisfatórios e que cumprem as tolerâncias estipuladas para o projeto em termos altimétricos.

Finalmente, determinou-se a percentagem de pontos que apresentaram diferenças entre $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$. Na tabela 22, encontram-se indicados os valores dos três intervalos e o número de pontos e respetiva percentagem que estavam contidos nos mesmos.

Tabela 22

Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos.

Intervalos	Valores (m)		Número de pontos contidos no intervalo	%
$\mu \pm \sigma$	-0,009	0,089	5	62,5
$\mu \pm 2\sigma$	-0,058	0,138	8	100
$\mu \pm 3\sigma$	-0,107	0,187	8	100

Neste caso, a percentagem de pontos contidos no terceiro intervalo está muito próxima da estipulada numa distribuição normal. Já as percentagens de pontos contidos no primeiro e segundo intervalos, estão um pouco mais afastadas, mas não muito.

4.3.1.2. Validação Planimétrica

Quanto à validação planimétrica, tal como foi feito na primeira parte do trabalho, também para Algos foram criados polígonos, neste caso 4, sobre a nuvem de pontos. Na figura 46, encontram-se representados os dois polígonos mostrados na metodologia na figura 32, mas sobre o MDS do drone.

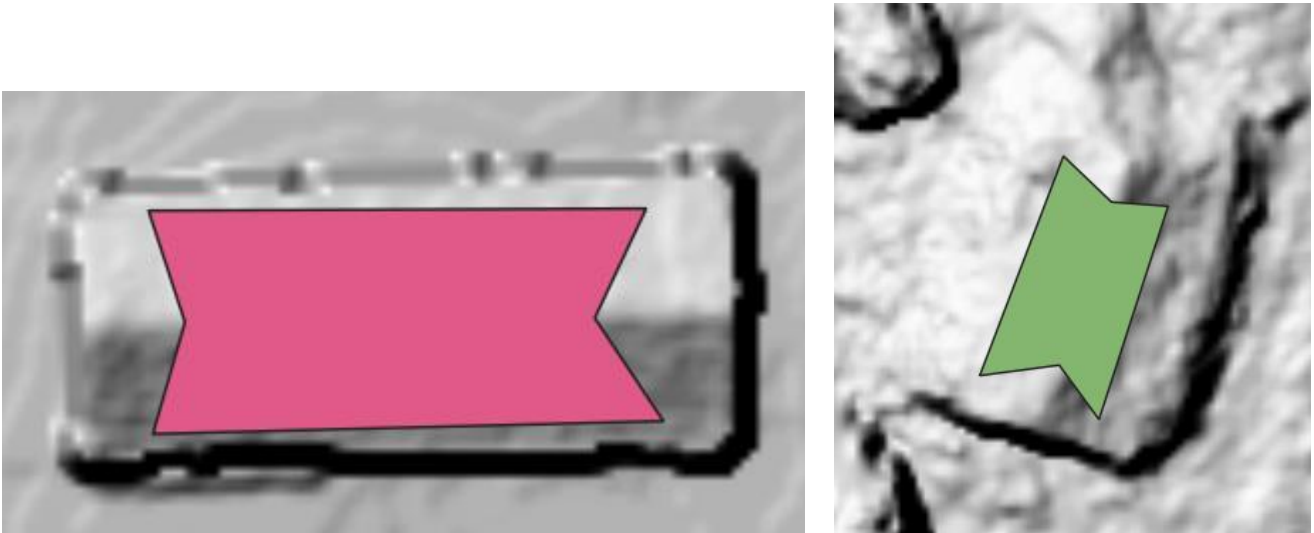


Fig. 46 – Polígonos mostrados na figura 32, mas sobre o MDS do drone.

Tal como foi referido na metodologia, a zona de Algosó abrangida pelos MDS é uma zona com muito poucas casas. Para além disso, estas casas encontram-se localizadas nas extremidades desta zona e são casas pequenas. Assim sendo, é normal que não tenham ficado muito bem representadas no MDS do drone, como é possível constatar na figura 46. Desta forma, não é fácil dizer com certeza, em termos visuais, se algum destes dois polígonos precisa de um grande ajuste de modo a ficar encaixado no MDS do drone. A tabela 23, mostra, para cada polígono, o ajuste necessário a efetuar em x e em y, para que a nuvem de pontos encaixe no MDS do drone. Esta tabela também inclui a média e o desvio padrão calculados para ambas as coordenadas.

Tabela 23

Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre o MDS da nuvem de pontos, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y.

Algosó		
Polígono	x (m)	y (m)
1	1,756	0,159
2	-0,719	-0,166
3	0,453	0,609
4	-1,216	-0,066
Média (m)	0,069	0,134
Desvio-padrão (m)	1,325	0,345

Pela análise da tabela 23, é possível observar que o polígono que apresentou um menor valor de ajuste em x foi o 3, com um valor de 45,3 cm. Por outro lado, o polígono que apresentou maior valor de ajuste em x foi o 1, com um valor de 175,6 cm. Já em y, o polígono que apresentou menor valor de ajuste foi o 4, com um valor de 6,6 cm, em módulo, e o polígono que apresentou maior valor de ajuste foi o 3, com um valor de 60,9 cm. De notar que os polígonos presentes nas figuras 32 e 46, são o 1 (imagem da

esquerda) e o 3 (imagem da direita), para os quais foram obtidos valores muito discrepantes. Em x, o polígono 3 apresentou um valor de ajuste bastante menor, enquanto que em y, o polígono 1 apresentou um valor bastante menor. No geral, pode afirmar-se que os valores obtidos tanto em x, como em y não foram satisfatórios, visto que metade destes valores foram superiores a 60 cm, em módulo, e que houve, inclusive, valores que ultrapassaram os 1,20 metros.

No que toca à média, foram obtidos valores relativamente pequenos, um inferior a 10 cm e o outro apenas um pouco acima. Porém, o desvio-padrão foi elevado em ambos os casos, de 132,5 cm, em x, e de 34,5 cm, em y. Quer isto dizer que, apesar da média ser pequena, os valores estão muito dispersos entre si, ou seja, como se vê na tabela, há valores negativos muito elevados, que são compensados por valores positivos também muito elevados. Isto reforça o facto de, no geral, os valores obtidos não terem sido satisfatórios, tendo em conta as tolerâncias estipuladas para o projeto LiDAR, em termos de planimetria. Contudo, no caso desta região, estes erros já seriam expectáveis, já que, como mencionado anteriormente, os telhados disponíveis para desenhar os polígonos não eram os mais adequados ao programa utilizado para determinar os ajustes.

4.3.1.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos

Relativamente à classificação da nuvem de pontos, foram encontrados alguns erros. Em certos locais da nuvem havia pontos que foram classificados, de forma errada, como edifícios. Na figura 47, encontra-se representado um exemplo deste erro.

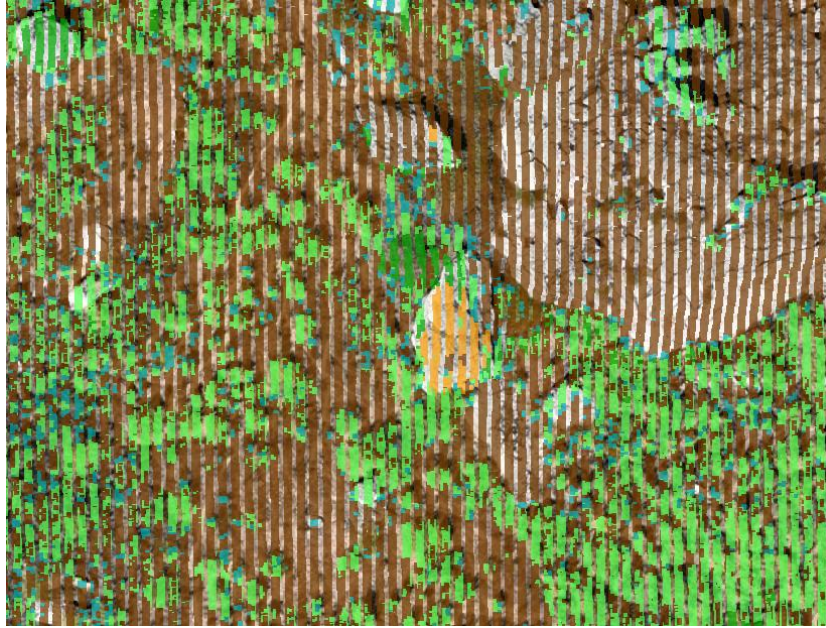


Fig. 47 – Exemplo de um erro encontrado na classificação da nuvem de pontos de Algosó, em que pontos, neste caso, de uma pedra foram classificados como edifício, em vez de solo.

Tal como é perceptível na figura 47, os pontos que estão classificados a laranja e que são representativos de uma pedra, deveriam ter sido classificados como solo, ou seja, a castanho, da mesma forma que as restantes pedras em volta foram classificadas.

Outro erro de classificação encontrado em algumas zonas da nuvem de pontos e que já tinha sido identificado na nuvem de pontos do ICNF, diz respeito a pontos que foram classificados como ruído, quando pertencem à classe solo ou vegetação. Na figura 48, está representado um exemplo deste erro.



Fig. 48 – Exemplo de outro erro encontrado na classificação da nuvem de pontos de Algosó, em que pontos de solo e vegetação foram classificados como ruído.

Na imagem da figura 48, deixou-se seleccionada apenas a classe do ruído (cor vermelha) e, como é perceptível, há vários pontos que deveriam ter sido classificados como solo ou vegetação, mas foram colocados nesta classe erradamente.

Mais um erro, que não é propriamente um erro, mas sim uma classificação incompleta, diz respeito a alguns pontos que estão por classificar. Na figura 49, estão representados diversos pontos que não possuem classificação, estando, por isso, representados a cinzento.

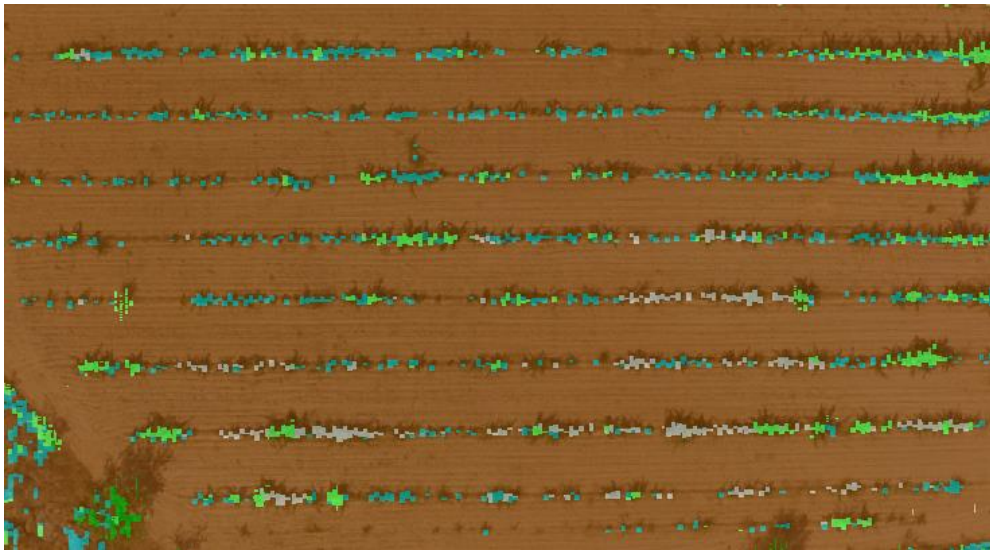


Fig. 49 – Exemplo de uma classificação incompleta, em que alguns pontos ainda estão por classificar, estando representados a cinzento.

Neste caso, os pontos pertencem claramente à classe vegetação, mas não foram associados a nenhuma classe.

Os três erros apresentados, foram os erros mais flagrantes encontrados. No geral, a classificação está bem conseguida, apesar de apresentar alguns pequenos problemas.

4.3.2. Macedo de Cavaleiros

4.3.2.1. Validação Altimétrica

Para Macedo de Cavaleiros, em termos de validação da altimetria, repetiram-se os passos realizados anteriormente. Na tabela 24, encontram-se representadas, para os 8 pontos levantados no terreno, a cota do MDS do drone, a cota do MDS da nuvem de pontos e a diferença entre elas.

Tabela 24

Cota no MDS do drone, cota no MDS da nuvem de pontos e respetiva diferença apresentadas para cada ponto levantado no campo, na zona de Macedo de Cavaleiros.

Macedo de Cavaleiros			
Pontos	Cota drone (m)	Cota LiDAR (m)	dif cotas (m)
1	583,096	583,143	0,047
2	584,213	584,275	0,062
3	584,404	584,475	0,072
4	582,131	582,193	0,062
5	568,434	568,533	0,100
6	574,420	574,474	0,053
7	592,301	592,346	0,044
8	595,242	595,320	0,077

Analisando a tabela 24, é perceptível que as diferenças obtidas estão entre os 4,4 cm e os 10 cm, e que, portanto, todos os pontos apresentaram diferenças menores que 20 cm. Tendo em conta isto, pode afirmar-se que os valores obtidos estão dentro do que é expectável para o projeto em questão. Estatisticamente, calculou-se, novamente, a média, o desvio-padrão e o RMS das diferenças entre as cotas para os 8 pontos. Na tabela 25, encontram-se representados estes valores.

Tabela 25

Média, desvio-padrão e RMS das diferenças entre as cotas para os 8 pontos avaliados.

μ (m)	σ (m)	RMS (m)
0,065	0,018	0,067

Pela observação da tabela 25, é possível constatar que a média deu um valor próximo de zero, de 6,5 cm, como já seria de esperar. Para além disso, o desvio-padrão também deu um valor pequeno, de 1,8 cm, o que significa que os valores não dispersam muito entre si. Por fim, o RMS também deu um valor pequeno, de 6,7 cm, ou seja, os resultados foram semelhantes aos obtidos na primeira fase do trabalho e para Algosó, sendo resultados satisfatórios e que cumprem as tolerâncias estipuladas para o projeto em termos altimétricos.

Finalmente, determinou-se a percentagem de pontos que apresentaram diferenças entre $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$. Na tabela 26, encontram-se indicados os valores dos três intervalos e o número de pontos e respetiva percentagem que estavam contidos nos mesmos.

Tabela 26

Valores dos intervalos $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ e $\mu \pm 3\sigma$, em metros, e número de pontos e respetiva percentagem contidos nos mesmos.

Intervalos	Valores (m)		Número de pontos contidos no intervalo	%
$\mu \pm \sigma$	0,047	0,083	6	75
$\mu \pm 2\sigma$	0,028	0,101	8	100
$\mu \pm 3\sigma$	0,010	0,119	8	100

Neste caso, as percentagens de pontos contidos em cada um dos intervalos foram as mesmas obtidas para Arcos. A percentagem de pontos contidos no terceiro intervalo está muito próxima da estipulada numa distribuição normal. Já as percentagens de pontos contidos no primeiro e segundo intervalos, estão um pouco mais afastadas, mas não muito.

4.3.2.2. Validação Planimétrica

No que diz respeito à validação planimétrica, tal como foi feito para Algosó, também para Macedo de Cavaleiros foram criados 4 polígonos sobre a nuvem de pontos. Na figura 50, encontram-se representados os dois polígonos mostrados na metodologia, na figura 37, mas sobre o MDS do drone.

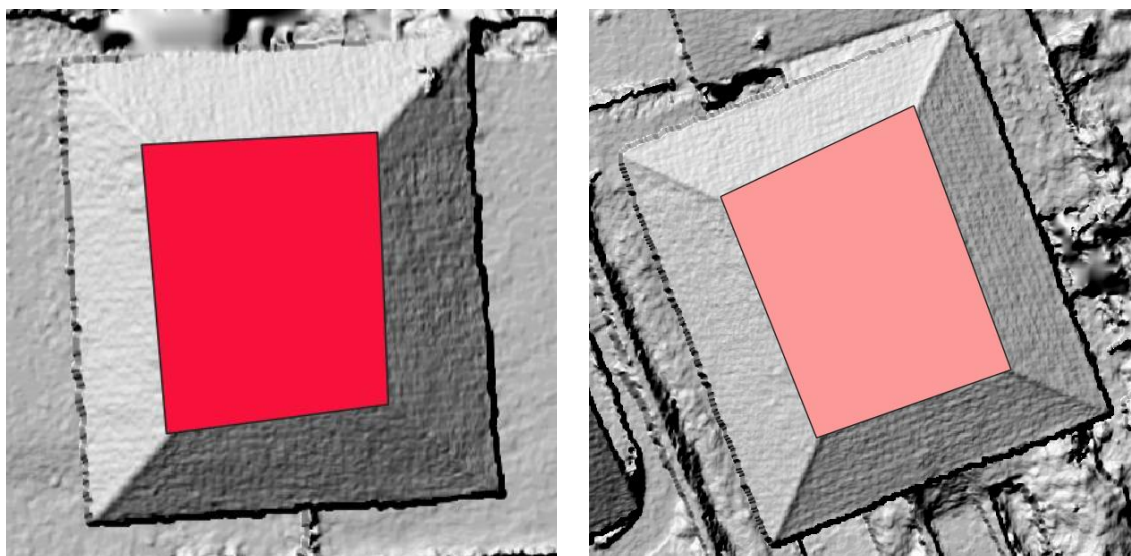


Fig. 50 – Polígonos mostrados na figura 37, mas sobre o MDS do drone.

Visualmente, parece que nenhum dos polígonos precisa de um grande ajuste, de modo a ficar encaixado no MDS do drone. A tabela 27, mostra, para cada polígono, o ajuste necessário a efetuar em x e em y, para que a nuvem de pontos encaixe no MDS do drone. Esta tabela também inclui a média e o desvio padrão calculados para ambas as coordenadas.

Tabela 27

Ajuste em x e em y, que é necessário aplicar a cada polígono desenhado sobre o MDS da nuvem de pontos, para que estes se encaixem no MDS do drone. Cálculo da média e desvio-padrão para x e y.

Macedo de Cavaleiros		
Polígono	x (m)	y (m)
1	0,063	0,041
2	0,094	0,169
3	0,056	-0,006
4	0,069	-0,012
Média (m)	0,071	0,048
Desvio-padrão (m)	0,017	0,084

Pela análise da tabela 27, é perceptível que o polígono que apresentou um menor valor de ajuste em x foi o 3, com um valor de 5,6 cm. Por outro lado, o polígono que apresentou maior valor de ajuste em x foi o 2, com um valor de 9,4 cm. Já em y, o polígono que apresentou menor valor de ajuste foi o 3, com um valor de 0,6 cm, em módulo, e o polígono que apresentou maior valor de ajuste foi o 2, com um valor de 16,9 cm, em módulo. De notar que os polígonos presentes nas figuras 37 e 50, são o 1 (imagem da esquerda) e o 4 (imagem da direita), sendo que o primeiro apresentou em valor de ajuste ligeiramente menor em x e o segundo apresentou um valor de ajuste um pouco menor em y. No geral, pode afirmar-se que os valores obtidos tanto em x, como em y foram satisfatórios e que cumprem as tolerâncias estipuladas.

No que toca à média e ao desvio-padrão, os valores obtidos também foram todos inferiores a 10 cm, o que satisfaz os objetivos do projeto em termos planimétricos.

4.3.2.3. Avaliação da classificação da nuvem de pontos

Relativamente à classificação da nuvem de pontos, foram encontrados alguns erros. Em certos locais da nuvem havia pontos representativos de objetos e estruturas que foram classificados, de forma errada, como solo e vegetação. Na figura 51, encontra-se representado um exemplo deste erro, juntamente com uma imagem do Google Earth Pro que ajuda a perceber o que são as estruturas presentes no ortomosaico.



Fig. 51 – Exemplo de um erro encontrado na classificação da nuvem de pontos de Macedo de Cavaleiros, em que pontos, neste caso, de estátuas foram classificados como solo (castanho) e vegetação (azul turquesa).

Pela observação da figura 51, é perceptível, pelo ortomosaico, que existem duas estruturas na rotunda e que estas foram classificadas, de forma errada, como solo (castanho) e vegetação (azul turquesa). O Google Earth Pro ajuda a perceber que estas duas estruturas são estátuas.

Outro erro de classificação encontrado em algumas zonas da nuvem de pontos e que já tinha sido identificado na nuvem de pontos do ICNF, diz respeito a pontos que pertencem aos telhados das casas e são classificados de forma errada, neste caso, como solo. Na figura 52, está representado um exemplo deste erro, com o respetivo gráfico da ferramenta *Elevation Profile*.

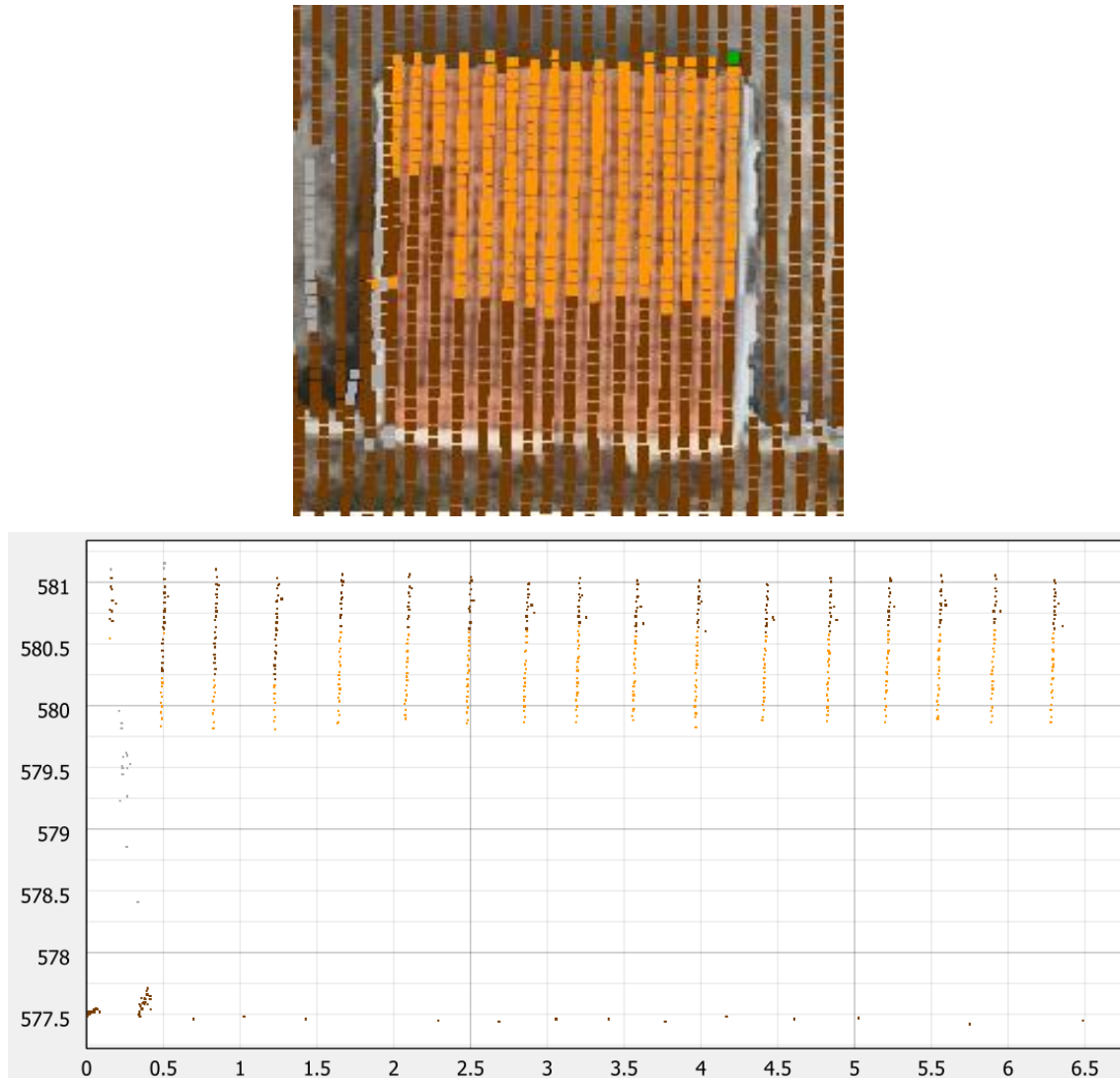


Fig. 52 – Exemplo de outro erro encontrado na classificação da nuvem de pontos de Macedo de Cavaleiros, em que pontos pertencentes ao telhado de uma casa são classificados como solo.

Pela observação da figura 52, é perceptível, tanto pela imagem, como pelo gráfico, que existem diversos pontos que fazem parte do telhado e que são classificados como solo (castanho), em vez de serem classificados como edifício (laranja).

Mais um erro encontrado na classificação da nuvem e que já tinha sido encontrado tanto na nuvem de pontos do ICNF, como na de Algoz, diz respeito a pontos pertencentes ao solo, que são classificados como ruído. Na figura 53, está representado um exemplo deste erro, com o respetivo gráfico da ferramenta *Elevation Profile*.

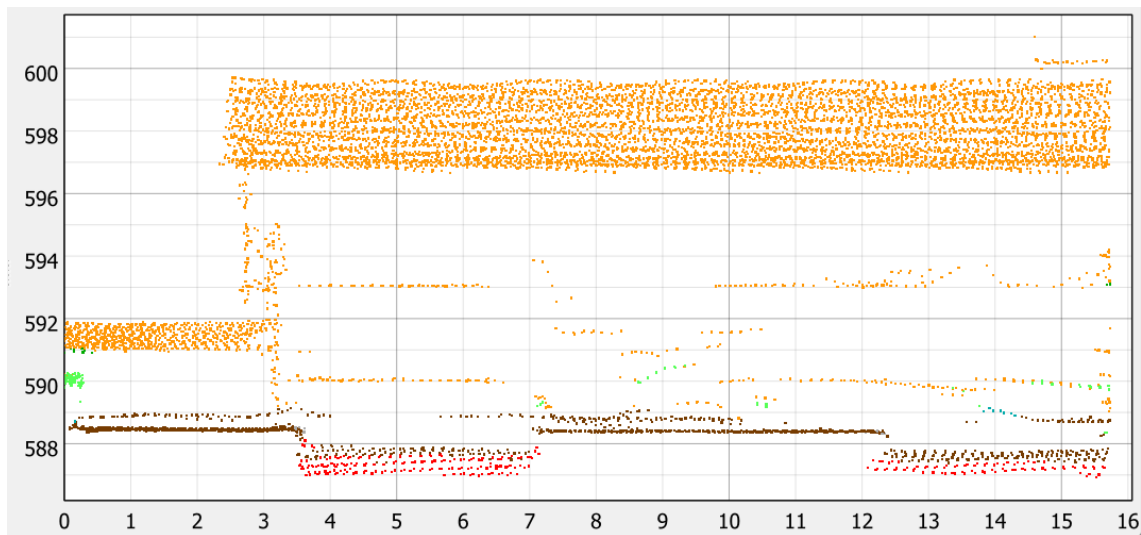
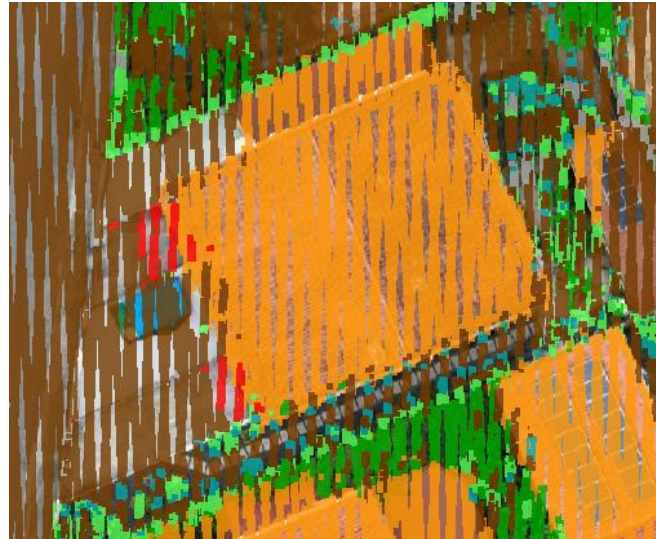


Fig. 53 – Exemplo de mais um erro encontrado na classificação da nuvem de pontos de Macedo de Cavaleiros, em que pontos de solo foram classificados como ruído.

Pela observação da imagem da figura 53, vê-se claramente que existem vários pontos que foram classificados como ruído (vermelho), de forma errada. O gráfico da ferramenta *Elevation Profile* permite perceber que estes são pontos que deveriam ter sido classificados como solo.

Os três erros apresentados, foram os que mais se evidenciaram na nuvem de pontos de Macedo de Cavaleiros. Tal como para Algosó, no geral, a classificação está bem realizada, apesar de apresentar alguns pequenos problemas.

Resumidamente, na primeira fase do trabalho, os resultados obtidos em altimetria foram aceitáveis e cumpriram as tolerâncias estipuladas no projeto LiDAR. Porém, em planimetria e em classificação da nuvem de pontos, isto já não aconteceu. Em termos planimétricos, os erros elevados obtidos deveram-se, muito provavelmente e como mencionado, à diferença entre os sistemas de coordenadas dos dados ICNF e dos

dados do drone. Quanto à classificação da nuvem de pontos, havia diversos erros que necessitariam de ser corrigidos.

Na segunda fase do trabalho, verificou-se que, das quatro zonas escolhidas, apenas uma apresentou resultados satisfatórios em ambas as vertentes, tendo em conta os objetivos do projeto LiDAR. Arcos foi a única região cujos resultados cumpriram as tolerâncias estipuladas para o projeto, tanto em altimetria, como em planimetria. Relativamente a Baltar, Valpedre e Foz do Douro, constatou-se que ocorreu um erro sistemático em termos altimétricos, que fez com que os erros tivessem todos valores altos. Já em termos planimétricos, apesar dos resultados obtidos para Baltar e Valpedre estarem dentro das tolerâncias pretendidas, alguns destes valores eram um pouco elevados. Tudo isto foi comunicado à empresa de imediato.

Por fim, na terceira fase do trabalho, foram obtidos resultados satisfatórios em quase todas as vertentes, tanto para Algosó, como para Macedo de Cavaleiros. No caso de Algosó, apenas foram obtidos erros altos na planimetria e estes erros, muito provavelmente, deveram-se à existência de poucas casas na região abrangida pelos MDS e ao facto das mesmas não serem adequadas à utilização do programa de cálculo dos ajustes, tal como mencionado anteriormente. Quanto a Macedo de Cavaleiros, foram obtidos resultados satisfatórios nas três vertentes avaliadas.

Conclusão

Através deste trabalho foi possível desenvolver metodologias expeditas que permitem validar dados, de modo a perceber se os mesmos possuem o rigor necessário para gerar os produtos pretendidos. Neste caso específico, as metodologias desenvolvidas foram utilizadas para validar nuvens de pontos de um projeto em que a empresa Viamapa se encontra envolvida, em três vertentes diferentes: altimetria, planimetria e qualidade da classificação. O objetivo essencial era perceber se estes dados possuíam o rigor necessário para gerar os produtos requeridos pelo projeto (MDT, MDS, ortomosaicos, ...).

Deste modo, dividiu-se o trabalho em três fases. Numa primeira fase, testaram-se as metodologias utilizando-se, para tal, nuvens de pontos do ICNF da região de Vila Pouca de Aguiar. Numa segunda fase, aplicaram-se as metodologias a um primeiro conjunto de nuvens de pontos do projeto, que após finalização, a Viamapa iria fornecer para a fiscalização. Tratava-se de nuvens de quatro regiões, ainda sem cor, nem classificação. No final, concluiu-se que apenas uma destas zonas cumpriu as tolerâncias estipuladas no projeto em ambas as vertentes avaliadas. Como as restantes zonas apresentaram erros bastante elevados em altimetria, alertou-se, de imediato, a empresa. Na terceira e última fase do trabalho, aplicaram-se as metodologias a um segundo conjunto de nuvens de pontos do projeto, que eram nuvens de duas regiões de Trás-os-Montes, já com cor e classificação. No final, concluiu-se que Algosó apenas não cumpriu os requisitos do projeto em planimetria, havendo justificações plausíveis para tal acontecer. Quanto a Macedo de Cavaleiros, foram obtidos resultados satisfatórios nas três vertentes avaliadas.

Assim sendo, é possível afirmar que as metodologias desenvolvidas permitiram identificar problemas em algumas nuvens de pontos. Estes problemas foram, então, comunicados à Viamapa, contribuindo, assim, para o bom desenvolvimento do projeto LiDAR. Estas metodologias poderão ser aplicadas, novamente, em futuros projetos em que a empresa se encontre envolvida, podendo ser úteis no controlo de qualidade interno realizado pela mesma.

Referências Bibliográficas

- [1] Grilli, E., Menna, F., & Remondino, F. (2017). A review of point clouds segmentation and classification algorithms. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 339-344.
- [2] Carter, J., Schmid, K., Waters, K., Betzhold, L., Hadley, B., Mataosky, R., & Halleran, J. (2012). An introduction to lidar technology, data, and applications. NOAA Coastal Services Center, 2, 17.
- [3] TOPS – Take-off Professionals (2024) – Navigating the World of 3D Point Cloud Data (Tutorial on Point Cloud). Disponível em: <https://www.takeoffpros.com/blog/what-is-point-cloud-modeling/> (acedido em agosto de 2024).
- [4] DGT (2022). Anexo I do Caderno de encargos do concurso público CP/3957/2022 (Levantamento LiDAR de Portugal continental): <https://www.base.gov.pt/Base4/pt/detalhe/?type=anuncios&id=335820>.
- [5] Özdemir, E., Remondino, F., & Golkar, A. (2019). Aerial point cloud classification with deep learning and machine learning algorithms. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 843-849.
- [6] Zhang, H., Wang, C., Tian, S., Lu, B., Zhang, L., Ning, X., & Bai, X. (2023). Deep learning-based 3D point cloud classification: A systematic survey and outlook. *Displays*, 79, 102456.
- [7] Mehendale, N., & Neoge, S. (2020). Review on lidar technology. *Available at SSRN 3604309 (Social Science Research Network)*.
- [8] ICNF (2020) - Projeto áGIL - Dados LiDAR. Documentação do projeto, disponível on-line em: <https://geocatalogo.icnf.pt/geovisualizador/agil.html> (acedido em agosto de 2024).
- [9] Gonçalves, J.A., Morgado, A., (2008). Use of the SRTM DEM as a geo-referencing tool by elevation matching. *International Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B2, 879-883. Beijing 2008.