



Implementação de novas metodologias para atualização de cadastro baseadas no uso de smartphones com Galileo

Américo Magalhães

Engenharia Geográfica

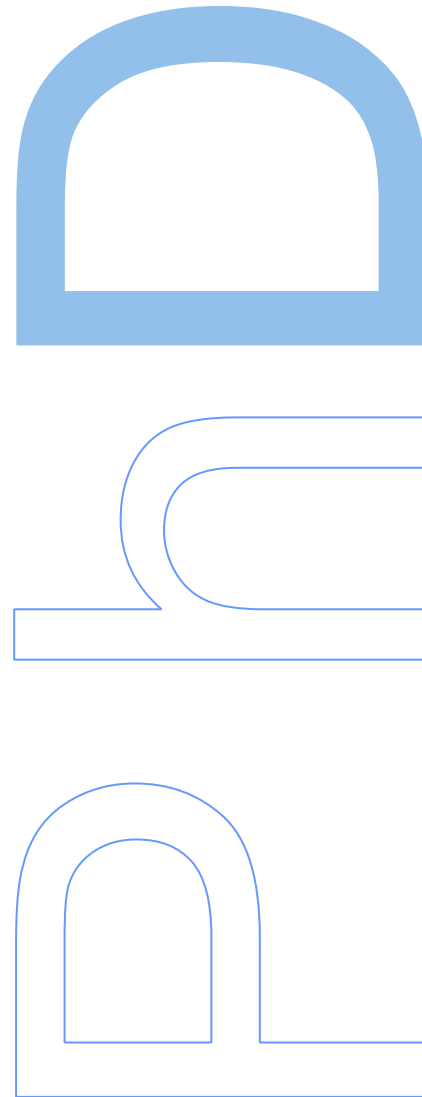
Departamento de Geociências Ambiente e Ordenamento do Território
2022

Orientador

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

Coorientador

M. Luísa M. C. Bastos, Investigador Aposentado Convidado,
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Dalmiro Jorge Filipe Maia, Investigador Principal Convidado,
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

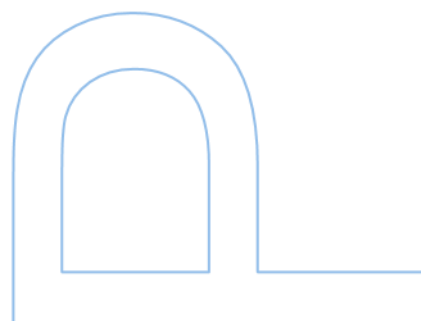
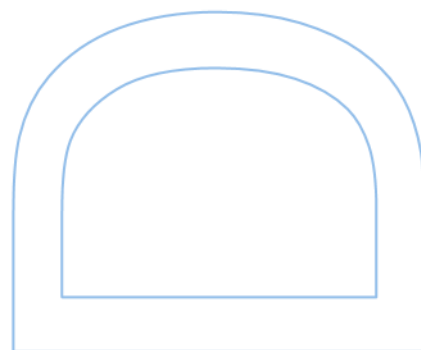


Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

A/O Orientadora(o),

José Alberto Gonçalves

Porto, 24/10/2022



Declaração de Honra

Eu, Américo da Silva Magalhães, inscrito no Programa Doutoral em Engenharia Geográfica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto declaro, nos termos do disposto na alínea a) do artigo 14.º do Código Ético de Conduta Académica da U.Porto, que o conteúdo da presente tese reflete as perspetivas, o trabalho de investigação e as minhas interpretações no momento da sua entrega.

Ao entregar esta tese, declaro, ainda, que a mesma é resultado do meu próprio trabalho de investigação e contém contributos que não foram utilizados previamente noutros trabalhos apresentados a esta ou outra instituição.

Mais declaro que todas as referências a outros autores respeitam escrupulosamente as regras da atribuição, encontrando-se devidamente citadas no corpo do texto e identificadas na secção de referências bibliográficas. Não são divulgados na presente tese quaisquer conteúdos cuja reprodução esteja vedada por direitos de autor.

Tenho consciência de que a prática de plágio e auto-plágio constitui um ilícito académico.



Vila Nova de Gaia, 20 de novembro de 2022

Agradecimentos

Depois de passados três anos e meio, ainda me recordo o desafio em julho de 2017 para avançar para uma tese de doutoramento, na qual poderia fazer uso dos conhecimentos adquiridos na minha vida profissional, sobretudo durante a última década de colaboração na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto na investigação GNSS e sistemas inerciais, e ao mesmo tempo desenvolver novos conhecimentos. Apesar de estar ciente de todas as dificuldades que iriam surgir neste caminho, e que se tornaram ainda mais complicadas devido à situação pandémica, apesar de tudo isto, penso que se conseguiram atingir o objetivo proposto, tendo contribuído para tal todos os que me apoiaram durante este tempo e aos quais ficarei sempre grato.

Gostaria em primeiro lugar, agradecer ao Prof. José Alberto Gonçalves por ter aceitado ser o meu orientador e que com a sua mestria de excelência na área da fotogrametria, me guiou ao longo deste tempo, transmitindo-me as linhas orientadoras por forma a alcançar os objetivos, assim como ideias e esclarecimentos. Agradeço à Dr.^a Luísa Bastos na qualidade de coorientadora e pelo facto de ter sido quem primeiro me lançou este desafio, a sua transmissão de conhecimento de excelência na área dos Sistema Globais de Navegação por Satélite, que vai muito além deste trabalho, estendendo-se pelos diversos anos de colaboração com o Observatório Astronómico “Prof. Manuel de Barros”, onde múltiplos desafios com elevados graus de exigência me permitiram uma evolução em experiência e conhecimento. Ainda no âmbito da minha orientação, agradeço ao Dr. Dalmiro Maia sempre disponível para os esclarecimentos de dúvidas e com sugestões de forma a enriquecer meu trabalho devido aos seus excelentes conhecimentos científicos, e às suas palavras de encorajamento nos momentos mais difíceis.

Gostaria de agradecer ao do Observatório Astronómico “Prof. Manuel de Barros” na qualidade do seu diretor atual, o Prof. José Luís Santos e ao seu antecessor, a Dr.^a Luísa Bastos, pela disponibilização de meios para a realização deste trabalho, assim todos colaboradores desta instituição que sempre tiveram uma palavra amiga. Desses colaboradores, um agradecimento especial à Mónica Rodrigues pela sua grande simpatia, com o sempre “Bom dia Eng. Américo!” e à sua incansável disponibilidade na resolução de todas as situações do fórum da secretaria, mas também ao Dr. Wenlin Yan pelos conhecimentos partilhados e sugestões na realização de testes, ao Eng.^o André Pinhal pelo apoio nos trabalhos e sugestões na otimização destes, ao Eng.^o Diogo Ayres no esclarecimento de dúvidas, ao Eng.^o Bernardo Relvas sempre com disponibilidade para colaborar nos trabalhos de oficina.

Um agradecimento às pessoas externas ao Observatório, que permitiram a realização dos

trabalhos em cenário hidrográfico e aéreo, como é caso do Sr. Alfredo Carvalho e o Dr. João Pinheiro nos teste realizados abordo das suas embarcações, e ao Eng.º Alexandre Gomes, o técnico Daniel Rodrigues e ao piloto Pedro Cruz pela disponibilidade nos voos na aeronave da InfoPortugal.

Termino com o agradecimento mais sentido, que me perdoem os anteriores citados, que vai não só por estes últimos anos, mas por todos os outros da minha vida, para o meu pai, a minha mãe (para sempre no coração) e à minha irmã, pelo carinho e apoio em todos momentos, sobretudo nos mais difíceis, dedicando-lhes a eles este trabalho.

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo projeto Enabling Green E-science para a Infraestrutura de Investigação SKA (ENGAGE SKA), referência POCI-01-0145-FEDER-022217, financiado pelo COMPETE 2020 e FCT, Portugal, e pelo projeto GRC-MS Consortium (grant related to the support of the Member States to the Galileo Reference Centre (GRC)), referência EUSPA/GRANT/04/2016, financiado pela União Europeia.

Sumário

Na atualidade, a informação georreferenciada tem uma enorme relevância no funcionamento da sociedade, com grande impacto socioeconómico a nível mundial, sendo pedra basilar em muitos aspetos do dia a dia dos cidadãos, e contribuindo decisivamente, como nunca visto antes, para o seu bem-estar. Para isto, muito contribuíram os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) como ferramenta usada em áreas tão diversas que vão desde o setor primário como a agricultura, pescas ou minas, até ao comércio, transportes e comunicações, serviços financeiros e novas tecnologias, passando pelas indústrias do segmento aeroespacial, da energia, automóvel ou naval. Se o sistema norte-americano GPS (Global Positioning System) foi o primeiro sistema GNSS, implementado inicialmente com propósitos militares, o mais recente sistema de navegação europeu Galileo, que é inteiramente civil, encontra-se em fase de alcançar a sua total operacionalidade tendo introduzido novas abordagens tecnológicas na exploração dos sinais GNSS que o distinguem dos outros sistemas. Um dos setores que beneficiou muito com a evolução dos sistemas GNSS foi o setor dos telemóveis que tem protagonizado uma verdadeira revolução tecnológica na última década. A introdução de múltiplos sensores aumentou muito as capacidades dos telemóveis, que passaram a designar-se por “telemóveis inteligentes”, vulgo *smartphones*, potenciando o seu uso num sem número de novas aplicações, incluindo as baseadas em localização. É este equipamento que serviu de base para este trabalho, no qual se propõe novos usos dos *smartphones*. Um dos sensores encontrados nestes equipamentos é um recetor e antena GNSS, que permitindo inicialmente acesso só aos sinais do sistema mais antigo, o GPS, numa das frequências, evoluiu rapidamente sendo hoje em dia possível encontrar vários modelos com acesso às medidas de código e de fase em bruto de todos os sistemas GNSS existentes, e nomeadamente a sinais GPS e Galileo em duas frequências (L1, L5). A motivação inicial deste trabalho foi a exploração de uma técnica inovadora e de fácil acesso, que alia exatidão e baixo custo na georreferenciação em contexto do Cadastro com um *smartphone*, tirando partido das vantagens da dupla frequência do sistema Galileo e da captura de imagens de alta resolução, permitindo a obtenção direta de coordenadas através da medição GNSS de pontos cadastrais ou por uma forma indireta obter as coordenadas desses pontos com recurso a técnicas de fotogrametria terrestre, em cenários em que os pontos a coordenar se apresentam nas proximidade de obstáculos que dificultam as observações dos sinais GNSS, inviabilizando uma correta georreferenciação. A ideia da aplicação ao cadastro surgiu na expectativa de poder contribuir para dar resposta à necessidade crescente de rápida atualização da informação cadastral do país, cuja importância para o ordenamento do território, a proteção ambiental, a implementação de políticas agrícolas, florestais e fiscais, é inquestionável. No entanto no decurso deste trabalho verificou-se que as capacidades de posicionamento poderiam ser

exploradas muito para além da aplicação aos levantamentos cadastrais, tendo sido também exploradas outras possibilidades de aplicabilidade das capacidades de posicionamento com um *smartphone*, através da exploração de modos de posicionamento quer *estático* quer *cinemático*, apresentados por Hofmann-Wellenhof et al. (2008), que permitam dar uma resposta eficaz, e a custos reduzidos. Os resultados obtidos mostram um elevado potencial, tanto em posicionamento como em navegação, para a obtenção de exatidões de nível decimétrico e até centimétrico. Este facto permite perspetivar uma verdadeira revolução nos processos de produção e atualização de cartografia de precisão, esperando-se também novas formas de os cidadãos se relacionarem com esses processos e serem, eles próprios, atores na atualização da cartografia. Antecipámos que os *smartphones* terão um papel fundamental na obtenção de imagens georreferenciadas quase instantâneas do ambiente que nos rodeia e, consequentemente, na identificação das respetivas mudanças, a uma escala planetária.

Palavras-chave: Galileo, *Smartphone*, Cadastro, GPS, GNSS, Dupla-frequência, Exatidão, Posicionamento Hidrográfico, Posicionamento Aéreo, Posicionamento Terrestre, Bases longas, Fotogrametria Terrestre.

Abstract

Currently, georeferenced information has an enormous relevance in the functioning of society, with a great socio-economic impact worldwide, being a cornerstone in many aspects of the daily lives of citizens, and contributing decisively, as never seen before, to their well-being. The Global Navigation Satellite Systems (GNSS) contributed greatly to this as a tool used in areas as diverse as the primary sector such as agriculture, fisheries or mining, to commerce, transport and communications, financial services and new technologies, including by the aerospace, energy, automotive or naval industries. If the North American GPS system (Global Positioning System) was the first GNSS system, initially implemented for military purposes, the most recent European Galileo navigation system, which is entirely civilian, is in the phase of reaching its full operability having introduced new technological approaches in the exploitation of GNSS signals that distinguish it from other systems. One of the sectors that benefited a lot from the evolution of GNSS systems was the mobile phone sector, which has been the protagonist of a true technological revolution in the last decade. The introduction of multiple sensors greatly increased the capabilities of mobile phones, which became known as “smart mobile phones”, commonly known as *smartphones*, enhancing their use in a number of new applications, including location-based ones. It is this equipment that served as the basis for this work, in which new uses of *smartphones* are proposed. One of the sensors found in these equipment is a GNSS receiver and antenna, which initially only allowed access to the signals of the oldest system, the GPS, in one of the frequencies, it evolved rapidly and nowadays it is possible to find several models with access to code and raw phase of all existing GNSS systems, namely GPS and Galileo signals on two frequencies (L1, L5). The initial motivation of this work was the exploration of an innovative and easily accessible technique, which combines precision and low cost in georeferencing in the context of the Cadastre with a *smartphone*, taking advantage of the dual frequency of the Galileo system and the capture of high-quality images. resolution, allowing the direct acquisition of coordinates through the GNSS measurement of cadastral points or, indirectly, obtaining the coordinates of these points using terrestrial photogrammetry techniques, in scenarios in which the points to be coordinated are present in the proximity of obstacles that hinder the observations of GNSS signals, making a correct georeferencing unfeasible. The idea of applying to the cadastre emerged in the expectation of being able to contribute to responding to the growing need for rapid updating of the country's cadastral information, whose importance for territorial planning, environmental protection, the implementation of agricultural, forestry and fiscal policies, is unquestionable. However, in the course of this work, it was found that the positioning capabilities could be explored far beyond the application to cadastre surveys, and other possibilities of applicability of the positioning capabilities with a *smartphone* were also explored, through the exploration of positioning modes

either static or kinematic, presented by Hofmann-Wellenhof et al. (2008), which allow an effective response, and at reduced costs. The results obtained show a high potential, both in positioning and in navigation, to obtain accuracies of decimeter and even centimeter level. This fact allows us to envision a real revolution in the processes of production and updating of precision cartography, and new ways are also expected for citizens to relate to these processes and to be, themselves, actors in the updating of cartography. We anticipate that *smartphones* will play a key role in obtaining almost instantaneous georeferenced images of the environment that surrounds us and, consequently, in identifying the respective changes, on a planetary scale.

Keywords: Galileo, *Smartphone*, Cadastre, GPS, GNSS, Dual Frequency, Accuracy, Hydrographical Positioning, Aerial Positioning, Terrestrial Positioning, Long Bases, Close Range Photogrammetry.

Índice

Agradecimentos	i
Sumário	iii
Abstract	v
Índice	viii
Lista de tabelas	xii
Lista de figuras	xiv
Lista de Abreviaturas	xix
1 Introdução	1
1.1 Estado da arte	3
1.2 Motivação e contributos inovadores.....	8
1.3 Objetivos	10
1.4 Estrutura.....	12
2 Utilizando os <i>smartphones</i> em Cadastro	14
2.1 Definições em cadastro	16
2.2 Modelos 3D com <i>smartphones</i> em cadastro	18
2.2.1 Algoritmos SIFT e SfM-MVS.....	19
2.2.2 Integração de dados posicionais e imagens com <i>smartphones</i>	22
2.2.2.1 Alinhamento.....	22
2.2.2.2 Nuvem de pontos densa	22
2.2.2.3 Ortofotomapas.....	23
2.2.3 Calibração da câmara.....	23
3 Posicionamento GNSS com <i>smartphones</i>	24
3.1 Sistemas GNSS.....	24
3.1.1 Erros nos sistemas GNSS	27
3.1.1.1 Erros dependentes dos satélites.....	29
3.1.1.2 Erros dependentes da atmosfera.....	29
3.1.1.3 Erros dependentes dos recetores e antenas	30
3.1.1.4 Erros dependentes da geometria.....	31
3.1.2 Erros intencionais	33
3.2 Tipos de posicionamento	34
3.3 <i>Smartphones</i> e recetores GNSS.....	38
3.3.1 Recetores GNSS	38
3.3.2 Antenas GNSS	41
3.3.3 <i>Smartphones</i> versus recetores/antenas GNSS.....	44

3.3.4	Ficheiros RINEX.....	45
3.4	Sistema Galileo	46
3.4.1	Segmento espacial	47
3.4.2	Segmento terrestre.....	48
3.4.3	Segmento do utilizador	49
3.4.4	Serviços Galileo.....	50
3.4.5	Sinais Galileo	51
3.4.6	Mensagem de navegação	52
4	Metodologias de levantamento com os <i>smartphones</i>	54
4.1	Equipamentos.....	54
4.1.1	<i>Smartphone</i>	54
4.1.2	Recetores e antenas.....	56
4.2	Softwares	56
4.2.1	Planeamento	56
4.2.2	Recolha de medidas GNSS no <i>smartphone</i>	57
4.2.3	Conversão em formato RINEX	57
4.2.4	Análises dos sinais e resultados.....	57
4.2.5	Processamento das medidas GNSS.....	58
4.2.6	Processamento fotogramétrico	58
4.3	Sistemas de coordenadas	59
4.4	Metodologia fotogramétrica em pontos cadastrais.....	59
4.5	Montagem dum suporte <i>smartphone</i> para mitigação da reflexão de sinais.....	60
5	Trabalhos de campo	62
5.1	Levantamento de pontos de cadastro.....	63
5.1.1	Levantamento A - Método fotogramétrico	63
5.1.2	Levantamento B - Método direto.....	65
5.1.3	Levantamento C - Método fotogramétrico e direto	67
5.2	Levantamento estático.....	69
5.2.1	Levantamento D – Bases longas	70
5.3	Levantamento cinemático	73
5.3.1	Levantamento E - Hidrográfico	73
5.3.2	Levantamento F - Aéreo	75
5.3.3	Levantamento G - Aéreo	77
5.3.4	Levantamento H - Terrestre	78
5.3.5	Levantamento I - Terrestre	79
6	Análise do sinal	81

6.1	Levantamento de pontos de cadastro.....	82
6.1.1	Levantamento A - Método fotogramétrico	82
6.1.1.1	Satélites visíveis	82
6.1.1.2	Qualidade do sinal.....	84
6.1.2	Levantamento B - Método direto.....	86
6.1.2.1	Satélites visíveis	86
6.1.2.2	Qualidade do sinal.....	91
6.1.3	Levantamento C - Método fotogramétrico e direto	93
6.1.3.1	Satélites visíveis	93
6.1.3.2	Qualidade do sinal.....	95
6.2	Levantamento estático.....	97
6.2.1	Levantamento D – Bases longas	97
6.2.1.1	Satélites visíveis	97
6.2.1.2	Qualidade do sinal.....	104
6.3	Levantamentos cinemáticos	110
6.3.1	Levantamento E - Hidrográfico	110
6.3.1.1	Satélites visíveis	110
6.3.1.2	Qualidade do sinal.....	112
6.3.2	Levantamento F - Aéreo	113
6.3.2.1	Satélites visíveis	113
6.3.2.2	Qualidade do sinal.....	116
6.3.3	Levantamento G - Aéreo	118
6.3.3.1	Satélites visíveis	118
6.3.3.2	Qualidade do sinal.....	119
6.3.4	Levantamento H - Terrestre.....	120
6.3.4.1	Satélites visíveis	120
6.3.4.2	Qualidade do sinal.....	121
6.3.5	Levantamento I - Terrestre	122
6.3.5.1	Satélites visíveis	122
6.3.5.2	Qualidade do sinal.....	124
6.4	Reflexão de sinais	125
6.5	Resumo	130
7	Análise de resultados	132
7.1	Levantamento de pontos de cadastro.....	132
7.1.1	Levantamento A - Método fotogramétrico	132
7.1.2	Levantamento B - Método direto.....	134
7.1.3	Levantamento C - Método fotogramétrico e direto	136
7.2	Levantamento estático.....	141

7.2.1	Levantamento D – Bases longas	141
7.2.1.1	Teste 1.....	142
7.2.1.2	Teste 2.....	146
7.2.1.3	Teste 3.....	146
7.2.1.4	Teste 4.....	147
7.2.1.5	Teste 5.....	148
7.2.1.6	Teste 6.....	149
7.3	Levantamentos cinemáticos	151
7.3.1	Levantamento E - Hidrográfico	151
7.3.2	Levantamento F - Aéreo	154
7.3.3	Levantamento G - Aéreo	157
7.3.4	Levantamento H - Terrestre	160
7.3.5	Levantamento I - Terrestre	162
7.4	Resumo	166
8	Conclusões.....	169
	Referências	173
	Anexo A. Análise do sinal	180
A.1	Levantamento B	180
A.2	Levantamento D	183

Lista de tabelas

Tabela 3.1- Técnicas de posicionamento GNSS	38
Tabela 3.2- Vantagens e desvantagens dos recetores GNSS em função das frequências.	41
Tabela 3.3 – Antenas GNSS típicas.	44
Tabela 3.4 – Observáveis Galileo e GPS, RINEX 3.03 no <i>smartphones</i>	46
Tabela 3.5 – Conteúdo da mensagem Galileo.	52
Tabela 4.1 – Recetores GNSS utilizados.	56
Tabela 4.2 – Antenas GNSS utilizadas.	56
Tabela 5.1 – Estações de referência utilizadas.	71
Tabela 6.1 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento A.....	83
Tabela 6.2 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento A. ..	85
Tabela 6.3 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento B.....	90
Tabela 6.4 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento B. ..	93
Tabela 6.5 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento D	95
Tabela 6.6 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento D. ..	96
Tabela 6.7 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento D.	104
Tabela 6.8 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no Teste 1.	109
Tabela 6.9 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS nos Testes 2, 4, 5, 6.	109
Tabela 6.10 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no Teste 3.	109
Tabela 6.11 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento E.....	111
Tabela 6.12 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento E.	112
Tabela 6.13 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento F.....	115
Tabela 6.14 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento F.	117
Tabela 6.15 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento G.	119
Tabela 6.16 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento G.	119
Tabela 6.17 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento H.	121
Tabela 6.18 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento H.	122
Tabela 6.19 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento I.	123
Tabela 6.20 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento I.	125
Tabela 6.21 – Médias da reflexão de sinais (m) obtidas em modo estático e cinemático (unidades: m).	127
Tabela 7.1 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento A.	133
Tabela 7.2 – Estatística dos resultados do levantamento A (unidades: m).	134
Tabela 7.3 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento B.	134
Tabela 7.4 – Estatística dos resultados do levantamento B (unidades: m).	136
Tabela 7.5 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento D.	138
Tabela 7.6 – Estatística observação GNSS e fotogramétrica (unidades: m).	139
Tabela 7.7 – Estatística observação GNSS com 40 e 180 segundos nos pontos 1, 2, 8 e 13 (unidades: m).	141
Tabela 7.8 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento C.	142
Tabela 7.9 – Estatística dos resultados do Teste 1 (unidades: m).	143
Tabela 7.10 – Estatística comparando o modo de voo ligado e desligado (unidades: m).	144
Tabela 7.11 – Estatística comparando dois equipamentos do mesmo modelo (unidades:	

m).	144
Tabela 7.12 – Estatística do Teste 2 (unidades: m).....	146
Tabela 7.13 – Estatística do Teste 3 (unidades: m).....	147
Tabela 7.14 – Estatística do Teste 4 (unidades: m).....	148
Tabela 7.15 – Estatística do Teste 5 (unidades: m).....	149
Tabela 7.16 – Estatística do Teste 6 (unidades: m).....	149
Tabela 7.17 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento E.	151
Tabela 7.18 – Estatística do levantamento E (unidades: m).	152
Tabela 7.19 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento F.	155
Tabela 7.20 – Estatística do levantamento F para soluções diferenciais (unidades: m).	156
Tabela 7.21 – Estatística do levantamento F para soluções SPP (unidades: m).	156
Tabela 7.22 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento G.....	157
Tabela 7.23 – Estatística do levantamento G (unidades: m).....	158
Tabela 7.24 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento H.	161
Tabela 7.25 – Estatística do levantamento H (unidades: m).....	161
Tabela 7.26 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento I.	162
Tabela 7.27 – Estatística do levantamento I (unidades: m).	163

Lista de figuras

Figura 2.1 - CGPR em 2021 (a) e Municípios iniciais do projeto BUPi (b).	14
Figura 2.2 – Exemplos de pontos cadastrais: marcos de propriedade (a, b, c, d) e marcas de propriedade (e, f, g, h).	17
Figura 2.3 – Princípio de modelos 3D com <i>smartphones</i> em cadastro.	18
Figura 2.4 – Etapas típicas do processo de SfM-MVS.	21
Figura 2.5 – Calibração da câmara do <i>smartphone</i> Xiaomi Mi8.	23
Figura 2.6 – Parâmetros de calibração do <i>smartphone</i> .	23
Figura 3.1 – Cronologia dos sistemas GNSS.	25
Figura 3.2 – Segmentos dos sistemas GNSS.	26
Figura 3.3 – Distribuição das frequências GNSS na banda L.	26
Figura 3.4 – Erros típicos que influenciam a precisão das medidas GNSS.	28
Figura 3.5 – Valores típicos do EMQ em erros GNSS (u-blox AG, 2009).	28
Figura 3.6 – Saltos (traços vermelhos) no sinal Galileo e GPS.	31
Figura 3.7 – Exemplo de geometria com bom e mau DOP.	32
Figura 3.8 – DOP durante 24 horas para a constelação Galileo.	32
Figura 3.9 – DOP durante 24 horas para todas as constelações GNSS.	33
Figura 3.10 – Modos de posicionamento e exatidão posicional.	35
Figura 3.11 – Posicionamento relativo com fases: diferenças simples, duplas e triplas.	37
Figura 3.12 – Distância real entre antena e satélite, e pseudodistância medida pelo recetor.	39
Figura 3.13 – Componentes de um recetor GNSS.	41
Figura 3.14 – Padrão de radiação típico de uma antena GNSS.	43
Figura 3.15 – Carregamento dos quatro satélites Galileo do lançamento de dezembro 2017 (European Space Agency, 2017).	47
Figura 3.16 – Rede do segmento terrestre do Galileo (European GNSS Service Center, 2021).	48
Figura 3.17 – Áreas do utilizador do sistema Galileo (USEGALILEO.EU, 2019).	50
Figura 4.1 – Localização da Antena do <i>smartphone</i> Xiaomi Mi8.	55
Figura 4.2 – Método usado no levantamento fotogramétrico de pontos cadastrais com <i>smartphone</i> .	59
Figura 4.3 – Base metálica por baixo do <i>smartphone</i> para minimizar as reflexões.	60
Figura 5.1 – Croqui dos pontos cadastrais do levantamento A.	64
Figura 5.2 – Levantamento do ponto 1 com recetor GNSS R6 (a) e do ponto 8 com técnica clássica com a ET (b).	64
Figura 5.3 – Pontos delimitadores observados na infraestrutura no OAUP.	66
Figura 5.4 – Observações com o <i>smartphone</i> diurnas (a) e noturnas (b), e com o recetor PolaRx5 (c).	66
Figura 5.5 – Croqui dos pontos cadastrais do levantamento C.	67
Figura 5.6 – Levantamento com <i>smartphone</i> (a, b) e taqueómetro eletrónico (c).	68
Figura 5.7 – Marco 1: (a) foto <i>smartphone</i> , (e) visada taqueómetro; Marca-rocha 4: (b) foto <i>smartphone</i> , (f) visada taqueómetro; Marca-construção 8: (c) foto <i>smartphone</i> , (g) visada taqueómetro; Marca-muro 13: (d) foto <i>smartphone</i> , (h) visada taqueómetro.	69
Figura 5.8 – Pilares utilizados da base de calibração do OAUP (a), estações e respetivas linhas de base (b).	70
Figura 5.9 – Observações realizadas nos pilares da base de calibração do OAUP.	71
Figura 5.10 – Embarcação do levantamento hidrográfico (a), <i>smartphone</i> à direita da antena (b), offset entre antenas (c).	74
Figura 5.11 – Trajetória realizada no levantamento hidrográfico em 04 de maio de 2021.	74
Figura 5.12 – Avião CESSNA C210 (a), localização do <i>smartphone</i> e antena aérea (b).	75
Figura 5.13 – Distâncias (“leverarms”) entre as antenas no avião.	76
Figura 5.14 – Trajetórias efetuadas em outubro de 2019 (verde) e junho de 2020	

(magenta).....	76
Figura 5.15 – Aeronave CESSNA C210 (a), <i>smartphone</i> e AeroAntenna (b), offset entre antenas (c).....	77
Figura 5.16 – Trajetória do voo de 08 de maio de 2021.....	77
Figura 5.17 – <i>Smartphone</i> e antena GNSS 303L (a) e moto 4x4 (b).	78
Figura 5.18 – Trajetória terrestre efetuada na restinga em 30 de setembro de 2019.	78
Figura 5.19 – Veículo utilizado no levantamento terrestre (a), <i>smartphone</i> e antena no cockpit (b), offset entre antenas (c).	79
Figura 5.20 – Percorso realizado no levantamento terrestre em 26 de agosto de 2020. .	79
Figura 6.1 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> (a) e recetor geodésico (b), em 29 de junho de 2019. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	82
Figura 6.2 – Número de satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> e recetor geodésico, em 29 de junho de 2019.....	83
Figura 6.3 – SNR: <i>smartphone</i> E1 (a), L1 (c), E5a (e), L5 (g); recetor geodésico E1 (b), L1 (d), E5a (f), L5 (h).....	85
Figura 6.4 – Visibilidade de satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> (a, c) e recetor geodésico (b, d): 03 julho (a, b), 16 julho (c, d). (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	87
Figura 6.5 – Número de satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> e recetor geodésico: 03 julho (a), 16 julho (b).	88
Figura 6.7 – Número de satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> e recetor geodésico, em 18 de julho de 2020.....	89
Figura 6.8 – Visibilidade de satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> (a) e recetor geodésico (b), em 24 de julho de 2020. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	89
Figura 6.9 – Número de satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> e recetor geodésico, em 24 de julho de 2020.....	90
Figura 6.10 – SNR em 18 de Julho de 2020: <i>smartphone</i> E1 (a), L1 (c), E5a (e), L5 (g); recetor E1 (b), L1 (d), E5a (f), L5 (h).	92
Figura 6.11 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> (a, c) e recetor geodésico (b, d), em 21 de agosto de 2021 e 11 de janeiro de 2022. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência).....	94
Figura 6.12 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor geodésico, em 21 de agosto de 2021.....	95
Figura 6.13 – SNR <i>smartphone</i> e Alloy versus elevação, 21 de agosto de 2021: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).	96
Figura 6.14 – SNR <i>smartphone</i> para três satélites Galileo (vermelhos) e GPS (verdes): E1/L1 (a), E5a/L5 (b).....	96
Figura 6.15 – Visibilidade no <i>smartphone</i> A (a) e <i>smartphone</i> B (b), em 12 de fevereiro de 2021 no Teste 1. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	98
Figura 6.16 – Número de satélites no <i>smartphone</i> A e <i>smartphone</i> B, em 12 de fevereiro de 2021 no Teste 1.	98
Figura 6.17 – Visibilidade no <i>smartphone</i> A (a) e recetor Alloy (b), em 25 de fevereiro de 2021 no Teste 2. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	99
Figura 6.18 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor Alloy, em 25 de fevereiro de 2021 no Teste 2.	99
Figura 6.19 – Visibilidade no <i>smartphone</i> A (a) e recetor Alloy (b), em 13 de março de 2021 no Teste 3. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	100
Figura 6.20 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor PolaRx5, em 13 de março de 2021 no Teste 3.	100
Figura 6.21 – Visibilidade no <i>smartphone</i> A (a) e recetor Alloy (b), em 18 de novembro de	

2021 no Teste 4. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	101
Figura 6.22 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor Alloy, em 18 de novembro de 2021 no Teste 4.	101
Figura 6.23 – Visibilidade no <i>smartphone</i> A (a) e recetor Alloy (b), em 19 de novembro de 2021 no Teste 5. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	102
Figura 6.24 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor Alloy, em 19 de novembro de 2021 no Teste 5.	102
Figura 6.25 – Visibilidade no <i>smartphone</i> A (a) e recetor Alloy (b), em 22 de novembro de 2021 no Teste 6. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	103
Figura 6.26 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor Alloy, em 22 de novembro de 2021 no Teste 6.	103
Figura 6.27 – SNR do <i>smartphone</i> A em modo voo ligado, 12 de fevereiro de 2021 (Teste 1): E1 (a), L1 (b), E5a (c), L5 (d).	105
Figura 6.28 – SNR do <i>smartphone</i> A em modo voo desligado, 12 de fevereiro de 2021 (Teste 1): E1 (a), L1 (b), E5a (c), L5 (d).	106
Figura 6.29 – SNR sinal Galileo, 13 de março de 2021 (Teste 3): <i>smartphone</i> E1 (a), E5a (c); PolaRx5 E1 (b), E5a (d).	107
Figura 6.30 – SNR sinal GPS, 13 de março de 2021 (Teste 3): <i>smartphone</i> L1 (a), L5 (c); PolaRx5 L1 (b), L5 (d).	107
Figura 6.31 – SNR <i>smartphone</i> e Alloy versus elevação, 18 de novembro de 2021 (Teste 4): E1/L1 (a), E5a/L5 (b).	108
Figura 6.32 – SNR <i>smartphone</i> e Alloy versus elevação, 19 de novembro de 2021 (Teste 5): E1/L1 (a), E5a/L5 (b).	108
Figura 6.33 – SNR <i>smartphone</i> e Alloy versus elevação, 22 de novembro de 2021 (Teste 6): E1/L1 (a), E5a/L5 (b).	108
Figura 6.34 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> (a) e recetor geodésico (b), em 04 de maio de 2021. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	111
Figura 6.35 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor geodésico, em 04 de maio de 2021.	111
Figura 6.36 – SNR <i>smartphone</i> e PolaRx5 versus elevação, 04 de maio de 2021: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).	112
Figura 6.37 – SNR no satélite E25 (vermelho) e G25 (verde), coordenadas Este (superior azul) e Norte (inferior azul): <i>smartphone</i> (a), PolaRx5 (b).	112
Figura 6.38 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> (a) e recetor geodésico (b), em 07 de outubro de 2019. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	114
Figura 6.39 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor geodésico, em 07 de outubro de 2019.	114
Figura 6.40 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> (a) e recetor geodésico (b), em 10 de junho de 2020. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	115
Figura 6.41 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor geodésico, em 10 de junho de 2020.	115
Figura 6.42 – SNR <i>smartphone</i> e PolaRx5 versus elevação, 07 de outubro de 2019: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).	116
Figura 6.43 – SNR <i>smartphone</i> e PolaRx5 versus elevação, 10 de junho de 2020: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).	117
Figura 6.44 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> (a) e recetor geodésico (b), em 08 de maio de 2021. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)	118
Figura 6.45 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor geodésico, em 08 de maio de	

2021.....	119
Figura 6.46 – SNR <i>smartphone</i> e PolaRx5 versus elevação, 08 de maio de 2021: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).....	119
Figura 6.47 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> (a) e recetor geodésico (b), em 30 de setembro de 2019. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência).....	120
Figura 6.48 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor geodésico, em 30 de setembro de 2019.	121
Figura 6.49 – SNR <i>smartphone</i> e NetR9 versus elevação, 30 de setembro de 2019: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).....	122
Figura 6.50 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no <i>smartphone</i> (a) e recetor geodésico (b), em 26 de agosto de 2020. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência).....	123
Figura 6.51 – Número de satélites no <i>smartphone</i> e recetor geodésico, em 26 de agosto de 2020.....	123
Figura 6.52 – SNR <i>smartphone</i> e PolaRx5 versus elevação, 26 de agosto de 2020: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).....	124
Figura 6.53 – Quebra do sinal L1 (a) em 2 satélites no <i>smartphone</i> após travessia do túnel.	124
Figura 6.54 – Valor médio da reflexão de sinais no <i>smartphone</i> (a) e recetores geodésicos (b).	127
Figura 6.55 – Reflexão de sinais em E1/L1 e E5a/L5, nos levantamentos estáticos: <i>smartphone</i> (a, c, e) e Alloy (b, d, f).	128
Figura 6.56 – Reflexão de sinais em E1/L1 e E5a/L5, nos levantamentos cinemáticos: E – hidrográfico, <i>smartphone</i> (a) e PolaRx5 (b); G – aéreo, <i>smartphone</i> (c) e PolaRx5 (d); I - terrestre, <i>smartphone</i> (e) e PolaRx5 (f).	129
Figura 7.1 – Erros obtidos nos pontos com o método fotogramétrico no levantamento A.	133
Figura 7.2 – Erros do <i>smartphone</i> em cada ponto nos teste: 1(a), 2(b) e 3(c) do levantamento B.	135
Figura 7.3 – Distribuição dos pontos de GNSS, das fotos e de referência do levantamento D.	137
Figura 7.4 – Marco do ponto 9 não definido no modelo (a) e marca do ponto 8 bem definido no modelo (b).....	138
Figura 7.5 – Erros nos pontos na observação GNSS (a) e no método fotogramétrico (b).	139
Figura 7.6 – Erros em Este e Norte para cada ponto por tempo de observação.....	141
Figura 7.7 – EMQ de todas soluções no <i>smartphone</i> do Teste 1.	142
Figura 7.8 – EMQ com o modo de voo ligado (a) e desligado (b) no <i>smartphone</i>	143
Figura 7.9 – EMQ nos <i>smartphones</i> A (a) e B (b).....	144
Figura 7.10 – EMQ das soluções Galileo (a) e GPS (b).....	145
Figura 7.11 – EMQ obtido no Teste 2.....	146
Figura 7.12 – EMQ das soluções do <i>smartphone</i> (a) e recetor geodésico (b) no Teste 3.	147
Figura 7.13 – EMQ obtido no Teste 4.....	148
Figura 7.14 – EMQ obtido no Teste 5.....	148
Figura 7.15 – EMQ obtido no Teste 6.....	149
Figura 7.16 – EMQ obtido no levantamento E hidrográfico, em modo diferencial.	152
Figura 7.17 – Resíduos no levantamento hidrográfico: E1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b); E5a no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).	153
Figura 7.18 – Resíduos no levantamento hidrográfico: L1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b); L5 no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).	154
Figura 7.19 – EMQ obtido no levantamento F aéreo, em modo diferencial.	155
Figura 7.20 – EMQ obtido no levantamento G aéreo, em modo diferencial.	158
Figura 7.21 – Resíduos no levantamento aéreo: E1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b), E5a no Mi8	

(c) e PolaRx5 (d).	159
Figura 7.22 – Resíduos no levantamento hidrográfico: L1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b), L5 no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).	160
Figura 7.23 – EMQ obtido no levantamento H terrestre, em modo diferencial.	161
Figura 7.24 – EMQ obtido no levantamento I terrestre, em modo diferencial.....	163
Figura 7.25 – Resíduos no levantamento terrestre: E1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b), E5a no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).	164
Figura 7.26 – Resíduos no levantamento terrestre: L1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b), L5 no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).	165
Figura A.1 – SNR em 03 de julho de 2020: <i>smartphone</i> E1 (a), L1 (c), E5a (e), L5 (g); recetor E1 (b), L1 (d), E5a (f), L5 (h).	181
Figura A.2 – SNR em 16 de julho de 2020: <i>smartphone</i> E1 (a), L1 (c), E5a (e), L5 (g); recetor E1 (b), L1 (d), E5a (f), L5 (h).	182
Figura A.3 – SNR em 24 de julho de 2020: <i>smartphone</i> E1 (a), L1 (c), E5a (e), L5 (g); recetor E1 (b), L1 (d), E5a (f), L5 (h).	183
Figura A.4 – SNR do <i>smartphone</i> B em modo voo ligado, 12 de fevereiro de 2021 (Teste 1): E1 (a), L1 (b), E5a (c), L5 (d).	183
Figura A.5 – SNR do <i>smartphone</i> B em modo voo desligado, 12 de fevereiro de 2021 (Teste 1): E1 (a), L1 (b), E5a (c), L5 (d).	184
Figura A.6 – SNR sinal Galileo, 25 de fevereiro de 2021 (Teste 2): <i>smartphone</i> E1 (a), E5a (c); Alloy E1 (b), E5a (d).....	184
Figura A.7 – SNR sinal GPS, 25 de fevereiro de 2021 (Teste 2): <i>smartphone</i> L1 (a), L5 (c); Alloy L1 (b), L5 (d).....	185

Lista de Abreviaturas

AltBOC	Alternate Binary Offset Carrier
ANTEX	Antenna Exchange Format
APDL	Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo
APP	Application
ARNS	Aeronautical Radio Navigation Service
ARP	Antena Reference Point
AS	Anti-spoofing
BeiDou	BeiDou Navigation Satellite System
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BOC _{cos}	Binary Offset Carrier, cosine-phased
bps	Bits per second
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BUPI	Balcão Único do Prédio
C/NAV	Commercial Navigation message
CAS1	Controlled Access Service 1
CAS2	Controlled Access Service 2
CDMA	Code Division Multiple Access
Chimera	Chips-Message Robust Authentication
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CNES	Centre National D'Etudes Spatiales
CORS	Continuously Operating Reference Stations
CS	Commercial Service
dBHz	Decibéis Hertz
DD	Diferenças-Duplas
DEM	Digital Elevation Model
DF	Dupla Frequência
DGT	Direção Geral Território
DOP	Dilution of Precision
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
EC	European Commission
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EMQ	Erro Médio Quadrático
EPN	EUREF Permanent Network
ERGNSS	Estaciones de Referencia GNSS
ESA	European Space Agency
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989
EUREF	European Reference Frame

EUSPA	European Union Agency for the Space Programm
Eurocontrol	Organização Europeia para a Segurança da Navegação Aérea
F/NAV	Freely accessible Navigation message
FCUP	Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FOG	Fiber-Optic Gyroscope
G/NAV	Governmental Navigation message
GAGAN	GPS Aided Geo Augmented Navigation system
Galileo	Sistema Global de Navegação por Satélite da Europa
GCC	Galileo Control Centers
GCS	Galileo Control Segment
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GILSC	Galileo Integrated Logistic Support Centre
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GMS	Galileo Mission Segment
GNSS	Global Navigation Satellites System
GRC	Galileo Reference Centre
GRC-MS	Galileo Reference Centre – Member States
GRSP	Geodetic Reference Service Provider
GSA	European GNSS Agency
GSC	European GNSS Service Centre
GSM	Global System for Mobile communications
GSMC	Galileo Security Monitoring Centre
GSS	Galileo Sensor Stations
GST	Galileo System Time
GSTI	GNSS Simulation and Testing Infrastructure
GTRF	Galileo Terrestrial Reference Frame
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
I/NAV	Integrity Navigation message
ICAO	European Geostationary International Civil Aviation Organization
ICL	International Conference on Localization
IFR	Instrument Flight Rules
IGP	Instituto Geográfico Português
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
ION	Institute of Navigation
IoT	Internet of Things
IRNSS	Indian Regional Navigational Satellite System
ISTA	Institute of Space Technology & Space Applications
ITRF	International Terrestrial Reference Frame

ITU	International Telecommunication Union
KML	Keyhole Markup Language
JLOC	Jammer Location
LHCP	Left Hand Circular Polarization
LiDAR	Light Detection and Ranging
LNA	Low Noise Amplifier
MBOC	Multiplexed Binary Offset Carrier
MEO	Medium Earth Orbit
MSAS	MTSAT Satellite Augmentation System
NAGUs	Notice Advisory to Galileo Users messages
NMEA	National Marine Electronics Association
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OAS	Open Access Service
OAUP	Observatório Astronómico da Universidade do Porto
OS	Galileo Open Service
OSAE	Ordem dos Solicitadores e dos Agentes de Execução
PCB	Printed Circuit Board
PDOP	Position (3D) Dilution of Precision
PIFA	Planar Inverted-F Antenna
PNT	Position, Navigation & Timing
POS	Position and Orientation System
PP	Point Positioning
ppm	Partes por milhão
PPP	Precise Point Positioning
PRS	Public Regulated Service
PVT	Position, Velocity & Time
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
ReNEP	Rede Nacional de Estações Permanentes
RHCP	Right Hand Circular Polarization
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RNSS	Radio Navigation Satellite Service
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime
RTK	Real Time Kinematic
SA	Selective Availability
SAR	Search and Rescue
SBAS	Satellite-based Augmentation Systems
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
SIG	Sistema de Informação Geográfica

SiNErGIC	Sistema Nacional de Exploração e Gestão de Informação Cadastral
SNAS	Satellite Navigation Augmentation System
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SoL	Safety of Life Service
SPP	Single Point Positioning
SPS	Standard Positioning Service
TDOP	Time Dilution of Precision
TEC	Total Electron Content
TESLA	Timed Efficient Streamed Loss-Tolerant Authentication
TICs	Tecnologias da Informação e Comunicação
TLS	Terrestrial Laser Scanner
TSP	Time Service Provider
TT&C	Telemetry, Tracking & Control
TTFF	Time To First Fix
ULS	Galileo UpLink Stations
UNAVCO	University NAVSTAR Consortium
UTC	Temps Universel Coordonné
VDOP	Vertical Dilution of Precision
VFR	Visual Flight Rules
WAAS	Wide Area Augmentation System
WiP	Work in Progress

1 Introdução

O posicionamento e navegação têm ao longo dos séculos sido fundamentais na dinâmica e evolução mundial. Com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de diferentes métodos ao longo dos tempos, as técnicas de posicionamento e navegação tiveram sempre como objetivo a obtenção de coordenadas materializadas em mapas. A curiosidade e, ao mesmo tempo, a necessidade do homem em representar a Terra, e poder usar essa informação em seu benefício, remonta a mais de 2 mil anos a.C., com o primeiro mapa-múndi conhecido a ser criado pelos babilónios. Depois disto o homem foi desenvolvendo estas representações com técnicas mais aprimoradas e precisas com a introdução de novas metodologias baseadas na evolução tecnológica, como são os casos dos satélites artificiais que permitem obter imagens de alta resolução ou um posicionamento e navegação de precisão através dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite, GNSS – sigla inglesa para “Global Navigation Satellite System”, ou ainda, num cenário terrestre, a exploração da cartografia móvel (“mobile mapping”), através da integração de imagens de alta resolução com medidas GNSS e dados de sensores inerciais. Tendo por base a exploração destas diferentes técnicas, este trabalho tem como desafio maior, a exploração de metodologias inovadoras de posicionamento com novos equipamentos como é o caso dos telemóveis “inteligentes”, usualmente referidos pelo termo técnico *smartphones*, nome pelo qual designaremos este equipamento ao longo deste trabalho, devido à sua popularidade e uso disseminado. A eficiência que estes equipamentos podem trazer em diversos contextos da georreferenciação, como, por exemplo, no Cadastro, assenta em quatro parâmetros: Portabilidade, Praticabilidade, Preço e Exatidão. O seu desenho e dimensões conferem ao *smartphone* uma portabilidade que poucos instrumentos podem alcançar, permitindo o seu transporte e uso em qualquer parte do mundo, independentemente do meio onde nos encontramos, seja este terrestre, aéreo ou marítimo. Ao mesmo tempo a sua praticabilidade resulta do seu fácil manuseamento pelo cidadão comum, através de aplicações relativamente simples de usar, quando comparado com equipamentos profissionais que exigem técnicos qualificados para a sua operação. Estes equipamentos profissionais caracterizam-se por terem um alto desempenho, mas, em contrapartida, por um custo elevado, o que muitas vezes cria dificuldades à sua aquisição. Neste aspeto o *smartphone* é um dispositivo com um preço muito mais baixo, podendo permitir o acesso a um número maior de equipamentos rentabilizando os trabalhos no campo com um maior número de equipas, diminuindo dessa forma o tempo de execução dos trabalhos com impacto direto na redução dos custos. A disponibilidade de diversos sensores, tais como recetor GNSS, sensores inerciais e câmaras de alta resolução, num único equipamento, permitem aos utilizadores a obtenção de informação georreferenciada de elevada exatidão.

A utilização, nos últimos anos, dos telemóveis como instrumento de posicionamento, com base no sistema GPS inicialmente e, mais recentemente, também nos outros sistemas GNSS, como por exemplo o Galileo, tornou-se quase universal, fornecendo serviços de Posicionamento, Navegação e Tempo (PNT) potenciadores de um vasto conjunto de novas aplicações com impacto na qualidade de vida das pessoas. Dentro deste universo, a comunidade científica é das que tem procurado explorar todo o potencial destes equipamentos, com especial realce para a exploração sinérgica de medidas GNSS, medidas inerciais e imagens adquiridas com os *smartphones*.

Com a introdução pela Google, em maio de 2016, do Android 7 para *smartphones* permitindo o acesso as medidas de código e de fase observáveis dos sistemas GNSS, os desafios aumentaram com a possibilidade de se obterem níveis de exatidão que, até então, só estavam ao alcance dos equipamentos GNSS de gama superior. Este passo veio confirmar a tese anteriormente sustentada por Pesyna et al. (2014), de que uma antena de um telemóvel podia fornecer medidas de código e fase do sinal L1 do GPS e permitir um posicionamento diferencial da ordem do centímetro. Entretanto, a isto juntou-se um outro evento que foi a introdução, pelos maiores fabricantes da indústria dos *smartphones*, do acesso aos sinais Galileo nos novos equipamentos, elevando ainda mais a qualidade da georreferenciação. Num trabalho da autoria de Groves & Adjrad (2017) demonstrou-se que o recurso aos sinais Galileo permite aumentar a exatidão posicional em ambientes urbanos e florestais, por serem menos sujeitos a interferências e reflexões, permitindo a receção de sinais mais fracos, o que constitui uma vantagem nas aplicações de “3D-mapping” nesses ambientes. Esse facto, aliado a uma nova capacidade decorrente da chegada ao mercado de *smartphones* equipados com o chip BCM47755 da Broadcom que permite acesso também à banda L5 para além da L1 (Broadcom, 2017), permitiu que sejam possíveis alcançar exatidões com dispositivos desta gama que até então só eram possíveis com equipamentos profissionais. O primeiro desta nova geração de dispositivos foi o Xiaomi Mi8, lançado no mercado em junho da 2018 e utilizado no âmbito deste trabalho, levando-nos a perspetivar uma verdadeira revolução no desenvolvimento de novas aplicações com este tipo de equipamentos. Com a utilização de duas frequências o efeito ionosférico, que é uma das maiores fontes de erro nas medidas GNSS usando recetores de frequência simples, pode ser eliminado, sendo ainda possível minimizar a reflexão de sinais e melhorar a resolução das ambiguidades da fase da portadora. No entanto, até ao presente, o acesso às medidas de código e fase de dupla-frequência, só é possível para os sistemas Galileo e GPS, já que para os outros dois sistemas, GLONASS e BeiDou, só a frequência L1 se encontra disponível. Por esse motivo, as medidas dessas duas constelações não foram usadas neste trabalho.

Por forma, a impulsionar as inovações decorrentes das potencialidades que um *smartphone*

com Galileo oferece, a Agência da União Europeia para o Programa Espacial (EUSPA - European Union Agency for the Space Programme), que tem como papel principal a dinamização da utilização do sistema Galileo, criou e coordena um grupo designado por GNSS Raw Measurements Task Force que integra várias universidades, organizações públicas e empresas GNSS, (EUSPA, 2020). Só em 2021 foram vendidos mais de 2 mil milhões de *smartphones* com Galileo (Costa, EUSPA, 2021), o que permite perspectivar não só aparecimento de novas aplicações que explorem o aumento de exatidão posicional atingido por um *smartphone*, mas também um extraordinário desenvolvimento da ciência cidadã com um enorme impacte no mapeamento e monitorização do planeta.

1.1 Estado da arte

Uma das mais valias dos *smartphones* assenta na capacidade de obtermos imagens de elevada resolução que, para além de permitirem a criação de uma base de dados fotográfica dos pontos observados, também permitem a exploração de métodos de fotogrametria terrestre para a obtenção de imagens ortorretificadas do terreno e, consequentemente, a obtenção de coordenadas desses pontos. A exploração destas metodologias pode trazer benefícios em diversos sectores de grande interesse socioeconómico. Em 2016 Contreras-Naranjo et al. (2016) referia que a produção em massa de dispositivos eletrónicos de consumo (mass market devices) disponibilizava um leque de produtos económicos, compactos e de alto desempenho, permitindo a investigadores, técnicos e também ao cidadão comum, desenvolver e explorar inúmeras aplicações, incluindo no âmbito da monitorização e diagnóstico no campo da saúde, com a utilização das câmaras de alta resolução coadjuvado por outros sensores. Nesse trabalho também é referido que todo esse potencial pode ser explorado noutras áreas da ciência, sendo, naturalmente, incontornável a sua utilização em deteção remota ou fotogrametria, permitindo a monitorização de infraestruturas ou do terreno em qualquer parte do planeta, devido à sua portabilidade, economia e exatidão posicional.

É neste contexto, de exploração da imagem, em conjunto com a capacidade na obtenção de coordenadas rigorosas, que surge a possibilidade de atualização de cadastro usando uma nova metodologia, eficiente e de menor custo, recorrendo a um *smartphone*, e a técnicas de fotogrametria terrestre, que surge a ideia deste trabalho em 2018. Já depois dessa data, em 2020, surgiu no mercado dos equipamentos topográficos de alto desempenho, o recetor GNSS RTK Leica GS18i (Leica Geosystems AG, 2020), onde a fusão de sensores GNSS, IMU e uma câmara, tornou possível georreferenciar pontos que não poderiam ser coordenados diretamente com um recetor GNSS, com exatidão centimétrica. Casella et al. (2021) mostram resultados com exatidões da ordem dos 6 cm, num tipo de georreferenciação que designaram por

“posicionamento visual”. No entanto, esse equipamento é bastante dispendioso, com um custo aproximadamente de 20 mil euros, um valor muito superior ao dos *smartphones* de dupla frequência, cujo custo ronda algumas centenas de euros, e permitem também o acesso a dados equivalentes aos sensores acima referidos, apesar da sua qualidade inferior, sobretudo no que diz respeito à antena GNSS utilizada. Os *smartphones*, permitem-nos registar um conjunto de medidas que podem ser explorados usando diferentes metodologias, quer baseadas na fusão de dados GNSS/IMU e imagem, ou de dados GNSS e imagem, em ambos os casos apoiados numa abordagem fotogramétrica na georreferenciação de pontos cadastrais, ou ainda em observações GNSS diretas nos pontos a georreferenciar.

Da avaliação do estado da arte que fizemos sobre o tema não foram encontrados estudos sobre a utilização de um *smartphone* num contexto de cadastro, com a literatura a mostra-nos referências a metodologias, algumas mais clássicas, enquanto usando tecnologias mais recentes, mas não *smartphones*. Jiao & Hurni (2021) resumiu as diferentes abordagens usadas no levantamento cadastral, que vão desde o uso de estações totais na recolha de dados no terreno, digitalização de cartas existentes, utilização de fotografias obtidas com técnicas fotogramétricas clássicas com imagens adquiridas a partir de aeronaves, que, mais recentemente, tem vindo a ser adquiridas com recurso a drones ou por satélite. O recurso a técnicas de varrimento laser LiDAR (Light Detection and Ranging) também é uma das abordagens usadas e que tal como na maioria das outras metodologias, exige meios técnicos avançados e com custos elevados. Como referido, a digitalização de cartografia existente, apesar de ser uma metodologia mais económica que pode servir de apoio em situações em que não há outra informação, é de utilidade limitada uma vez que, na maioria dos casos faz, uso de bases cartográficas desatualizadas. Ribera et al. (2022) mostraram que a utilização de cartas cadastrais antigas pode constituir um apoio na atualização cadastral em Espanha. No campo da utilização de drones na recolha de informação cadastral georreferenciada, Zrinjski et al. (2019) apresentaram um estudo analisando a exatidão e aplicabilidade, tendo outros autores, como Cienciála et al. (2021), Šafář et al. (2021) Kysel & Hudecova (2021), também abordado a sua utilização em levantamentos cadastrais. No que respeita ao uso de sistemas LiDAR terrestres ou aéreos, em 2016 Koeva & Elberink (2016) avançavam com a importância que estes sistemas podem ter na atualização do cadastro. Mais recentemente, He & Li (2020) investigaram a aplicação destas técnicas a partir de plataformas terrestres e aéreas, usando um drone, para levantamentos cadastrais, obtendo exatidões na ordem dos 5 cm. Chio & Hou (2021) realizaram trabalhos terrestres obtendo erros de 15 cm por comparação com pontos de referência coordenados com estação total. Gura & Nedyakina (2021) apresentaram o varrimento laser terrestre como a melhor técnica geodésica para a obtenção de dados cadastrais.

Nenhum dos trabalhos até agora publicados recorrem a técnicas de fotogrametria terrestre para efetuar levantamentos cadastrais usando um *smartphone*. Todos eles recorrem a técnicas bem mais dispendiosas, embora eficazes. No entanto existem diversos trabalhos de autores que procuraram tirar partido das capacidades dos *smartphones* através destas técnicas com outros fins. No contexto da fotogrametria terrestre com recurso a *smartphones*, Niederheiser et al. (2016) referem que esta técnica é uma abordagem relativamente barata, intuitiva e eficaz na modelação 3D, recaindo o seu estudo na modelação de escarpas comparando diferentes sensores, entre eles alguns de baixo custo como o *smartphone*, e softwares. Wróżyński et al. (2017) desenvolveram um estudo para mostrar que equipamentos usados no quotidiano como uma câmara fotográfica digital e um *smartphone* podem ser usados para fazer levantamentos de aterros através da recolha de imagens para a criação de nuvens de pontos e subsequente geração de modelos 3D, permitindo a medição de volumes. Num contexto de avaliação da dinâmica costeira Jaud et al. (2019) usaram três *smartphones* e uma câmara para modelação topográfica de uma praia de areia e de arribas por técnicas fotogramétricas terrestres. Como referência foram usados os dados obtidos com um Laser de varrimento - “Terrestrial Laser Scanner” (TLS), tendo obtido erros médios e desvios inferiores a 3 e a 22 centímetros, respetivamente. Dabove et al. (2019) analisaram o desempenho de um *smartphone* numa abordagem de fotogrametria terrestre para a obtenção de informação 3D de uma caverna, que geralmente é efectuada por levantamentos topográficos clássicos usando estações totais ou, mais recentemente, usando o TLS. Tavani et al. (2020) realizaram um estudo sobre a utilização de imagens de um *smartphone*, em combinação com os dados fornecidos pelos sensores inerciais e GNSS, para orientar e georreferenciar as imagens de uma escarpa, tendo obtido erros na ordem do centímetro para o posicionamento GNSS diferencial, com tempos de observação em modo estático de mais de 20 minutos, e na ordem da dezena de centímetros com tempos de observação inferiores a 10 minutos. Tungol et al. (2021) propuseram o uso de *smartphone* para a monitorização da fragmentação de rochas e minerais resultantes da detonação de explosivos em explorações mineiras, usando as imagens, sem pontos de controlo no terreno. Para a georreferenciação das imagens, foram usadas as coordenadas obtidas em modo absoluto pelo *smartphone* aquando da aquisição das respetivas imagens, permitindo exatidões da ordem do metro ou pior. Woo et al. (2021) investigaram a possibilidade do uso de imagens do *smartphone* na determinação das dimensões dos troncos de árvores através de diferentes algoritmos, obtendo erros inferiores a 10 cm.

A identificação de estudos sobre o desempenho GNSS em posicionamento estático ou cinemático com *smartphones* também foi efetuada, em primeiro lugar pela necessidade de obtermos um posicionamento rigoroso como base do nosso método indireto de medição de coordenadas por técnicas fotogramétricas. Em segundo, devido às possibilidades de

exploração de outras aplicações com vantagens na obtenção direta de coordenadas através da exploração das capacidades GNSS de um *smartphone*, e que também se tornou motivo de investigação neste trabalho. Nos trabalhos analisados não foram encontradas as novas abordagens que introduzimos na metodologia de posicionamento com recurso a *smartphones*. No âmbito do desempenho GNSS em *smartphones*, com alguns autores a focarem-se nos novos sinais do sistema Galileo, foram realizados estudos onde se avaliaram aspetos que caracterizam a eficiência posicional e de navegação dos dispositivos, como a intensidade do sinal, a reflexão de sinais e o erro posicional. Na fase inicial deste trabalho ainda não existia um grande leque de estudos, destacando-se dois relativos aos trabalhos de Moisés Navarro-Gallardo et al. (2017) e de Gabriele Pirazzi et al. (2017), apresentados na conferência do Institute of Navigation, ION GNSS+ 2017. No caso dos primeiros autores, estes demonstraram as possibilidades de exploração GNSS usando os *smartphones* com Android 7, comparando resultados de diferentes soluções de PVT (Position, Velocity, Time) e desenvolvendo um aplicativo para obter acesso a todas as informações de localização disponíveis no Android, como a mensagem navegação, informações do relógio e medidas GNSS brutas. A avaliação da qualidade das medidas e a comparação relativa entre as diferentes constelações GNSS, com ênfase no Galileo, também fizeram parte desse estudo. Já Pirazzi et al. (2017) apresentaram um estudo sobre a análise da exatidão, a disponibilidade e a qualidade dos dados bruto, e dos algoritmos de posicionamento preciso aplicados a dados Galileo e GPS de *smartphones*, concluindo que estes poderiam alcançar exatidões decimétricas em modo estático e submétrica quando usado em modo cinemático em cenários urbanos.

No entanto, nos últimos anos surgiu um número maior de trabalhos sobre este tema, com investigadores a explorarem as potencialidades GNSS em *smartphones*. A GSA (European GNSS Agency), denominada por EUSPA desde Abril 2021 (European Union Agency for the Space Programme) tem sido a grande responsável por promover o uso do sistema Galileo e também a exploração do potencial dos *smartphones* para posicionamento de alta exatidão, relatando no “White Paper on using GNSS Raw Measurements on Android devices” (EUSPA, 2017), resultados de observações cinemáticas com exatidões de 0,90 m e 0,62 m, respetivamente para as componentes horizontal e vertical, com um nível de confiança de 68% (um-sigma), usando a combinação Galileo+GPS de frequência única em PPP (Posicionamento de Ponto Preciso). O CNES (Centre National d’Études Spatiales, 2021), apresentou por Laurichesse et al. (2017) novas aplicações para PPP em *smartphones*, nomeadamente um conversor para o formato RTCM, permitindo enviar, a partir de um *smartphone*, as medidas GNSS (código, fase, Doppler) para um “caster”, possibilitando assim aos utilizadores usarem softwares de posicionamento compatíveis, como o RTKLib (T.TAKASU, 2018) ou o BKG Ntrip Client (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2021).

As empresas FLAMINGO (2017) e Geo++ GmH (2018) criaram aplicações para extrair medidas brutas GNSS de *smartphones* nas bandas L1 e L5. A Google também criou a ferramenta GnsLogger para analisar e registrar dados GNSS destes dispositivos.

Wu et al. (2019) apresentaram estudos do desempenho do posicionamento GNSS, em modo estático e cinemático, usando um *smartphone* de dupla frequência, e comparando com os resultados obtidos com receptores geodésicos, reportando erros menores do que 22 cm em estático, nas coordenadas este, norte e altitude, enquanto que em modo cinemático os erros foram da ordem dos 5 metros. As soluções foram calculadas usando a abordagem PPP (Precise Point Positioning). M. Fortunato et al. (2019) obtiveram valores, para os erros de posicionamento com um *smartphone*, em torno de 1 e 2 metros EMQ (Erro Médio Quadrático) usando as técnicas RTK (Real Time Kinematic) e PPP em modo cinemático, e de cerca de 2,8 metros em modo de posicionamento absoluto. Yan et al. (2019) exploraram o desempenho da integração dos sensores IMU (Inertial Measurement Unit) de baixo custo e dos dados GNSS de um *smartphone* de dupla frequência, tendo obtido no posicionamento um EMQ da ordem dos 20 cm na comparação com as soluções integradas GPS/IMU de um receptor GPS de dupla frequência e uma unidade de inercial de médio desempenho (tactical grade). Noutro estudo, os mesmos autores, Yan et al. (2020), apresentaram resultados baseados em soluções obtidas usando exclusivamente medidas GNSS reportando erros de 10 a 50 cm, respetivamente, para *smartphones* de frequência dupla e de frequência simples, em posicionamento relativo. Chiang et al. (2020) propuseram uma fusão de dados de três sensores, GNSS, IMU e câmaras, que equipam os *smartphone* para melhorar o desempenho da navegação terrestre em ambientes difíceis, obtendo erros na ordem dos 4 metros nas coordenadas horizontais e dos 9 metros na componente vertical, em posicionamento absoluto. Uradziński & Bakula (2020) obtiveram exatidões de 5 cm, para posicionamento GPS em modo estático, usando uma estação de referência a poucos quilómetros de distância do *smartphone*, com um tempo de levantamento de cerca de uma hora, obtendo, para tempos de observação mais curtos exatidões também centimétricas. Critchley-Marrows et al. (2020) apresentaram erros de 33 cm na componente horizontal, e de 67 cm na componente vertical, usando um *smartphone* de dupla frequência em observações estáticas usando uma abordagem PPP. Também numa abordagem PPP, Wang et al. (2021) obtiveram um EMQ de 20 cm nas coordenadas ENU, em modo estático, e de 1 metro em modo cinemático, usando *smartphones*. Usando um *smartphone*, com acesso a medidas GPS em L1 Paziewski et al. (2021) apresentaram resultados soluções com um desvio padrão em torno de 40 cm nas soluções flutuantes e abaixo de 10 cm nas soluções fixas, em posicionamento relativo, em modo estático, usando uma linha de base muito pequena. Shinghal & Bisnath (2021) obtiveram resultados com um *smartphone* em posicionamento PPP e RTK com exatidões na ordem dos 20 cm e 7 metros, respetivamente, em modo estático e cinemático. Robustelli et al. (2021) realizaram testes para avaliar a qualidade das observações, e o

desempenho do posicionamento GNSS em modo absoluto, com recurso a dupla frequência e a frequência simples, obtendo um valor da ordem dos 3 metros para o EMQ na componente horizontal. Liu et al. (2021) apresentaram resultados para posicionamento PPP estático, aplicando um modelo de correção ionosférica regional, conseguindo obter erros no plano de 75 cm e em vertical da ordem de 1 metro, usando diferentes *smartphones*. Devido aos poucos satélites Galileo visíveis, só usaram no processamento observações dos outros três sistemas concorrentes, GPS, GLONASS e BeiDou, Sharma et al. (2021) analisaram erros associados às antenas dos *smartphones* no posicionamento GNSS em modo estático e cinemático com base em dispositivos com acesso às medidas Galileo e GPS. Recorrendo a técnicas RTK, posicionamento absoluto e integração com sensores inerciais, concluíram que os erros podem atingir alguns centímetros. Mais recentemente, Zangenehnejad & Gao (2021) publicaram um trabalho sobre as oportunidades e perspetivas que o uso das capacidades GNSS dos *smartphones* abrem em diferentes áreas tais como, a cartografia, a navegação, o cadastro bem como numa ampla gama de trabalhos que necessitem de uma georreferenciação rigorosa. Tendo concluído, que apesar das limitações na obtenção de altas exatidões devido à sua baixa gama, os diversos métodos e algoritmos que têm vindo a ser explorados em torno dos *smartphones*, permitirão melhores resultados no futuro.

1.2 Motivação e contributos inovadores

Neste momento duas questões se podem colocar, “Porquê o Cadastro?” e “Qual o contributo inovador?” Para darmos resposta a estas questões é importante primeiro referir que se procurou um tema através do qual se pudesse dar um contributo para resolver problemas pertinentes para a nossa sociedade. O cadastro é um tema que claramente se enquadra neste cenário devido ao seu grande impacte socioeconómico para um país, nomeadamente no planeamento e ordenamento do território. Este planeamento e ordenamento podem ser determinantes para acautelar situações graves como as que, no nosso país, conduziram aos trágicos incêndios de 2017. De facto, para a definição de estratégias para a preservação e conservação ambiental, para a implementação de políticas agrícolas e florestais, e também na definição da política fiscal, é essencial ter o cadastro atualizado. A atualização de cadastro tem sido uma preocupação de sucessivos governos, no entanto esta tarefa não tem sido fácil, em parte devido às dificuldades que um levantamento georreferenciado de vastas áreas de terrenos implica em termos de custos. Estes custos são sobretudo devidos aos elevados valores de aquisição dos equipamentos usados para o levantamento rigoroso, bem como dos tempos de execução. A componente financeira leva a que muitas das vezes, não seja possível ter a quantidade desejável de dispositivos para usar no terreno, restringindo dessa forma a quantidade de

equipas no campo aumentando assim a duração dos trabalhos no campo.

É justamente nesse ponto que este trabalho procura dar um contributo inovador propondo a implementação de soluções que permitam uma exploração de técnicas eficientes, e mais económicas, em resposta aos requisitos dos levantamentos cadastrais, nomeadamente no que concerne à exatidão do posicionamento e à capacidade de atualização periódica do cadastro. Esse contributo resulta na implementação de uma metodologia que demonstra a exequibilidade do uso de um *smartphone* de dupla frequência para, com recurso à fotogrametria terrestre se georreferenciar pontos cadastrais. Essa metodologia apresenta múltiplas vantagens permitindo contornar algumas dificuldades que se encontram no terreno e que obrigam ao recurso a técnicas avançadas, mas com mais custos. Por exemplo, alguns pontos cadastrais encontram-se em locais onde um levantamento direto com uma antena GNSS não é possível, obrigando a um levantamento com um taqueómetro eletrónico. Este processo pode ser substituído pela aquisição, pelo *smartphone*, de um conjunto de imagens de elevada resolução, a partir de locais onde podemos visar os pontos cadastrais e ao mesmo tempo obter um posicionamento de rigor decimétrico ou até centimétrico que, como acima referido, é possível com um dispositivo móvel desta natureza. Com as fotografias georreferenciadas será possível gerar uma nuvem de pontos e modelos 3D, estando então reunidas condições para se extrair de uma forma indireta as coordenadas dos pontos cadastrais. Esta abordagem tem a vantagem de, ao mesmo tempo, ficarmos com um suporte visual dos pontos e de parte do terreno, que poderá ser muito útil como memória visual em futuras identificações dos pontos. Este processo com o *smartphone* nunca foi explorado num contexto de trabalho cadastral e o seu carácter inovador resulta também da possibilidade de utilização deste equipamento em medições diretas nos pontos cadastrais, como se tratasse de um recetor GNSS geodésico. Podemos assim tirar partido da possibilidade de usar um *smartphone* na obtenção de coordenadas por técnicas de levantamento GNSS.

Para além da vantagem do uso de *smartphones* para levantamento cadastral, pelo seu baixo custo, é também de sublinhar a eficiência associada à sua portabilidade, atendendo a que pode ser levado, e utilizado, em qualquer lado sem dificuldade, tendo um modo de operação bastante prático, e acessível ao cidadão comum, não obrigando necessariamente ao recurso a técnicos especializados, para a obtenção de resultados rigorosos.

Mas a exploração em topografia e geodesia destas novas ferramentas tecnológicas não se ficam só pelo cadastro predial e rústico. Se a importância da exploração dos *smartphones*, equipamentos de baixo custo e boa exatidão de posicionamento, é relevante na Europa, a sua utilização em locais remotos do globo, onde a menor disponibilidade de meios e redes de apoio geodésico têm deixado um vazio com décadas de atraso na produção de cartografia e cadastro

envolvendo grandes escalas (1: 5.000 ou maior) reveste-se ainda de maior relevância. Este facto levou-nos a pensar em testar o conceito num cenário remoto, onde as redes de estações permanentes GNSS são pouco densas, como em África ou na América Latina, ou quase inexistentes, como nas zonas polares do Ártico e da Antártida, com as estações de referência a situarem-se a centenas de quilómetros dos locais que interessa mapear em detalhe. A pensar nisto foi realizado um estudo de avaliação da exatidão do posicionamento relativo com *smartphone* apoiado em linhas de base longas com o objetivo de avaliar a possibilidade de obtenção de exatidões que satisfaçam os padrões de referência dos levantamentos a grandes escalas.

Até agora falamos do potencial de um *smartphone* para a execução de levantamentos topográficos e cadastrais em modo estático, no entanto há potencial de exploração desta metodologia também em modo cinemático, o que nos motivou a avaliar as capacidades dos *smartphones* para posicionamento e navegação de plataformas móveis (navegação geodésica) e de veículos (navegação clássica). Para além dos veículos terrestres, também se avaliou o desempenho no posicionamento de uma embarcação e de uma aeronave, a pensar na sua aplicação num cenário de sondagens hidrográficas, ou de navegação e levantamentos aéreos.

1.3 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver novas metodologias na obtenção de posicionamento preciso a partir de imagens para atualização do cadastro, através da utilização de *smartphones* com acesso aos sinais do sistema Galileo e GPS. Sendo o cadastro um tema com grande importância em diversos sectores de grande relevância socioeconómica, nomeadamente o ordenamento e segurança do território, a introdução de novas práticas inovadoras e mais eficientes pretende contribuir para a agilização dos processos de georreferenciação e inventariação da propriedade, base fundamental na produção de cadastro. A capacidade de utilização de *smartphones* na obtenção de coordenadas GPS por códigos com as mensagens NMEA (National Marine Electronics Association) com exatidão não inferiores ao metro não é novidade, mas a sua obtenção com exatidão centimétrica ou decimétrica com recurso às fases da portadora, em conjunto com os novos sinais Galileo, coloca um novo cenário.

Se a isto, associarmos a capacidade dos *smartphones* para a captura de imagens de elevada resolução, ficamos em posição de explorar métodos de fotogrametria terrestre que facilitam a obtenção de imagens ortorretificadas do terreno. Se a captura das imagens está relativamente facilitada, já a obtenção de soluções rigorosas, sejam resultados do posicionamento baseado

no sistema Galileo, GPS ou na combinação dos dois, coloca desafios mais exigentes, tornando-se essencial aceder aos dados em bruto do código e da fase dos novos sinais transmitidos pelos satélites Galileo nas bandas E1 e E5a, e aos sinais nas bandas L1 e L5 do sistema GPS. A exploração destes sinais, disponibilizados por alguns *smartphones*, em diferentes cenários de levantamento estático e cinemático, exige um trabalho exaustivo de forma a podermos explorar todo o potencial destes dispositivos em diferentes contextos e exigências de rigor posicional.

Num contexto de aquisição de informação cadastral, em que muitas vezes os pontos a recolher se encontram obstruídos por paredes de edifícios ou vegetação, o posicionamento GNSS torna-se impossível ou pouco rigoroso devido à degradação do sinal. Neste caso a combinação de soluções GNSS rigorosas, obtidas a partir das observações GNSS com o *smartphone*, com as imagens recolhidas pelo mesmo *smartphone*, a partir de posições em locais não obstruídos, tem a vantagem de permitir obter soluções fiáveis e de baixo custo. As imagens para além de essenciais para o processamento fotogramétrico, tendo em vista a obtenção de coordenadas dos pontos cadastrais observados, são também uma mais valia, permitindo a obtenção de informação visual que facilitará o trabalho de caracterização dos prédios levantados. Este método também tem a vantagem de ser uma técnica não invasiva, permitindo uma resposta a situações de impossibilidade de acesso a pontos inacessíveis, quer pela morfologia ou condições naturais do terreno, quer nos casos de impossibilidade de obter permissão no acesso através das propriedades de terceiros. No entanto sempre que possível a observação direta de um ponto cadastral com o telemóvel será um processo muito mais rápido por não ser necessário um conjunto de pontos alimentar o processamento fotogramétrico, sendo também um objetivo.

As dificuldades de natureza financeira são muitas vezes um entrave à realização de projetos e trabalhos, associados ao custo dos equipamentos de georreferenciação. O recurso a *smartphones*, com custos da ordem das centenas de euros, pode ser muito útil também em trabalhos de cartografia, hidrografia, SIG e muitas outras aplicações baseadas em georreferenciação. A pensar nestas possibilidades, foram explorados outros levantamentos em modo estático e cinemático.

O posicionamento relativo de pontos estáticos usando estações de referência com linhas de base longas, foi uma das aplicações testadas. Os resultados obtidos deram lugar à publicação de um artigo na revista *Sensors*, na seção “Internet of Things” (IoT), intitulado “Relative positioning in remote areas using a GNSS dual frequency Smartphone”, Magalhães et al. (2021). Neste artigo mostrámos que é possível obter exatidões melhores que 30 cm em linhas de base superiores a 100 km, usando soluções obtidas com o sistema Galileo e GPS de forma individual ou na sua combinação Galileo+GPS. Para avaliar o posicionamento em modo

cinemático foram desenvolvidos estudos usando plataformas terrestres, marítimas e aéreas. Alguns resultados obtidos foram objeto do trabalho intitulado “Assessing Galileo Positioning Using a Smartphone in an Airborne Platform”, (Magalhães et al. (2021)) apresentado na conferência ICL-GNSS 2021, bem como serviram de base à preparação do artigo “Terrestrial, maritime and aerial kinematic positioning with a dual-frequency *smartphone*”, onde é avaliado o desempenho do posicionamento cinemático com o *smartphone* nos três ambientes e que se encontra em fase de ser submetido no jornal *Sensors*. Nos subcapítulos 7.3.1, 7.3.3 e 7.3.5 encontramos os resultados obtidos, respetivamente, nos trabalhos em ambiente fluvial, aéreo e terrestre.

1.4 Estrutura

Esta tese encontra-se estruturada em oito capítulos. Neste primeiro capítulo para além de uma introdução geral sobre o tema em estudo, e o estado da arte, também são apresentados os motivos que nos levaram à exploração deste tema e os benefícios que o seu carácter inovador pode introduzir no contexto do Cadastro e não só, assim como o objetivo proposto.

No segundo capítulo encontramos conceitos relacionados com o Cadastro e as técnicas de obtenção de modelos 3D do terreno com integração de dados GNSS e imagens adquiridas com *smartphones*.

No terceiro capítulo é apresentada a temática do posicionamento GNSS com recurso a *smartphones*, referindo-se às características destes equipamentos e também de receptores geodésicos, incluindo as antenas. Complementarmente são descritos os sistemas GNSS atualmente disponíveis, em especial o sistema Galileo, com referência aos tipos de erros que afetam as observações.

No quarto capítulo são apresentadas as metodologias desenvolvidas neste trabalho, e descritas as técnicas mais adequadas às observações com o *smartphone* de forma indireta e direta, assim como um resumo dos equipamentos e softwares utilizados.

No capítulo cinco apresenta-se a descrição dos diversos trabalhos realizados em cenários reais, distribuídos por três subcapítulos. Um primeiro sobre os trabalhos de posicionamento de pontos cadastrais pela técnica fotogramétrica, ou seja, a metodologia indireta e o recurso à medição direta. O segundo subcapítulo descrevendo os testes realizados em posicionamento estático, em particular na utilização de estações de referência remotas. O terceiro subcapítulo é dedicado aos levantamentos em modo cinemático, realizados em três diferentes ambientes, respetivamente, fluvial, aéreo e terrestre.

No capítulo seis, que se reveste de grande importância devido às especificidades dos *smartphones*, apresenta-se uma análise aos sinais dos sistemas Galileo e GPS e características das respetivas medidas registadas com o *smartphone*, avaliando em particular a intensidade do sinal, a reflexão de sinais e a geometria dos satélites observados.

No sétimo capítulo são apresentados os resultados que constituem os grandes indicadores do potencial inovador dos métodos implementados. Este são apresentados através de gráficos e tabelas com as análises estatísticas, permitindo avaliar o grau de exatidão que o um *smartphone* pode alcançar.

No oitavo e último capítulo, são apresentadas as conclusões e as perspetivas futuras da exploração das técnicas e métodos apresentados.

2 Utilizando os *smartphones* em Cadastro

O Cadastro Geométrico da Propriedade Rústica (CGPR), é uma ferramenta essencial na gestão e ordenamento dos prédios de um país, e ainda como gerador de mais-valias fiscais, daí a necessidade do conhecimento das suas localizações e limites. O cadastro predial moderno caracteriza-se pela utilização de novas tecnologias de uma forma transversal a todo o processo, desde a sua fase inicial de levantamentos no terreno, passando pelo processamento dos dados, até à forma de consulta dos produtos por parte dos utilizadores. No entanto este processo tem-se revelado ser bastante moroso e sobretudo dispendioso. Os custos elevados começam logo na fase de obtenção rigorosa de informação georreferenciada no terreno, que é realizada com recurso a equipamentos de custo elevado, como os recetores geodésicos GNSS ou os equipamentos mais tradicionais como as estações totais e também na necessidade de equipas de técnicos qualificados. Apesar dos esforços nos finais dos anos 90 na informatização do Cadastro Geométrico da Propriedade Rústica (CGPR) pelo então Instituto Geográfico Português (IGP) o cadastro ainda continua a ser um problema: somente metade da área de Portugal continental se encontra coberta, como podemos ver na Figura 2.1 (a) (DGT - Direção-Geral Território, 2021), estimando-se ser necessária a identificação de mais de 17 milhões de prédios no território (Diário da República, 2013), o que terá custos de milhões de euros. Um valor na ordem dos 700 milhões de euros foi previsto pelo Sistema Nacional de Exploração e Gestão de Informação Cadastral (SiNErGIC) para levar a cabo o projeto de Cadastro Predial Experimental. Com estes custos tão avultados a execução do projeto ficou-se por sete municípios piloto, dois na região Norte em Paredes e Penafiel, dois na região Centro em Oliveira do Hospital e Seia, e três na região Sul em São Brás de Alportel, Loulé e Tavira.

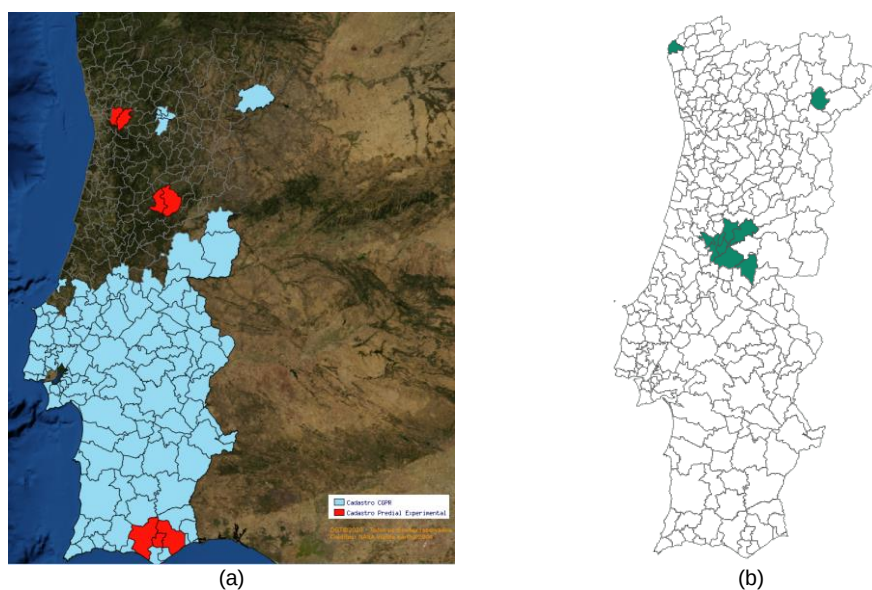


Figura 2.1 - CGPR em 2021 (a) e Municípios iniciais do projeto BUPi (b).

Com os trágicos incêndios florestais ocorridos no verão e outono do ano de 2017 na região centro do país reforçou-se o sentimento da grande necessidade de existência de informação cadastral, tendo surgido um novo projeto piloto denominado por Balcão Único do Prédio (BUPi) (2021) que consiste numa nova plataforma que possibilita a identificação dos proprietários das áreas em risco de incêndio e a prevenção da incidência de fogos em defesa do meio ambiente, dos bens, e da vida. Trata-se de um sistema de informação cadastral simplificado que inicialmente teve 10 municípios, Alfândega da Fé, Caminha, Castanheira de Pera, Figueiró dos Vinhos, Góis, Pampilhosa da Serra, Pedrógão Grande, Penela, Proença-a-Nova e Sertão, Figura 2.1 (b), com recolha de informação georreferenciada simplificada da localização e dos limites dos prédios. A configuração geoespacial dos prédios é definida pela RGG (Representação Gráfica Georreferenciada), podendo ser realizada de três formas como indicado no manual do utilizador BUPi. Pelo desenho do polígono que define o prédio sobre o mapa digital disponibilizado no site online BUPi ou submetendo as coordenadas das extremas do prédio levantadas no terreno com o vulgarmente designado levantamento GPS, ou ainda, submetendo um ficheiro KML (ou num dos outros formatos aceites Shape; Gpx; Igc; TopoJSON ou GeoJSON), com o polígono desenhado previamente no Google Earth Pro. Neste novo projeto cadastral, o recurso ao uso das novas tecnologias de posicionamento e também das TICs (Tecnologias da Informação e Comunicação), permite tornar mais eficiente todo o processo, desde a aquisição de dados, à posterior organização e à consulta da informação por parte de serviços responsáveis, bem como por diferentes entidades, incluindo o público em geral. É no contexto da aquisição de dados que no manual acima referido é colocada a questão “Posso usar alguma APP GPS de um *smartphone* para me ajudar a localizar o terreno?”. Este trabalho procura dar uma resposta a esta questão, mas indo mais além do que a exatidão métrica possível em posicionamento absoluto com este equipamento.

A Ordem dos Solicitadores e dos Agentes de Execução (antiga Câmara dos Solicitadores) também lançou em 2011 um serviço de identificação, descrição e caracterização dos prédios denominado por Geopredial (OSAE, 2021). Este serviço é realizado por solicitadores certificados com o objetivo dar resposta às necessidades dos proprietários na identificação das suas propriedades de forma rápida e económica. A georreferenciação precisa dos limites das propriedades através deste serviço é realizada por técnicas de levantamento GNSS com tempos de observação entre o meio minuto e os três minutos, dependendo das condições de visibilidade ou com o recurso a levantamentos topográficos, em três classes de exatidão (A, B e C), com a classe A de elevada exatidão a obrigar a uma maior exigência posicional que não pode ultrapassar um erro de 25 cm sendo sobretudo aplicada nos casos dos prédios urbanos. A classe B considerada de alta exatidão permite erros máximos até 85 cm, sendo realizada por observação GNSS em prédios urbanos e rústicos, mas não se aplica em prédios florestais. A

classe C tem uma exatidão base que pode atingir os 2 metros de erro sendo empregue em todos tipos de prédios mesmo em contexto florestal.

É a pensar em qualquer um dos serviços de cadastro acima referidos, que este trabalho tem como desafio maior a exploração de numa técnica inovadora, prática e precisa de georreferenciação com recurso às capacidades GNSS de um *smartphone*, sobretudo tirando partido das vantagens da dupla frequência do sistema Galileo seja a observação direta dos pontos por técnicas GNSS como as que habitualmente são empregues com recetores profissionais, obtendo dessa forma as coordenadas desses pontos ou de forma indireta por métodos fotogramétricos com a captura de imagens de alta resolução e a geração de modelos 3D onde podemos extrair as coordenadas. Ao mesmo tempo, o baixo custo destes equipamentos, na ordem das centenas de euros, permite poupanças muito significativas em relação aos equipamentos profissionais com custos muito superiores, podendo ter um grande impacto na eficiência dos trabalhos, logo à partida com a redução de custos permitindo dessa forma um aumento de disponibilidade financeira para a aquisição de um maior número de equipamentos, e a constituição de equipas mais numerosas de técnicos para a realização dos levantamentos.

2.1 Definições em cadastro

A demarcação dos prédios, a cartografia de suporte, a aquisição de dados cadastrais, os modelos de documentos e formulários, o sistema de referência, o enquadramento legal, as estruturas e conteúdos de dados são conceitos que caracterizam o cadastro dos prédios, sejam estes rústicos, urbanos ou florestais. No âmbito deste trabalho é importante revermos alguns conceitos mais relevantes que encontramos no documento das Normas e Especificações Técnicas – Delimitação, Demarcação e Qualidade dos Dados (Direção de Serviços de Informação Cadastral – DGT, 2021).

O Cadastro Predial é definido como um conjunto de dados que caracterizam e identificam os prédios cadastrados.

Um Prédio é definido como sendo uma porção delimitada do solo legalmente autonomizada, abrangendo as águas, plantações, edifício e construções de qualquer natureza existentes de forma permanente.

A Estrema é uma linha delimitadora imaginária, mas que poderá estar materializada no terreno por muros, sebes e outras construções como um talude ou elementos naturais como a margem de um rio, definindo a geometria de um prédio é através da sua representação cartográfica com

uma linha poligonal unindo as suas extremas definidas por pontos cadastrais materializados por marcos ou marcas de propriedade (Figura 2.2).

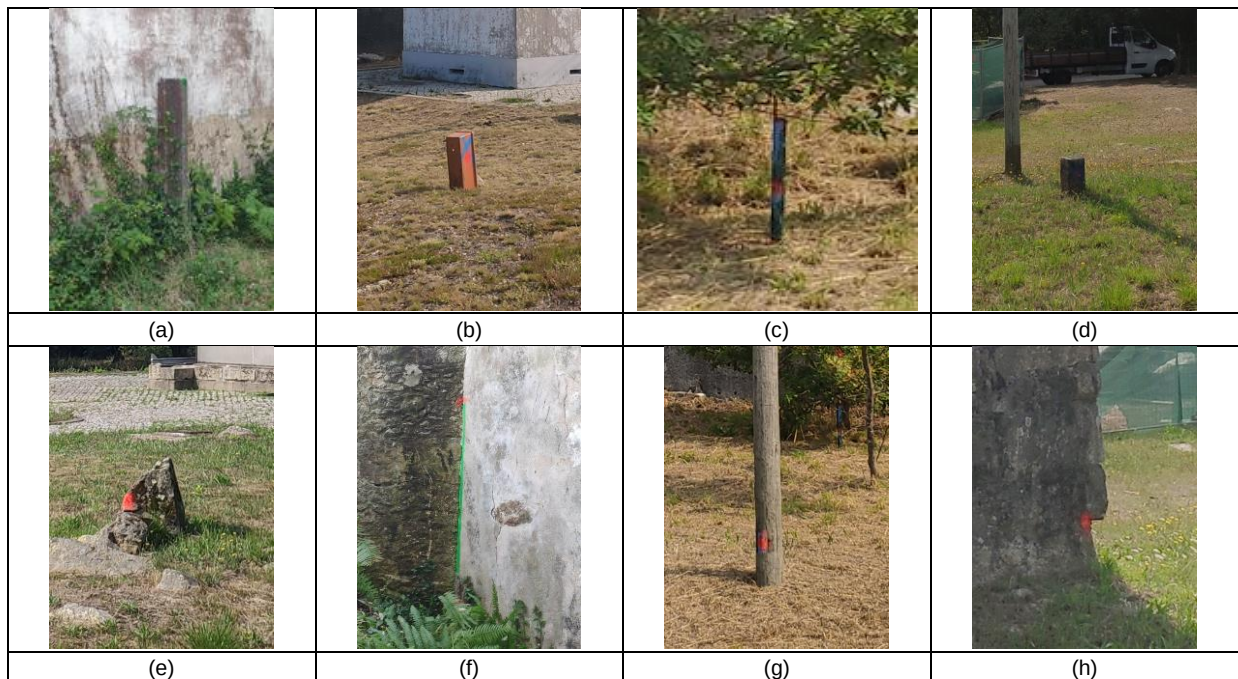


Figura 2.2 – Exemplos de pontos cadastrais: marcos de propriedade (a, b, c, d) e marcas de propriedade (e, f, g, h).

O Ponto Cadastral define-se como um ponto que foi coordenado para definir a posição e a geometria de uma entidade geográfica do cadastro predial, e encontram-se sinalizados no terreno por marcos, pedras, marcas e inscrições.

O Ponto de Estrema é um ponto que coincide com o limite de prédio, mas que não se encontra materializado no terreno.

O Marco de propriedade é usado para delimitar os prédios que não possuem muros ou vedações e geralmente são de materiais resistentes como betão, pedra, alvenaria ou madeira, preferencialmente com dimensões de 30 cm por 15 cm de cor branca para sua fácil identificação, no entanto apesar do esforço que nos últimos anos se tem feito para uniformizar estes elementos, a realidade é na maioria dos casos muito diferente e podemos encontrar marcos de diversas formas, tamanhos e cores como os exemplos na Figura 2.2.

A Marca de propriedade é geralmente de materiais resistentes e devem ser fixadas quando não é possível colocar marcos ou quando existem construções como paredes, muros, rochas ou outras estruturas permanentes, podendo ser substituídas por pinturas de inscrições ou sinais, sendo normalmente uma prática muito habitual a simples marca pintada.

A Exatidão Posicional é definida pelo confronto entre as coordenadas dos pontos cadastrais e as correspondentes no terreno por um método rigoroso, devendo cumprir os seguintes dois

critérios em planimetria: apresentar um erro médio quadrático menor ou igual a 40 cm e 90% das amostras dos pontos não deverá ultrapassar os 60 cm.

O Sistema de Referência utilizado no cadastro é o adotado para o território nacional, estabelecido pela DGT (2021), no caso de Portugal Continental o PT-TM06/ETRS89 e na Região Autónoma da Madeira o sistema PTR08-UTM zona 28N/ITRF93, enquanto que na Região Autónoma dos Açores temos um sistema para o Grupo Ocidental, PTR08-UTM zona 25N /ITRF93 e outro sistema para o Grupo Central e Grupo Oriental, PTR08-UTM zona 26N/ITRF93.

2.2 Modelos 3D com *smartphones* em cadastro

Como referido anteriormente, o recurso a imagens para obter informação tridimensional com câmaras digitais dos telemóveis tem vindo a ser explorado em diferentes áreas com diferentes propósitos, mas no contexto do cadastro não foi encontrado nenhum estudo ou trabalho sobre a sua aplicabilidade. Para obter modelos 3D é necessário recorrer a técnicas e algoritmos, que até ao aparecimento dos *smartphones* se realizava com recurso a equipamentos bastante específicos na aquisição de imagens alta qualidade como na robótica, mas que com a evolução destes dispositivos levaram à sua exploração pela comunidade em geral na aquisição de imagens de qualidade em diversos contextos. É com base nessas técnicas e algoritmos que se procurou neste trabalho explorar uma nova metodologia relativamente simples.

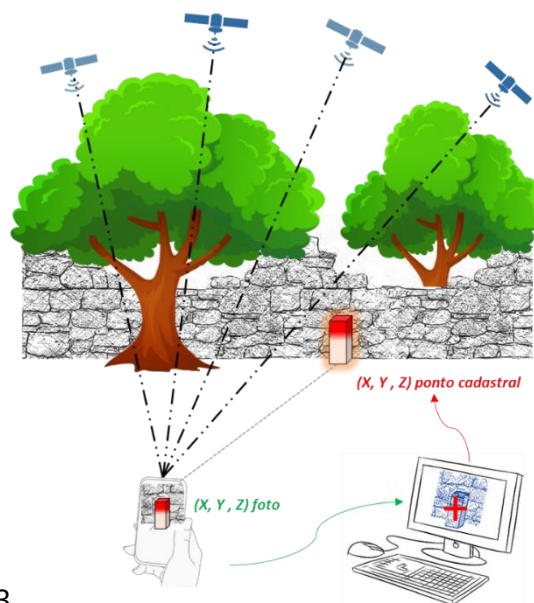


Figura 2.3

Figura 2.3 – Princípio de modelos 3D com *smartphones* em cadastro.

Esta metodologia é sustentada em três etapas, a primeira é fotografar o objeto que materializa o ponto cadastral, a segunda etapa é obter coordenadas que georreferenciam a fotografia usando a capacidade GNSS do *smartphone* (Figura 2.3) e a última etapa é o processo de extração das coordenadas do objeto a partir da nuvem de pontos com informação 3D georreferenciada.

Estes passos não implicam muitos conhecimentos técnicos do operador, qualquer cidadão tira fotos sem qualquer tipo de dificuldade, as quais em alguns modelos de telemóveis ficam logo com as suas coordenadas nos seus metadados, embora com exatidão não melhor que 2 metros. No entanto, esta exatidão poderá ser melhorada com a utilização de dados em bruto que alguns *smartphones* permitem através do cálculo de coordenadas mais precisas por técnicas de posicionamento diferencial ou PPP, o que poderá introduzir alguma dificuldade adicional, mas não com o nível exigido na operação de um recetor geodésico. Mesmo quando olhamos para a extração de informação georreferenciada de modelos 3D, existem softwares que permitem de uma forma bastante “amigável” construir esses modelos e a obtenção de coordenadas sem exigir conhecimentos demasiado técnicos.

Para além do seu carácter inovador em geral, este método pode ser uma alternativa de em situações cujos os pontos se encontram em locais de difícil observação GNSS com as antenas ao não receberem o sinal corretamente, apresentando falhas na continuidade do sinal ou incertezas nas distâncias entre as antenas e os satélites das constelações GNSS devido a reflexões, inviabiliza a obtenção de resultados precisos. A forma de ultrapassar estas situações terá de ser através de métodos alternativos que para serem rigorosos, como por exemplo o uso de um taqueómetro eletrónico, torna o processo mais dispendioso.

Como referido acima, existem diversos algoritmos para a reconstrução 3D, no entanto é importante realçar dois deles pela sua grande aplicabilidade em diversas áreas devido ao seu elevado grau de eficiência e automatização.

2.2.1 Algoritmos SIFT e SfM-MVS

É sobretudo através do popular algoritmo SfM (Structure from Motion), Forsyth & Ponce (2012), que é possível a reconstrução 3D. Este processo utiliza o algoritmo SIFT (Scale Invariant Feature Transform) no alinhamento das imagens desenvolvido por Lowe (2004), permitindo de forma muito eficiente e completamente automática a obtenção de pontos conjugados em imagens de uma mesma cena, permitindo a determinação de posição relativa da câmara em cada imagem e das respetivas orientações angulares. Este algoritmo aparece na literatura

muitas vezes associado a contextos de reconhecimento de objetos, Hsu et al. (2009), em diversos setores tais como indústria, arquitetura, medicina e na deteção remota, entre muitos outros.

No entanto, uma outra sigla oriunda da visão computacional e que tem vindo a ser muito utilizada recentemente na obtenção de modelos tridimensionais com *smartphones*, como podemos constatar em diversos dos estudos referidos no estado da arte, é o SfM, que consiste na geração de uma nuvem de pontos tridimensional, permitindo a construção de modelos dos objetos fotografados, por técnicas de “Multi-View Stereo” (MVS), Furukawa & Ponce (2010), aparecendo muitas das vezes mais associado a contextos de Fotogrametria, Gómez-Gutiérrez et al. (2014), e na modelação 3D de construções, Yilmazturk & Gurbak (2019).

Ambas as abordagens podem ser efetuadas sobre imagens aéreas ou terrestres, com eixos paralelos ou convergentes, podendo ser georreferenciados por vários processos, por exemplo envolvendo o posicionamento da câmara obtido aquando da aquisição das imagens. No entanto, até por ser o algoritmo base do software Metashape da Agisoft, (Shervais & Dietrich (2016)) utilizado neste trabalho, debrucemo-nos um pouco mais sobre o algoritmo SfM-MVS.

O algoritmo SfM-MVS e a metodologia a ele associada tem logo uma vantagem que no âmbito deste trabalho é uma componente muito relevante, que é o seu custo. Quando comparado com outras técnicas, como o varrimento laser, o seu custo é muito mais baixo, requerendo na sua forma mais básica de uma câmara digital, hoje em dia muitas vezes substituída pelo *smartphone*, e um computador onde podemos utilizar softwares inteiramente ou parcialmente gratuitos para os utilizadores. Alguns destes programas têm algumas restrições na sua forma gratuita, como no caso do Metashape (2021) acima referido, o 3DF Zephyr (2022) ou o Pix4D (2022), mas existem outros completamente gratuitos ou de código livre como o VisualSFM (2012), openMVG (2014), o MicMac (2018), o Regard3D (2018), o COLMAP (2020), o Meshroom (2021) ou ainda, o OpenDroneMap (OpenDroneMap, 2022).

Outras vantagens são a possibilidade de a partir das nuvens de pontos criadas ser relativamente simples a obtenção de modelos digitais de elevação (DEM) e de ortofotos com elevado rigor, mas para tal é necessária uma cuidadosa aquisição de pontos de controle, por técnicas de posicionamento precisas, também a flexibilidade em se ter uma grande variedade de escalas espaciais é outra capacidade bastante vantajosa, Carrivick et al. (2016).

As desvantagens deste algoritmo recaem nos desafios de aquisição e processamento de dados em grandes escalas espaciais devido ao grande volume de dados gerados, por não se poder saber se uma nuvem de pontos será bem-sucedida no momento do levantamento, embora isto não seja nada que outras técnicas também não sofrem, a não discriminação das localizações

de pontos ou tipos de pontos devido a uma análise de informação da nuvem de pontos de modo automático. Uma visualização eficiente dos dados por vezes é problemática devido ao peso da informação ou devido a determinados cenários em que a correlação de pontos conjugados ainda apresenta algumas debilidades, que encontramos na realização deste trabalho.

Na Figura 2.4 estão esquematizadas as etapas típicas de um processo SfM-MVS usado nas geociências, que se inicia pela deteção dos pontos-chave nas imagens, existindo diversas técnicas que se podem aplicar, como por exemplo a abordagem SIFT, que é a mais utilizada. Na segunda etapa é feita a correspondência entre esses pontos nas diferentes imagens através de métodos como da vizinhança mais próxima (Furukawa & Ponce, 2010), seguindo-se uma terceira etapa onde é feita uma filtragem desses pontos através da eliminação de pontos geometricamente inconsistentes. Apesar de denominarmos todo o processo por SfM, tecnicamente o SfM é a quarta etapa do processo, onde se define a estrutura 3D intermediária através de uma nuvem de pontos menos densa, simultaneamente também são definidas as posições e orientações das diferentes imagens, assim como os parâmetros de calibração da câmara. A quinta etapa do processo pode ser opcional em cenas 3D de áreas onde um posicionamento num sistema de coordenadas conhecido não é importante, sendo suficiente o sistema arbitrário resultante da anterior etapa. No entanto, nas geociências é essencial a georreferenciação da nuvem de pontos, com pontos de controlo que são obtidos geralmente por técnicas de posicionamento GNSS. Na última etapa é gerada a nuvem densa de pontos com a aplicação de algoritmos MVS, onde o mais usada é o de Furukawa & Ponce (2010). Estes algoritmos realizam a reconstrução completa da cena 3D a partir das imagens de uma câmara com os parâmetros internos e externos conhecidos, aumentando o número de pontos em relação à nuvem de pontos resultante do SfM.

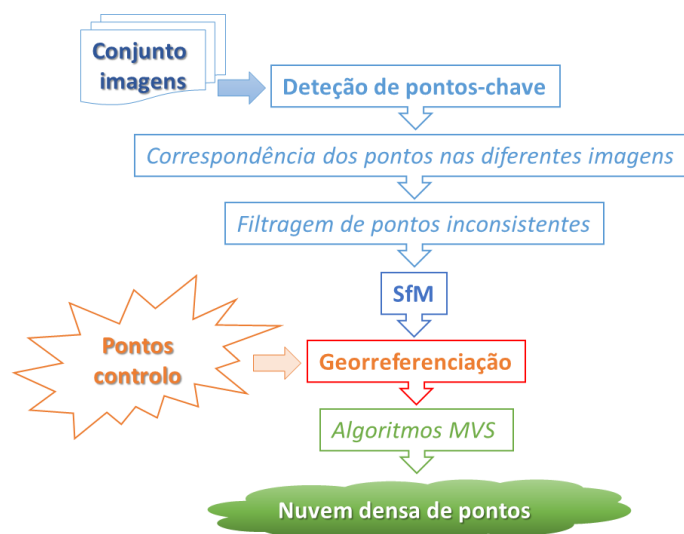


Figura 2.4 – Etapas típicas do processo de SfM-MVS.

2.2.2 Integração de dados posicionais e imagens com *smartphones*

A integração de dados de posicionamento e imagem adquiridos com *smartphones* assenta em três etapas, respetivamente, o alinhamento, a criação de nuvem de pontos densa e os ortofotos.

2.2.2.1 Alinhamento

Após o carregamento das imagens, a primeira etapa consiste no alinhamento das fotografias através da correlação de pontos comuns no conjunto de fotografias, ao mesmo tempo também é obtida a posição e orientação da câmara para cada fotografia e estimados os parâmetros de calibração da câmara, ou seja, respetivamente, a orientação externa e interna. O resultado é uma nuvem de pontos dispersos que é necessária para a determinação de mapas de profundidade, enquanto que as posições da câmara são necessárias na posterior reconstrução da superfície tridimensional. A posição da câmara do telemóvel no momento da aquisição da foto fica desde logo registada nos metadados com coordenadas GNSS de baixa exatidão, resultado de um posicionamento absoluto. É neste ponto que as capacidades de obtenção de dados em bruto de códigos e fases com o telemóvel permitem elevar o patamar da exatidão, permitindo o cálculo de coordenadas mais precisas que são integradas no processamento fotogramétrico em substituição das coordenadas dos metadados. Este aspeto é absolutamente fulcral, só esta metodologia é que permite que os dados obtidos com a câmara e recetor do *smartphone* forneçam resultados comparáveis ao estado da arte quando se usam recetores geodésicos e câmaras fotográficas muito mais dispendiosas.

2.2.2.2 Nuvem de pontos densa

Na segunda etapa são geradas as nuvens de pontos densas, assim como modelos triangulares ("mesh") ou modelos de elevação do terreno que permitem a representação foto realística do objeto, podendo ser exportado em vários formatos. A nuvem de pontos densa é baseada no cálculo dos parâmetros de orientação internos e externos das imagens, sendo gerada com mapas de profundidade calculados para os pares de imagens sobrepostos. Podendo-se definir o modelo digital de superfície (DSM, do inglês Digital Surface Model) que inclui tanto o terreno quanto todos os objetos no solo, como árvores, edifícios e estruturas, ou apenas mostrar o terreno através do modelo digital do terreno (DTM). É importante salientar que a metodologia usada para o posicionamento através do *smartphone* se baseia na recolha de dados em bruto e utilização das fases, para que os níveis de exatidão sejam aceitáveis e que os modelos não apresentem desvios sistemáticos significativos.

2.2.2.3 Ortofotomapas

A terceira etapa é destinada à criação dos ortofotomapas, através da projeção das fotos com base nos dados de orientação externa e interna sobre um DEM ou uma malha. No caso se fotos multiespectrais, os ortofotos podem permitir representar índices de vegetação ou radiométricos.

2.2.3 Calibração da câmara

Um aspeto importante a conhecer são os parâmetros de câmara, nesse âmbito é necessária a realização de uma pré-calibração da câmara do *smartphone* através de um conjunto de fotos tiradas em torno de uma construção. A Figura 2.5 mostra-nos a calibração realizada como *smartphone* Xiaomi Mi8 em torno da torre equatorial existente no OAUP, tendo-se começado e terminado o registo das fotos no mesmo ponto, num tipo de uma poligonal fechada, de forma a verificar se o início e o fim são concordantes.



Figura 2.5 – Calibração da câmara do *smartphone* Xiaomi Mi8.

É feito um processamento dessas imagens, incorporando algumas distâncias de referência no objeto, medidas à fita. Os parâmetros de calibração obtidos, Figura 2.6, foram carregados durante o processo de alinhamento do conjunto de fotografias registadas com o *smartphone* das cenas com os pontos cadastrais a georreferenciar.

Camera type:	Frame	
Pixel size (mm):	0.00172347	x 0.00172347
Focal length (mm):	4.216	
☐ Enable rolling shutter compensation	☐ Film camera with fiducial marks	
Initial Adjusted Bands GPS/INS Offset		
Type:	Precalibrated	
f:	3069.71042	cx: 13.3171
k1:	0.186132	cy: -4.0789
k2:	-0.648821	p1: 0.000214282
k3:	0.623001	p2: -0.000618504
k4:	0	b1: 0
		b2: 0
Fixed parameters:	All	Select...
Image-variant parameters:	None	Select...

Figura 2.6 – Parâmetros de calibração do *smartphone*.

3 Posicionamento GNSS com *smartphones*

Neste capítulo dedicado ao posicionamento GNSS com *smartphones* fazemos uma retrospectiva sobre conceitos como os tipos de posicionamento, os recetores e as antenas, os sistemas GNSS, com particular atenção para o Galileo e os erros nas medições GNSS, que tanta importância têm aquando da utilização dos equipamentos profissionais e que no caso do *smartphone* devido às suas debilidades será necessária uma atenção especial.

O posicionamento GNSS pode ser realizado usando um simples recetor de uma só frequência ou com recetores com múltiplas frequências, usando uma única constelação ou em combinação de constelações. Se inicialmente os *smartphones* só permitiam um posicionamento absoluto com base no sistema GPS através do código do sinal L1, a evolução do seu hardware e software fez com que hoje em dia seja possível a realização de medições em bruto das fases e códigos dos sinais L1 e L5 do referido sistema, mas também do sistema Galileo, permitindo um rigor nunca antes alcançado em instrumentos desta gama, através do posicionamento relativo. No entanto, nem todos os *smartphones* possuem estas características. Uma forma de os identificar é através da página eletrónica “Raw GNSS Measurements” (Android Developers, 2019), onde é possível identificar quais os equipamentos com capacidade de acesso a dados GNSS em bruto existentes no mercado. Estas capacidades fizeram com que um *smartphone* se esteja a tornar um instrumento GNSS de baixo custo, apesar de algumas debilidades que este equipamento apresenta e que começa logo na menor qualidade da sua antena, podendo ainda dar uma boa resposta em algumas aplicações GNSS.

3.1 Sistemas GNSS

Os sistemas GNSS têm um grande peso na equação do posicionamento global, com receitas globais no mercado de dispositivos e serviços GNSS estimadas entre os 150 € biliões e os 325 € biliões para o período de 2019 a 2029, segundo relatório de mercado de 2019 da EUSPA (EUSPA, 2019). Mesmo que a sociedade continue ainda a empregar de uma forma generalizada a palavra “GPS” para se referir aos sistemas GNSS, estes já não se resumem só ao sistema norte-americano GPS ou, em conjunto, com o sistema russo GLONASS. Novos sistemas concorrentes surgiram a nível global como o sistema Galileo desenvolvido pela Europa e o sistema BeiDou da China, enquanto que a um nível regional surgiram os sistemas IRNSS indiano e QZSS japonês. Na Figura 3.1 estão representados por ordem cronológica do seu aparecimento os sistemas referidos.

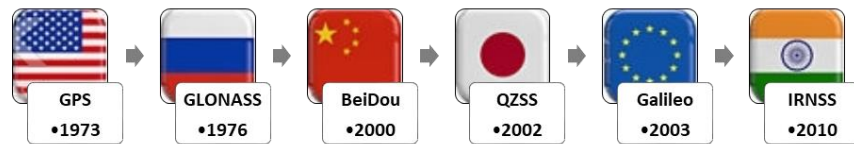


Figura 3.1 – Cronologia dos sistemas GNSS.

No contexto GNSS temos ainda os sistemas de aumento SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems) europeu EGNOS, norte-americano WAAS, japonês MSAS, indiano GAGAN, russo SDCM e chinês SNAS, que permitem em tempo real exatidões das coordenadas na ordem dos 2 metros, com importância na navegação aérea, permitindo elevar os níveis de segurança e rentabilidade na aviação, mas também em operações marítimas e de busca e salvamento.

Os sistemas GNSS para serem eficientes e confiáveis necessitam de cumprir determinados requisitos, como a Disponibilidade que nos indica a percentagem de tempo do utilizador no cálculo soluções (posição, navegação e tempo), a Exatidão pela diferença entre as soluções verdadeiras e as calculadas, a Continuidade das operações sem interrupções, a Integridade através da confiança que podemos ter nas soluções do recetor, o TTFF (Time To First Fix) relativo ao instante necessário para obtenção da primeira posição fixa, a Robustez às falsificações e interferências, e a Autenticação que garante a utilização de sinais e dados confiáveis. Outros parâmetros que também são importantes e que deveremos ter em conta para um bom funcionamento dos serviços GNSS são o consumo de energia, o seguimento, a resiliência, a conectividade e a interoperabilidade (EUSPA, 2019). Estando reunidos estes requisitos estamos em posição de avançar para os princípios básicos de posicionamento e navegação destes sistemas, que são idênticos, sendo possível aplicar na maioria dos casos aos outros sistemas as técnicas utilizadas com o sistema GPS, criando uma grande interoperabilidade entre eles, com significativos benefícios para os utilizadores.

Três segmentos compõem um sistema GNSS, Figura 3.2, o Espacial com os satélites em orbitas MEO (Medium Earth Orbit) que transmitem os sinais, o Controlo com as estações de controlo e monitorização dos satélites, e o Utilizador, onde os observadores equipados com recetores GNSS recebem os sinais e calculam as coordenadas e o tempo.

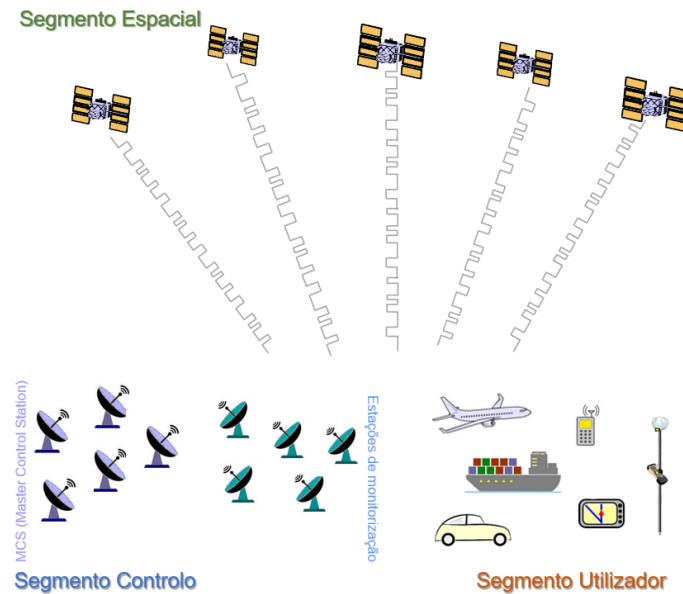


Figura 3.2 – Segmentos dos sistemas GNSS.

É no segmento Espacial que os satélites GNSS em órbita difundem sinais rádio no domínio das micro-ondas, nomeadamente na banda L, compreendida entre os 1000 - 2000 MHz. Cada sistema GNSS têm alocadas as respetivas frequências dentro deste intervalo, esquematizado na Figura 3.3, baseada no livro de Subirana et al. (2013), onde se situam os serviços de radionavegação RNSS (Radio-Navigation Satellite Service) e ARNS (Aeronautical Radio Navigation Service). Muitas destas frequências encontram-se sobrepostas entre os sistemas, sendo esta compatibilidade possível por ação da agência ITU (International Telecommunication Union, 2021) das Nações Unidas, que fornece procedimentos para resolver a compatibilidade dos sinais de radiofrequência de navegação (United Nations, 2010). É a partir destes sinais emitidos continuamente pelos satélites nas frequências apresentadas, que um utilizador dos sistemas GNSS obtém medidas de distâncias.

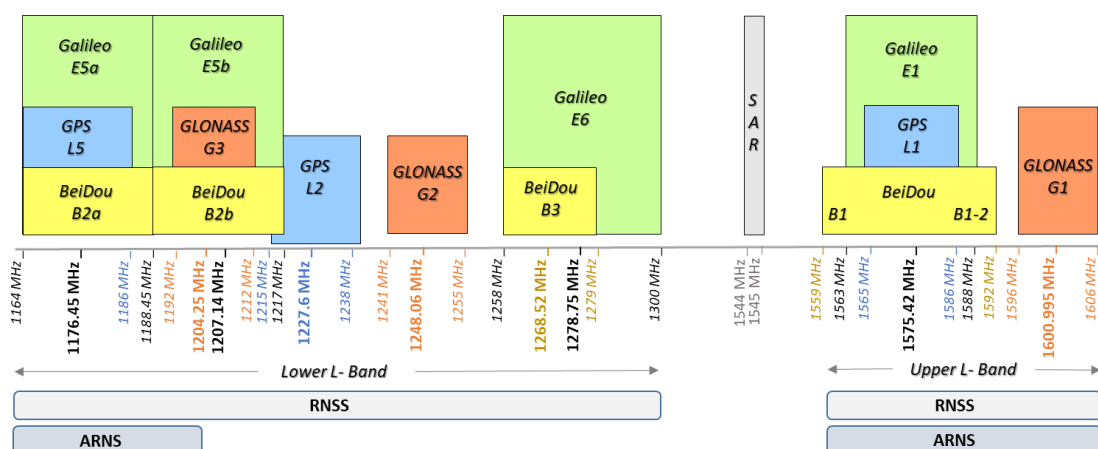


Figura 3.3 – Distribuição das frequências GNSS na banda L.

Os sistemas GNSS podem ser usados em simultâneo por um número ilimitado de utilizadores, permitindo suportar diversos modos de medição e de posicionamento, podendo servir diferentes tipos de aplicações. Os satélites estão equipados com vários relógios atómicos de última geração e através da tecnologia de transmissão por rádio emitem um sinal com informação que permite aos recetores do segmento de Utilizador, calcular o tempo de trânsito desse sinal, e também enviam informações sobre suas posições (efemérides). O recetor GNSS é assim capaz de calcular sua localização e o instante da observação com exatidões da ordem dos nanossegundos, usando os sinais de, pelo menos, quatro satélites de posição conhecida, com base em três observáveis, a pseudodistância do código, a fase da portadora e diferenças das pseudodistâncias das contagens de Doppler.

3.1.1 Erros nos sistemas GNSS

Apesar da alta tecnologia que os satélites e os recetores GNSS apresentam, incluindo também os *smartphones*, estes não são perfeitos, existindo erros de diversas origens que influenciam a exatidão dos resultados GNSS. No entanto estes podem ser corrigidos ou minimizados através de algumas técnicas de observação, tais como a utilização de recetores a observar em simultâneo, a realização de observações com tempos mais longos ou usar medições especiais, ou ainda, a escolha dos locais.

Na Figura 3.4 estão esquematizados os erros típicos que afetam as medidas GNSS, tais como os erros dos relógios, as efemérides dos satélites (órbitas), a geometria dos satélites, os atrasos na atmosfera da propagação do sinais ao atravessar a ionosfera e troposfera, o ruído nos recetores e antenas, os erros provocados por interferências do sinal por radiação eletromagnética, que podem ter origem em radares, antenas de telecomunicações ou outro tipo de radiação involuntária, mas que também podem ter uma origem intencional como os casos de criação de réplicas falsas do sinal designado por “spoofing” ou pela perturbação do sinal GNSS com dispositivos de empastelamento dos sinais designado por “jamming”, de tal forma que inibem a sua correta utilização por parte dos utilizadores.



Figura 3.4 – Erros típicos que influenciam a precisão das medidas GNSS.

Na Figura 3.5 podemos ver o nível do EMQ para cada tipo de erro desde os centímetros no caso do ruído do recetor, a alguns metros no caso do atraso ionosférico.

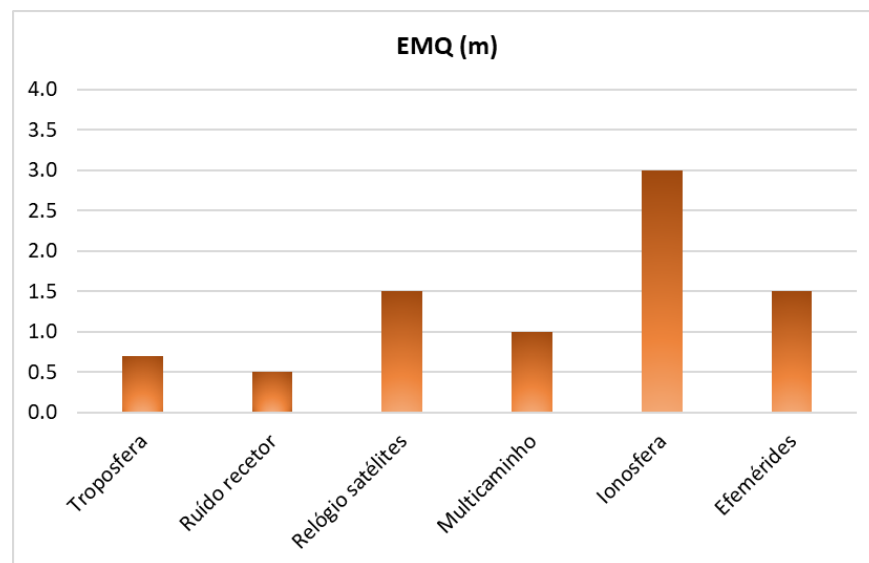


Figura 3.5 – Valores típicos do EMQ em erros GNSS (u-blox AG, 2009).

3.1.1.1 Erros dependentes dos satélites

Mesmo com os satélites tão sofisticados existem alguns pequenos erros causados por estes como é o caso dos relógios atômicos dos satélites que apesar de serem muito precisos, não são perfeitos e podem ter discrepâncias no tempo que se vão refletir nas medidas do tempo de trânsito do sinal e por consequente nas distâncias: 1 milissegundo de erro no tempo implica um erro de aproximadamente 30 cm na distância calculada. Também existem erros relacionados com as órbitas apesar da monitorização contínua das posições dos satélites, os recetores mantêm um almanaque com a informação de todos os satélites e atualiza essa informação assim que recebe uma nova, mas esta informação pode conter erros tais como posições não tão bem calculadas para os satélites. No entanto, estes erros podem ser cancelados com a utilização em simultâneo de pelo menos dois recetores, modo relativo.

3.1.1.2 Erros dependentes da atmosfera

O sinal de um satélite GNSS até chegar à antena do recetor tem de passar pela atmosfera terrestre que não tem as mesmas condições para a viagem da luz no vácuo. A sua passagem através das partículas carregadas da ionosfera e, em seguida, através do vapor de água na troposfera provoca uma diminuição da velocidade de propagação do sinal, daí o uso das habituais expressões de atraso ionosférico e troposférico.

O efeito da ionosfera situada na zona da atmosfera terrestre que se estende de cerca dos 60 km até mais de 2.000 km (Subirana et al. (2013)), é o que tem maior impacto podendo atingir alguns metros, com atrasos no caso dos códigos, mas com um efeito oposto nas fases, com o seu adiantamento. Este erro pode ser matematicamente modelado, mas continua a ser um erro significativo, pode ser cancelado em grande parte com a utilização em simultâneo de dois recetores em posicionamento relativo, preferencialmente com linhas de base até 20 km, de forma a que ambos os recetores sofram os mesmos efeitos, no entanto existe ainda uma dependência da maior ou menor atividade solar. A velocidade de propagação do sinal na ionosfera depende de sua densidade de eletrões dada pelo TEC (Total Electron Content) em que durante o dia aumenta devido à radiação solar, que causa a ionização de átomos neutros, produzindo eletrões e iões livres. Durante a noite, dá-se o processo inverso com os eletrões livres a serem recombinados com os iões produzindo partículas neutras, o que leva a uma redução na densidade de eletrões (Subirana et al. (2013)). Como a ionosfera é um meio dispersivo, a refração do sinal depende de sua frequência o que permite remover seu efeito em mais de 99,9% usando duas frequências, no caso dos recetores de uma única frequência, será necessário aplicar um modelo ionosférico, como por exemplo, o modelo Klobuchar (Klobuchar, 1987), para remover o máximo possível do efeito.

Já o atraso troposférico que acontece na zona da atmosfera entre a superfície terrestre e aproximadamente os 60 km de altitude, é, em geral, substancialmente inferior ao ionosférico, beneficiando também da utilização de dois recetores, com a diminuição do seu valor para sensivelmente metade. A refração troposférica é tratada em duas componentes, a primeira é a componente hidrostática que segue as leis dos gases perfeitos, causada pelos gases secos existentes na atmosfera e pode causar erros entre os 2,3 metros no zénite, mas chegar aos 10 metros para os sinais com alturas baixas. A segunda é a componente não hidrostática húmida, devida ao vapor de água e pela água condensada na forma de nuvens, existindo uma dependência das condições climáticas (Leick (2004)). O atraso nesta componente é bem menor que no caso seco, apenas algumas dezenas de centímetros, mas é mais difícil de modelar devido à sua rápida variação de forma aleatória (Subirana et al. (2013)). Existem alguns modelos com diferentes abordagens para a correção destes erros, dividindo-se em dois grupos, os modelos rigorosos orientados para a Geodesia, mas mais complexos dependendo de dados meteorológicos, como o modelo de Saastamoinen (Saastamoinen (1973)), e os modelos para Navegação menos precisos, mas independentes dos dados meteorológicos.

3.1.1.3 Erros dependentes dos recetores e antenas

A ideia de que o sinal GNSS chega diretamente à antena do recetor não é de toda verdade, devido aos elementos que compõem o ambiente envolvente tais como edifícios, árvores, montes, superfícies de água, postes e outras estruturas, provocam reflexões ao longo do seu percurso até atingir a antena. Em determinadas situações pode até nem se quer alcançar a antena devido a uma completa obstrução do sinal criando falhas no sinal, o que é muito frequente em levantamentos em zonas urbanas ou florestais, sobretudo em métodos de levantamento cinemático. As reflexões do sinal (*multipath*) alteram a verdadeira distância entre antena do recetor e o satélite, em resultado do atraso dos códigos e das fases. Os equipamentos mais recentes utilizam algoritmos sofisticados para minimizar este efeito, como na deteção da polarização do sinal que é recebido, RHCP no caso do sinal direto, mas que passa a LHCP após as reflexões, o operador deverá ter alguns cuidados, especialmente com dispositivos com pobre supressão deste efeito como os telemóveis, evitando sempre que possível os locais mais suscetíveis a reflexões.

Nas situações de quebras no seguimento do sinal dos satélites, são provocadas descontinuidades nas medidas da fase da portadora criando dessa forma “cycle slips”, que se traduzem em saltos na ambiguidade, ou seja, no número inteiro dos ciclos do comprimento de onda. Estes saltos que não afetam os códigos, tornam mais difícil o processamento com as fases, dificultando o cálculo de soluções mais precisas, ou até mesmo impossibilitar a sua obtenção. Para além das obstruções acima indicadas, também outras razões podem provocar

estes saltos, tal como perda de energia, uma razão sinal-ruído SNR (Signal-to-Noise Ratio) muito baixa, uma falha do software do recetor, um oscilador do satélite com defeito ou ainda até por condições ionosféricas severas. A Figura 3.6 mostra um gráfico com a deteção de saltos (traços vermelhos) nas medidas do *smartphone* para o Galileo e GPS. A cor verde indica os satélites de dupla frequência e a cor laranja os satélites de frequência simples.

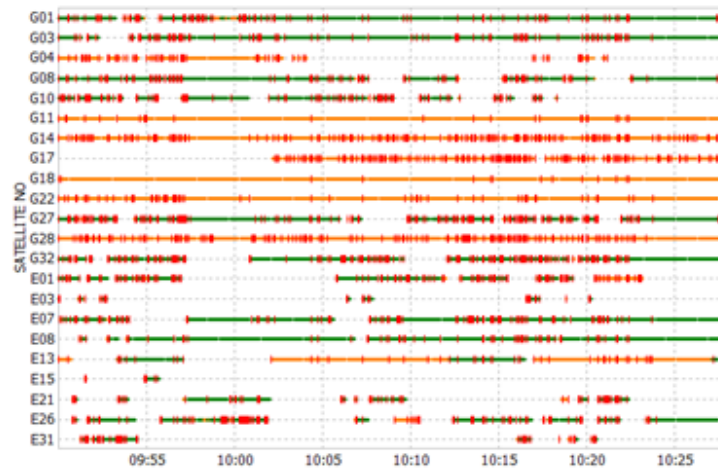


Figura 3.6 – Saltos (traços vermelhos) no sinal Galileo e GPS.

3.1.1.4 Erros dependentes da geometria

A geometria dos satélites tem papel preponderante na qualidade nos resultados obtidos, esta geometria é quantificada através do parâmetro escalar denominado Diluição da Precisão - DOP (Dilution Of Precision) que quanto menor for, melhor exatidão terão os resultados.

A expressão (3.4) representa a relação entre a exatidão posicional representada pelo seu desvio padrão σ^* , o DOP e o desvio padrão σ_r do erro nas pseudodistâncias (Seeber, 2003).

$$\sigma^* = \text{DOP} \cdot \sigma_r \quad (3.4)$$

Este indicador pode ser dividido em cinco tipos, o indicador geométrico GDOP que é o somatório de todos os DOP, o tempo (TDOP), a posição horizontal (HDOP) e vertical (VDOP). O PDOP é o mais utilizado para a indicação da qualidade da geometria dos satélites, é o indicador posicional (3D) sendo definido pela posição horizontal (HDOP) e vertical (VDOP). O indicador escalar que em condições normais tem o valor mais baixo de todos é o TDOP relativo ao tempo e está associado ao erro do relógio dos satélites. De uma forma simples, pode-se afirmar que uma boa distribuição dos satélites na constelação permite um valor pequeno deste parâmetro. Numa representação gráfica, quanto maior for a área definida pelos satélites, melhor será o DOP, enquanto que quanto menor for essa área, pior será o DOP, Figura 3.7.

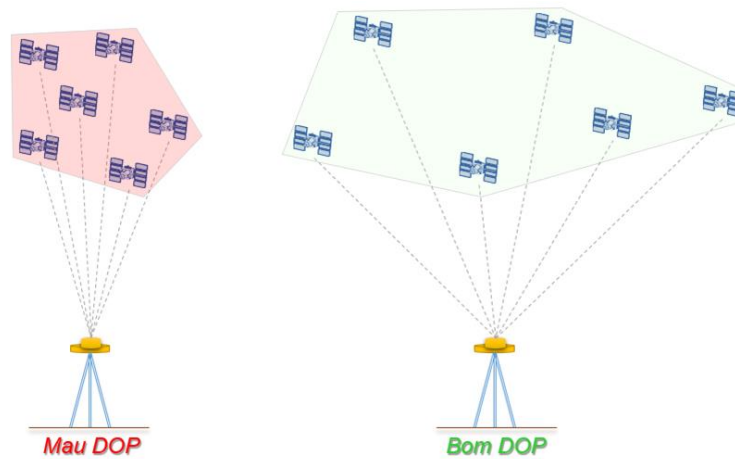


Figura 3.7 – Exemplo de geometria com bom e mau DOP.

A forma de controlar o DOP é realizando um planeamento para o período de observação, sendo desaconselhável realizar observações quando o PDOP é elevado, maior do que cinco, geralmente uma constelação completa apresenta valores inferiores a três. Com a utilização de equipamentos GNSS multi-constelação a probabilidade do DOP ser elevado é muito menor, do que quando se usa um único sistema, devido a uma maior disponibilidade de satélites. As Figura 3.8 e Figura 3.9 são demonstrativas desta constatação, com o exemplo prático de uma planeamento realizado com a aplicação online Trimble GNSS Planning (Trimble Inc., 2018) no âmbito de um dos trabalhos realizado no dia 4 de maio de 2021, na região do Porto, com uma máscara com altura de 0° e assumindo teoricamente a inexistência obstáculos. Podemos ver dois picos na Figura 3.8, relativos à geometria da constelação Galileo, que por ainda não se encontrar totalmente finalizada, pode apresentar intervalos com valores DOP elevados.

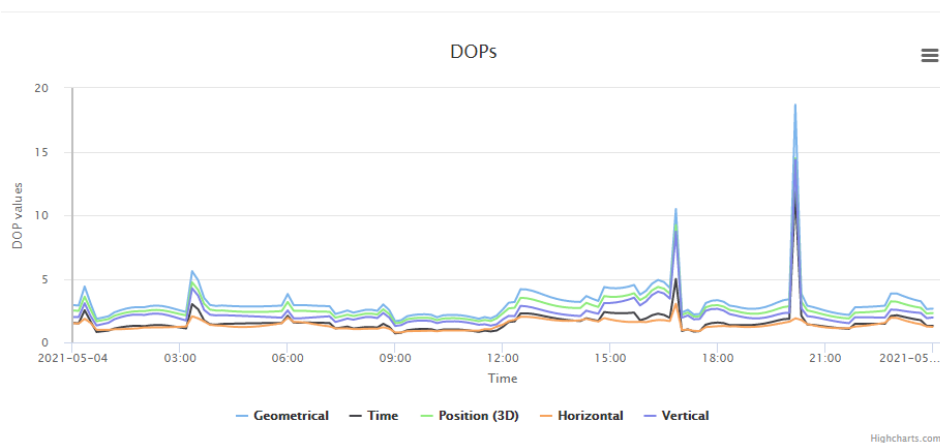


Figura 3.8 – DOP durante 24 horas para a constelação Galileo.

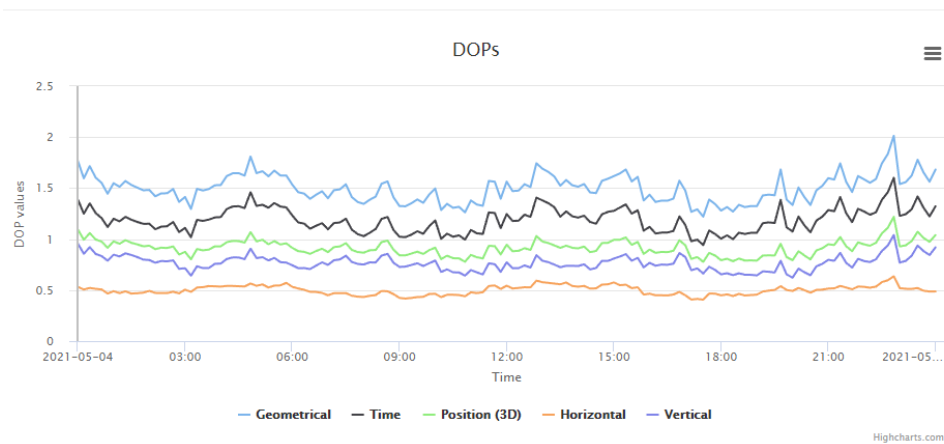


Figura 3.9 – DOP durante 24 horas para todas as constelações GNSS.

3.1.2 Erros intencionais

Se os erros acima referidos pela sua natureza não são causados, fazendo parte do próprio processo GNSS, já os erros intencionais só existem devido a ações mal-intencionadas de terceiros. Um dos erros intencional mais recorrente na atualidade podendo afetar qualquer um dos sistemas GNSS é o “Jamming”, que é uma perturbação deliberada do sinal a partir de equipamentos que difundem sinais que inibem o sinal GNSS de forma tal que os resultados podem ser desastrosos ou mesmo impossíveis de obter. Para contornar isto, foram tomadas medidas pelos militares norte-americanos desenvolvendo algumas aplicações, como por exemplo, o GPS “Jammer Location” (JLOC) para identificar e fornecer alertas aos militares quando uma ameaça é detetada (Inside GNSS, 2010). Além disto, o governo americano decretou a proibição do uso, venda e compra destes dispositivos, nos Estados Unidos com penas vão desde multas de milhares de dólares, à apreensão dos equipamentos e até pode levar a prisão, podendo ser usados apenas por serviços militarizados e de segurança em situações de crise.

No caso do sistema Galileo, que não é militar, mas que pode ser usado por estes através de um serviço encriptado como o Serviço Público Regulado (PRS), possui um mecanismo anti-jamming, fornecendo posições e tempo de forma restrita a utilizadores autorizados pelo governo, forças de segurança e serviços confidenciais que exigem um alto nível de continuidade e fiabilidade. Uma outra ameaça aos sistemas GNSS é o “spoofing”, diferente do anterior, pois não bloqueia os sinais, mas é caracterizado por criar uma réplica falsa dos sinais GNSS, ou seja, podendo enganar um recetor, levando a pensar que está posicionado num outro local e num outro tempo. O mecanismo AS (anti-spoofing) usado no sistema norte-americano foi uma forma de defesa destinada a contornar esta ameaça, através da encriptação dos sinais, não sendo assim possível gerar réplicas, garantindo a integridade do sistema. Os equipamentos de frequência simples são relativamente mais fáceis de falsificar, por outro lado os equipamentos

multifrequência podem ter várias técnicas para detetar uma falsificação do sinal. Outra solução, que pode ser útil é o recurso a uma unidade inercial (IMU) integrada ou acoplada no recetor permitindo uma verificação da falsificação, mas ao mesmo tempo permitir a obtenção de uma solução PVT integrada (Septentrio, 2018). No entanto têm sido desenvolvidas ferramentas de autenticação das mensagens de navegação como forma de combater as falsificações, sobretudo nos sistemas Galileo e GPS, respetivamente o “Timed Efficient Streamed Loss-Tolerant Authentication” (TESLA) e o “Chips-Message Robust Authentication” (Chimera), Petovello & O'Driscoll (2018).

Um antigo erro propositado do sistema GPS era o SA (Selective Availability), mas que foi desativado em maio de 2000 por ordem presidencial e não fazendo parte das últimas gerações de satélites GPS, era considerado pelos militares como uma proteção do sinal, mas que aos olhos da comunidade civil originava um erro grosseiro na ordem dos 100 metros e assentava em dois processos, o ϵ que manipulava as efemérides e δ que introduzia um erro sistemático no relógio (Seeber, 2003). No entanto a comunidade científica encontrou a forma de eliminar esse erro, que consistia na utilização de dois recetores a observar ao mesmo tempo, ou seja, a técnica de posicionamento relativo e diferencial.

3.2 Tipos de posicionamento

O posicionamento por GNSS, seja com recurso a recetores geodésicos ou com outros dispositivos como os *smartphones*, envolve conceitos relativamente simples. O observador usa os satélites como pontos de referência de coordenadas conhecidas e mede a sua distância relativamente a, pelo menos, 4 satélites o que lhe permite determinar a sua posição em formato tridimensional com coordenadas (X, Y, Z) ou em coordenadas geodésicas, latitude, longitude e altitude elipsoidal (Φ , λ , h), e ainda o instante de observação. O método consiste na trilateração e resulta da medição de distâncias usando o intervalo de tempo do trânsito dos sinais rádio entre os satélites e os recetores GNSS, esse tempo de trânsito tem de ser muito preciso, sendo estimado o instante de observação com precisão após efetuadas algumas correções.

A determinação da posição de um observador esteja este parado (em modo estático) ou em movimento (em modo cinemático), pode ser efetuada por três diferentes modos, Posicionamento Absoluto, Posicionamento Relativo e PPP (Precise Point Positioning). Se no caso do primeiro não podemos esperar exatidões melhores que o metro, no caso dos dois outros modos já podemos contar com a obtenção de valores da ordem do centímetro ou decímetro. Na Figura 3.10 podemos ver de forma esquematizada os três modos e a indicação das respetivas exatidões.

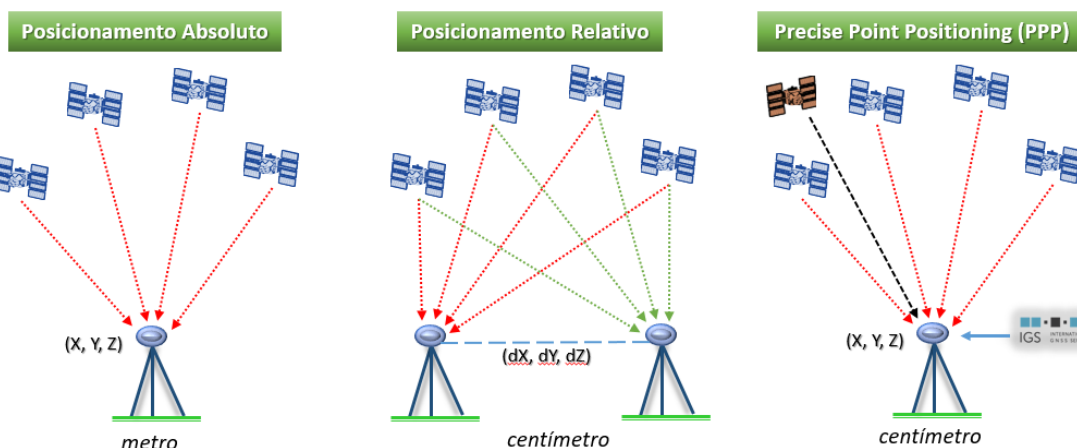


Figura 3.10 – Modos de posicionamento e exatidão posicional.

O Posicionamento Absoluto é obtido em tempo real utilizando pelo menos 4 satélites e só usa o código como observável, bastando um recetor com a frequência L1, tendo sido o modo inicial de utilização do GPS, com exatidão na ordem dos 10 metros. Atualmente, com a utilização dos sistemas de aumento SBAS (Satellite-based Augmentation Systems), como o EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) no caso europeu, é possível melhorar estas exatidões para a ordem dos 2 metros. No entanto, apesar de este tipo de posicionamento usar só as medidas de um recetor e se encontrar conectado com coordenadas de baixa exatidão, o desenvolvimento mais recente de metodologias de posicionamento do tipo PPP (Precise Point Positioning) e que também são realizadas com recurso a um único recetor permite a obtenção de coordenadas com exatidão centimétrica, mas obrigando ao uso de recetores de pelo menos duas frequências e a utilização dos códigos e das fases da portadora, com a observação de pelo menos 5 satélites, e a utilização de efemérides precisas dos satélites e correções dos relógios, que são determinadas pela IGS (International GNSS Service, 2021).

A equação fundamental para a obtenção da pseudodistância (PR_i) entre o satélite e a antena do observador pode ser representada pela expressão (3.1) (Seeber, 2003).

$$PR_i = |\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_B| + c dt_u = c \tau_i \quad (3.1)$$

Onde R_i é a distância geométrica entre o satélite i e a antena do recetor B , $\mathbf{X}_i$ é o vetor da posição do satélite em coordenadas geocêntricas com as componentes (X_i, Y_i, Z_i) , $\mathbf{X}_B$ é o vetor da posição da antena do recetor em coordenadas geocêntricas com as componentes (X_B, Y_B, Z_B) , dt_u é o erro de sincronização do relógio do satélite e o relógio do recetor, τ_i é o tempo de trânsito do sinal desde o satélite até à antena do observador, e c é a velocidade de propagação do sinal. Esta equação pode ser aperfeiçoada com a introdução de novos parâmetros, tais como o atraso do sinal devido aos efeitos atmosféricos dt_a , o erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS dt_s e o ruído das observações ε_R que inclui a reflexão de

sinais e outros efeitos, ficando com o aspeto apresentado na equação (3.2).

$$PR_i = c(t_r - T_t) = R + cdt_u + cdt_a + cdt_s + \epsilon_R \quad (3.2)$$

Adaptando esta equação à fase da portadora com a introdução do termo N que representa o número inteiro de ciclos do sinal desde o satélite até a sua receção pelo observador, designado por ambiguidade inteira da fase da portadora, a equação de observação ficará na forma apresentada na expressão (3.3). No entanto o seu desconhecimento obriga à sua determinação, o que não é de fácil resolução. A variável f na expressão corresponde à frequência da portadora.

$$PR_i = R + cdt_u + cdt_a + cdt_s + c \frac{N}{f} + \epsilon_R \quad (3.3)$$

O Posicionamento Relativo obriga ao uso de pelo menos de dois recetores em simultâneo não muito distantes, com linhas de base entre eles de algumas dezenas de km, de preferência até 20 km. O aumento da distância provoca proporcionalmente uma degradação da exatidão sobretudo devido ao efeito ionosférico. Colocando um dos recetores como estação de referência (base), estacionado num ponto de coordenadas conhecidas e o outro como móvel (rover), ponto do observador a coordenar, temos como condição utilizar pelo menos 4 satélites, podendo-se usar recetores de frequência simples ou com mais de duas frequências. Três modos podem ser usados, o modo DGPS (Differential GPS) que só usa códigos, em tempo real RTK (Real Time Kinematic) ou em pós-processamento PPK (Post Processed Kinematic) que usa códigos e fases. Com esta técnica diferencial as soluções são obtidas com maior exatidão, sobretudo nos casos RTK e PPK onde se podem atingir centímetros ou decímetros, por permitir o cancelamento de grande parte dos erros, como o erro dos relógios dos satélites, erro nas órbitas do satélite (efemérides), os atrasos ionosférico e troposférico. A estação de referência deverá preferencialmente ter uma linha de base de curta distância, quer se realize o levantamento em tempo real ou em pós-processamento. No caso em tempo real a conexão é feita via rádio, obrigando ao uso de dois recetores com rádio por parte do operador, mas que tem vindo a ser substituída pela conexão via Internet através do protocolo NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol), sendo só necessário um recetor da parte do operador e permitindo linhas de base maiores com as estações de referência permanentes, CORS (Continuously Operating Reference Stations), as quais também permitem armazenar dados para a obtenção de soluções em pós-processamento.

Um posicionamento com base em observações diferenciais com as fases para além da vantagem de ser possível o cancelamento ou a redução dos erros que estão presentes nas observações originais, também pode facilitar a resolução da ambiguidade do ciclo, de difícil resolução. Estas observações diferenciais resultam de combinações lineares entre recetores e

satélites através das diferenças formadas entre observáveis e podem ser obtidas de três formas, diferenças simples, duplas ou triplas, permitindo a eliminação de erros.

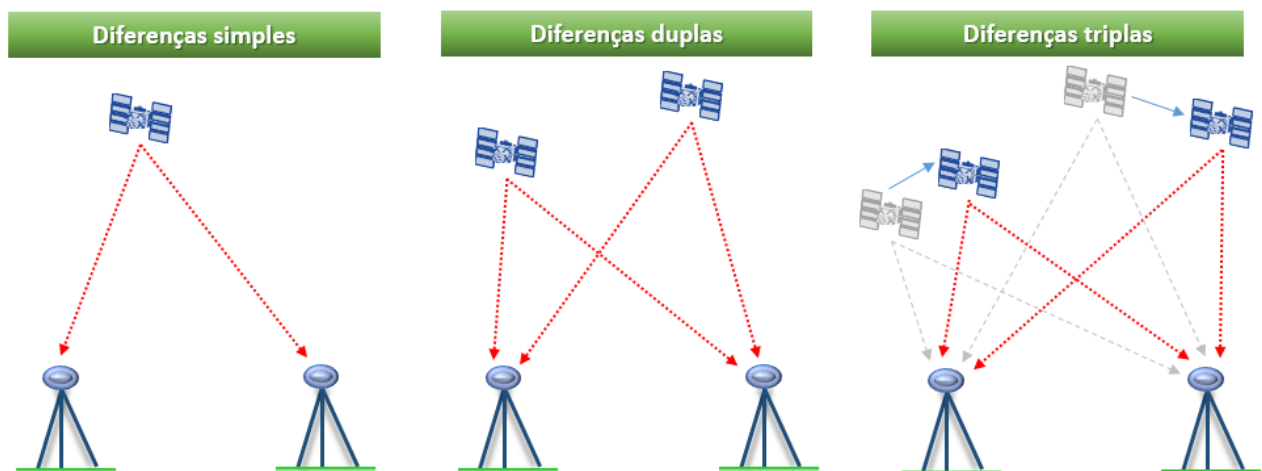


Figura 3.11 – Posicionamento relativo com fases: diferenças simples, duplas e triplas.

As diferenças simples resultam da observação em simultâneo do mesmo satélite por dois recetores, isto é, as pseudodistâncias medidas em simultâneo para o mesmo satélite pelos recetores são subtraídas, permitindo o cancelamento do erro de sincronismo do relógio do satélite, termo cdt_s na expressão 3.2, assim como minimizar ou mesmo eliminar quando os recetores se encontram relativamente próximos, por estarem sujeitos aos mesmos efeitos atmosféricos cdt_a , o atraso ionosférico e o troposférico.

As diferenças duplas permitem para além da eliminação dos erros referidos nas diferenças simples, também o cancelamento do erro de sincronismo dos recetores, o termo cdt_u na expressão 3.2, e são obtidas pelas medições em simultâneo de dois recetores para os mesmos dois satélites. Este método diferencial também é utilizado em muitas das técnicas na resolução das ambiguidades do ciclo (Seeber, 2003).

As diferenças triplas são formadas pela diferença entre duas épocas de duas diferenças duplas, permitindo a eliminação dos erros das as diferenças duplas mais a eliminação da ambiguidade e minorar outros erros sistemáticos.

Na seguinte Tabela 3.1 encontra-se um resumo das técnicas utilizadas em observações GNSS com as exatidões típicas que elas permitem obter.

Tabela 3.1- Técnicas de posicionamento GNSS

Posicionamento	Método	Exatidão	Duração	Processa.	Observáveis
Absoluto	Estático	2-10 m	10 min	real	Códigos
	Cinemático	5-10 m	-	real	
Relativo	Cinemático DGPS	1-2 m	-	pós	
	Cinemático SBAS	2 m	-	real	
	Estático	1 cm	30 min	pós	Fases
	Estático - rápido	2 cm	10-20 min	pós	
	RTK	1-2 cm	1 s	real	
	Stop & Go	10-30 cm	1-2 min	pós	
Absoluto	PPP	1 cm	30 min	pós	
	PPP-RTK	1 cm	1 s	real	

3.3 Smartphones e recetores GNSS

Se no caso dos recetores podemos dizer que o seu objetivo é a obtenção de coordenadas, no caso dos *smartphones* a génese da sua utilização é como instrumento de comunicações. Perante isto, é natural que um *smartphone* não apresente um grau de capacidade GNSS ao nível de um equipamento profissional, logo devido ao seu menor custo. No entanto as capacidades de alguns modelos permitem-nos ter resultados bastante bons para um equipamento desta gama, podendo ser uma ferramenta muito útil em diversas aplicações como cartografia, cadastro, SIG ou navegação pelo seu bom rácio exatidão/custo.

3.3.1 Recetores GNSS

Um recetor GNSS é um equipamento com capacidade de processar os sinais rádio da banda L transmitidos pelos satélites GNSS e sendo capaz de resolver as equações de navegação, a fim de determinar a posição, a velocidade e o tempo preciso. Neste trabalho somos confrontados com um novo conceito de equipamento, diferente dos clássicos recetores GNSS, que podia levantar dúvidas sobre o seu desempenho neste capítulo devido aos diversos requisitos que um dispositivo GNSS necessita para o seu bom funcionamento. Como iremos verificar mais à frente, estes dispositivos conseguem dar uma boa resposta podendo ser uma alternativa de baixo custo em posicionamento GNSS para determinadas aplicações. Para o processamento dos sinais, o recetor tem de ser capaz de distingui-los. Para isso faz uso de técnicas de acesso múltiplo, como a CDMA (Code Division Multiple Access) que permite que vários sinais sejam transmitidos simultaneamente na mesma frequência sendo identificados pelo seu PRN (Pseudo-Random Noise) ou pela técnica FDMA (Frequency Division Multiple Access) mais complexa, usada só no GLONASS, por razões históricas, em que cada satélite tem uma

frequência portadora específica, o que torna mais complexo o processamento, mas mais resistente a interferências, Hofmann-Wellenhof et al. (2008). Tendo o tempo como o elemento fundamental do posicionamento, o recetor compara o instante de emissão do sinal com o instante de receção, na escala de tempo do relógio do recetor. Sabendo a velocidade do sinal, é obtida uma medida da pseudodistância recetor-satélite, que tem erros incorporados (Figura 3.12).

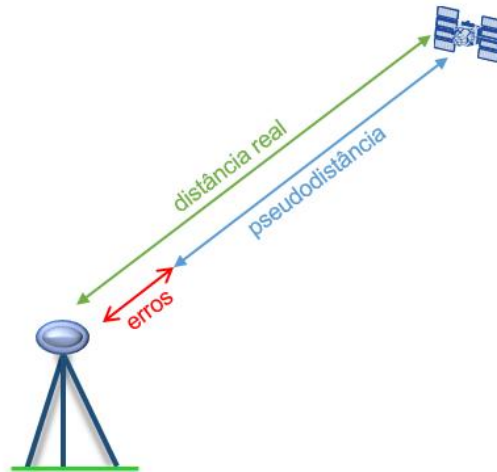


Figura 3.12 – Distância real entre antena e satélite, e pseudodistância medida pelo recetor.

Os recetores GNSS têm conhecimento prévio do código PRN, com cada satélite a ter o seu próprio código que funciona como a sua assinatura e que consiste numa sequência aparentemente aleatória de 1023 zeros e uns. Os satélites aparecem identificados pelo seu número PRN que é composto por uma letra que identifica a constelação e seguida de um número que se inicia em 01 e de forma sequencial vai até ao número máximo de satélites da respetiva constelação. A letra E identifica os satélites da constelação Galileo, enquanto que os da constelação GPS são identificados pela letra G e os das constelações GLONASS e BeiDou são identificados pelas letras R e C, respetivamente. Os satélites SBAS (Satellite Based Augmentation System), de transmissão de correções, são identificados pela letra S.

É possível saber se um determinado satélite está visível ou não com base no código PRN usando um processo de aquisição, o qual é realizado através da obtenção da correlação entre o sinal recebido e a réplica do código gerado no recetor. Este processo é designado por aquisição e baseia-se em várias correlações entre o sinal de recebido do satélite e múltiplas réplicas geradas para os diferentes atrasos do código e frequências (efeito) Doppler, devidos ao efeito de movimento existente entre o satélite e recetor. Estes dois parâmetros são as primeiras incógnitas na deteção de sinais GNSS, sendo estimados quando a réplica e o sinal estiverem alinhados. Inicializa-se então o processo de seguimento do sinal, o qual também usufruiu da contínua estimativa e correção destes dois parâmetros para melhorar os “loops”

realizados neste processo se manterá enquanto for visível pelo recetor.

Normalmente, na sua arquitetura mais comum, os recetores GNSS atribuem um canal dedicado para cada sinal a ser seguido, o qual fornece as medições de código e fase, intensidade do sinal e a mensagem de navegação. No passado, o número de canais era bastante limitado, o que nos dias de hoje, devido ao número de satélites e sinais existentes, não permitiria um seguimento na totalidade destes. No entanto, a evolução dos recetores, adaptando-se à evolução GNSS, permite realizar observações de um grande número de satélites e sinais das múltiplas constelações existentes através das centenas de canais que possuem.

A arquitetura de um recetor GNSS é complexa, mas podemos de forma simplificada dividi-lo em três mecanismos: “*Front-End*” (primeiro mecanismo do recetor), processador de banda e a unidade de controlo, Hofmann-Wellenhof et al. (2008). No entanto podemos considerar um quarto componente: a antena que apesar de ser geralmente externa ao recetor, é primeiro elemento desta cadeia, por ser através dela que é possível os sinais dos satélites chegarem ao recetor. As antenas poderão ter incorporado um amplificador, LNA (Low Noise Amplifier), permitindo dessa forma um ganho de algumas dezenas de decibéis. O segundo mecanismo é o “*Front-End*” que recebe os sinais vindos da antena, sendo realizadas ações de filtragem que reduzem o ruído e rejeitam os sinais fora das bandas GNSS. O processo começa pela amplificação do sinal com um LNA, seguindo-se uma filtragem e uma conversão para uma frequência intermédia baseada no oscilador (relógio) de cristais de quartzo, voltando de novo a ser alvo de uma filtragem, em seguida é alvo de uma amplificação através do controle automático de ganho e finalmente dá-se a conversão analógica do sinal para digital que seguirá para o componente seguinte. O terceiro componente onde se encontra o número de canais de um recetor, é o processador digital do sinal que realiza a correlação das réplicas dos códigos PRN geradas no recetor, com os sinais dos satélites, fazendo dessa forma a aquisição e o seguimento dos satélites, gerando os códigos, as fases da portadora e as frequências de Doppler através dos “Tracking Loops”. O último componente é o processador de navegação que descodifica a mensagem de navegação para obter por o tempo GPS, através da modelação dos atrasos dos relógios dos satélites (polinómio para cada satélite) e dos recetores (estes através do cálculo da posição com os códigos), as efemérides dos satélites e os dados do almanaque. Desta forma estão reunidas as condições todas para ser calculada a posição, a velocidade e o instante de tempo (PVT), finalizando com o processo de armazenamento de dados em memória interna ou em cartão de memória. Os três últimos componentes trocam informações entre si para aumentar o desempenho do recetor.



Figura 3.13 – Componentes de um recetor GNSS.

Hoje em dia existem diversos tipos de recetores direccionados para responder às diferentes necessidades da sociedade, desde os recetores de frequência simples que equipam por exemplo a maioria dos telemóveis e equipamentos direccionados para o mercado de massas, caracterizando-se por uma gama de preços económicos, aos recetores profissionais utilizados em áreas onde a exatidão e fiabilidade são muito importantes como os recetores geodésicos. Na Tabela 3.2 encontramos algumas das vantagens e desvantagens dos recetores em função das suas frequências e aplicações. Também podemos fazer uma diferenciação dos recetores pelas técnicas de aquisição e seguimento do sinal, como podemos ver de forma detalhada em alguma literatura, como Hofmann-Wellenhof et al. (2008) ou Kaplan & Hegarty et al. (2017), no entanto todos tem um elevado desempenho.

Tabela 3.2- Vantagens e desvantagens dos recetores GNSS em função das frequências.

	Frequência simples	Multifrequências
Vantagens	✎ Mais económicos ✎ Arquitetura mais simples ✎ Fácil de utilizar	✎ Minimização do efeito ionosférico ✎ Linhas de base maiores ✎ Mais fácil a correção dos “cycle slips”
Desvantagens	✎ Exatidões inferiores ✎ Dificuldades na minimização do atraso ionosférico ✎ Mais tempo de observação para melhorar a exatidão	✎ Preços elevados ✎ Maior complexidade de processos ✎ Maiores dimensões
Aplicações	Navegação, SIG, telemóveis, lazer, recreação, desporto, agricultura, pescas, floresta	Geodesia, topografia, fotogrametria, topometria, geodinâmica, GNSS/IMU

3.3.2 Antenas GNSS

Uma antena pode transmitir ou receber sinais eletromagnéticos como é o caso das antenas GNSS, convertendo os sinais vindos dos satélites em órbita em voltagens de radiofrequência elétrica. Uma das propriedades fundamentais de uma antena é o padrão de radiação definido como uma função matemática ou uma representação gráfica do campo de radiação magnética da antena, refletindo a recetividade de uma antena a um sinal em função da direção da sua incidência, o azimute e o ângulo de elevação, podendo representar várias quantidades, como ganho, diretividade, campo elétrico ou vetor de radiação, Vallozzi et al. (2016).

Uma antena GNSS é elemento crítico numa boa receção do sinal transmitido a partir dos satélites, não sendo suficiente ter um bom recetor se a antena for de má qualidade, mas mesmo que se usem antenas de elevada qualidade é fundamental ter sempre uma boa visibilidade dos satélites para realizar um seguimento contínuo do sinal. Em geral, estas consistem num elemento radiante e circuitos micro-ondas geralmente implementados fisicamente por debaixo deste numa placa de circuito impresso, PCB (Printed Circuit Board), onde podemos também encontrar um amplificador, caso se trate de uma antena ativa, sendo todos estes elementos protegidos por uma tampa transparente às ondas rádio, Kaplan & Hegarty (2017). O elemento de radiação é responsável pela largura de banda da antena e as características da radiação, enquanto que a placa condiciona o formato do padrão da radiação e o amplificador ajusta o ruído. A medição do ganho é feita em relação a uma antena ideal sem perdas que recebe sinais igualmente bem de todas as direções, designada por antena isotrópica, sendo medida em decibéis. A física das antenas é de tal ordem que para aumentar o ganho em algumas direções, é necessário reduzi-lo noutras. Deste modo, o alcance do azimute ou dos ângulos de elevação com ganho apreciável define a largura de banda da antena, que para ser mais larga obriga a uma redução do pico do ganho, enquanto que por outro lado, para aumentar o pico somos obrigados a estreitar esta banda.

A polarização é uma outra propriedade com grande impacto na caracterização das antenas GNSS, geralmente estas apresentam uma polarização RHCP (Right Hand Circular Polarization), devido aos sinais GNSS emitidos pelos satélites terem este tipo de polarização circular, que ao contrário da polarização linear, não sofrem mudanças da polarização ao atravessarem a ionosfera devido ao campo magnético da Terra. Apesar de serem desenhadas para terem um baixo ganho LHCP (Left Hand Circular Polarization), estas não são perfeitas e também podem apanhar alguma energia LHCP, em resultado essencialmente da reflexão dos sinais nas superfícies. Os sinais refletidos sofrem uma mudança da sua polarização, invertendo-se a regra da mão-direita, permitindo discriminar o sinal direto é resultado de reflexão de sinais. Na Figura 3.14 podemos ver a cobertura típica do padrão da radiação, onde os sinais com baixos ângulos de elevação implicam um ganho mais pequeno, encontrando-se maximizado no zénite, Hofmann et al. (2008). Estes sinais devidos aos satélites de baixa elevação, podem sofrer uma perda de polarização até 3 decibéis em relação aos sinais dos satélites de maior elevação, podendo ser melhorada montando a antena sobre um base metálica, Rama Rao et al. (2013).

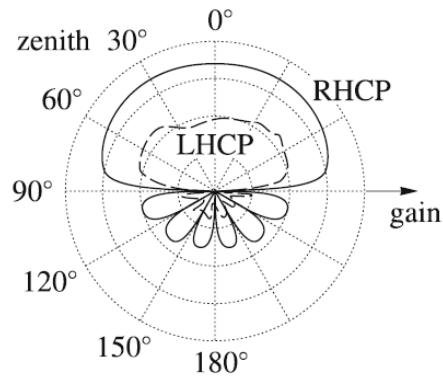


Figura 3.14 – Padrão de radiação típico de uma antena GNSS

As antenas que não recebem energia elétrica a partir dos recetores são designadas de passivas, como as dos dispositivos móveis e apenas têm o elemento de radiação. No caso das antenas ativas que se encontram separadas dos recetores possuem um amplificador LNA (Low Noise Amplifier) integrado de forma a minimizar possíveis perdas nos cabos de ligação e aumento da sensibilidade com uma redução do ruído em geral, mas contribuem para o aumento do consumo energético do recetor associado com valores típicos de 3 a 20 mA (u-blox AG, 2019). Este aspeto é uma desvantagem em relação às antenas passivas, no entanto têm a vantagem de o recetor se poder encontrar a uma distância considerável, enquanto que uma antena passiva deverá encontrar-se o mais próximo possível do recetor para minimizar perdas.

No caso particular das antenas passivas como as que equipam os *smartphones*, estas são tipicamente do tipo PIFA (Planar Inverted F Antenna), assim chamado porque a sua forma é parecida com a letra "F" invertida. Esta caracterizam-se por terem uma largura de banda estreita, geralmente construída numa PCB, sendo a primeira limitação na obtenção de medidas de boa qualidade para uma resolução rápida e confiável da ambiguidade de fase, como referido por Pesyna et al. (2014). As suas dimensões muito reduzidas e seu baixo custo, assim como a sua capacidade de radiar em mais do que uma banda de frequência, torna-as vantajosas e bastante apreciadas pelos fabricantes dos dispositivos de massas, com sua incorporação em diversos equipamentos. No entanto, a polarização linear, em vez de circular e um padrão de radiação omnidirecional, recebendo sinais de todas as direções, leva a uma perda de vários decibéis, estimado em cerca de 11 dBHz (EUSPA, 2017), particularmente devido à forte atenuação do sinal de alguns satélites enquanto recebe adequadamente o sinal de outros.

As antenas GNSS podem ser integradas no recetor, como é o exemplo dos telemóveis ou serem independentes dos recetores, enviando os sinais captados ao recetor por cabo coaxial ou tecnologia Wi-Fi. Na Tabela 3.3 encontramos um resumo dos diferentes tipos de antenas GNSS e suas principais características, assim como o tipo de aplicações em que são habitualmente usadas.

Tabela 3.3 – Antenas GNSS típicas.

	Geodésica	Cinemática	Portátil
Frequências	Multifrequência	Multifrequência	Simplex
Largura de banda	Larga	Estreita / Larga	Estreita
Padrão da radiação	Controlado	Controlado	Não controlado
Supressão reflexão de sinais	Elevada	Média	Nenhuma
Sensibilidade	Alta	Média / Alta	Baixa
Interferência de manuseamento	Elevada rejeição	Boa rejeição	Mínima rejeição
Centro de fase	Muito importante	Importante	Não é importante
Dimensões	Grandes	Médias/pequenas	Muito pequenas
Peso	Pesadas	Pouco pesadas	Leves
Custo	Elevado	Médio	Baixo
Aplicações	Geodesia Topografia Topometria	Agricultura Aeronáutica Transportes	Navegação Telemóveis SIG
			

3.3.3 *Smartphones* versus recetores/antenas GNSS

As diferenças entre os *smartphones* e os recetores geodésicos são diversas desde o hardware ao software, utilizando um número restrito de canais, o dispositivo móvel permite no máximo medições em bruto, nas duas frequências, em alguns modelos e apenas para os sistemas Galileo e GPS, ao passo que os outros dois sistemas concorrentes, GLONASS e BeiDou, só uma frequência se encontra disponível. Os recetores geodéticos, por seu lado, permitem medições em múltiplas frequências de multi-constelações, através da disponibilidade de centenas de canais.

No entanto, é nas antenas que podemos encontrar as diferenças com maior impacto no desempenho deste tipo de equipamento, começando desde logo pelas suas menores dimensões, mas esta vantagem pode-se tornar também numa desvantagem, pois com a diminuição do tamanho de uma antena também se pode degradar a sua largura de banda, Rama Rao et al. (2013). Outra desvantagem é a sua radiação com polarização linear de padrão não controlado, podendo receber sinais vindos de todos lados. Também têm uma banda estreita e uma baixa sensibilidade, e ainda, uma baixa supressão à reflexão de sinais e na rejeição às interferências maliciosas ou involuntárias. Estas antenas são do tipo passivas, sem amplificador de sinal devido ao consumo crítico de energia num equipamento como é o *smartphone*. De forma a melhorar o consumo, os fabricantes implementaram o mecanismo denominado ciclo de

trabalho (“duty-cycle”) para economizar energia, este mecanismo que não existe nos recetores, têm impacto nas medidas do sinal GNSS, impossibilitando a aquisição de forma contínua da fase da portadora, no entanto, este mecanismo pode ser desligado nas opções avançadas.

No caso dos recetores geodésicos, estes usam principalmente antenas ativas com um amplificador de sinal e com polarização RHCP, apresentando um padrão de radiação controlada, recebendo os sinais segundo uma forma hemisférica (Figura 3.14). Estas antenas apresentam uma largura de banda mais larga e com maior sensibilidade do que as dos telemóveis, suprimindo muito mais os efeitos da reflexão de sinais e de interferências eletromagnéticas independentemente da sua origem. Os centros de fase das antenas geodésicas são calibrados e disponibilizados nos ficheiros ANTEX (Antenna Exchange Format), o que não acontece no caso das antenas dos *smartphones*, o que cria dificuldades numa obtenção de exatidão milimétrica. Os recetores geodésicos também possuem um “Front-End” mais elaborado e eficiente do que os *smartphones*.

3.3.4 Ficheiros RINEX

É conhecida a grande aplicabilidade que os ficheiros em formato ASCII denominados por RINEX (Receiver Independent Exchange Format) têm na troca, na edição e no processamento de dados em bruto GNSS independentemente da origem do recetor, não sendo surpresa que se tenha sido adotado como o formato principal de acesso aos dados em bruto GNSS em *smartphones*.

Estes ficheiros foram desenvolvidos inicialmente pelo AIUB (Astronomical Institute of the University of Bern) para ser usado na campanha EUREF89 e que passou a estar sob a gestão da IGS (International GNSS Service) a partir de 2011, num trabalho em conjunto com o grupo RTCM-SC104 (IGS, 2020) e têm vindo a sofrer atualizações ao longo dos últimos anos com a introdução de novas versões, por forma a dar resposta aos novos sistemas GNSS e sinais, existindo três versões de base principais.

A versão 2 originalmente usada quando se tinha um ou dois sistemas, GPS e GLONASS evoluiu para a versão 3 como forma de adaptação ao crescente número de constelações e observáveis, tendo sido a versão utilizada pelas aplicações de gravação no *smartphone* dos sinais apresentados na Tabela 3.4 no decurso das medições efetuadas neste trabalho. Recentemente, surgiu uma nova versão 4 com atualizações em relação à versão 3, mas mantendo uma formatação idêntica, ao contrário do que anteriormente se tinha passado na passagem da versão 2 para a 3, a qual sofreu uma alteração considerável na forma de

apresentação das observáveis e que podem ser encontradas nos manuais disponibilizados pela IGS (2020). Neste manuais podemos verificar também que os ficheiros RINEX obedecem a regras de formatação muito bem definidas e qualquer alteração dessa formatação pode inutilizar a sua utilização, deste modo a conversão de dados em bruto binários é um processo rigoroso e feito maioritariamente com os programas dos fabricantes, embora alguns programas de licença livre, como o Teqc da UNAVCO (UNAVCO, 2020), entretanto descontinuado e que só suportava a versão 2, ou o RTKLib possam realizar a conversão de alguns ficheiros proprietários.

Tabela 3.4 – Observáveis Galileo e GPS, RINEX 3.03 no *smartphones*.

Sistema	Banda	Código	Fase	Doppler	Força do Sinal
Galileo	E1	C1C	L1C	D1C	S1C
	E5a	C5Q	L5Q	D5Q	S5Q
GPS	L1	C1C	L1C	D1C	S1C
	L5	C5Q	L5Q	D5Q	S5Q

3.4 Sistema Galileo

O sistema Galileo é o sistema de posicionamento global da Europa, de controlo civil e não militar como o norte-americano GPS foi desenhado pela Comissão Europeia (EC), a Agência Espacial Europeia (ESA), e a Organização Europeia para a Segurança da Navegação Aérea (Eurocontrol), como o objetivo de fornecer um posicionamento e tempo mais preciso para aplicações civis, e mais confiável com a utilização da mensagem de integridade.

A aplicabilidade das capacidades do Galileo encontra um vasto leque de alvos, desde a agricultura, ciência, transportes, comunicações, turismo, distribuição energética, sistema bancário, os serviços de segurança e emergência, mas também outros alvos macroeconômicos. Das diversas potencialidades que este sistema permite podemos referir como exemplo a possibilidade de aterrar uma aeronave com uma exatidão de 2 metros em relação ao centro da pista, introduz na aviação um elevado padrão de segurança por permitir aterragens mesmo em condições meteorológicas adversas, poupando tempo de espera das aeronaves para conseguirem uma janela de oportunidade para aterrar em segurança, ou mesmo em casos extremos serem desviados para outros aeroportos, sendo assim possível, além da segurança, aumentar a rentabilidade e um minimizar o impacto no ambiente com menos tempo de voo, e com uma diminuição significativa no efeito mais marcante nestas situações que são os grandes constrangimentos que provocam aos cidadãos.

3.4.1 Segmento espacial

O primeiro satélite Galileo do segmento espacial, com um tempo de vida útil de 12 anos, foi lançado em dezembro de 2005, contando no final de Dezembro de 2021 com uma constelação de 28 satélites MEO (European GNSS Service Centre, 2021). No entanto dos 28 satélites dois deles, o E10 e E34 ainda se encontravam nessa data em fase de validação das suas órbitas, devido ao seu recente lançamento em 05 de dezembro 2021, enquanto que outros quatro satélites se encontravam inoperacionais. Destes dois satélites, o E20 e o E22 encontram-se inoperacionais por falhas nos relógios e perda de energia, enquanto que os outros dois satélites, o E14 e E18 encontram-se numa órbita mais baixa e elíptica, devido a problemas nos seus lançamentos, não podendo ser usados, apesar dos esforços para a sua integração terem apresentado bons resultados posicionais. No entanto, as dificuldades que alguns recetores comerciais apresentaram com satélites de órbitas muito elípticas, levou à sua não utilização.

Quando a constelação estiver completa será composta por 24 satélites operacionais, numa designada por constelação Walker 24/3/1, com 8 satélites distribuídos por 3 planos orbitais (A, B e C) de inclinação 56° , igualmente espaçados por 120° . O semieixo maior orbital de cada satélite é de 29599,8 Km, levando cerca de 14h 04m 42s a realizar uma órbita completa, repetindo-se ao fim de 14 dias. Na Figura 3.15 podemos ver o carregamento de quatro satélites Galileo no contentor durante os preparativos do lançamento de dezembro de 2017. Um dos satélites de código GSAT0217, tem a alcunha Alexandre, atribuída no âmbito do concurso lançado em 2011 pela Comissão Europeia na União Europeia, com o objetivo de atribuir a cada um dos satélites Galileo o nome das crianças que ganhassem o “Concurso de Desenho Infantil do Galileo” em cada Estado Membro (European Commission, 2021).



Figura 3.15 – Carregamento dos quatro satélites Galileo do lançamento de dezembro 2017 (European Space Agency, 2017).

3.4.2 Segmento terrestre

O segmento terrestre é composto por uma rede, Figura 3.16, que controla e monitoriza o sistema Galileo e possui como centros nevrálgicos do Galileo Control Centers (GCC), o Galileo Control Segment (GCS) e o Galileo Mission Segment (GMS).



Figura 3.16 – Rede do segmento terrestre do Galileo (European GNSS Service Center, 2021)

O centro GCS, monitoriza e controla os satélites, com base em Oberpfaffenhofen perto de Munique, na Alemanha e está ligado à telemetria, ao rastreio e telecomando das estações em Kiruna na Suécia e em Kourou na Guiana Francesa. Enquanto que o centro GMS, localizado em Fucino no centro da Itália, tem como função verificar continuamente cada satélite, produzindo mensagens de correção para compensar desvios no tempo e nas órbitas. Estas são transmitidas para os satélites, os quais as retransmitem a cada 100 minutos no sinal da mensagem de navegação. Estes dois centros servem de interface entre os satélites a rede de estações terrestres que compõe o segmento terrestre. O Geodetic Reference Service Provider (GRSP) apoia o GCC na realização da referência geodésica Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF) de forma a manter a consistência como o ITRF, enquanto que o Time Service Provider (TSP) apoia o GCC na realização do sistema de tempo Galileo System Time (GST) alinhado com o Tempo Universal Coordenado (UTC).

A rede mundial é constituída por estações Galileo Sensor Stations (GSS), responsáveis por recolher e enviar em tempo real as medições de dados Galileo. Por estações Galileo Uplink Stations (ULS), que são responsáveis pela distribuição e envio dos dados da missão para a constelação. E por estações Telemetry, Tracking & Control (TT&C), responsáveis pela receção

e envio dos dados de telemetria gerados pelos satélites e ainda pela distribuição e envio dos comandos de controlo necessários para manter os satélites.

Existem diversos serviços que complementam este segmento terrestre do Galileo. O European GNSS Service Centre (GSC), localizado na Espanha próximo de Madrid, que tem como função a interligação entre os utilizadores do sistema operacional inicial do Galileo (OS) e o sistema Galileo, sendo controlado pelo Ministério da Defesa. O Galileo Security Monitoring Centre (GSMC) composto por dois centros localizados nos arredores de Paris e de Madrid, responsáveis pela monitorização da segurança do sistema e também por gerir o acesso ao Serviço Público Regulado. O Galileo Reference Centre (GRC), localizado em Noordwijk nos Países Baixos, tem como responsabilidades a monitorização e avaliação do desempenho dos serviços Galileo, sendo independente das operações da infraestrutura principal do Galileo. O Galileo Integrated Logistic Support Centre (GILSC) localizado European Space Applications Park em Transinne na Bélgica, tem como função garantir elevados padrões de funcionamento das infraestruturas terrestres do Galileo, através de uma resposta eficiente às necessidades de manutenção, através da reposição de peças e de reparações nas infraestruturas terrestres, com a atualização de equipamentos das estações ou o seu envio para os fabricantes para intervenções mais técnicas.

3.4.3 Segmento do utilizador

O segmento do utilizado é composto por todos os recetores que observam os sinais do Galileo e assim poderem determinar as suas coordenadas e um tempo muito preciso. Como se trata de um sistema muito mais recente que o GPS, não há como comparar recetores Galileo antigos e novos, todos eles são bem atuais. O segmento dos utilizadores do Galileo, esquematizado na Figura 3.17, abrange uma vasta áreas e mercados, como os transportes terrestres, marítimos ou aéreos, passando pela agricultura, segurança e proteção, pelo sector financeiro, sector energético, serviços emergência, Geodesia, Cartografia, serviços cuja sincronização precisa do tempo é crítica, as aplicações do mercado de massas e a internet das coisas (IoT).



Figura 3.17 – Áreas do utilizador do sistema Galileo (USEGALILEO.EU, 2019)

O Europa tem feito um grande esforço não só financeiro, mas também de divulgação para o uso do Galileo, como o moto “A exatidão conta. Perto já não é suficiente. Use o Galileo. Galileo Navegação criada na Europa” (USEGALILEO.EU, 2019) e com os resultados à vista, tendo-se atingido em 3 anos mil milhões de *smartphones* equipados com o Galileo e segundo o próximo relatório do mercado de 2019 da GSA, 95% dos fabricantes de telemóveis introduziram chips com capacidades de receber os sinais Galileo (GSA, 2019).

Com o objetivo de apoiar os utilizadores Galileo existe o GSC que tem a responsabilidade em estabelecer a ligação entre o sistema Galileo e os utilizadores, disponibilizando diversas funcionalidades e serviços tais como suporte técnico destinado a responder a questões dos utilizadores e desenvolvedores de aplicativos, informações sobre o status do sistema Galileo, com o fornecimento de efemérides, almanaques, avisos e notificações através das mensagens NAGUs (Notice Advisory to Galileo Users messages). A manutenção de uma biblioteca eletrónica com informações gerais e documentação do programa, assim como interface com os fornecedores de serviços GNSS, suporte em tópicos como o GNSS Simulation and Testing Infrastructure (GSTI) e monitorização da satisfação dos utilizadores são outros serviços também disponibilizados pelo GSC.

3.4.4 Serviços Galileo

O Galileo disponibilizará cinco serviços que poderão ser utilizados, o OS (Open Service) nos sinais E1 e E5a, sem custos e de livre acesso para todos, sem encriptação nem autenticação do sinal, com uma exatidão de um metro, destinado para a navegação de veículos automóveis e de serviços de telecomunicações móveis baseados em localização.

O serviço CS (Commercial Service) nos sinais E5b e E6, com maior exatidão do que OS, próxima do cm, sendo um serviço garantido, mas baseado em dados encriptados, permitindo o

desenvolvimento de aplicações para fins profissionais ou comerciais.

O serviço PRS (Public Regulated Service) nos sinais E1 e E6, também é encriptado e foi projetado para ser mais robusto, com mecanismos “anti-jamming” e de deteção de problemas de integridade. Este serviço destina-se à segurança e infraestruturas estratégicas como energia, telecomunicações e finanças, estando só disponível para autoridades governamentais.

O serviço SoL (Safety of Life Service) nos sinais E1 e E5a, representando uma melhoria de desempenho operacional do OS por meio da transmissão de informações de integridade e garantia de serviço, como informar de falhas de algum satélite. Este serviço já está disponível para a aviação seguindo os padrões da International Civil Aviation Organization (ICAO) graças ao sistema EGNOS.

O serviço SAR (Search And Rescue Service), que embora não seja de facto um serviço de navegação, vai ajudar a transmitir sinais de socorro georreferenciados a um centro de coordenação de salvamento, trata-se de um serviço de busca e salvamento mundial.

3.4.5 Sinais Galileo

Os sinais Galileo são transmitidos em três frequências usando a técnica CDMA, as bandas E1, E5 e E6 (European Union, 2021), encontrando-se enquadradas no espectro para o serviço RNSS (Radio Navigation Satellite Service) e com exceção da banda E6, as restantes estão incluídas no espectro do serviço ARNS (Aeronautical Radio Navigation Service) utilizado na aviação civil (ver Figura 3.3).

O sinal Galileo é composto pela banda E1, modelada na portadora 1575,420 MHz e suportando os serviços OS, CS, SoL e PRS, sendo composta por três canais. O canal E1-A que se encontra encriptado e disponível apenas aos utilizadores autorizados do serviço PRS, com modelação $\text{BOC}_{\cos}$ (Binary Offset Carrier, cosine-phased), e os canais E1-B e E1-C ambos de acesso aberto e com modelação MBOC (Multiplexed Binary Offset Carrier), sendo o canal B de dados, enquanto que o C é um canal piloto que se caracteriza por ter poucos dados, mas com capacidade de aquisição e seguimento do sinal mesmo quando fraco.

O sinal de banda larga E5 situado nos 1191,795 MHz é modelado pela técnica AltBOC (Alternate Binary Offset Carrier) com base nas bandas, a E5a e a E5b (Subirana, Zornoza, & Hernandez-Pajares, 2013) e caracteriza-se especialmente pelos baixos erros de reflexão de sinais e seguimento de alta precisão do código. Note-se, que estas duas bandas também podem ser utilizadas de forma independente, o que nos leva na prática a estarmos perante

cinco bandas.

A banda E5a com modelação BPSK (Binary Phase Shift Keying) na frequência dos 1176,450 MHz, suportando o serviço OS de acesso aberto, possuindo um canal de dados, E5a-I e um canal piloto, E5a-Q. Este sinal transmite dados básicos para suportar as funções de navegação e tempo, usando uma taxa baixa de 25 bps, permitindo uma desmodulação mais consistente dos dados.

A banda E5b, também modelada pela técnica BPSK nos 1207,140 MHz, suportando os serviços OS, CS e SoL, de acesso aberto contendo mensagens de integridade, mas também dados comerciais encriptados. Tem um canal de dados, E5b-I e um piloto, E5b-Q, mas com uma taxa de dados 5 vezes superior ao E5a.

Na portadora 1278,750 MHz temos a banda E6, a qual suporta serviços CS e PRS encriptados. Dividindo-se em três canais, o E6-A disponível para os utilizadores autorizados do PRS com modelação BOC_{cos}, enquanto que os outros dois canais E6-B e E6-C, respetivamente, o canal de dados e piloto, são de acesso comercial, encontrando-se modelados pela técnica BPSK.

3.4.6 Mensagem de navegação

As mensagens de navegação do Galileo são estruturadas numa sequência de “frames” e “subframes” com várias páginas. Estas apresentam cinco tipos de dados que são transmitidos em quatro mensagens de navegação Galileo, Tabela 3.5 (Hofmann-Wellenhof et al. (2008)), onde a mensagem F/NAV (Freely accessible Navigation message) está associada ao serviço OS, enquanto que a I/NAV (Integrity Navigation message) se encontra associada a três serviços, respetivamente o OS, o CS e o SoL, a mensagem C/NAV (Commercial Navigation message) é encontrada no serviço CS e a mensagem G/NAV (Governmental Navigation message) está referenciada com o serviço regulado PRS.

Tabela 3.5 – Conteúdo da mensagem Galileo.

Mensagem		F/NAV		I/NAV		C/NAV	G/NAV
Canais		E5a-I		E1B	E5b-I	E6B	E1A, E6A
Dados	<i>Busca e salvamento</i>			X			
	<i>Complementar</i>					X	
	<i>Integridade</i>			X	X		X
	<i>Posicionamento e Navegação</i>	X		X	X		X
	<i>PRS</i>						X

Nestas mensagens encontramos as efemérides com os parâmetros que definem a órbita

kepleriana de cada satélite, assim como as correções dos seus relógios, os parâmetros ionosféricos, o estado dos satélites, o almanaque e outros dados. No sistema Galileo estas mensagens são atualizadas a cada três horas, mas com uma validade de quatro horas, onde a hora de sobreposição visa salvaguardar interrupções ou atrasos. Os parâmetros dos satélites são fornecidos em intervalos de 10 minutos, permitindo uma interpolação mais rigorosa do que no caso do GPS, cujo os intervalos são de 60 minutos.

4 Metodologias de levantamento com os *smartphones*

Os levantamentos usando *smartphone* seguem os cuidados gerais de qualquer levantamento, seja só na vertente de obtenção de medidas GNSS ou também na vertente fotogramétrica usando as medidas GNSS para georreferenciação das imagens. No entanto, estes levantamentos possuem especificidades próprias quando comparados com recetores e antenas geodésicos, em particular porque os dados recolhidos são muito mais sensíveis aos efeitos da reflexão de sinais e possuem um maior nível de ruído. Neste capítulo, para além de se indicarem os equipamentos utilizados na realização dos trabalhos, também são descritas as metodologias utilizadas nos levantamentos com o *smartphone*, incluindo os aspetos gerais e as novas metodologias desenvolvidas para conseguir, usando este dispositivo, o melhor desempenho possível, nos levantamentos estáticos e cinemáticos em plataformas terrestres, aéreas e marítimas de forma a obter as melhores medidas, sobretudo no minimizar de efeitos perturbadores das observações.

4.1 Equipamentos

4.1.1 *Smartphone*

Um dos passos iniciais foi a escolha do *smartphone* mais adequado de acordo com as suas características, para tal foi usado o apoio da página eletrónica “Raw GNSS Measurements” (Android Developers, 2019), onde foi possível identificar as características dos equipamentos com capacidade de acesso a dados de código e fase em bruto existentes no mercado. Inicialmente, o Huawei P10 de frequência simples com acesso aos dados em bruto de códigos e fases era o dispositivo com melhor potencial, mas a chegada ao mercado português em outubro de 2018 do Xiaomi Mi8 com características similares, mas com a vantagem de permitir o acesso a frequência dupla nos sistemas Galileo (E1/E5a) e GPS (L1/L5), veio permitir uma capacidade de rigor posicional decimétrico e mesmo centimétrico nunca vista em dispositivos desta gama.

Apesar das dimensões relativamente pequenas deste *smartphone*, com 7 cm de largura por 15 cm de altura, tiveram-se cuidados adicionais no manuseamento deste dispositivo durante as observações estáticas e cinemáticas de forma a mitigar erros devido a estas características. Utilizou-se por baixo do equipamento uma base de alumínio para minimizar efeitos da reflexão de sinais, e também para determinar o local onde se encontrava a antena GNSS. Assim era

possível centrar a sua posição em pontos de observação ou fazer a obtenção de distâncias entre sensores para posterior compensação das suas posições. Com base em informações partilhadas pelo Dr. Wenlin Yan durante a sua colaboração com o OAUP e em testes de bloqueio do sinal, usando uma folha de metal ficou comprovado que a antena se localizava no canto superior esquerdo, local oposto as duas câmaras traseiras do *smartphone*, como podemos verificar na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Localização da Antena do *smartphone* Xiaomi Mi8.

O *smartphone* Xiaomi Mi8 vem equipado com três câmaras digitais, duas principais na parte traseira e uma na frente, a habitual câmara das “selfies” que para o trabalho não tinha interesse. Uma das câmaras principais, geralmente designada como primeira câmara, é uma Sony IMX 363 Exmor RS com um sensor de tecnologia CMOS (Complementary metal-Oxide-Semiconductor), com uma resolução de 12,2 MP (3024 por 4032 pixéis), pixel de 1,4 microns, abertura do diafragma de f/1,8 e uma distância focal de 21 mm. É uma lente tipo grande-angular.

A segunda câmara direcionada para telefoto é da marca Samsung S5K3M3 baseada num sensor CMOS, com uma resolução de 13 MP (3120 por 4208 pixéis), pixel de 1,0 microns, abertura do diafragma de f/2,4 e uma distância focal de 26 mm. As características apresentadas foram obtidas a partir dos dados EXIF (Exchangeable image file format) extraídos de fotografias obtidas com as duas câmaras.

Nos trabalhos realizados a escolha recaiu na obtenção de fotos grande-angular com o sensor da Sony, por ser um tipo de câmara padrão que equipa um grande número de *smartphones*.

Como referido no anterior capítulo, os *smartphones* possuem um mecanismo de ciclo de trabalho, “duty-cycle”, para economizar energia, que na maioria dos trabalhos realizados foi desativado, permitindo dessa da forma a gravação contínua da fase da portadora.

No entanto, três trabalhos realizados em 2019, tanto em modo estático como em cinemático, tinham este mecanismo ativo, mas as exatidões obtidas nestas observações não foram muito prejudicadas, com erros aproximadamente na mesma ordem de grandeza das observações com o mecanismo desligado.

4.1.2 Recetores e antenas

Nos trabalhos realizados foram utilizados diferentes recetores GNSS e antenas, apresentados nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2, de forma a servir de base na comparação ao *smartphone*.

Tabela 4.1 – Recetores GNSS utilizados.

Marca Modelo	Xiaomi Mi8	Trimble R6	Trimble NetR9	Septentrio Rx5	Trimble Alloy
Frequência	1 Hz	10 Hz	50 Hz	100 Hz	
Sistemas GNSS	GPS, Galileo, BeiDou, GLONASS	GPS, GLONASS	GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou, SBAS, QZSS, IRNSS		
Frequência	Dupla		Múltipla		
Tipo	Não-Geodésico	Geodésico			
Exatidão	Centímetro, decímetro	Centímetro, milímetro			
Custo	300€ - 600€	10000€ - 20000€			
Antena	Interna		Externa		
Medidas		Código e fase			
					

Tabela 4.2 – Antenas GNSS utilizadas.

Marca Modelo	Septentrio PolaNt-x MF	Trimble Zephyr II	Antcom GNSS 303L	AeroAntenna AT1675-381
Sistemas	GPS, Galileo, BeiDou, GLONASS, SBAS			
Tipo	Geodésica		Cinemática	
Frequência	Múltipla			
				

4.2 Softwares

Durante os trabalhos foram usados diferentes softwares direcionados para o planeamento, recolha e análise das observações, assim como para a conversão dos dados em formato proprietário para RINEX e ainda no processamento das medidas de código e fases, e na análise dos resultados.

4.2.1 Planeamento

Um planeamento das observações foi sempre realizado usando os softwares RxPlanner da Septentrio (Septentrio NV/SA, 2021) ou a ferramenta disponível online, Trimble GNSS Planning (Trimble Inc., 2021) de forma a escolher os períodos com maior número de satélites, melhor DOP (Dilution of Precision) e outras configurações, com especial atenção na constelação Galileo. No caso desta, por se encontrar na fase da sua finalização, ainda não disponibiliza todos os satélites em órbita, podendo originar períodos com poucos satélites visíveis.

4.2.2 Recolha de medidas GNSS no *smartphone*

A obtenção das medidas GNSS no formato de ficheiros RINEX com o dispositivo móvel foram realizadas utilizando a aplicação Geo++ RINEX Logger (Geo++ GmH, 2020), em alguns testes iniciais a aplicação RINEX ON (Nottingham Scientific Ltd, 2020) também foi utilizada, no entanto a aplicação da Geo++ revelou-se mais eficiente, por ter uma opção que evitava que o *smartphone* entrasse em modo de adormecimento ao fim de 10 minutos e dessa forma interromper a recolha das medidas GNSS. Na fase quase final deste trabalho surgiu a aplicação GNSS/IMU Logger do Instituto do Espaço da Universidade de Munique (ISTA - Institute of Space Technology & Space Applications, 2021), que também foi explorada.

Na fase inicial do estudo, entre novembro de 2018 e abril de 2019, surgiu um problema na obtenção das medidas do sinal E5a do sistema Galileo, resultante de uma atualização do firmware do *smartphone*, que tornou impossível a gravação deste sinal por qualquer aplicação. Por forma a verificar a existência do sinal no equipamento foi utilizada a aplicação GNSSLogger (Android Developers, 2019) para a recolha de dados em bruto (não em formato RINEX) para serem analisados na aplicação GNSS Analysis App e ao mesmo tempo para serem também enviados para o suporte técnico da Geo++ para análise. Das análises realizadas conclui-se que uma alteração no número de bits do código de acesso as medidas GNSS estava na origem da falha, sendo posteriormente resolvida com uma atualização da aplicação.

4.2.3 Conversão em formato RINEX

Se as medidas do *smartphone* são convertidas por defeito no formato RINEX, no caso das observadas pelos equipamentos geodésicos, tanto nos usados no campo como nos das estações de referência foi realizada a conversão dos dados em bruto proprietários para o formato RINEX através dos softwares Convert To RINEX da Trimble (Trimble, Inc., 2020) e SBF Converter da Septentrio (Septentrio NV/SA, 2021). O software BKG Ntrip Client (BNC) serviu também de apoio em alguns trabalhos efetuados, para a gravação em tempo real de dados GNSS de estações da rede EPN (EUREF Permanent Network, 2021) no formato RINEX.

4.2.4 Análises dos sinais e resultados

Nas análises do desempenho dos sinais, número de satélites, geometria, reflexão de sinais e resultados foram usados os softwares RTKLib Demo5 (Everett, 2021), réplica do código original RTKLib adaptada aos novos sinais, o software BKG Ntrip Client (BNC) através da sua ferramenta de verificação da qualidade do sinal RINEX Editing & QC e ainda, rotinas de apoio

criadas em Matlab R2020a (The MathWorks, Inc., 2021).

A análise GNSS focou-se essencialmente nos sistemas Galileo e GPS, enquanto que outros dois sistemas concorrente, GLONASS e BeiDou, não foram alvo de análise por apresentarem resultados inferiores em modo isolado e degradando as soluções finais quando combinados com os outros sistemas GNSS. Isto explica-se por o *smartphone* não permitir acesso a duas frequências nestes sistemas, só disponibilizando a frequência simples, o que enfraquece a exatidão das soluções. Também são fatores a ter em conta a menor qualidade das efemérides e dos relógios dos satélites que estes sistemas apresentam.

4.2.5 Processamento das medidas GNSS

No processamento das observações em modo estático ou cinemático foi usado o módulo RTKPOST (RTKLib), usando a técnica de observações de Diferenças-Duplas (DD) em conjugação com um filtro Extended Kalman Filter (EKF), com as seguintes definições: frequências E1, L1, E5a e L5 para *smartphone*, enquanto que no caso dos recetores geodésicos para além destas também foram usados os sinais L2 e E5b; 10°/15° de altura da máscara; efemérides difundidas; correção ionosférica com o modelo Klobuchar; correção troposférica com o modelo Saastamoinen; o ficheiro ANTEX (Antenna Exchange Format) ngs14.atx com as calibrações das antenas.

Numa fase preliminar do estudo, também se usou o software Trimble Business Center (Trimble Geospatial, 2018), mas que se revelou pouco eficaz na obtenção de soluções, devido aos seus algoritmos exigirem um bom conjunto de dados GNSS, condição que nem sempre acontece com o *smartphone* devido às limitações da antena, de canais disponíveis, intensidade do sinal, menor número de observáveis e de satélites observados. Optou-se pela sua não utilização.

4.2.6 Processamento fotogramétrico

Para a realização do processamento fotogramétrico das imagens digitais na obtenção de modelos 3D foi utilizado o software Agisoft Metashape Professional (Agisoft, 2021). Esta aplicação realiza o processamento fotogramétrico de imagens, quer na vertente de fotogrametria aérea, quer na da fotogrametria terrestre, como é o caso do método em estudo, gerando dados espaciais 3D que permitem a medição de objetos com pormenor. O software permite processar mais de 50.000 fotos sejam estas de câmaras RGB, térmicas, multiespectrais e sistemas multi-câmaras de forma acessível graças ao seu sistema de processamento automatizado inteligente, permitindo assim que um principiante neste tema possa utilizar o

software sem grandes dificuldades. No entanto, não deixa de ser uma ferramenta poderosa devido aos seus recursos avançados, mesmo do ponto de vista dos utilizadores mais especialistas.

4.3 Sistemas de coordenadas

O sistema de coordenadas geodésico utilizado na generalidade dos trabalhos apresentados nesta tese foi o ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), excetuando o trabalho cinemático aéreo, em que se adotou o sistema ITRF2014 (International Terrestrial Reference Frame 2014) à época das observações, imposto pelo projeto GRC-MS (Galileo Reference Centre-Member States) em que se inseria.

4.4 Metodologia fotogramétrica em pontos cadastrais

Se o levantamento direto de um ponto cadastral com o *smartphone* é idêntico aos habituais com equipamentos geodésicos, no caso da aplicação do método de obtenção de informação cadastral georreferenciada rigorosa (decímetro), no levantamento de pontos cadastrais por métodos fotogramétricos, foi necessário delinear uma estratégia eficiente, com uma boa relação entre o tempo de observação e exatidão.

Esta estratégia consistiu em capturar cinco fotografias, numa configuração como a apresentada na Figura 4.2. No mínimo são necessárias três imagens do ponto a levantar, com a câmara do *smartphone* em diferentes posições não colineares e a uma distância do alvo entre 5 e os 20 metros (Jaud et al. (2019), Yilmazturk & Gurbak (2019)).

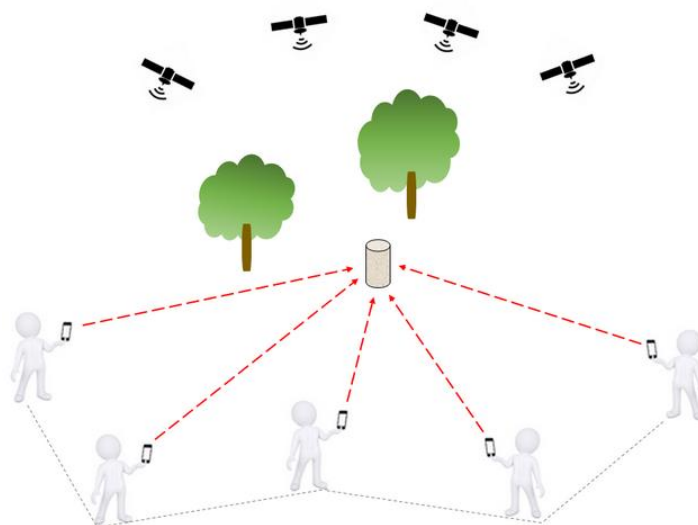


Figura 4.2 – Método usado no levantamento fotogramétrico de pontos cadastrais com *smartphone*.

Inicialmente, a captura realizava-se segurando simplesmente o telemóvel na mão, mas para minimizar as oscilações e obstruções do sinal pelo corpo do operador durante as observações, optou-se pelo uso de um bastão, no qual foi também possível colocar uma base metálica para mitigar a reflexão de sinais, cuja supressão é baixa neste tipo de dispositivo. Em cada uma das posições é feita a recolha das medidas GNSS (código e fase) com uma das aplicações do *smartphone* acima referidas para georreferenciar cada uma dessas fotografias. Estabeleceu-se uma duração mínima de observação GNSS de 40 segundos, mas sendo superior nos casos em que as condições de visibilidade dos satélites eram mais difíceis.

As imagens permitiram a obtenção das coordenadas dos pontos e ao mesmo tempo alimentaram a base do cadastro com as fotografias dos pontos levantados.

Nestes trabalhos de georreferenciação de estemas para além dos recetores geodésicos, também foi usado um taqueómetro eletrónico, modelo Trimble M3, para determinação de coordenadas dos pontos para validação.

4.5 Montagem dum suporte *smartphone* para mitigação da reflexão de sinais

Em geral, a maioria dos cuidados durante os levantamentos estáticos e cinemáticos com telemóvel são, nos seus principais aspetos, similares. A realização de observações em locais desimpedidos com boa visibilidade não é nenhuma novidade, em especial na escolha do local para um levantamento em modo estático, porque em cinemático esta condição é muito mais difícil de concretizar. No entanto, mesmo em posicionamentos estáticos nem sempre é possível satisfazer plenamente esta condição e para mitigar estas situações, e a baixa supressão da reflexão de sinais no *smartphone*, foi utilizada uma base metálica debaixo do telemóvel para ajudar na eliminação de alguns sinais refletidos, Figura 4.3. No entanto nem sempre foi possível a sua utilização, como no caso dos levantamentos aéreos.



Figura 4.3 – Base metálica por baixo do *smartphone* para minimizar as reflexões.

Uma forma de minimizar erros neste dispositivo seria também aumentar o tempo de observação, o que se procurou fazer em alguns levantamentos, enquanto que noutros, devido às técnicas rápidas de observação, houve uma maior sujeição aos erros. Uma outra medida tomada foi o processamento com uma altura da máscara de 10° ou 15° , que também permite para além das reflexões, a mitigação de outros erros atmosféricos que afetam em especial os satélites mais próximos do horizonte.

5 Trabalhos de campo

Neste capítulo são apresentados os diferentes trabalhos de campo realizados em ambiente real descrevendo-se as técnicas e metodologias mais adequadas à natureza inovadora de cada um deles, em modo estático ou cinemático, mas tendo como denominador comum, o posicionamento diferencial usando as medidas código e fase de dupla frequência disponíveis nos dispositivos móveis para os sistemas Galileo e GPS. Atendendo a que a constelação Galileo não se encontrava finalizada, podendo existir períodos com um menor número de satélites visíveis, e que a constelação GPS também ainda não está toda modernizada com satélites a difundir o sinal L5, a melhor abordagem adotada foi o cálculo de soluções combinadas das duas constelações.

A maioria dos levantamentos estiveram sujeitos às condições reais do meio onde se realizaram, como nos casos dos levantamentos cinemáticos, o mesmo se passando em alguns dos levantamentos em modo estático. No entanto, houve casos em que as condições escolhidas procuraram reproduzir no ambiente do OAUP os vários tipos de condições que seriam encontradas num levantamento cadastral, tais como a proximidade de estruturas, edifícios, árvores, postes, etc., que criam dificuldades às observações GNSS, mais acentuadas num *smartphone* devido às suas características.

No subcapítulo 5.1 são apresentados três levantamentos com objetivos de aplicação na georreferenciação de pontos cadastrais designados por A, B e C, tendo todos eles a utilização inovadora de um *smartphone* para um posicionamento com exatidão em contexto do cadastro, através da medição de coordenadas com recurso a métodos fotogramétricos a partir de imagens ou por coordenação direta dos pontos por GNSS.

No subcapítulo 5.2 encontramos um trabalho intitulado por D, com o objetivo de utilizar estações de referência a grandes distâncias dos pontos a coordenar por posicionamento diferencial GNSS com o *smartphone*.

No subcapítulo 5.3 encontramos os levantamentos em modo cinemático, em diferentes ambientes, com uma expectativa inovadora de aplicação das capacidades GNSS de um *smartphone* em trabalhos desta natureza. Um levantamento E foi dedicado às observações GNSS com o telemóvel em meio fluvial, com o objetivo de poder servir de fonte de dados precisos no apoio à georreferenciação em trabalhos de Hidrografia, como as sondagens. Os levantamentos F e G mostram os trabalhos efetuados em ambiente aéreo, que para além, de avaliar o potencial geodésico, também avaliaram o potencial em navegação aérea, como complemento valioso ao uso das Regras de Voo Visual, designação em português do “Visual

Flight Rules” (VFR) conforme indicado no “Manual VFR” dos Serviços de Informação Aeronáutica (AIS) (2021). Os levantamentos H e I foram dedicados aos trabalhos efetuados no ambiente terrestre, com a possibilidade de emprego dos dados adquiridos com este tipo de equipamento móvel em contextos de “crowdsourcing” geoespacial, mas também numa vertente restrita de trabalhos com objetivos mais de índole geodésica, como por exemplo na obtenção de dados para definição de um modelo de elevação do terreno.

Na verdade, apenas os primeiros levantamentos, A, B e C, dizem respeito ao cadastro. Contudo, os restantes foram realizados de forma a testar as diferentes formas de posicionamento com o *smartphone*. Uma vez que se traduziram em importante conhecimento para a utilização destes dispositivos, tendo por isso impacto muito além da sua aplicação no caso cadastral, decidiu-se incluí-los nesta tese.

5.1 Levantamento de pontos de cadastro

Os levantamentos de pontos cadastrais foram realizados através da georreferenciação com a observação direta nos pontos e também com o método fotogramétrico.

5.1.1 Levantamento A - Método fotogramétrico

Em 29 de junho de 2019, entre as 14:30 e as 15:30 horas UTC foi realizado o levantamento identificado como A, em modo estático, observando-se pontos de estrema com o *smartphone*, no que foi o primeiro teste com este equipamento em ambiente real do método fotogramétrico em avaliação. Serviu sobretudo para verificar quais as dificuldades que se poderiam experimentar e assim adotar-se os melhores procedimentos.

Neste trabalho foram realizadas observações de nove pontos de estrema de um terreno (Figura 5.1). Como alguns pontos não permitiam um levantamento GNSS, recorreu-se à utilização de técnicas clássicas de topografia com um taqueómetro eletrónico, sendo em pontos desta natureza que o método fotogramétrico em estudo pode ser muito vantajoso, permitindo em pontos afastados da estrema a obtenção de medidas GNSS válidas.

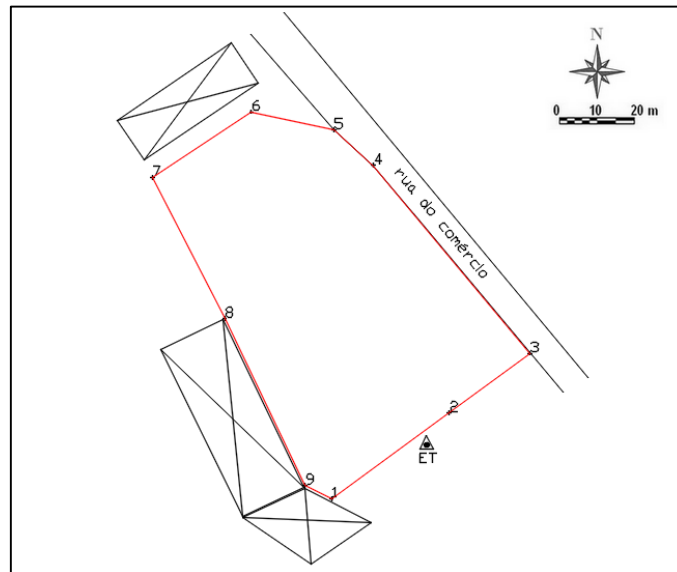


Figura 5.1 – Croqui dos pontos cadastrais do levantamento A

No levantamento das estremas apresentadas na Figura 5.1, foram utilizados o *smartphone*, o recetor RTK R6 e o taqueómetro eletrónico M3 da Trimble. Estes dois últimos equipamentos serviram de base de comparação das coordenadas obtidas com o *smartphone*.

O recetor RTK foi utilizado na coordenação dos pontos que permitiam aplicação desta técnica em tempo real (Figura 5.2 (a)), concretamente os pontos 2 a 7, usando a estação de Gaia da ReNEP (Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS). Este equipamento também serviu para coordenar a base do taqueómetro eletrónico, que serviu de apoio no levantamento dos pontos cadastrais 1, 8 e 9 que não eram observáveis pela técnica RTK (Figura 5.2 (b)).

O levantamento pelo método fotogramétrico foi realizado para os pontos cadastrais 1, 3, 4, 5, 6 e 7. Os restantes ficaram excluídos pela dificuldade de observação GNSS devido às árvores existentes no terreno.

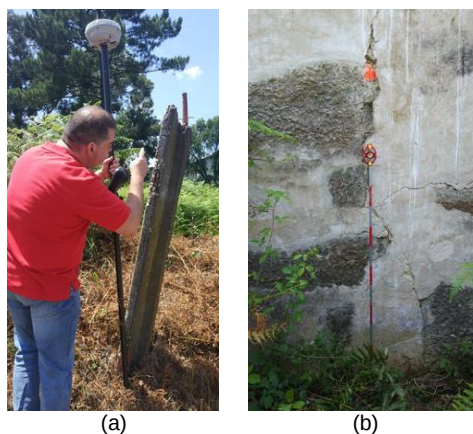


Figura 5.2 – Levantamento do ponto 1 com recetor GNSS R6 (a) e do ponto 8 com técnica clássica com a ET (b).

Este trabalho, que foi a primeira abordagem do método fotogramétrico, consistiu em tirar quatro fotografias, em diferentes posições em torno da estrema a coordenar. Nessas posições realizou-se a observação GNSS durante um intervalo de tempo de aproximadamente meio minuto, com a aplicação RINEX Logger. Nesta abordagem o *smartphone* foi manuseado sem recurso a bastão, tendo-se verificado que esta forma de execução, apesar de ser imediata, na prática podia introduzir erros grosseiros com oscilações do equipamento durante os processos de aquisição da imagem e de observações GNSS sobretudo em tempos mais longos de observação.

Em trabalhos posteriores, como poderemos ver à frente, optou-se pela utilização de um bastão como apoio do *smartphone*, permitindo maior estabilidade do equipamento, o que ao mesmo tempo permite a utilização de um base de metálica por debaixo do equipamento minimizando os efeitos da reflexão de sinais. O cálculo das soluções em modo diferencial com duplas-diferenças foi realizado com o software RTKLib Demo5 utilizando a estação de referência existente nas instalações do Observatório Astronómico da Universidade do Porto (OAUP), equipada com um recetor Alloy e antena Zephyr Geodetic II da Trimble. Não foi utilizada a estação de Gaia (ReNEP), também aqui localizada, por não registar com a frequência de amostragem de 1Hz. No entanto, a obtenção de soluções para todos os pontos nem sempre foi possível, devido à existência de árvores e construções que condicionaram as medidas não permitindo o cálculo de soluções diferenciais com exatidão. A geração do modelo 3D de cada ponto foi realizado através da técnica SfM do software Agisoft Metashape.

5.1.2 Levantamento B - Método direto

Num hipotético cenário de um prédio cadastral, foram observados diretamente com o *smartphone* pontos numa infraestrutura existente no OAUP, realizados em julho e agosto de 2020 (Figura 5.3). Foram observados 18 pontos com o *smartphone* e o recetor PolaRx5, com este a usar uma antena PolaNt-MF (Figura 5.4), apoiados por um bipé e um bastão. No caso do *smartphone* foi usada a base metálica colocada debaixo dele para minimizar os efeitos da reflexão de sinais. As coordenadas obtidas com o recetor serviram para avaliação das obtidas com o dispositivo móvel.

Por vezes, nos levantamentos cadastrais também pode ser necessário coordenar, para além das estremas, outros pontos correspondentes a construções ou outros elementos caracterizadores do prédio, tais como pontos de água ou edifícios de apoio. Neste sentido foram observados os pontos com os números de 11 a 18.



Figura 5.3 – Pontos delimitadores observados na infraestrutura no OAUP.

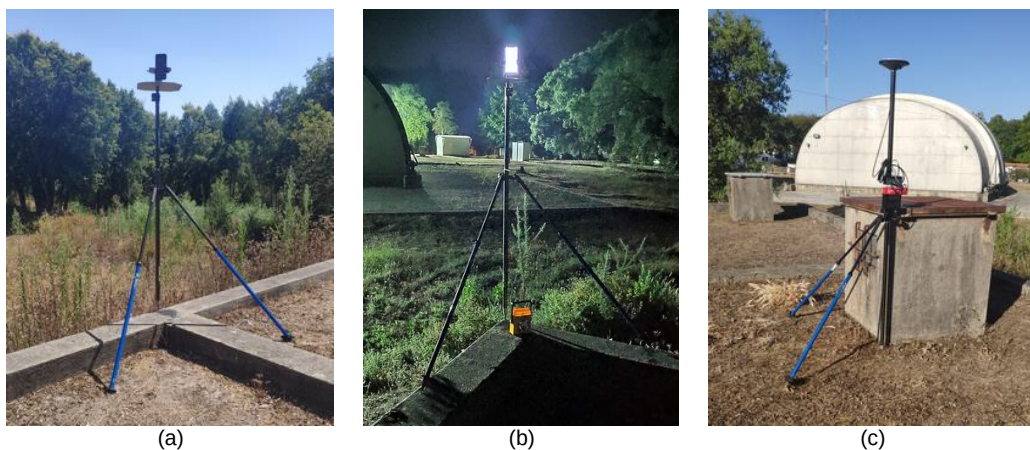


Figura 5.4 – Observações com o *smartphone* diurnas (a) e noturnas (b), e com o recetor PolaRx5 (c).

Foram efetuados três testes com o *smartphone* em posicionamento estático, em diferentes dias, a diferentes horas do dia e da noite, utilizando a aplicação RINEX Logger para a obtenção dos ficheiros de observação com diferentes tempos de observação de meio minuto no Teste 1, dez minutos no Teste 2 e cinco no Teste 3. O primeiro teste de observações com a duração de 30 segundos, que é o tempo mínimo definido no serviço Geopredial para observação de pontos cadastrais por técnicas GNSS, foi realizado em duas sessões repartidas pelos dias 3 e 16 de julho de 2020. Em cada uma das sessões foram observados um conjunto de 9 pontos aleatórios com o objetivo de se ter observações em diferentes datas. No dia 3 as observações dos pontos 2, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 16 e 17 iniciaram-se às 21:48 e terminaram às 22:13 horas UTC, enquanto que no dia 16 as observações realizaram-se entre as 21:46 e as 22:09 horas para os restantes pontos. Foram sido selecionadas as horas que apresentavam melhor geometria e número de satélites Galileo e GPS.

Um segundo teste foi efetuado no dia 18 de julho de 2021, com observação de dez minutos em cada ponto, a partir das 23:06 até às 02:47 horas UTC. O horário das observações foi selecionado de forma a termos a melhor geometria e número de satélites Galileo e GPS. O terceiro teste com observações de cinco minutos foi efetuado entre as 13:26 até as 14:29 hora UTC de 24 de julho de 2021, um período com boas condições de observação.

O levantamento com o recetor geodésico combinado com uma antena PolaNt-MF (Figura 5.4 (c)) para a obtenção das coordenadas de referência foi efetuado a 02 de agosto de 2020.

Todos os levantamentos tiveram as suas soluções calculadas segundo o método diferencial usando a estação de referência Trimble do OAUP indicada no subcapítulo anterior, através do programa RTKLib Demo5, usando as configurações enunciadas no capítulo 4.

5.1.3 Levantamento C - Método fotogramétrico e direto

A 21 de agosto de 2021 efetuou-se um levantamento pelo método fotogramétrico para georreferenciar pontos cadastrais, tais como marcos e marcas em rochas, muros e edifícios, de um prédio, simulado para o efeito no espaço do OAUP, Figura 5.5.

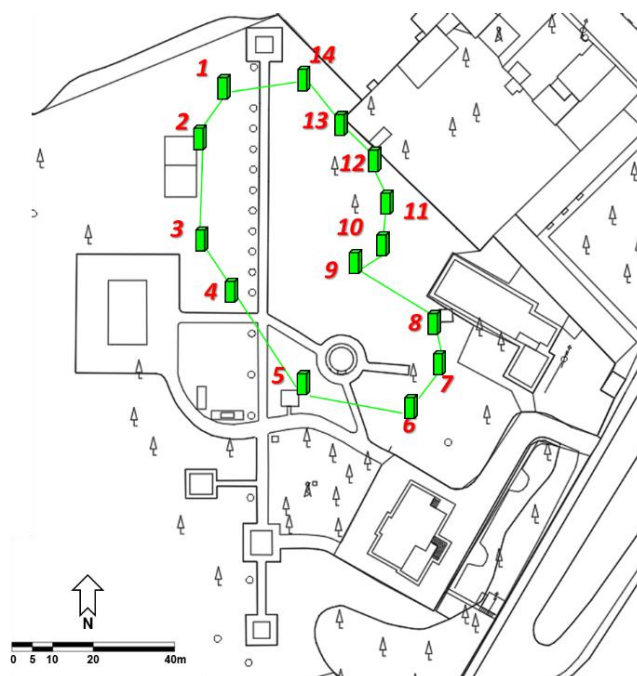


Figura 5.5 – Croqui dos pontos cadastrais do levantamento C.

Para verificar a qualidade das soluções obtidas pelo método fotogramétrico, recorreremos a técnicas clássicas de topografia que nos permitem determinar as posições de forma absoluta com exatidões da ordem do centímetro. Estes métodos são obviamente muito mais custosos e

mais exigentes do ponto de vista logístico, Desta forma, os pontos cadastrais foram coordenados de forma rigorosa por técnicas clássicas de topografia usando o taqueómetro eletrónico Trimble M3, Figura 5.6 (c), estacionada no pilar 9 da base de calibração do OAUP. Este método de elevado rigor e custo permite alcançar exatidões na ordem dos milímetros, o que é exagerado para as exatidões decimétricas exigidas num levantamento cadastral.

Foi realizado mais tarde, em 11 de janeiro de 2022, um levantamento GNSS direto, com a observação no ponto cadastral com o *smartphone*, com a duração mínima de 5 minutos, prologando-se um pouco mais nos pontos mais difíceis. Nessa mesma altura também foram observados alguns pontos segundo o método fotogramétrico com um tempo de observação de 180 segundos (3 minutos), valor máximo adotado no serviço Geopredial, por forma a podermos melhorar a exatidão das soluções GNSS e assim, obter um modelo tridimensional mais rigoroso. Em ambos casos foi usado como suporte um bipé com uma base metálica, Figura 5.6 (b), para eliminar possíveis oscilações que um maior tempo de observação pode ter de parte do operador ao segurar o bastão só com as mãos.

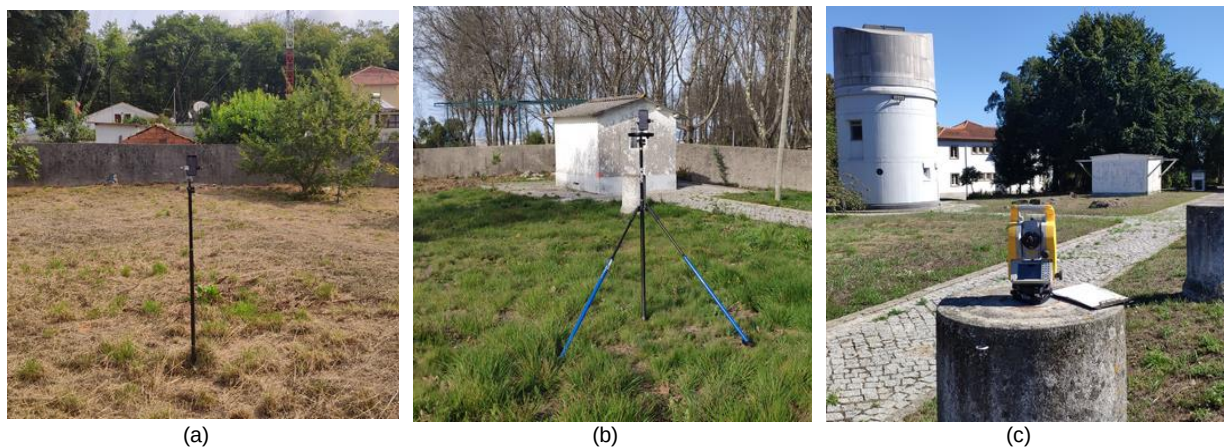


Figura 5.6 – Levantamento com *smartphone* (a, b) e taqueómetro eletrónico (c).

Com vimos cada ponto cadastral tem associadas cinco fotografias georreferenciadas pelas soluções obtidas com método pós-processamento diferencial. Na Figura 5.7 podemos ver fotografias de quatros dos pontos cadastrais observados, respetivamente, um marco (a, e), uma marca-rocha (b, f), uma marca-construção (c, g) e uma marca-muro (d, h).

Num cenário destes a contribuição do método fotogramétrico ou do método direto de medição GNSS com o *smartphone* poderão ser uma mais valia, com redução de custos por não ser necessário recorrer a técnicos especializados. Há também a vantagem, no método fotogramétrico, de se tornar possível a medição de pontos que, devido à sua natureza, não permitem uma fácil medição GNSS, como os pontos exemplificados na Figura 5.7 (a, e) e (c, d).



Figura 5.7 – Marco 1: (a) foto smartphone, (e) visada taqueómetro; Marca-rocha 4: (b) foto smartphone, (f) visada taqueómetro; Marca-construção 8: (c) foto smartphone, (g) visada taqueómetro; Marca-muro 13: (d) foto smartphone, (h) visada taqueómetro.

As coordenadas foram obtidas utilizando o RTKLib Demo5 em modo diferencial usando a estação localizada nas instalações do OAUP. Os conjuntos de cinco pontos coordenados e respetivas fotos, tal como no levantamento A, permitiram a através da técnica SfM do software Metashape, a geração de um modelo 3D onde pudemos medir as coordenadas dos pontos.

5.2 Levantamento estático

A pensar noutras aplicações que exigem exatidões de posicionamento decimétricas ou mesmo centimétricas, como por exemplo na densificação de redes de apoio em zonas remotas, foi efetuado também uma avaliação da utilização de estações de referência localizadas a centenas de quilómetros para um posicionamento diferencial com o *smartphone*. Após uma exaustiva busca pela literatura concluímos que um tal estudo não teria sido feito antes, ou pelos não teria sido publicado. Estes resultados foram por isso alvo de uma publicação, Magalhães et al. (2021). A originalidade da abordagem foi um dos aspetos notado pelos revisores durante o processo de revisão do artigo.

Não sendo diretamente uma aquisição de dados cadastrais, a realização deste tipo de posicionamento é de grande importância para o cadastro. A possibilidade de criar redes de apoio topográfico de grande rigor posicional, em locais remotos e recorrendo a equipamentos de baixo custo, é de grande interesse para apoio aos levantamentos topográficos tradicionais, e em particular os cadastrais.

5.2.1 Levantamento D – Bases longas

Em fevereiro, março e novembro de 2021 foram realizadas observações dos pilares da base de calibração de coordenadas conhecidas existente no OAUP (Figura 5.8 (a)), com o objetivo de avaliar a exatidão que poderíamos obter com o *smartphone* num posicionamento relativo usando estações de referência localizadas a grandes distâncias (Figura 5.8 (b)).

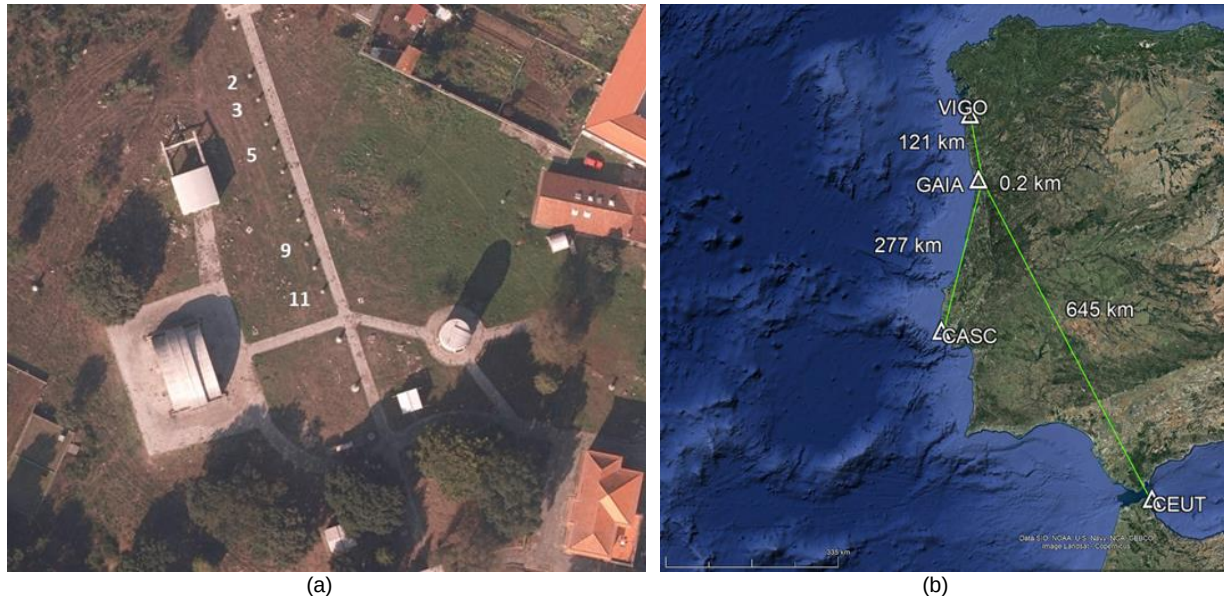


Figura 5.8 – Pilares utilizados da base de calibração do OAUP (a), estações e respetivas linhas de base (b).

Foram escolhidas quatro estações, da rede de estações permanentes da EPN, duas em Portugal e duas em Espanha. Em Portugal foram escolhidas as estações de Gaia (GAIA), a que corresponde a mais curta linha de base, inferior a 0,2 km, e Cascais (CASC) a uma distância muito superior, de 277 km. No território espanhol a escolhas recaíram nas estações de Vigo (VIGO), à distância de 121 km e de Ceuta situada no continente africano a uma distância de 645 km, o que é uma linha de base muito significativa e pouco usual em posicionamento diferencial.

Atendendo a que, com o aumento das distâncias das linhas de base, a exatidão nas soluções diferenciais diminui basicamente em $0,1\text{ppm} \times \text{distância}$ segundo o “User manual of the Bernese GNSS Software, Version 5.2” (Dach et al. (2018)), estima-se para esta distância tão grande de Ceuta, um possível erro na ordem dos 6,5 cm.

Na Tabela 5.1 podemos ver um resumo das distâncias de cada linha de base, recetores e antenas das estações, sistemas GNSS disponibilizados, assim como a localização e a rede a que pertencem. Os ficheiros RINEX de observação, das estações de referência foram obtidos com o software BKG Ntrip Client, à cadência de 1 s, a partir do sítio da EUREF (www.euref-ip.net).

Tabela 5.1 – Estações de referência utilizadas.

Estação	Linha de base (km)	Recetor	Antena	Sistemas GNSS	Rede	Localização
GAIA	0,2	Trimble Alloy	Trimble GNSS-Ti Choke Ring v2	Galileo, GPS GLONASS	ReNEP	Gaia Portugal
VIGO	121,1	Trimble NETR9	Trimble L1/L2 Dorne Margoli Choke Ring	Galileo, GPS GLONASS, BeiDou	ERGNSS	Vigo Spain
CASC	277,2	Trimble Alloy	Trimble GNSS-Ti Choke Ring v2	Galileo, GPS GLONASS	ReNEP	Cascais Portugal
CEUT	645,5	Trimble NETR9	Trimble L1/L2 Dorne Margoli Choke Ring	Galileo, GPS GLONASS, BeiDou	ERGNSS	Ceuta Spain



Figura 5.9 – Observações realizadas nos pilares da base de calibração do OAUP.

As observações nos pilares foram realizadas em seis testes, distribuídos por diferentes dias, a diferentes horas do dia e da noite, e com diferentes durações, usando uma base de centragem forçada. Foi usado o RINEX Logger para a recolher os ficheiros de observação. Excetuando o primeiro teste, em todos os outros testes o dispositivo foi colocado na vertical, tendo sido usada em três dos testes uma base de alumínio para mitigar efeitos da reflexão de sinais.

O primeiro levantamento, denominado “teste 1”, foi realizado utilizando dois *smartphones* Mi8 idênticos, designados como *smartphone A* e *smartphone B* que realizaram observações em simultâneo e no mesmo ponto. A razão para usar dois *smartphones* do mesmo modelo foi porque como estes tinham sido adquiridos em ocasiões diferentes, queríamos avaliar uma

possível influência do hardware/firmware. Cada observação teve uma duração de 10 minutos, com os dois *smartphones* posicionados 28,5 cm acima do topo do pilar (Figura 5.9 (a)). Os trabalhos iniciaram-se às 22:00 horas UTC do dia 12 de fevereiro de 2021. A fim de avaliar possíveis perturbações nos sinais GNSS, o Wi-Fi, o Bluetooth e o sinal GSM foram ligados e desligados (modo de voo) durante as observações realizadas nos pilares 2, 3, 5, 9 e 11 (ver Figura 5.8 (a)) em duas rondas. Na primeira ronda o *smartphone* A estava com modo de voo ligado e o *smartphone* B com modo de voo desligado, invertendo-se os papéis na segunda ronda.

No teste 2, foi utilizado apenas um *smartphone*, colocado verticalmente com antena 42 cm acima do pilar 9 (Figura 5.9 (b)). O levantamento teve uma duração de duas horas, com início às 15:27 horas do dia 25 de fevereiro de 2021, com o objetivo de verificar o desempenho do dispositivo durante um período mais longo de observação. Para avaliar a qualidade dos sinais adquiridos do *smartphone*, foram usadas as medições do recetor Trimble Alloy (estação de referência), montada em um pilar próximo a 15 metros.

O teste 3 foi realizado no dia 13 de março, entre as 21:30 e a 23:30 horas, observando-se os pilares 5, 9 e 11 por 30 minutos cada, com apenas um *smartphone*. A antena do dispositivo foi posicionada verticalmente com uma altura de 30 cm do topo do pilar. A antena Septentrio PolaNT-MF com recetor PolaRx5, também foi montada na mesma plataforma em modo excêntrico, 18 cm ao norte do ponto de referência e com uma altura de 20 cm em relação ao seu ARP (Antena Reference Point) (Figura 5.9 (c)). O recetor PolaRx5 foi usado para comparar a exatidão do posicionamento entre equipamentos de elevado desempenho e o *smartphone*.

Os testes 4, 5 e 6 foram realizados com o objetivo de obter medidas durante períodos mais longos de observação. O tempo total de observação destes testes traduziu-se num acumulado de 12 horas, dividido por intervalos de 4, 3 e 5 horas, respetivamente, permitindo desta forma uma maior robustez dos resultados obtidos. Esses testes foram realizados em pilares, horas e dias diferentes, com o *smartphone* a 29 cm acima do topo do pilar (Figura 5.9 (d, e, f)).

O teste 4, foi realizado às 16:30 horas do dia 18 de novembro de 2021, durante 4 horas no pilar 9, enquanto que o teste 5 durou 3 horas, começando às 18:30 horas do dia 19 de novembro de 2021 no pilar 5. O teste final, com o número 6, teve um tempo de levantamento de 5 horas, no pilar 11, com início às 08:15 horas do dia 22 de novembro. Nestes últimos três testes, uma base de alumínio foi usada debaixo do *smartphone* para minimizar os efeitos da reflexão de sinais.

Em todos os testes as soluções foram calculadas com o programa RTKLib Demo5, usando as habituais configurações.

5.3 Levantamento cinemático

No âmbito do posicionamento em modo cinemático, usando como ferramenta inovadora um telemóvel, todos os trabalhos efetuados tiveram como objetivo comum a avaliação do seu potencial num contexto em que os erros encontrados possam servir aplicações no campo da geodesia e de navegação. Com a melhoria do nível de exatidão que um *smartphone* de dupla frequência introduz em trabalhos desta natureza, são apresentados estudos em diferentes ambientes: dois em plataforma aérea, um em plataforma terrestre e um em plataforma marítima.

As capacidades GNSS destes equipamentos poderão beneficiar algumas aplicações de levantamento cinemático, como por exemplo aquelas em que é necessário localizar sensores recolhendo dados em movimento. É o caso do apoio aos levantamentos batimétricos, melhorando a exatidão limitada de muitos dos sistemas de sondagens hidrográficas que geralmente utilizam a frequência simples e muitas vezes apenas com posicionamento por códigos. No caso aéreo o posicionamento com exatidão é importante na recolha de imagens para levantamentos fotogramétricos ou com sensores de recolha de dados geofísicos.

Como já foi referido, estes levantamentos não se relacionam com o tema da aquisição de dados cadastrais. Contudo, a sua realização traduziu-se em importante conhecimento da performance dos aparelhos e das condicionantes para a qualidade do sinal, que foi de grande utilidade para as aplicações estáticas como as do levantamento cadastral. Por essa razão elas são descritas neste capítulo.

5.3.1 Levantamento E - Hidrográfico

Num levantamento em ambiente fluvial o *smartphone* e o recetor geodésico PolaRx5, com a antena PolaNt da Septentrio, foram montados numa lancha rápida semirrígida (Figura 5.10). A antena do dispositivo móvel foi posicionada ao lado da antena geodésica, no sentido de deslocação da embarcação, num bastão com uma base de alumínio por baixo, como noutros casos, para minimizar a reflexão de sinais. Este efeito é bastante significativo neste tipo de ambiente como resultado da combinação das reflexões no espelho de água com a arfagem da embarcação.

O bastão foi fixado à estrutura metálica do painel de comando da embarcação, mitigando as vibrações do movimento próprio de um barco. As antenas foram colocadas muito próximas, como podemos ver na Figura 5.10 (b, c). O desenho das suas posições resultou na distância de 14 cm e 7 cm segundo os eixos xx e yy, respetivamente. Assumiu-se que a antena do *smartphone* e a base da antena PolaNt se encontravam ao mesmo nível.

As soluções de ambos equipamentos foram calculadas em modo diferencial com a estação de referência Trimble do OAUP, com o software RTKLib Demo5, usando as configurações definidas no capítulo 4.

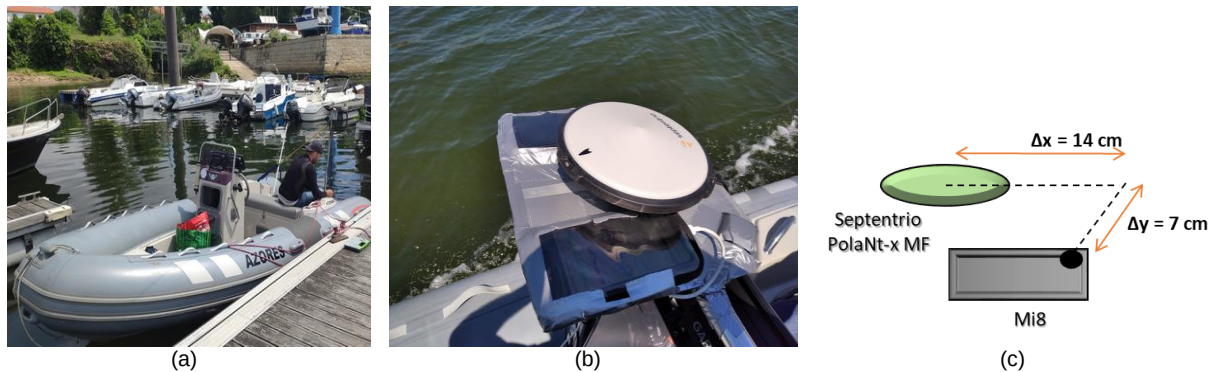


Figura 5.10 – Embarcação do levantamento hidrográfico (a), *smartphone* à direita da antena (b), offset entre antenas (c).

O levantamento realizou-se na zona da marina do Freixo, no dia 4 de maio de 2021, seguindo um desenho de perfis para sondagens, Figura 5.11, entre as 10:55 e 11:50 horas UTC, durante 55 minutos. Foi usada a aplicação RINEX Logger para adquirir as medidas dos sinais GNSS.



Figura 5.11 – Trajetória realizada no levantamento hidrográfico em 04 de maio de 2021.

O propósito deste trabalho foi avaliar o desempenho do *smartphone* como ferramenta de posicionamento de exatidão num levantamento hidrográfico ou também como uma ferramenta para a comunidade de “crowdsourcing” como o OpenSeaMap. O comportamento do dispositivo móvel num ambiente destes, que geralmente tem uma boa visibilidade sobretudo no cenário de mar é, no entanto, fortemente sujeito a reflexões na superfície da água. No caso do rio, para além deste efeito, a existência de pontes e os efeitos “canyon” das margens podem também condicionar o sinal com reflexões e mesmo quebras no seu seguimento. O processamento diferencial foi efetuado com as configurações e a aplicação usadas anteriormente.

5.3.2 Levantamento F - Aéreo

Um levantamento aéreo foi realizado no âmbito do projeto GRC-MS, financiado pela EUSPA, que visa a avaliação do desempenho do Galileo. O grupo da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP) é responsável por avaliar o desempenho do sistema para posicionamento e navegação em aeronaves. Várias campanhas (4 por ano) foram realizadas desde o outono de 2018 até ao presente. Aproveitando a disponibilidade do avião, Figura 5.12 (a), decidiu-se levar a bordo o *smartphone* Mi8 de forma a avaliar o seu potencial para ser utilizado como dispositivo de baixo custo para navegação aérea e georreferenciação.



Figura 5.12 – Avião CESSNA C210 (a), localização do *smartphone* e antena aérea (b).

O *smartphone* foi então montado na janela superior traseira de um avião CESSNA C210, conforme mostrado na Figura 5.12 (b), para observação das medidas de fase e código com a aplicação GNSS Logger nas duas frequências disponibilizadas pelo *smartphone*. Este foi o local possível para posicionar o equipamento sem colocar em causa os elevados padrões de segurança exigidos numa aeronave, no entanto a natureza da sua localização introduz algum ruído e quebras no sinal, especialmente durante manobras. Um recetor Septentrio PolaRx5 multifrequência e uma antena AeroAntenna, previamente instalada na fuselagem do avião, foram usados para a observação dos sinais para servirem de comparação.

Na sua montagem no avião, o *smartphone* foi alinhado com a antena aérea segundo o eixo dos yy, com diferenças nos eixos dos xx e zz de 1,10 m e 0,30 m (Figura 5.13). A redução entre antenas foi realizada com um algoritmo em Matlab criado para o efeito, utilizando os parâmetros da atitude do sistema de posição e orientação POS (Position and Orientation System) que equipa este avião e é habitualmente utilizado para fotogrametria aérea. Este sistema GPS/IMU utiliza um recetor NovAtel de dupla frequência e uma unidade inercial tipo FOG (Fiber-Optic Gyroscope).

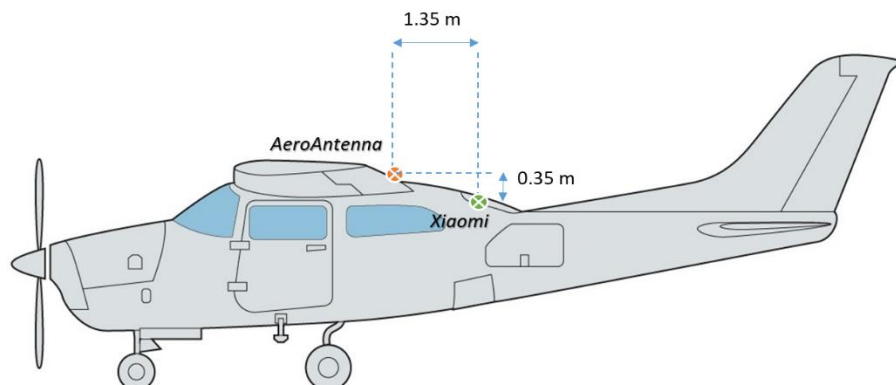


Figura 5.13 – Distâncias (“leverarms”) entre as antenas no avião.

Neste levantamento, devido às especificações deste projeto, as coordenadas foram calculadas em ITRF2014 à época das observações. As coordenadas da antena de referência do OAUP foram estimadas para cada campanha, usando as velocidades disponibilizadas pela EUREF (EUREF Permanent Network, 2021) para a estação permanente de Gaia da ReNEP, situada aproximadamente a 200 metros. As soluções de ambos os equipamentos foram calculadas em modo diferencial com o software RTKLib Demo5, com as configurações definidas no capítulo 4 e usando a estação de referência Trimble do OAUP.

Uma campanha efetuou-se a 7 de outubro de 2019, com início às 16:00 horas UTC, enquanto a outra foi realizada a 10 de junho de 2020, com início às 14:30 horas, com duração de hora e meia, após as descolagens do aeródromo de Vilar de Luz na Maia, realizando-se os trajetos esquematizados na Figura 5.14.

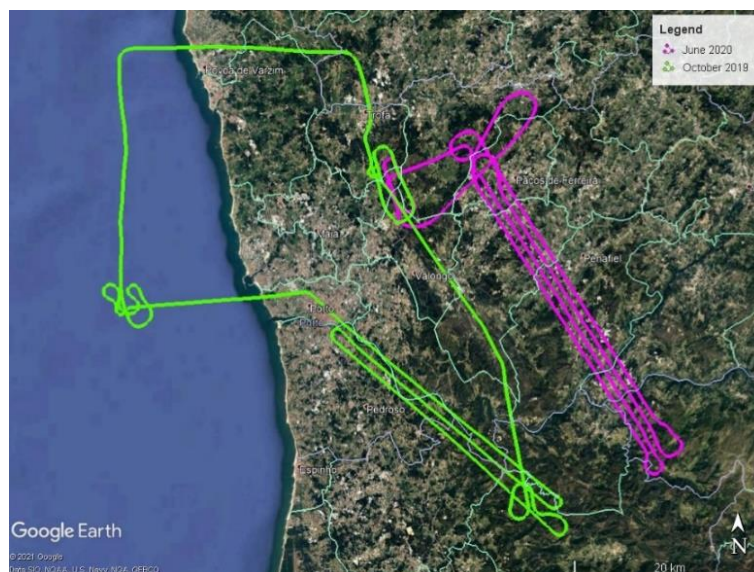


Figura 5.14 – Trajetórias efetuadas em outubro de 2019 (verde) e junho de 2020 (magenta).

5.3.3 Levantamento G - Aéreo

No âmbito de mais uma campanha do projeto GRC-MS foi realizada uma recolha de dados com o *smartphone* no dia 08 de maio de 2021, durante cerca 70 minutos, iniciado 10:05 horas UTC, a partir do aeródromo de Vilar de Luz, Maia.

Foram utilizados os mesmos equipamentos do anterior levantamento aéreo, repetindo-se as respectivas montagens das antenas, Figura 5.15.

Se as trajetórias efetuadas nos dois voos do anterior levantamento, tiveram como objetivo a realização de trabalhos de fotogrametria aérea, com o desenho de perfis, no caso da trajetória realizada neste levantamento, o percurso do tipo voo comercial ou de recreio, Figura 5.16.

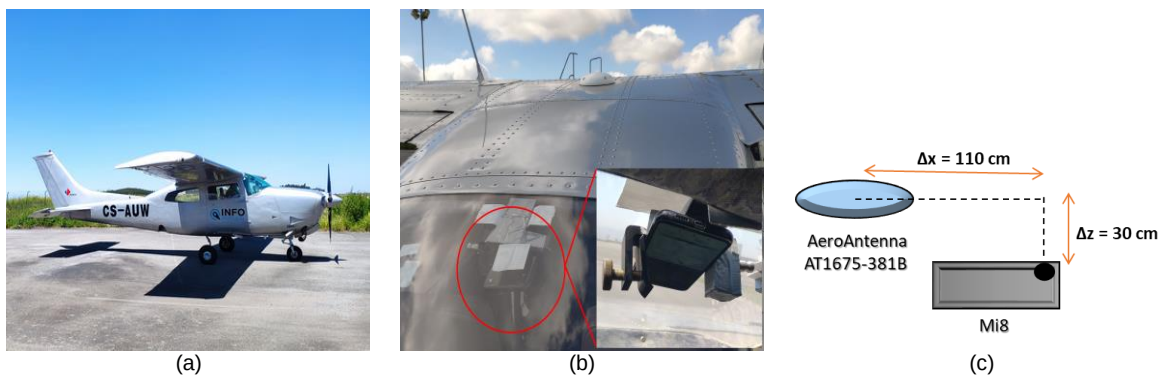


Figura 5.15 – Aeronave CESSNA C210 (a), *smartphone* e AeroAntenna (b), offset entre antenas (c).

As observações GNSS no *smartphone* foram recolhidas com o software GNSS/IMU Logger do ISTA. O processamento diferencial foi realizado utilizando o mesmo método e configurações do anterior levantamento.

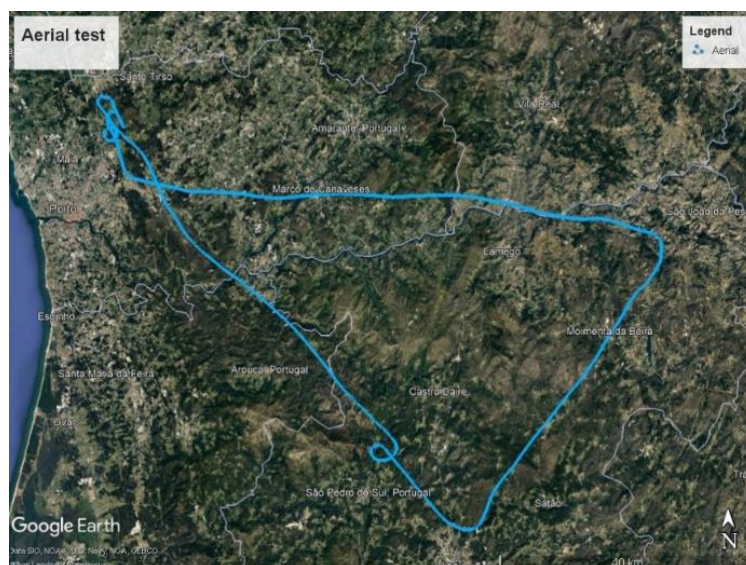


Figura 5.16 – Trajetória do voo de 08 de maio de 2021.

5.3.4 Levantamento H - Terrestre

Um levantamento terrestre foi realizado em 30 de setembro de 2019, no âmbito da monitorização sazonal da restinga do Douro por técnicas GNSS, em cumprimento do contrato celebrado entre a FCUP e a Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A (APDL), onde o primeiro trabalho remonta ao ano de 2001.

O telemóvel e uma antena cinemática, modelo Antcom GNSS 303L, foram montados numa plataforma no topo do veículo 4x4 do OAUP, de forma que as distâncias nos eixos do yy e zz fosse considerada nula, e com uma pequena diferença de 8 cm no eixo dos xx, Figura 5.17. Um recetor geodésico Trimble modelo NetR9 foi usado para registar as observações, enquanto que no telemóvel as medidas foram registadas com a aplicação RINEX Logger.

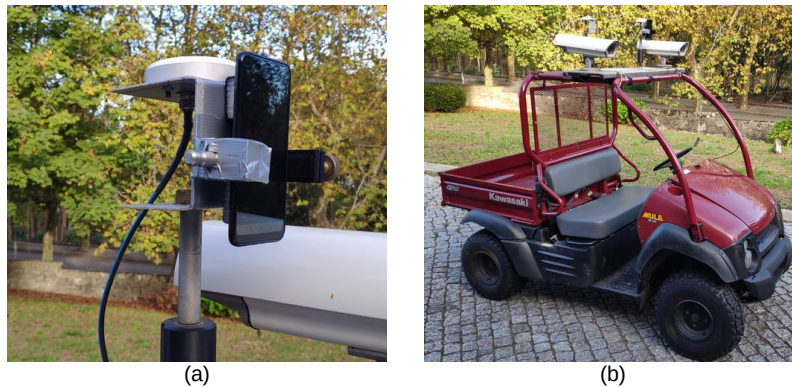


Figura 5.17 – Smartphone e antena GNSS 303L (a) e moto 4x4 (b).

Estas observações foram processadas em modo diferencial usando a estação permanente do OAUP, com o software RTLib Demo5 utilizando as habituais configurações. A observação GNSS teve uma duração de cerca 1 hora, entre as 11 e 12 horas UTC, num trajeto dedicado à obtenção de uma grelha para a definição do modelo tridimensional do terreno, Figura 5.18.



Figura 5.18 – Trajetória terrestre efetuada na restinga em 30 de setembro de 2019.

5.3.5 Levantamento I - Terrestre

No âmbito dos levantamentos cinemáticos, foi realizado um levantamento em estrada num automóvel. O *smartphone* foi montado no tablier do automóvel, como se mostra na Figura 5.19, lado a lado com a antena PolaNt, ligada ao recetor PolaRx5, para validação do posicionamento. As duas apenas antenas distavam 11 cm, na direção do eixo dos yy. O método de processamento diferencial foi efetuado com as configurações e a aplicação habitualmente utilizadas.

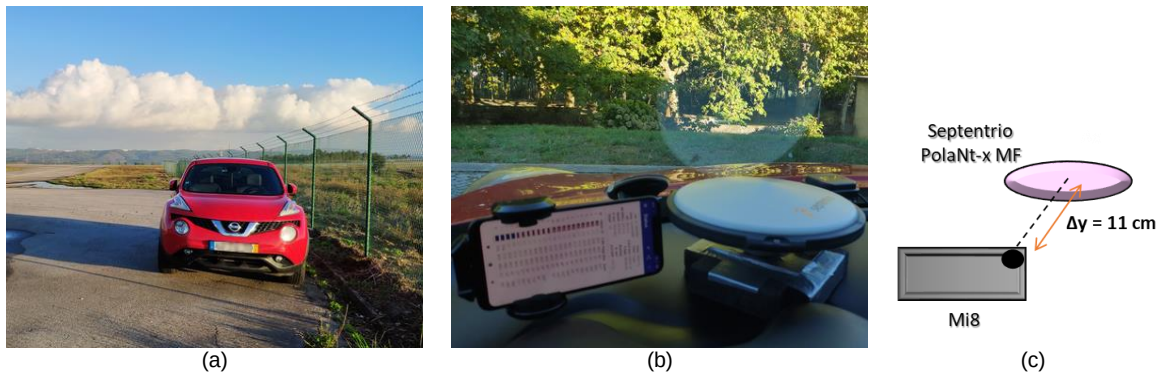


Figura 5.19 – Veículo utilizado no levantamento terrestre (a), *smartphone* e antena no cockpit (b), offset entre antenas (c).

Procurou-se um período de boa geometria dos satélites da constelação Galileo, tendo-se realizado este levantamento na madrugada do dia 26 de agosto de 2020. Iniciou-se às 01:40 horas UTC, e efetuou-se um percurso de quase 1 hora nas autoestradas que circundam a região do Porto (Figura 5.20). As medidas E1/E5a e L1/L5 do *smartphone* foram obtidas com recurso à aplicação RINEX Logger.

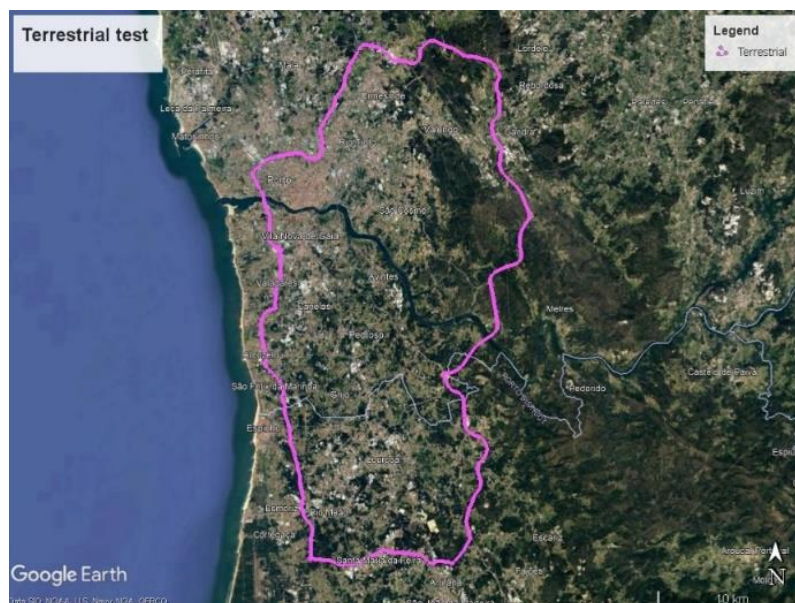


Figura 5.20 – Percurso realizado no levantamento terrestre em 26 de agosto de 2020.

Esta abordagem não teve o objetivo da obtenção de um posicionamento de elevado rigor. Para tal a montagem das antenas deveria ter sido no exterior do veículo. No interior da viatura as perturbações sobre os sinais recebidos causadas pela reflexão de sinais e por perdas de sinal, são mais significativas. Esta abordagem procurou sobretudo avaliar se um qualquer cidadão pode ser uma fonte de dados GNSS, tirando partido da capacidade da dupla frequência que o telemóvel em estudo permite. Um posicionamento de rigor razoável poderia revelar-se como uma mais valia num contexto de “crowdsourcing community”. Esta informação poderá ser recolhida por uma pessoa a bordo do seu veículo, durante as suas deslocações, promovendo desta forma uma contínua atualização da informação georreferenciada, como do OpenStreetMap, acrescentando substanciais benefícios para a comunidade em geral.

6 Análise do sinal

Neste capítulo são apresentadas as análises realizadas aos sinais em termos de geometria, intensidade do sinal e reflexão de sinais dos equipamentos nos levantamentos efetuados. A intensidade do sinal, geralmente dada sob a forma da razão sinal-ruído (SNR) é um parâmetro muito relevante para caracterizar a qualidade das medições, dependendo do seguimento dos satélites, da antena, e dos parâmetros da largura de banda do “*Front-End*” do recetor.

No caso das antenas de baixo custo dos *smartphones*, a sua polarização linear, bem como um “*Front-End*” de qualidade inferior, resulta num menor ganho de sinal quando comparadas com as antenas geodésicas. No entanto, o SNR também pode ser afetado por outros fatores, como sinais de satélite baixos, interferências, ruído ou reflexão de sinais, que no *smartphone* tem baixa supressão. Para mitigar o efeito de alguns desses problemas, as observações foram efetuadas, com as melhores visibilidades sempre que possível, e recurso a uma base metálica debaixo das antenas em algumas observações. No processamento aplicou-se uma altura da máscara de 15°, no entanto, nalgumas situações, em especial nos levantamentos cinemáticos, na procura de terem mais satélites observados, também foi usada uma máscara de 10°.

Para facilitar a análise, em cada um dos tipos de gráficos apresentados neste capítulo seguimos esquemas uniformes. A análise da intensidade do sinal é representada através da análise estatística e gráfica do SNR para os sinais Galileo e GPS, com dois tipos de gráficos: (i) um com o SNR de cada satélite definido por uma cor ao longo do tempo, e (ii) outro relativo à elevação dos satélites, onde as cores identificam os sinais Galileo e GPS em cada equipamento.

Avalia-se também a visibilidade, número de satélites, e diluição da exatidão (com o PDOP médio), considerando uma altura da máscara de 0°, teoricamente sem obstáculos. Nos gráficos de visibilidade os satélites serão sempre identificados pelo seu PRN e pelas letras E para o Galileo e G para o GPS. A cor laranja representará sempre as medidas de frequência simples, a cor verde as de dupla frequência. A cor vermelha será indicadora de medidas triplas ou superior.

Uma avaliação da reflexão de sinais estimado para os sinais E1, E5a, L1 e L5, também foi realizada, sendo apresentada na forma do erro médio quadrático para satélites de cada constelação.

6.1 Levantamento de pontos de cadastro

De seguida são mostradas as análises da geometria e sinal para cada um dos levantamentos realizados em modo estático no contexto do cadastro.

6.1.1 Levantamento A - Método fotogramétrico

O levantamento A caracterizou-se por observações com o *smartphone* de pontos cadastrais, numa primeira avaliação do método fotogramétrico em estudo. Nas seguintes tabelas e figuras mostra-se a informação que caracterizou as observações em termos de visibilidade, número de satélites, geometria através do PDOP, e intensidade do sinal para as constelações Galileo e GPS. Apesar de a estação de referência com o recetor Trimble Alloy se encontrar a uma distância de 13,5 km no OAUP, os satélites estão a mais de 20.000 km, pelo que se pode assumir que as condições de visibilidade são similares, a menos das condições do terreno com possíveis obstruções do sinal. Optou-se como termo de comparação a informação desta estação.

6.1.1.1 Satélites visíveis

Na Figura 6.1 encontramos a distribuição no céu dos satélites observados nos dois equipamentos para as constelações Galileo e GPS durante o levantamento A de aproximadamente de 45 minutos, e na Figura 6.2 e na Tabela 6.1 o número de satélites, com a tabela a apresentar também o PDOP.

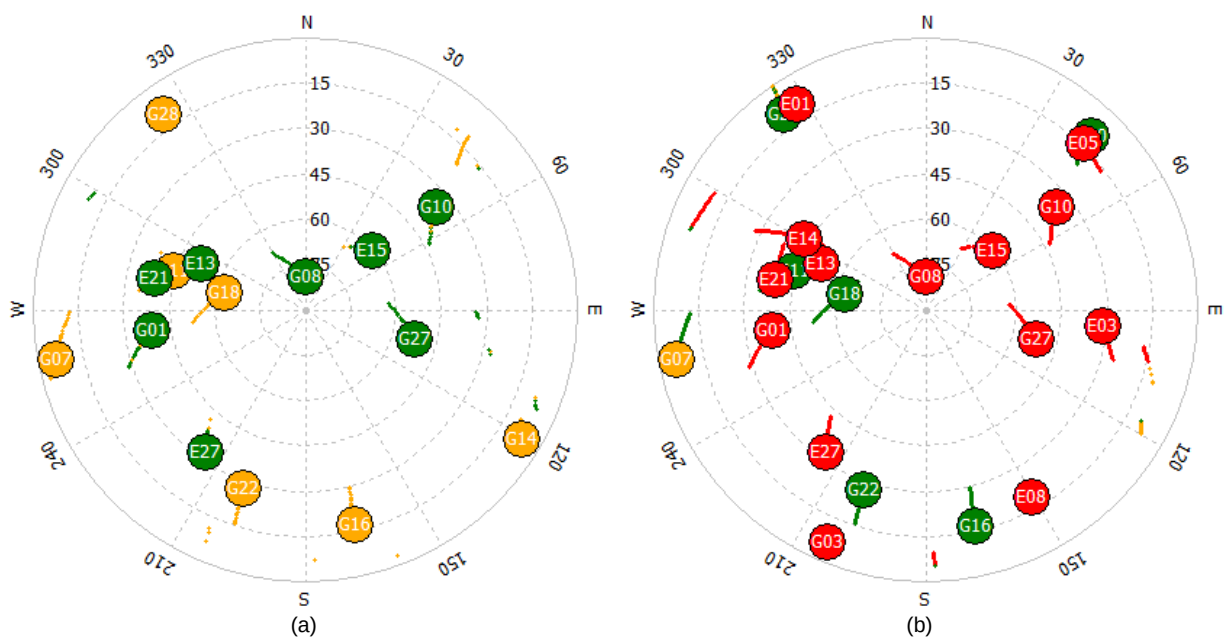


Figura 6.1 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a) e recetor geodésico (b), em 29 de junho de 2019. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

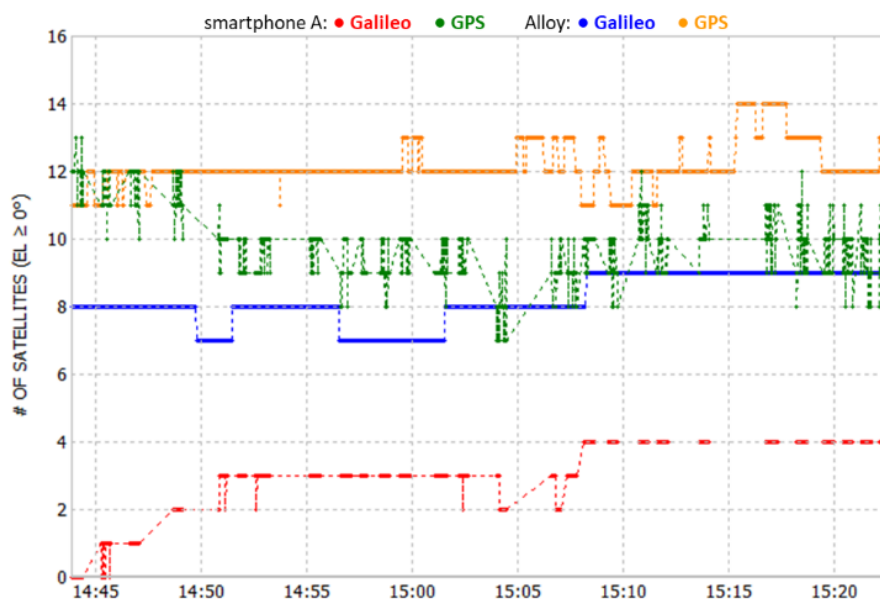


Figura 6.2 – Número de satélites Galileo e GPS no *smartphone* e recetor geodésico, em 29 de junho de 2019.

Tabela 6.1 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento A.

Galileo			GPS			Galileo+GPS			Dispositivo	Data
Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP		
1	4	11,3	7	13	1,7	10	16	1,6	Smartphone Alloy	29/06/2019
7	9	2,0	11	14	1,3	19	23	1,0		

Com base na tabela e nos gráficos verificamos que um menor número de satélites foi observado pelo dispositivo móvel. Isso sucede tanto na constelação GPS como na do Galileo. É nesta última que se notam diferenças mais significativas em relação ao recetor geodésico, com uma diferença média ao longo do tempo de cinco satélites, com um pico na parte inicial do levantamento chegando aos sete satélites. Estas diferenças são explicadas pela menor sensibilidade deste tipo de dispositivo, descrita no subcapítulo 3.1, sobretudo em termos de antena e do hardware do recetor, como o “Front-End” ou número de canais disponíveis.

Apesar de, pelas razões anteriormente explicadas, se analisarem as duas constelações acima referidas, o equipamento também observou os satélites das outras duas constelações disponíveis GLONASS e BeiDou, duplicando o número total de satélites e dessa forma ocupando mais canais. A ocupação dos canais neste equipamento é realizada segundo uma ordem que também poderá afetar principalmente o número de satélites Galileo, atendendo que o seguimento dos satélites é feito geralmente pela seguinte ordem: GPS, GLONASS, BeiDou e por último Galileo.

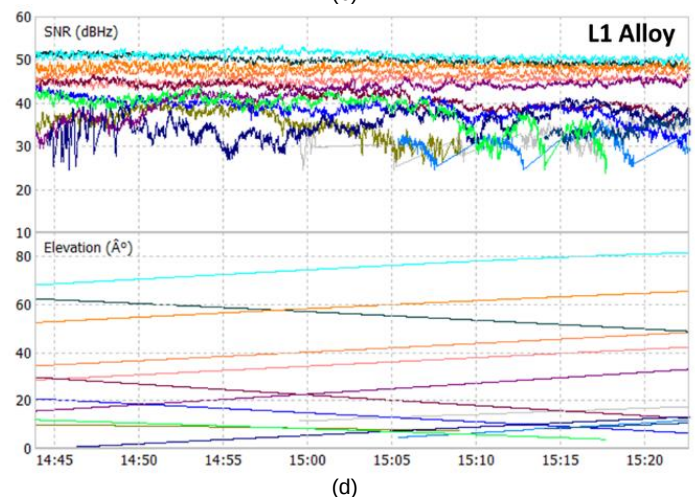
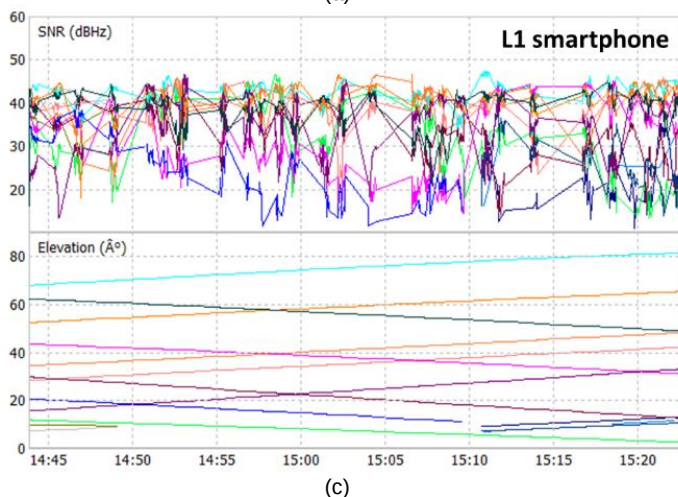
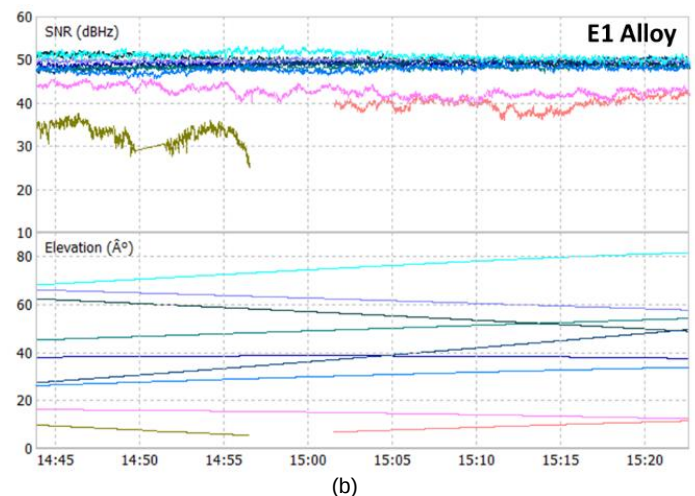
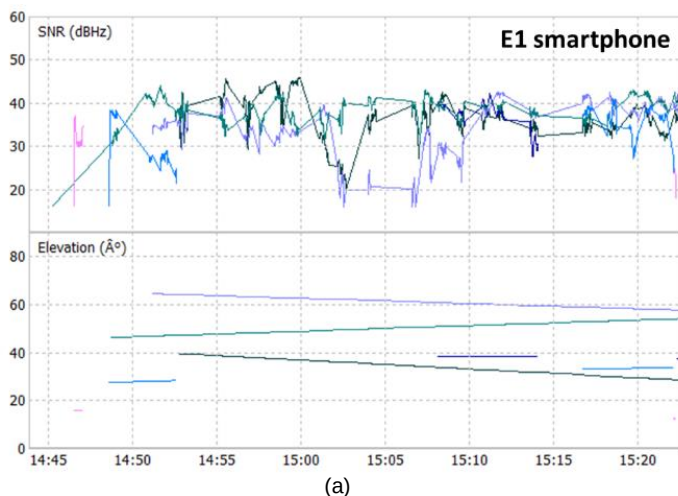
Importa salientar que o local das observações também terá contribuído para algumas diferenças, por não ser o mesmo do recetor geodésico, tendo sofrido influências de obstáculos de diferentes naturezas, como árvores e construções. Nas análises seguintes, em que a

questão do local ser diferente não se coloca, iremos encontrar similaridades entre os trabalhos.

Em termos da geometria o PDOP do *smartphone* para a constelação GPS apresenta um valor de 1,7, considerado bom, mas no caso do sistema Galileo e como consequência do baixo número de satélites, o PDOP de 11,3 é um valor bastante elevado, bastante acima de cinco, que é normalmente considerado para uma aceitável distribuição geométrica dos satélites. A combinação dos dois sistemas melhora a geometria observada pelo *smartphone*, mas não deixa de ser inferior ao apresentado pelo recetor geodésico.

6.1.1.2 Qualidade do sinal

Na Figura 6.3 e Tabela 6.2 mostra-se o comportamento da intensidade do sinal através da observável SNR no dispositivo móvel Xiaomi Mi8 e no recetor Alloy da Trimble. Atendendo às características dos dois equipamentos, é expectável que esta observável tenha valores inferiores em todas as frequências do telemóvel, geralmente com as diferenças a situarem-se em torno dos 10 dBHz, tal com referido no documento “White Paper on using GNSS Raw Measurements on Android devices” da EUSPA (EUSPA, 2017), assim como em alguns trabalhos de autores como Liu et al. (2019), Paziewski et al. (2019) e Liu et al. (2021).



Continua.

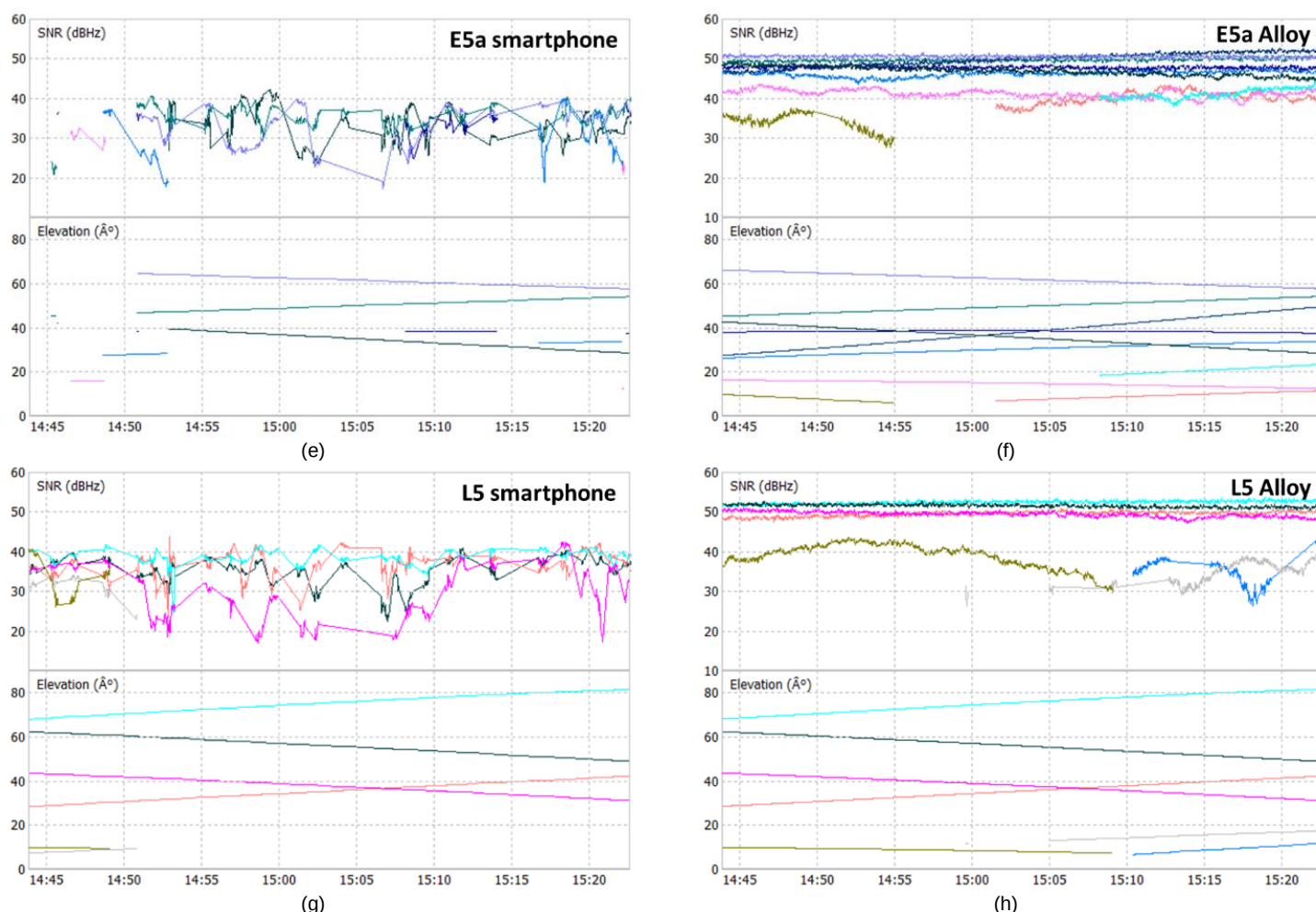


Figura 6.3 – SNR: *smartphone* E1 (a), L1 (c), E5a (e), L5 (g); recetor geodésico E1 (b), L1 (d), E5a (f), L5 (h).

Tabela 6.2 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento A.

	<i>Smartphone</i>				<i>Alloy</i>				Data
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	37,1	38,2	34,4	36,7	46,4	46,0	45,8	48,4	29/06/2019
Desvio	4,0	5,3	3,7	3,5	4,0	5,3	4,5	4,2	
Mínimo	19,5	22,1	20,6	20,1	26,9	14,8	27,0	32,9	
Máximo	45,9	47,5	42,2	43,9	52,2	53,4	54,0	53,7	

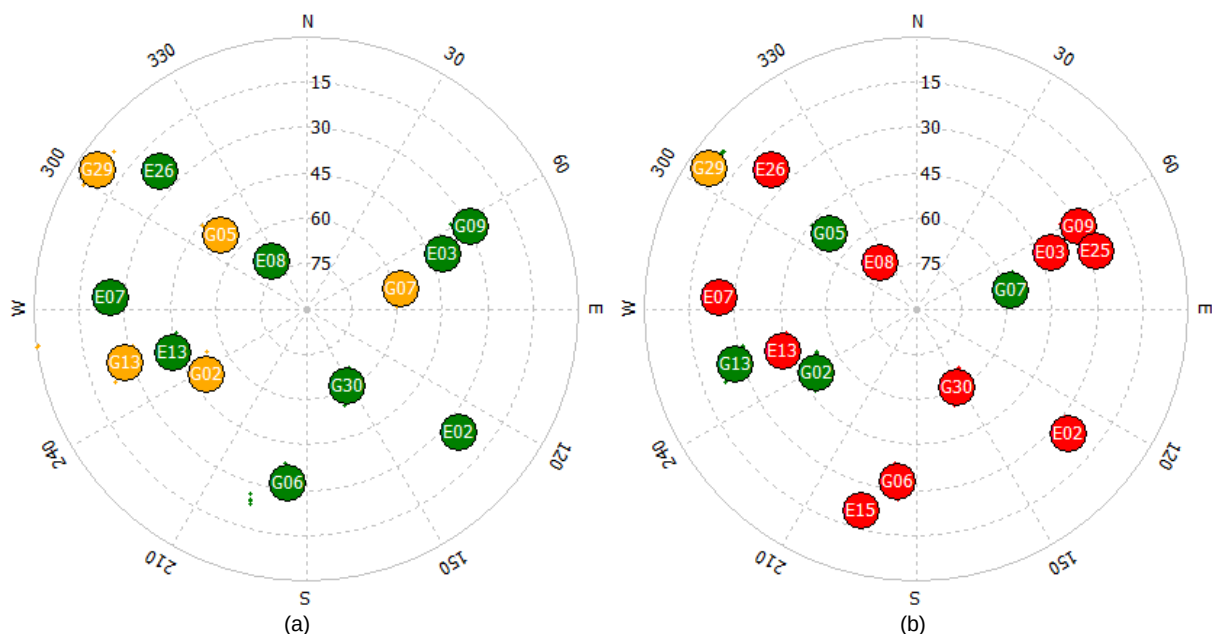
Analisando os gráficos e a tabela acima, verificamos que o *smartphone* apresenta valores médios em todos sinais entre os 34 e os 38 dBHz, já o recetor geodésico Alloy apresenta médias entre 46 e 48 dBHz, com máximos a ultrapassar os 50 dBHz. No caso do recetor os sinais E5a/L5 são os que apresentam os valores mais elevados, enquanto que no caso do *smartphone*, os valores mais elevados são para os sinais da banda E1/L1. Os desvios padrões são similares em ambos equipamentos, embora ligeiramente melhores nos sinais E5a/L5.

6.1.2 Levantamento B - Método direto

No levantamento B fizeram-se observações em modo estático dos pontos que delimitavam uma infraestrutura nas instalações do OAUP, divididas em três levantamentos com tempos de observação diferentes. O levantamento de menor tempo, com cerca de 1 minuto foi designado por Teste 1, enquanto que o Teste 2 teve a duração de 10 minutos e o Teste 3 durou 5 minutos. Estas observações com o *smartphone* e as do recetor PolaRx5 da Septentrio para obtenção uma referência na comparação das coordenadas obtidas com *smartphone*, foram realizadas numa abordagem de levantamento estático-rápido. Para a análise do sinal, o recetor geodésico PolaRx5 não foi considerado, porque o seu período de observação não foi simultâneo com nenhum dos levantamentos realizados com o *smartphone*. Essa análise foi efetuada com recurso ao recetor Trimble Alloy da estação de referência, que ao contrário do que acontecia no levantamento A, se encontra nas imediações dos pontos a uma distância de cerca 100 metros.

6.1.2.1 Satélites visíveis

Na Figura 6.4 mostra-se a distribuição dos satélites Galileo e GPS observados nos dois equipamentos no Teste 1 com a duração de 1 minuto, em duas datas distintas, 03 de julho e 16 de julho de 2020 e na Figura 6.5 o número de satélites.



Continua.

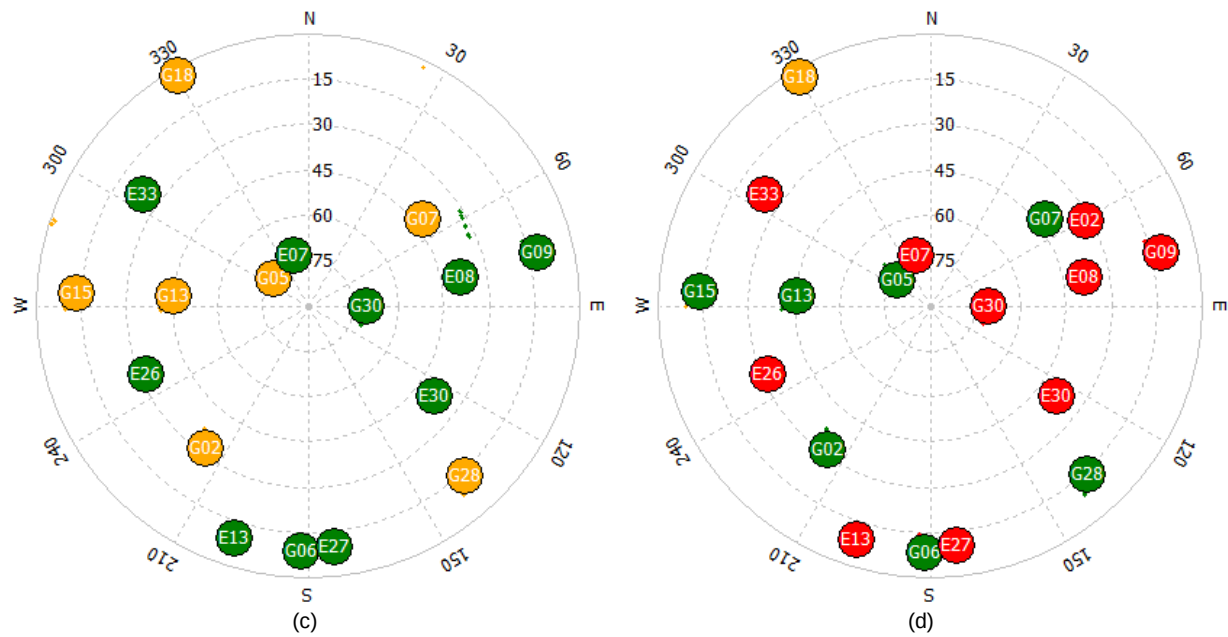
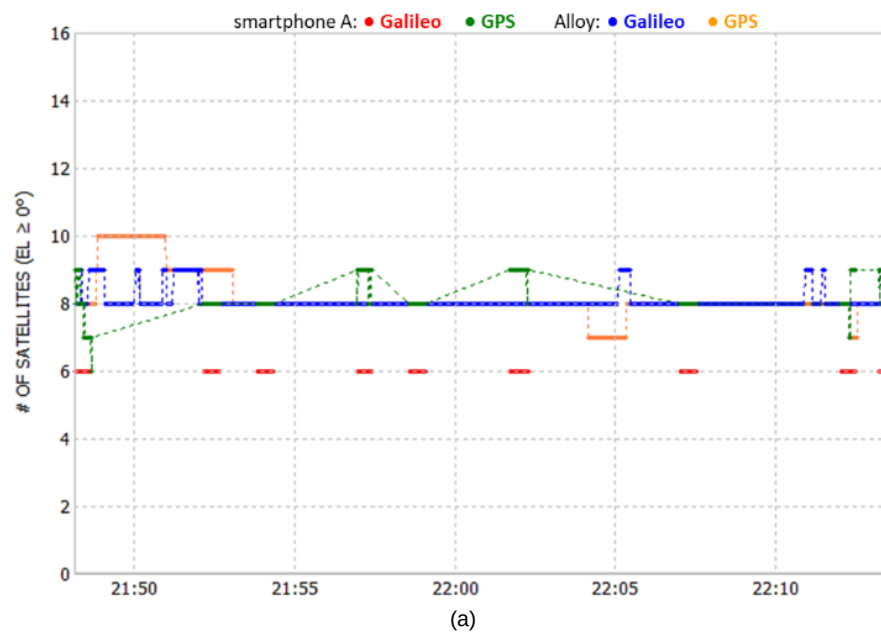


Figura 6.4 – Visibilidade de satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a, c) e recetor geodésico (b, d): 03 julho (a, b), 16 julho (c, d). (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)



Continua.

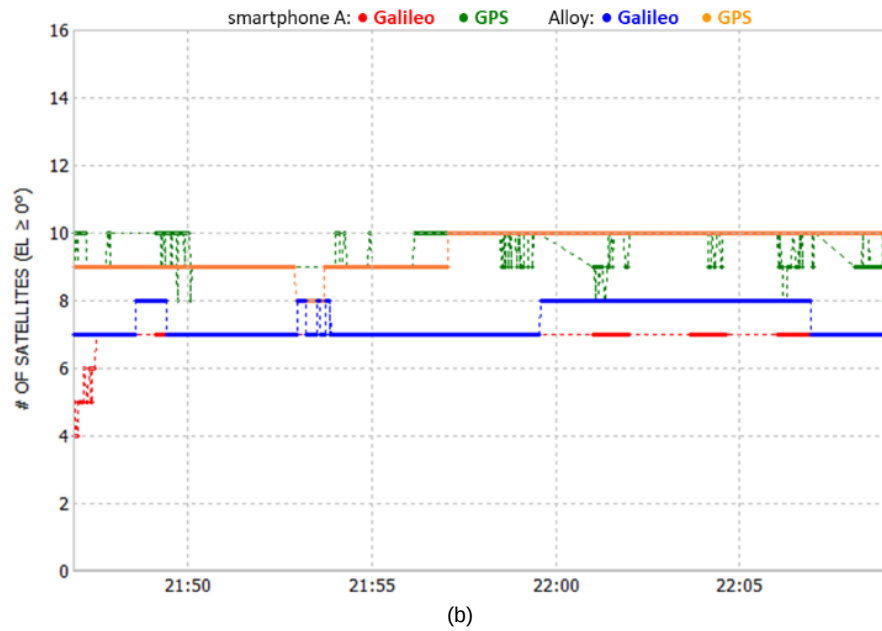


Figura 6.5 – Número de satélites Galileo e GPS no *smartphone* e recetor geodésico: 03 julho (a), 16 julho (b).

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** mostra-se a distribuição dos satélites Galileo e GPS no *smartphone* e recetor geodésico em 18 de julho de 2020, durante o Teste 2 com a duração de 10 minutos, e na Figura 6.6 o número de satélites durante este teste.

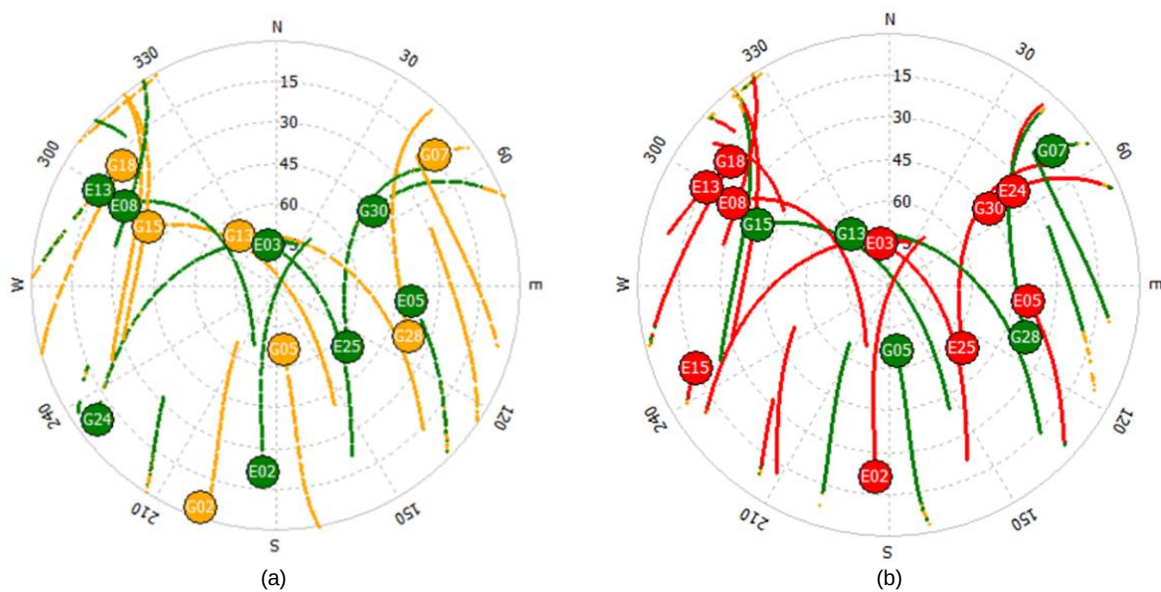


Figura 6.6 – Visibilidade de satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a) e recetor geodésico (b), em 18 de julho de 2020. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

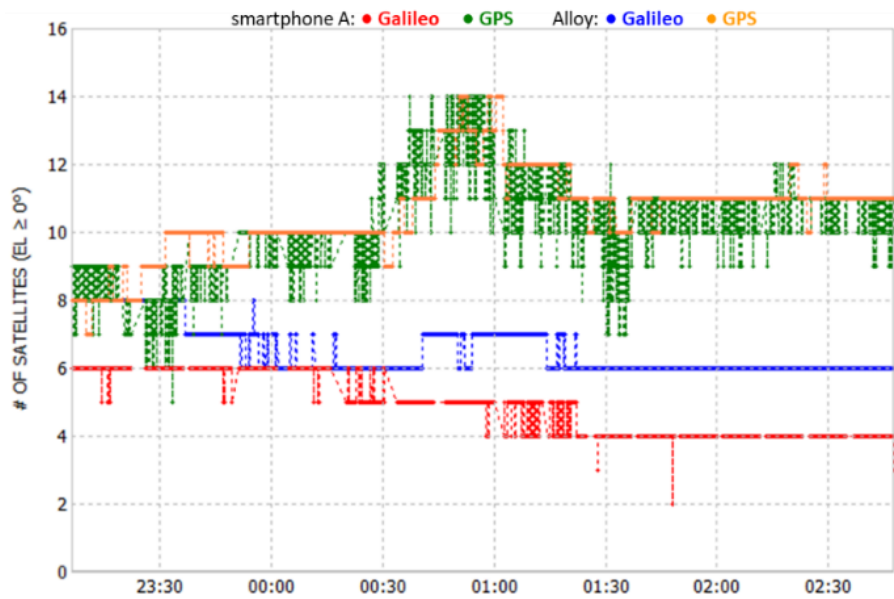


Figura 6.6 – Número de satélites Galileo e GPS no *smartphone* e recetor geodésico, em 18 de julho de 2020.

Na Figura 6.7 vemos a distribuição dos satélites Galileo e GPS no *smartphone* e recetor geodésico no Teste 3 durante as observações de 24 de julho de 2020, com a duração de 5 minutos, na Figura 6.8 encontramos o número de satélites.

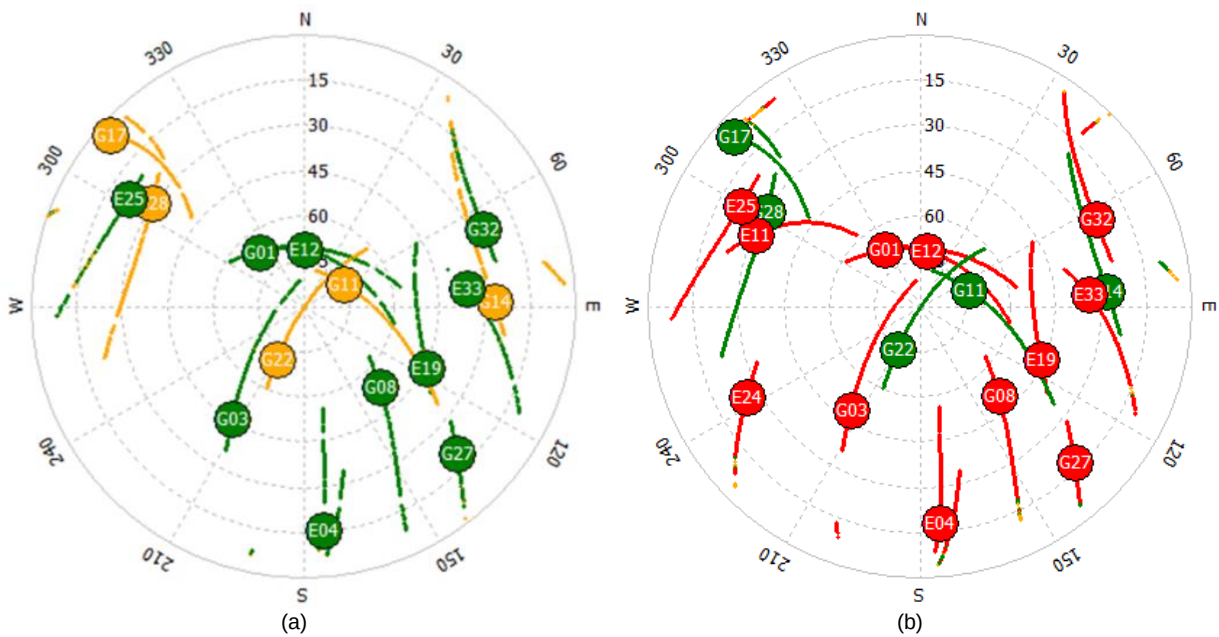


Figura 6.7 – Visibilidade de satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a) e recetor geodésico (b), em 24 de julho de 2020. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

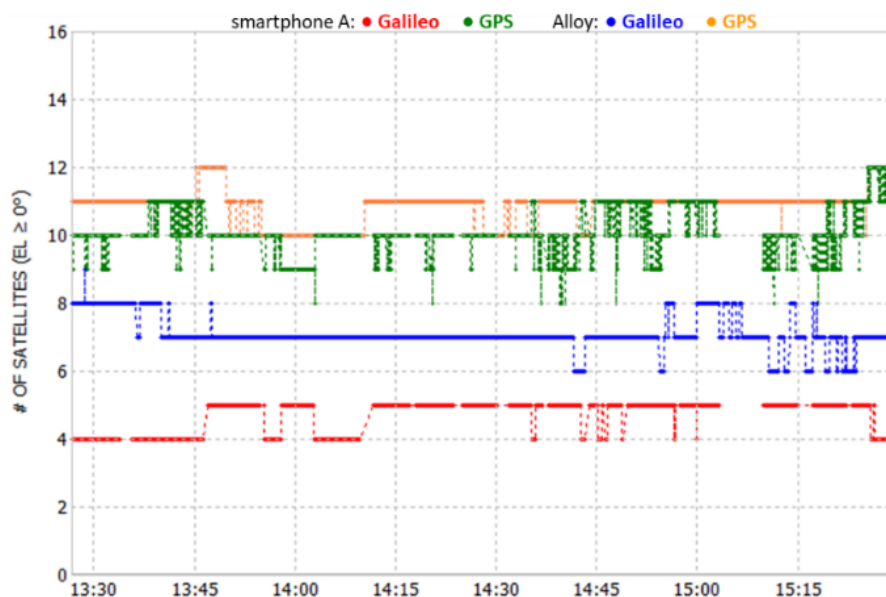


Figura 6.8 – Número de satélites Galileo e GPS no *smartphone* e recetor geodésico, em 24 de julho de 2020.

Na Tabela 6.3 encontramos o resumo do número de satélites máximos e mínimos seguidos nas duas constelações em análise, Galileo e GPS, assim como o PDOP em cada dispositivo

Tabela 6.3 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento B.

Galileo			GPS			Galileo+GPS			Dispositivo	Data
Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP		
6	6	2,6	7	9	2,1	13	15	1,5	Mi8	03/07/2020
8	9	2,0	7	10	1,3	15	19	1,3	Alloy	
4	7	2,6	8	10	1,4	14	17	1,2	Mi8	16/07/2020
7	8	2,3	8	10	1,4	15	18	1,1	Alloy	
4	6	7,8	7	14	1,6	12	19	1,2	Mi8	18/07/2020
6	8	2,2	8	14	1,6	15	21	1,2	Alloy	
4	5	3,7	9	12	1,5	13	17	1,2	Mi8	24/07/2020
6	8	2,4	10	12	1,4	16	19	1,1	Alloy	

Neste levantamento e tal como no levantamento anterior, o *smartphone* apresenta um seguimento inferior relativamente ao número de satélites, mais pronunciado no caso da constelação do Galileo, que geralmente apresenta cerca de 1 a 2 satélites a menos, do que no caso do recetor geodésico em todas as observações realizadas. No caso do número de satélites do sistema GPS, não se encontram diferenças tão significativas, sendo por vezes igual ao recetor geodésico Alloy na maioria das observações.

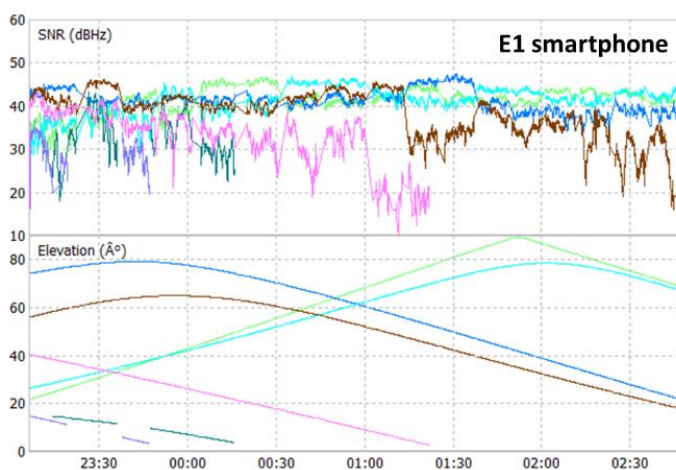
Impôs-se o número mínimo de 4 satélites do Galileo a observar simultaneamente, mas devido ao facto de a constelação à data, ainda não estar finalizada, cria em certos períodos dificuldades na observação simultânea de um bom número de satélites. No caso do sistema GPS não foram observados menos do que 7 satélites. Em termos dos números máximos de satélites a observar

simultaneamente das duas constelações, Galileo e GPS, atingiu-se o 8 e o 10, respetivamente.

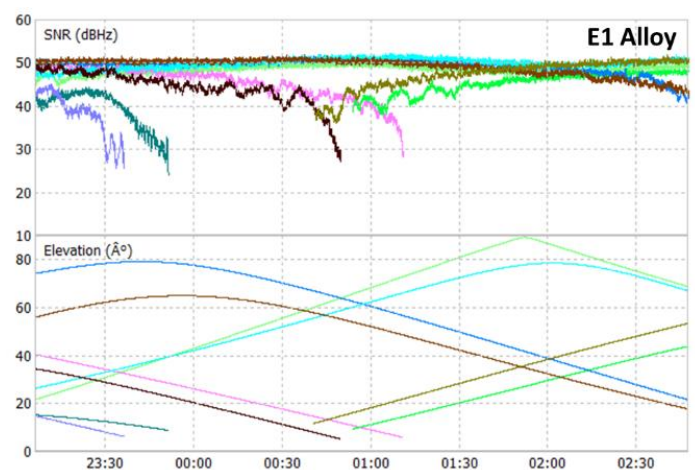
Quando analisamos o PDOP, verificamos que apesar do *smartphone* apresentar valores ligeiramente superiores ao recetor no caso do Galileo, no caso do GPS os valores são similares, consequência do maior número de satélites seguidos para esta constelação. Contudo, mesmo no caso do Galileo, com valores a oscilar entre os 2,6 e 3,7, estes encontram-se dentro do intervalo considerado muito aceitável. A exceção são as observações dos satélites Galileo para o dia 18 de julho, em que foi atingido um valor de 7,8 contribuindo para tal um VDOP de 6,6. A combinação de satélites das duas constelações, como seria expectável, leva ao aumento da quantidade de satélites disponíveis, introduzindo assim um melhoramento na qualidade da posição, devido a uma melhor distribuição geométrica dos satélites.

6.1.2.2 Qualidade do sinal

Nas figuras seguintes mostra-se os gráficos da intensidade do sinal para as frequências E1, E5a, L1 e L5 no dispositivo móvel Xiaomi Mi8 e no recetor geodésico Alloy da Trimble, onde cada satélite é representado por uma cor e onde também são possíveis ver as elevações de cada satélite. A Figura 6.9 mostra a razão sinal-ruído para as observações realizadas na data de 18 de julho de 2020, para observações com a duração de 10 minutos. No Anexo A encontram-se mais gráficos do mesmo tipo dos abaixo apresentados com a análise dos mesmos sinais e equipamentos, mas efetuados noutras datas, respetivamente, em 03 e 16 de julho de 2020 com a observações com duração de 1 minuto, e a 24 de julho de 2020 efetuando-se medições de 5 minutos.

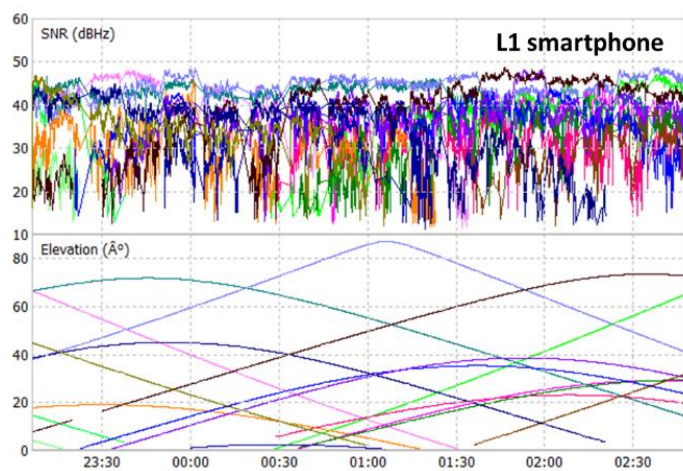


(a)

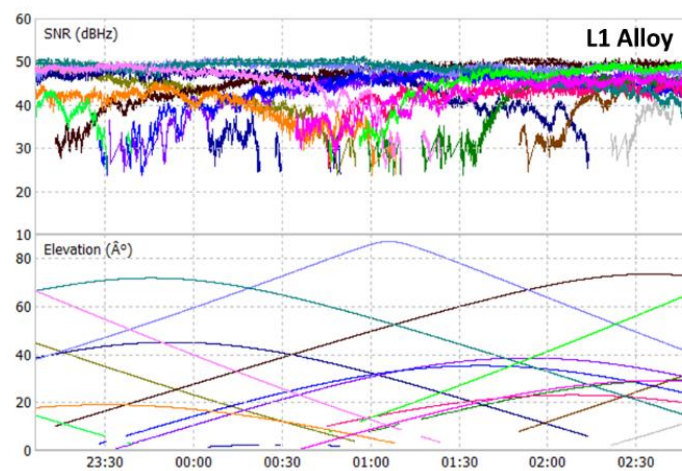


(b)

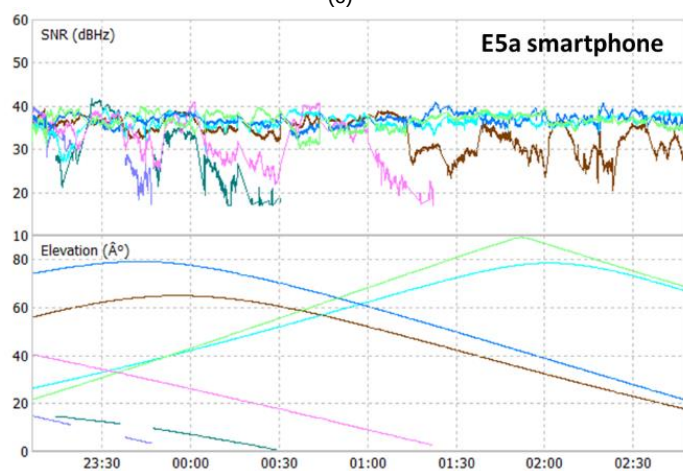
Continua.



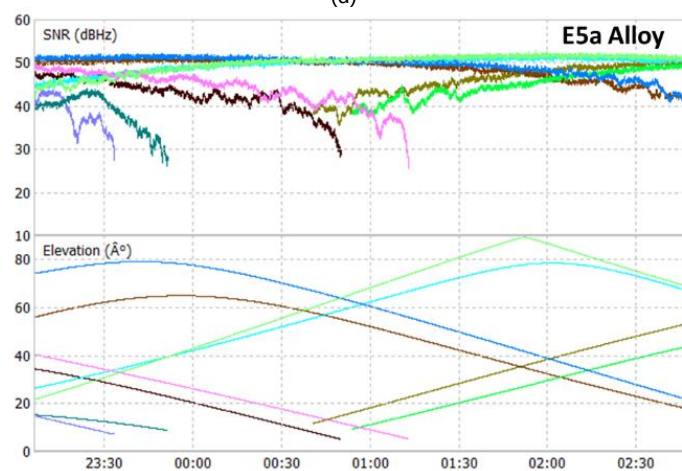
(c)



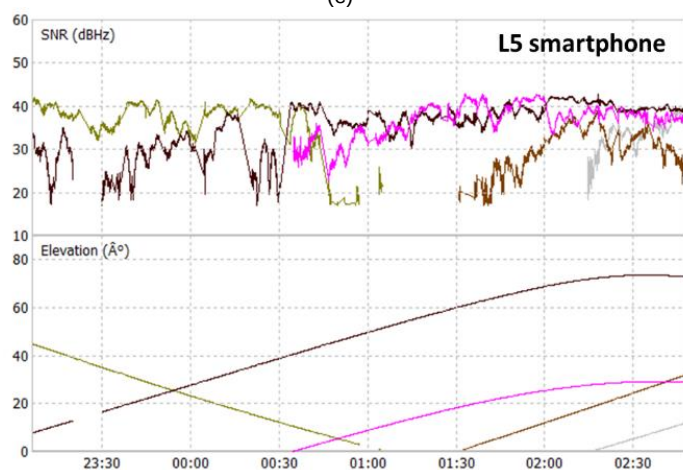
(d)



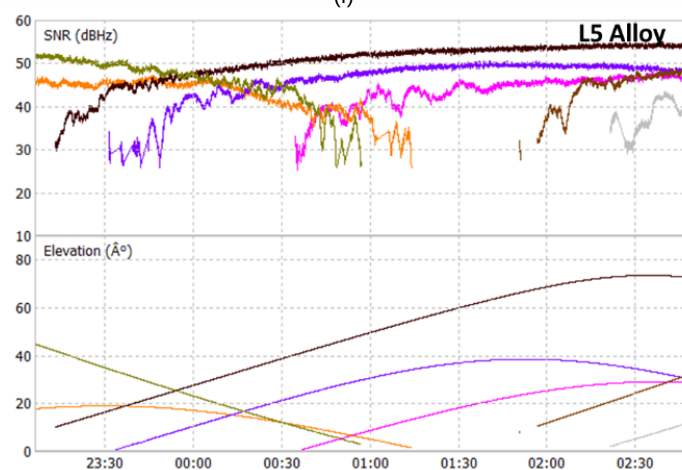
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 6.9 – SNR em 18 de Julho de 2020: *smartphone* E1 (a), L1 (c), E5a (e), L5 (g); recetor E1 (b), L1 (d), E5a (f), L5 (h).

Tabela 6.4 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento B.

	Smartphone				Alloy				Data
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	38,6	40,1	35,6	37,9	46,3	44,7	46,1	49,2	03/07/2020
Desvio	3,6	4,8	3,2	2,9	3,9	5,3	4,0	4,0	
Mínimo	26,3	23,3	21,5	27,6	26,3	23,8	22,0	30,8	
Máximo	45,4	47,3	41,0	41,4	52,5	51,1	52,1	54,3	
Média	37,4	38,4	34,7	35,6	46,4	44,9	46,1	47,8	16/07/2020
Desvio	4,2	5,1	3,0	3,0	3,9	5,0	4,2	4,9	
Mínimo	23,6	23,3	22,4	27,1	25,9	23,8	19,3	31,1	
Máximo	45,9	47,8	41,7	40,6	51,9	51,5	52,4	54,1	
Média	39,4	37,8	35,6	36,3	47,2	44,4	46,9	46,9	18/07/2020
Desvio	4,6	5,6	3,1	4,0	4,0	4,8	4,5	4,5	
Mínimo	15,2	20,0	20,0	20,1	24,8	23,8	18,6	28,0	
Máximo	47,6	48,8	41,7	42,9	52,3	51,5	52,9	55,0	
Média	36,5	39,2	33,1	37,2	44,8	44,7	43,9	48,4	24/07/2020
Desvio	3,5	5,0	3,4	3,0	4,4	4,5	4,6	4,3	
Mínimo	17,7	22,2	20,3	20,2	24,8	23,8	18,3	31,0	
Máximo	44,8	48,9	40,5	43,0	52,2	51,5	51,5	54,4	

Analisando os gráficos e a tabela acima, verificamos que para o *smartphone* os valores médios se situam na ordem dos 30 dBHz, enquanto que para o recetor são da ordem dos 40 dBHz. Os máximos do *smartphone* nunca superam os 50 dBHz, com os maiores valores em L1, enquanto que no recetor estes superam esse valor. Os valores mais elevados de 54 e 55 dBHz encontram-se no sinal L5. O valor mais baixo é 15,2 dBHz no sinal E1 do telemóvel no dia 18, mas a maioria dos valores encontram-se acima dos 20 dBHz. Estes valores são concordantes com os valores obtidos no anterior levantamento.

6.1.3 Levantamento C - Método fotogramétrico e direto

O levantamento C teve como objetivo o posicionamento de 14 pontos cadastrais pelo método por técnicas fotogramétricas, nas instalações do OAUP.

6.1.3.1 Satélites visíveis

A Figura 6.10 mostra a distribuição dos satélites Galileo e GPS nos dois equipamentos, *smartphone* e recetor geodésico Trimble Alloy, durante o período do levantamento e a Figura 6.11 mostra-nos o número de satélites em ambos sistemas e equipamentos. Na Tabela 6.5 encontramos o PDOP médio e número máximo e mínimo de satélites.

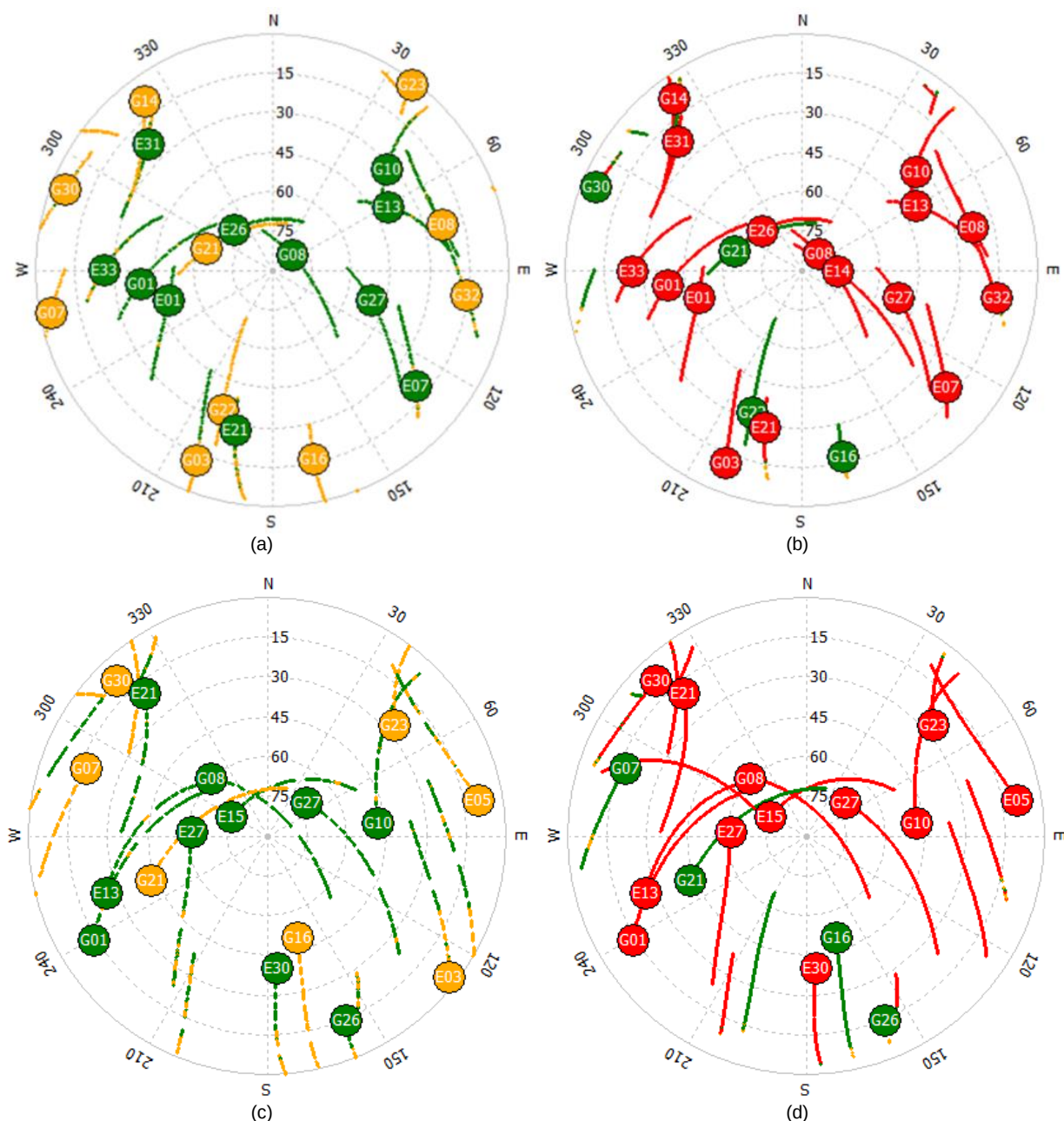


Figura 6.10 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a, c) e recetor geodésico (b, d), em 21 de agosto de 2021 e 11 de janeiro de 2022. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

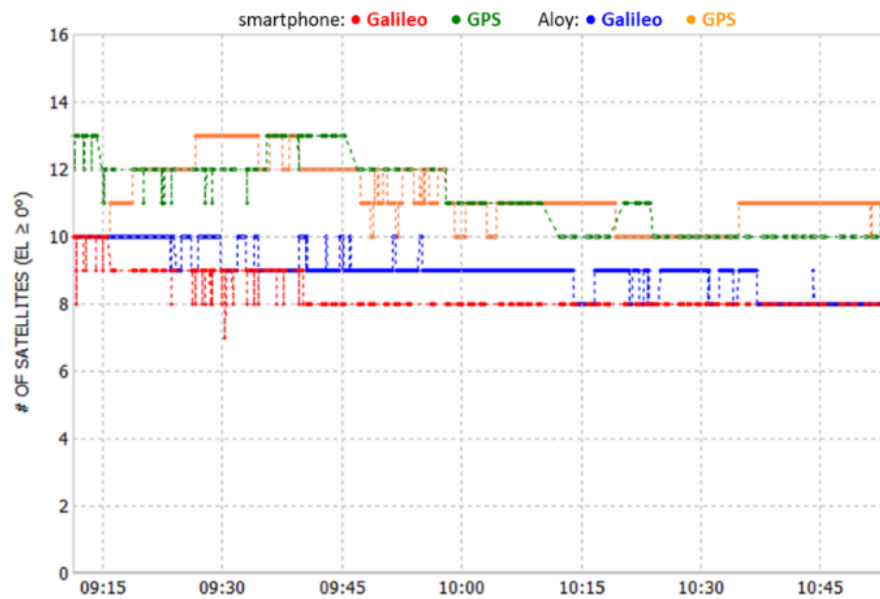


Figura 6.11 – Número de satélites no *smartphone* e recetor geodésico, em 21 de agosto de 2021.

Tabela 6.5 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento D .

Galileo			GPS			Galileo+GPS			Dispositivo	Data
Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP		
7	10	2,0	10	13	1,3	18	23	1,0	Smartphone Alloy	21/08/2021
8	10	1,9	10	13	1,4	18	23	1,1		
7	9	1,9	9	12	1,4	17	20	1,0	Smartphone Alloy	11/01/2021
6	9	1,9	9	13	1,4	16	21	1,1		

Neste levantamento o comportamento do *smartphone* em termos de número e visibilidade satélites em ambas constelações foi praticamente igual ao do recetor geodésico da estação de referência usada nas imediações dos pontos. Esta é uma situação que nem sempre acontece, como podemos ver em outros levantamentos e está dependente do software usado. No caso do GNSS/IMU Logger, usado neste levantamento, este não faz uma filtragem com exclusão dos sinais mais fracos como no caso da aplicação RINEX Logger, fazendo o seguimento de mais satélites, mas que não implica que devido a isso possamos ter resultados melhores.

6.1.3.2 Qualidade do sinal

Na Figura 6.12 mostra-se o SNR em função da elevação para o *smartphone* Xiaomi Mi8 e recetor Alloy usado como estação de referência no posicionamento relativo para o cálculo das coordenadas. A Figura 6.13 mostra três satélites de cada uma das duas constelações, Galileo e GPS, onde as cores em tons vermelhos correspondem aos satélites Galileo, enquanto que os tons verdes sinalizam os satélites GPS. A Tabela 6.6 apresenta o resumo estatístico da intensidade do sinal dos satélites observados.

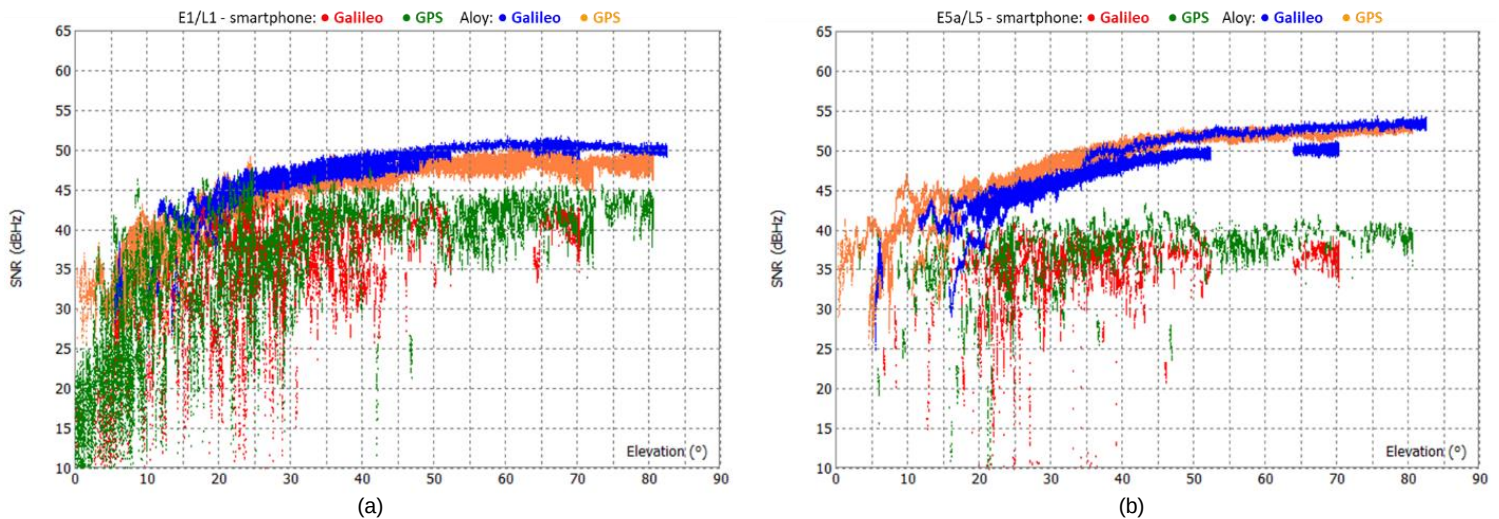


Figura 6.12 – SNR *smartphone* e Alloy versus elevação, 21 de agosto de 2021: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

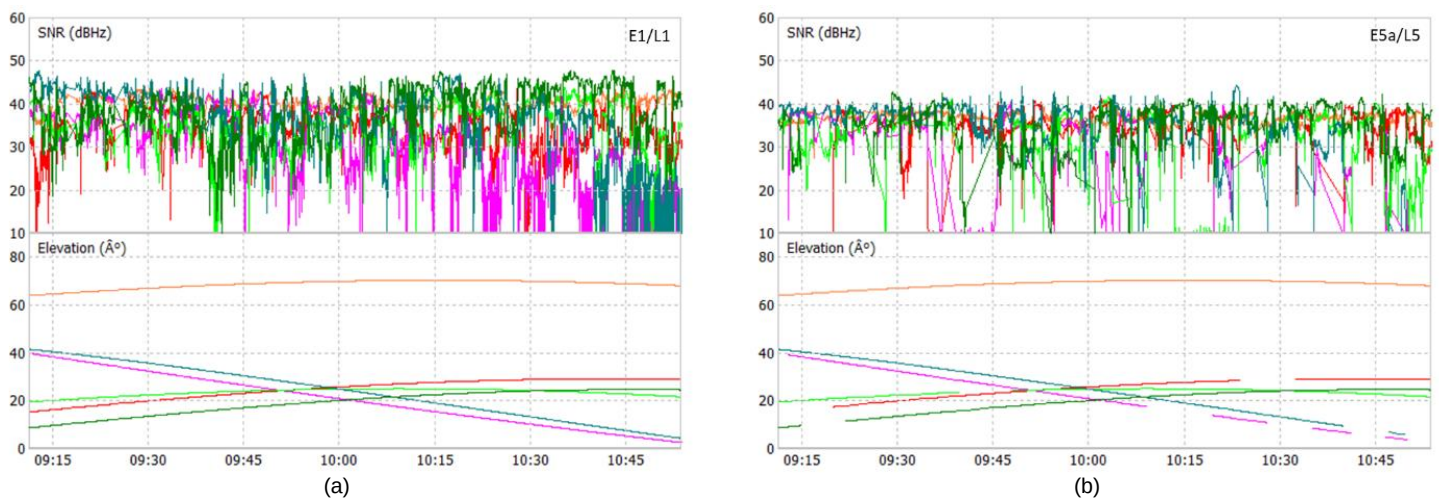


Figura 6.13 – SNR *smartphone* para três satélites Galileo (vermelhos) e GPS (verdes): E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

Tabela 6.6 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento D.

	<i>Smartphone</i>				<i>Alloy</i>				<i>Data</i>
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	35,2	35,6	33,9	37,3	46,7	43,8	46,5	47,9	21/08/2021
Desvio	7,5	9,3	7,0	3,8	3,5	5,3	4,1	4,3	
Mínimo	7,0	7,0	7,0	7,0	26,9	23,8	18,6	31,5	
Máximo	45,9	47,9	40,9	44,4	51,8	50,8	54,4	53,9	
Média	32,9	35,1	32,1	34,5	46,5	43,8	46,2	48,1	11/01/2022
Desvio	8,3	8,9	6,9	6,0	4,4	5,6	4,8	4,5	
Mínimo	7,0	7,0	7,0	7,0	22,7	23,8	20,6	27,4	
Máximo	47,8	49,5	43,0	44,7	55,5	52,0	54,0	54,3	

O comportamento da intensidade do sinal neste levantamento é similar aos apresentados anteriormente, com a razão sinal-ruído no telemóvel inferior em todos os sinais de ambas constelações, no entanto notamos maiores desvios devido aos satélites baixos, a Figura 6.12 e Figura 6.13 mostram-nos isso.

Nos levantamentos anteriores as oscilações não eram tão significativas, o que se explica pela

utilização nesses levantamentos da aplicação RINEX Logger, que descarta os piores valores SNR.

O GNSS/IMU Logger usado neste levantamento tem uma filtragem diferente, a qual permite seguir os satélites de altura mais baixa, mas que se reflete em SNR's baixos na ordem dos 7 dBHz, e como vimos acima, isto têm implicação no número de satélites seguidos.

Como temos verificado o sinal E5a/L5 é mais fraco do que o E1/L1 no *smartphone* e no caso dos satélites baixos às vezes só o sinal E1/L1 é medido, tal como podemos verificar nos gráficos da Figura 6.10 (a, c), mais notado nos satélites Galileo por todos eles terem as duas frequências.

6.2 Levantamento estático

De seguida mostram-se as análises da geometria e sinal para cada um dos levantamentos efetuados em modo estático no contexto do trabalho de bases longas.

6.2.1 Levantamento D – Bases longas

O levantamento D teve com objetivo a análise do uso de um *smartphone* para realizar um posicionamento relativo usando estações de referência distantes. A sua possível utilização, na georreferenciação de pontos em zonas remotas, pode ter uma vasta aplicabilidade em diferentes campos, tais como na cartografia, topografia e mesmo em cadastro, ou em outros trabalhos onde um posicionamento mais rigoroso é necessário.

Este levantamento foi dividido em seis testes como descrito no capítulo 5, com a observação de pilares existentes nas instalações do OAUP, usando estações da rede EUREF, respetivamente de Cascais e Gaia em Portugal, Ceuta e Vigo em Espanha.

6.2.1.1 Satélites visíveis

A Figura 6.14 mostra a distribuição dos satélites no céu das constelações Galileo e GPS, durante o Teste 1, com os dois *smartphones* Mi8 em análise e a Figura 6.15 mostra o número de satélites para as duas constelações.

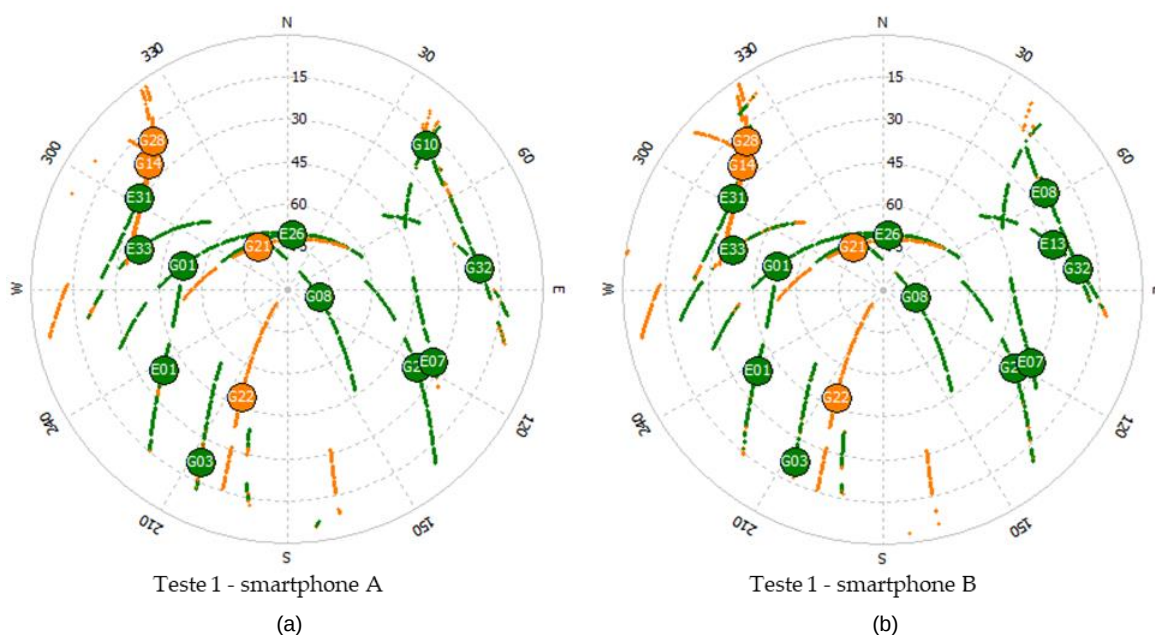


Figura 6.14 – Visibilidade no *smartphone* A (a) e *smartphone* B (b), em 12 de fevereiro de 2021 no Teste 1. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

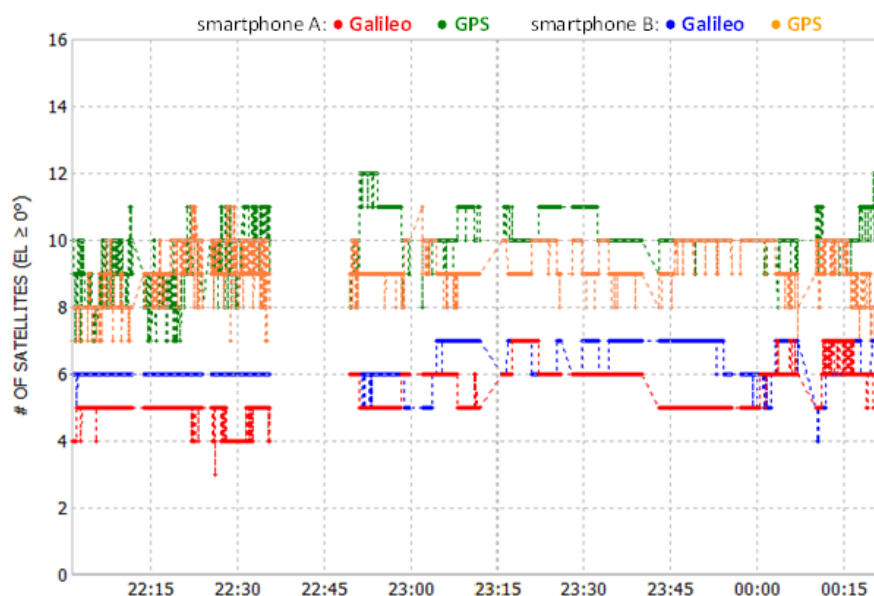


Figura 6.15 – Número de satélites no *smartphone* A e *smartphone* B, em 12 de fevereiro de 2021 no Teste 1.

A distribuição dos satélites das constelações Galileo e GPS do Teste 2 é apresentada na Figura 6.16, enquanto na Figura 6.17 vemos o número de satélites seguidos pelo *smartphone* e pelo recetor geodésico Alloy que se encontrava num dos pilares da base de calibração do OAUP.

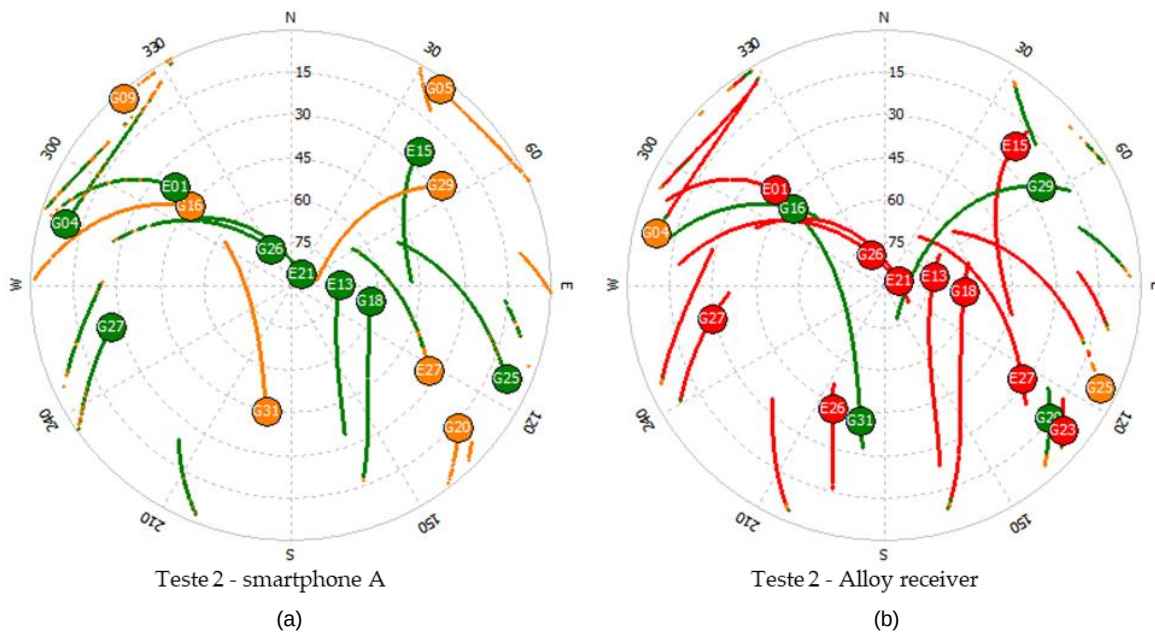


Figura 6.16 – Visibilidade no *smartphone* A (a) e recetor Alloy (b), em 25 de fevereiro de 2021 no Teste 2. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

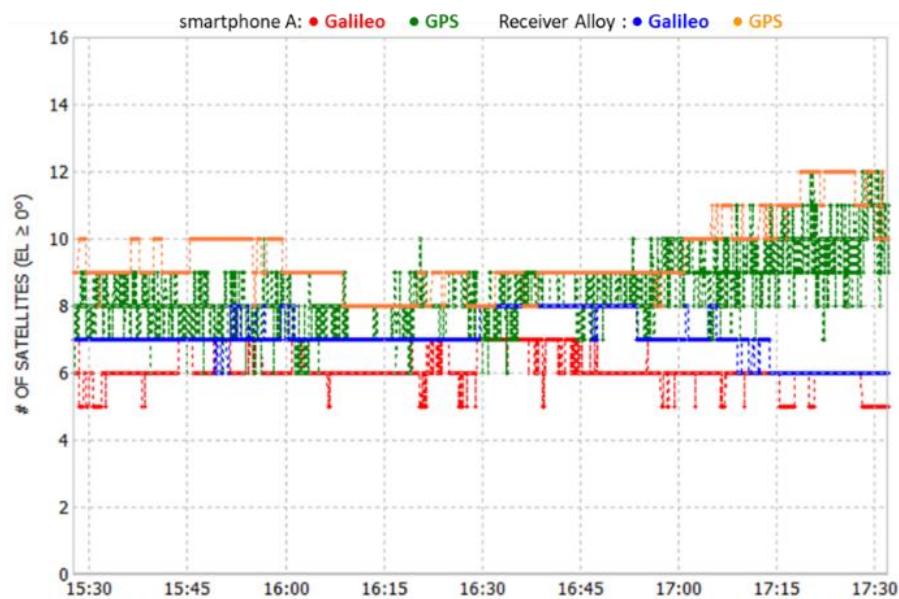


Figura 6.17 – Número de satélites no *smartphone* e recetor Alloy, em 25 de fevereiro de 2021 no Teste 2.

Na Figura 6.18 encontramos a distribuição dos satélites durante a realização do Teste 3, do seguimento feito pelo *smartphone* e pelo recetor geodésico da Septentrio PolaRX5.

Este recetor geodésico foi colocado na mesma plataforma do *smartphone*, tendo como objetivo servir de apoio na comparação das coordenadas existentes dos pilares e verificar os comportamentos dos dois dispositivos em estudo. Ao mesmo tempo, também permitiu a comparação da visibilidade, geometria e intensidade do sinal, não sendo necessário desta forma recorrer ao recetor da estação de referência Trimble, como noutros testes.

Na Figura 6.19 encontra-se a distribuição do número de satélites ao longo do tempo de observação em ambos os equipamentos.

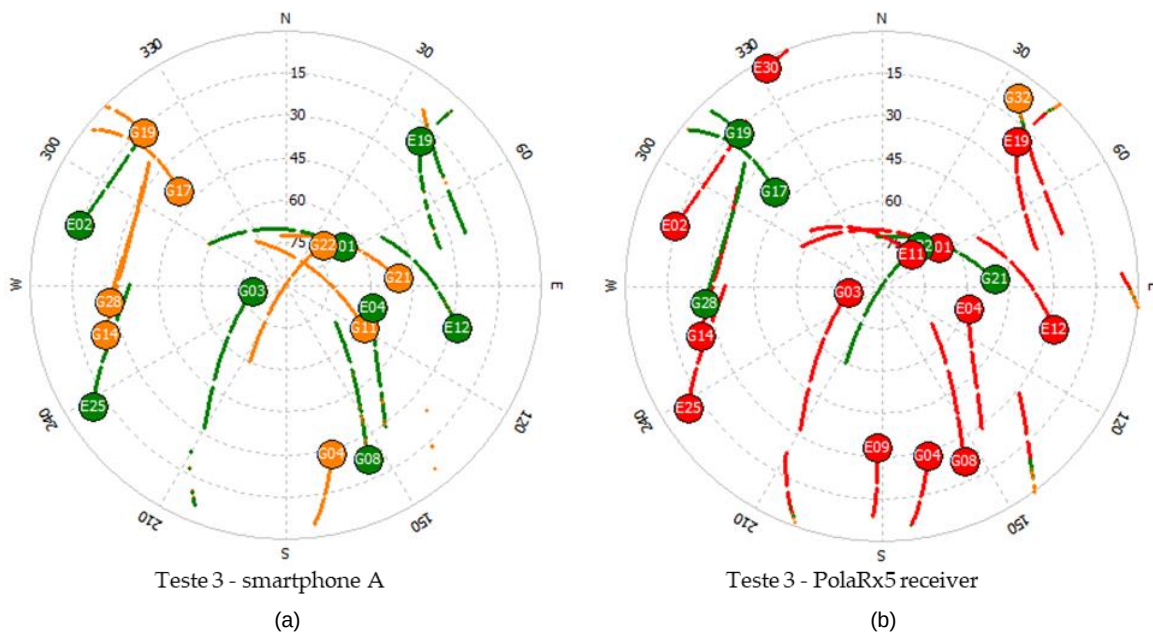


Figura 6.18 – Visibilidade no *smartphone* A (a) e recetor Alloy (b), em 13 de março de 2021 no Teste 3. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

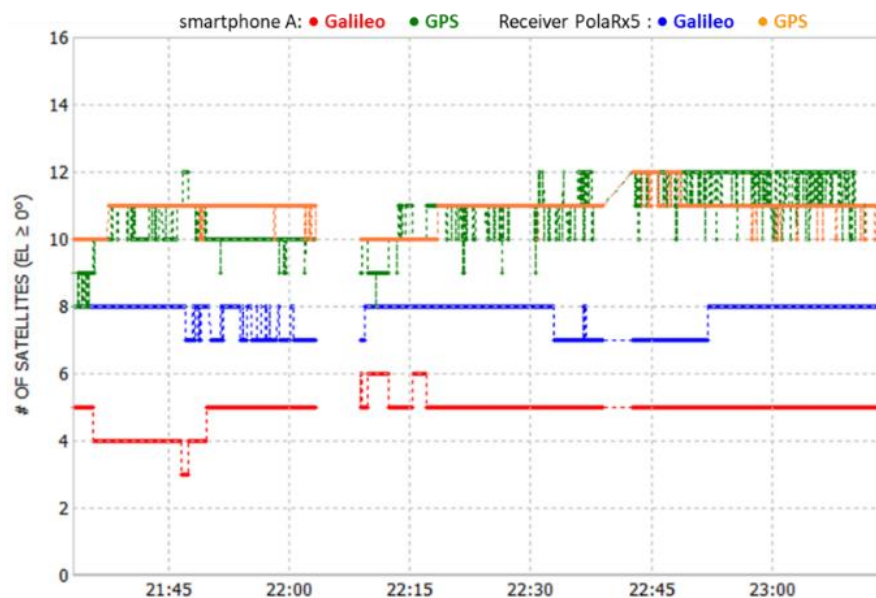


Figura 6.19 – Número de satélites no *smartphone* e recetor PolRx5, em 13 de março de 2021 no Teste 3.

A Figura 6.20 mostra a visibilidade dos satélites do Teste 4, com uma duração de 4 horas, podendo ver-se na Figura 6.21 o número de satélites seguidos nas constelações Galileo e GPS.

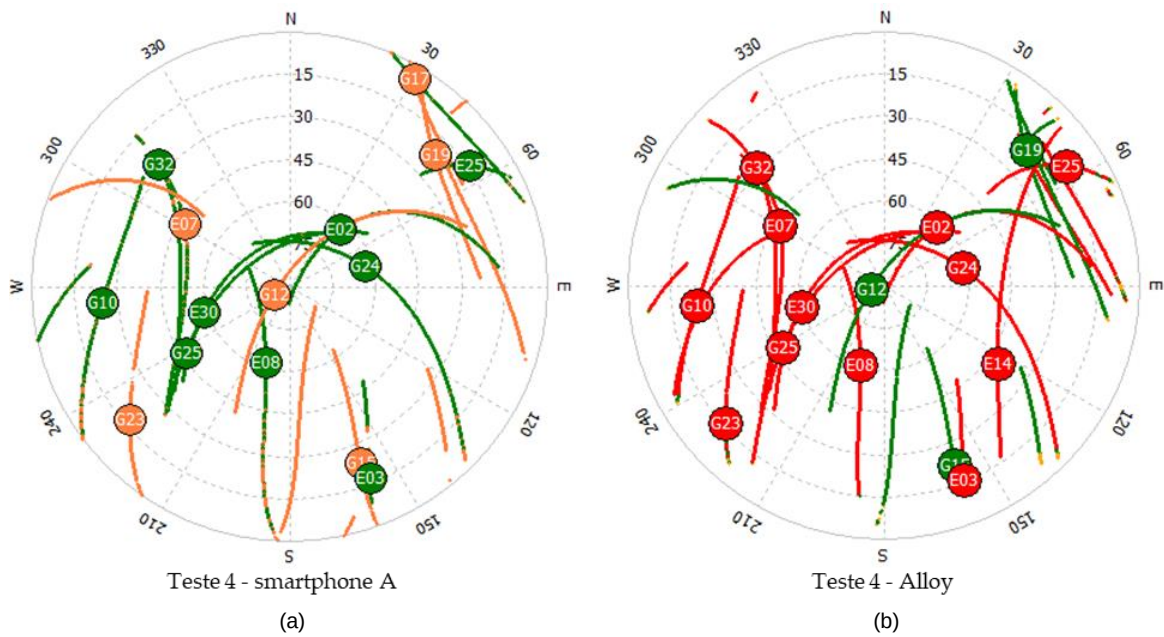


Figura 6.20 – Visibilidade no *smartphone A* (a) e recetor Alloy (b), em 18 de novembro de 2021 no Teste 4. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

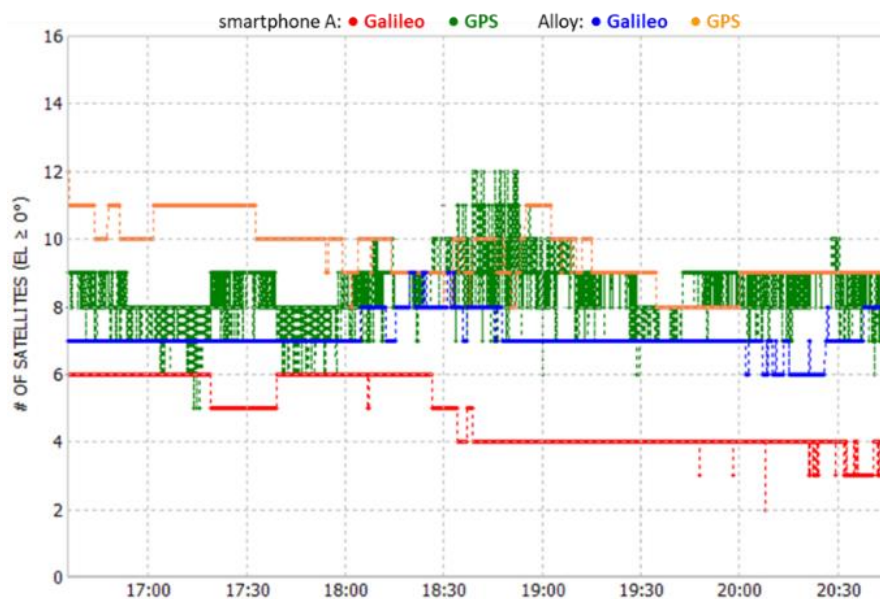


Figura 6.21 – Número de satélites no *smartphone* e recetor Alloy, em 18 de novembro de 2021 no Teste 4.

Na Figura 6.22 encontra-se a distribuição dos satélites seguidos pelo o *smartphone* e pelo recetor durante cerca 3 horas de observação no Teste 5. Na Figura 6.23 vemos a quantidade de satélites seguidos durante esse período na constelação Galileo e GPS.

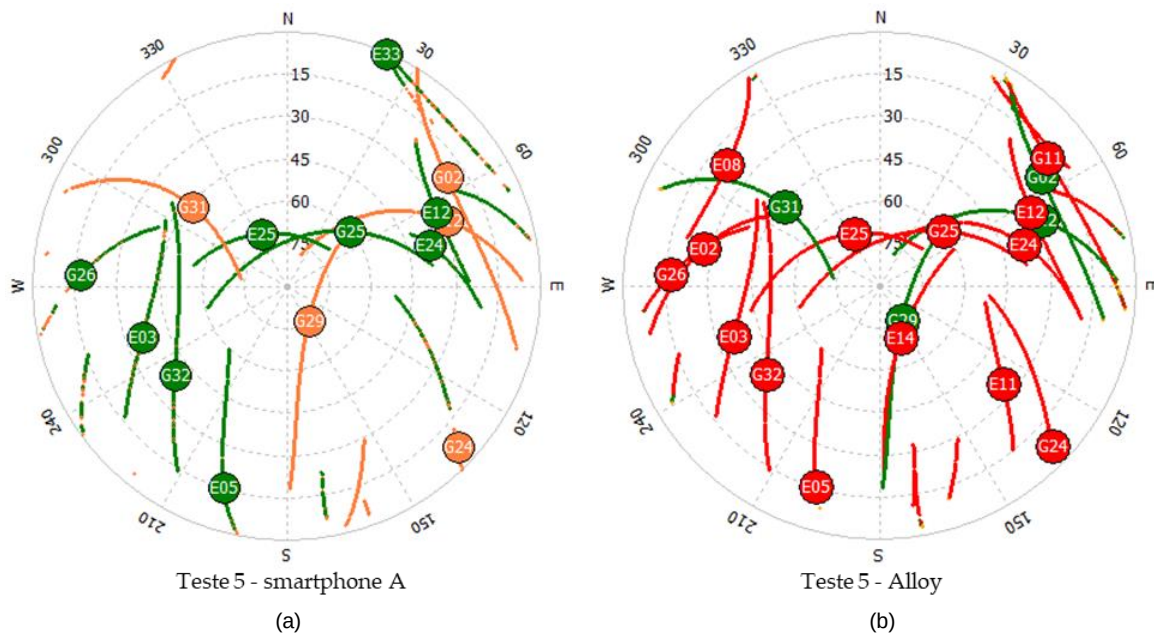


Figura 6.22 – Visibilidade no *smartphone* A (a) e recetor Alloy (b), em 19 de novembro de 2021 no Teste 5. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

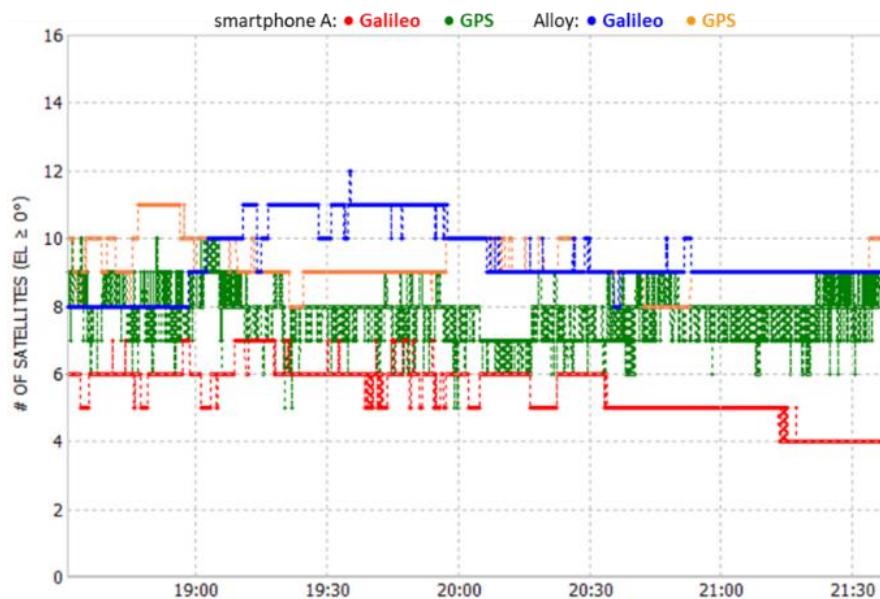


Figura 6.23 – Número de satélites no *smartphone* e recetor Alloy, em 19 de novembro de 2021 no Teste 5.

Na Figura 6.24 vemos a distribuição dos satélites Galileo e GPS seguidos pelo o *smartphone* e pelo recetor Alloy no Teste 6 durante um período de aproximadamente de 5 horas. Na Figura 6.25 encontramos o número de satélites seguidos durante esse período.

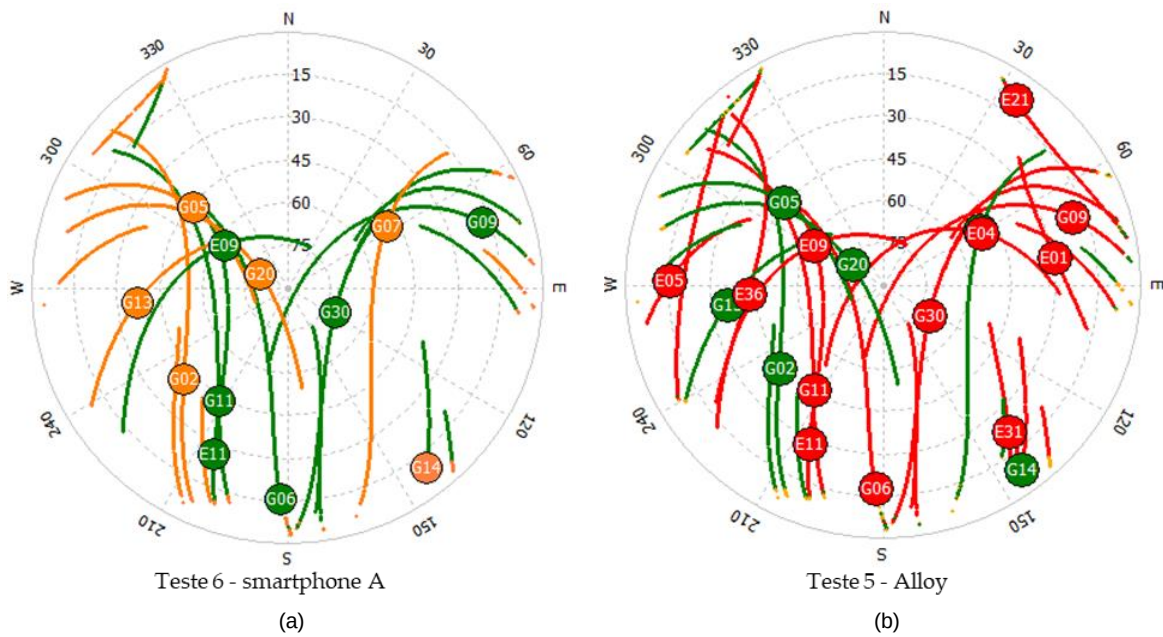


Figura 6.24 – Visibilidade no *smartphone* A (a) e recetor Alloy (b), em 22 de novembro de 2021 no Teste 6. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

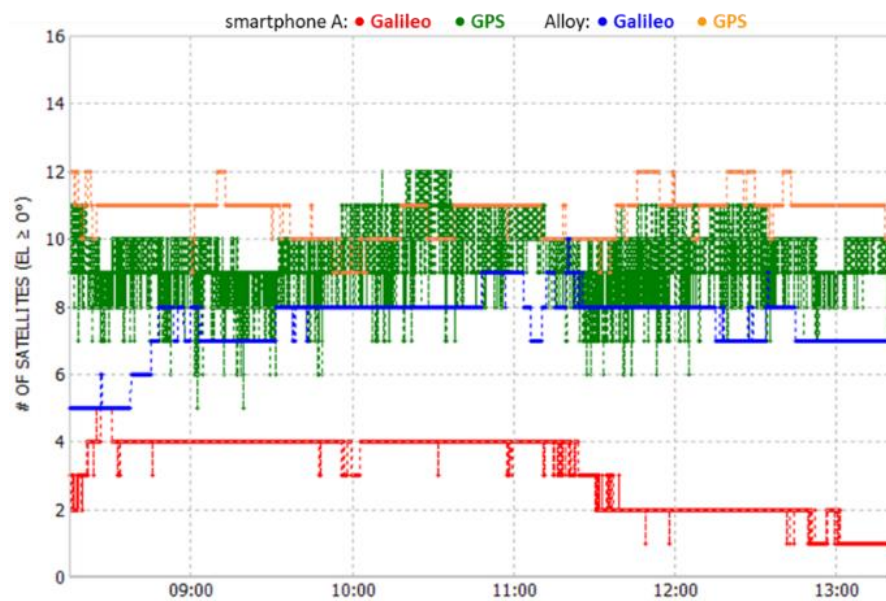


Figura 6.25 – Número de satélites no *smartphone* e recetor Alloy, em 22 de novembro de 2021 no Teste 6.

A Tabela 6.7 mostra-nos o resumo estatístico número de satélites em termos de máximos e mínimos seguidos nas constelações Galileo e GPS pelos equipamentos utilizados, *smartphone* A e B, recetor geodésico Alloy da Trimble com a antena Zephyr Geodetic II da mesma marca que tem como função servir de estação permanente, o recetor PolaRx5 e antena PolaNt-MF da Septentrio.

Como vimos acima, este levantamento foi dividido em seis testes, realizados em diferentes datas, indicados na última coluna da tabela, procurando realizar observações com diferentes tempos

de observação para avaliar a consistência temporal dos resultados obtidos. Na tabela encontramos ainda a geometria de ambas as constelações isoladamente e em combinação definida pela média dos seus respetivos PDOP.

Tabela 6.7 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento D.

Galileo			GPS			Galileo+GPS			Dispositivo	Data
Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP		
3	7	3,7	7	12	1,7	11	17	1,4	Smartphone A	12/02/2021 (Teste 1)
4	7	2,6	7	11	1,8	13	17	1,3	Smartphone B	
5	7	2,7	6	12	1,6	12	17	1,3	Smartphone	25/02/2021 (Teste 2)
6	8	2,3	7	12	1,5	13	19	1,1	Alloy	
3	6	6,1	8	12	1,7	13	17	1,3	Smartphone	13/03/2021 (Teste 3)
7	8	2,0	10	12	1,4	17	19	1,1	PolaRx5	
2	6	7,3	5	12	1,7	10	16	1,4	Smartphone	18/11/2021 (Teste 4)
6	9	2,3	8	11	1,6	15	18	1,2	Alloy	
4	7	4,1	6	12	1,9	11	16	1,5	Smartphone	19/11/2021 (Teste 5)
8	12	1,8	8	11	1,6	16	20	1,1	Alloy	
1	5	4,1	7	12	1,6	9	16	1,4	Smartphone	22/11/2021 (Teste 6)
5	9	2,3	9	12	1,6	15	20	1,1	Alloy	

Da figuras e tabela apresentadas acima vemos algumas diferenças no número de satélites seguidos e na geometria das constelações, com um menor número de satélites observados e com PDOP superiores dos *smartphones* relativamente aos recetores geodésicos.

No Teste 1, que para além do objetivo de usar estações remotas, também teve como propósito analisar a influência que dois *smartphones* do mesmo modelo poderiam apresentar, notou-se uma diferença no número de satélites observados pouco significativa. No caso da geometria, o *smartphone* B teve um PDOP melhor no caso da constelação Galileo, enquanto que o *smartphone* A essa melhoria foi no GPS. A ligeira diferença de satélites seguidos em cada constelação nos dois dispositivos, Figura 6.15, com o dispositivo B a observar mais satélites Galileo, pode explicar esse resultado.

Nos restantes testes, a comparação do *smartphone* e recetores geodésicos, mostra-nos que o *smartphone* seguiu quase sempre menos satélites, sejam Galileo ou GPS, quando comparado ao Trimble Alloy e ao Septentrio PolaRx5. O que pode ser explicado pela qualidade inferior da antena e pelo menor número de canais disponíveis. Geometricamente a constelação GPS mostram sempre um PDOP inferior a 2, próximo dos valores dos recetores profissionais. No caso da constelação Galileo, os valores são na sua maioria acima de 4, apresentando no pior caso um PDOP de 7,3 durante o Teste 4 em 18 de novembro de 2021.

6.2.1.2 Qualidade do sinal

Das Figura 6.26 à Figura 6.32 (mais exemplos no Anexo A) verifica-se o comportamento da razão sinal-ruído durante os seis testes nos *smartphones* e nos recetores geodésicos. No teste 1 analisou-se o impacto que o modo voo ligado ou desligado poderia ter sobre os sinais, assim

como as diferenças que modelos iguais podiam ter. Nos restantes testes o *smartphone* foi confrontado com a intensidade do sinal dos recetores profissionais.

As falhas existente na Figura 6.27 e nas Figuras 6.29 e 6.30, deveram-se, no primeiro caso a uma falha técnica num dos equipamentos, não gravando dados durante a observação do pilar 9, tendo--se repetido a observação. No segundo caso, não pode ser considerada falha pois se trata da mudança de pilares, possivelmente devido a uma maior duração nessa operação, a aplicação usada na representação gráfica não ligou as duas observações como se pode verificar nas outras transições.

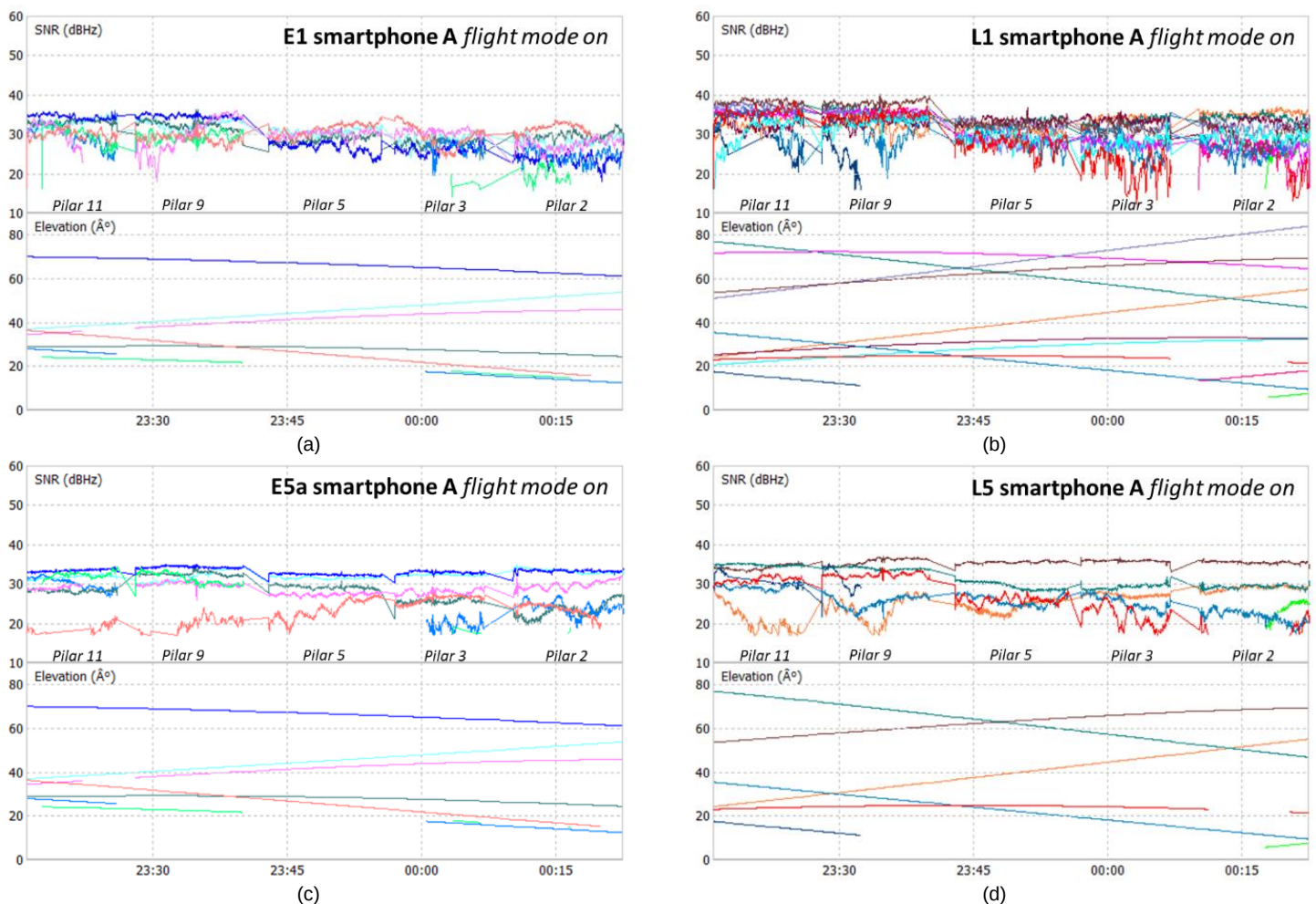
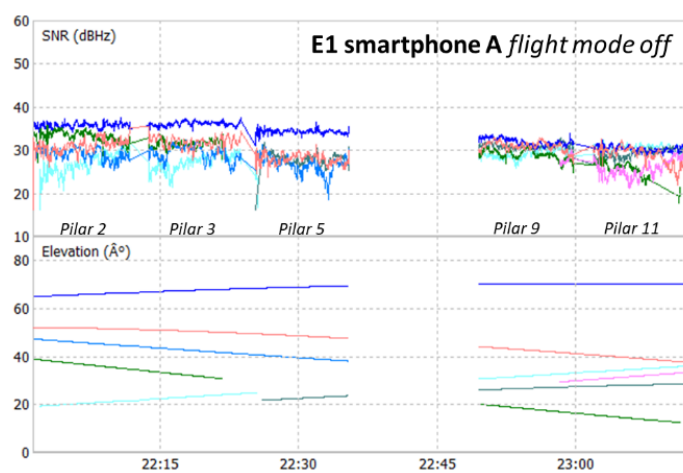
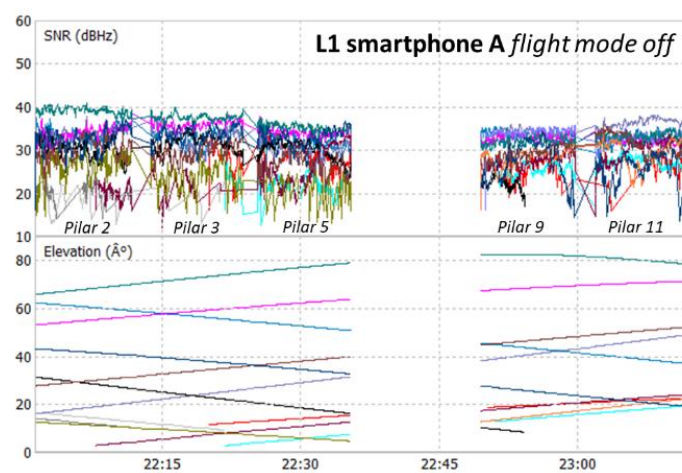


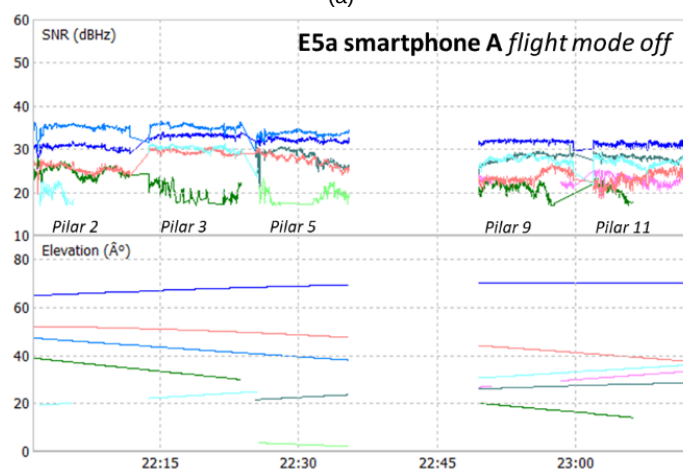
Figura 6.26 – SNR do *smartphone* A em modo voo ligado, 12 de fevereiro de 2021 (Teste 1): E1 (a), L1 (b), E5a (c), L5 (d).



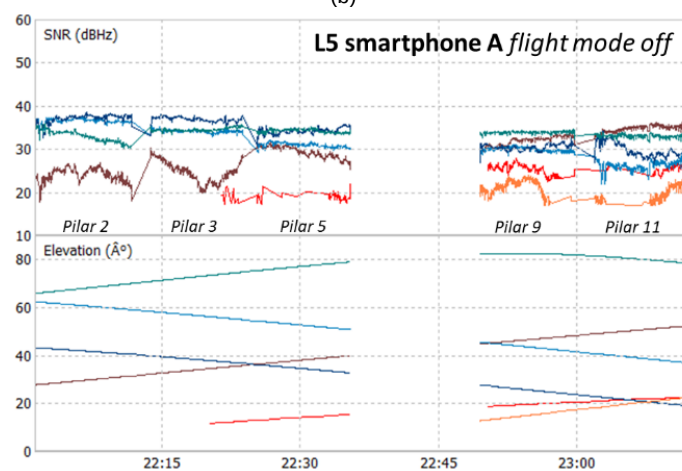
(a)



(b)

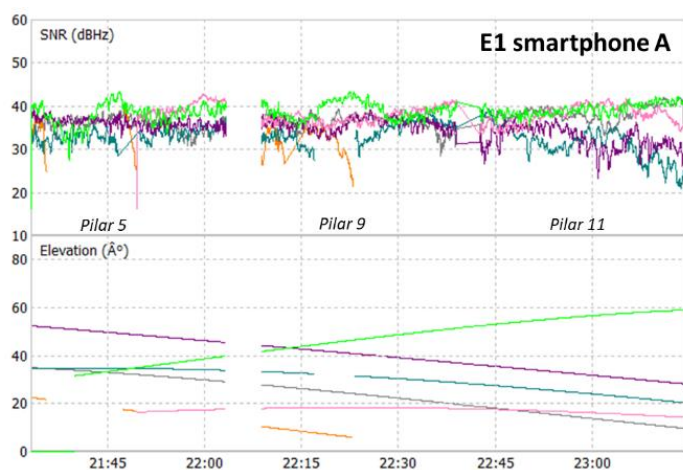


(c)

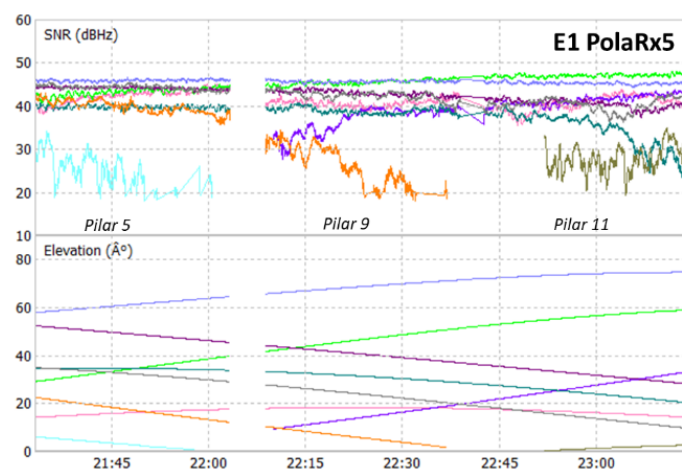


(d)

Figura 6.27 – SNR do *smartphone A* em modo voo desligado, 12 de fevereiro de 2021 (Teste 1): E1 (a), L1 (b), E5a (c), L5 (d).



(a)



(b)

Continua.

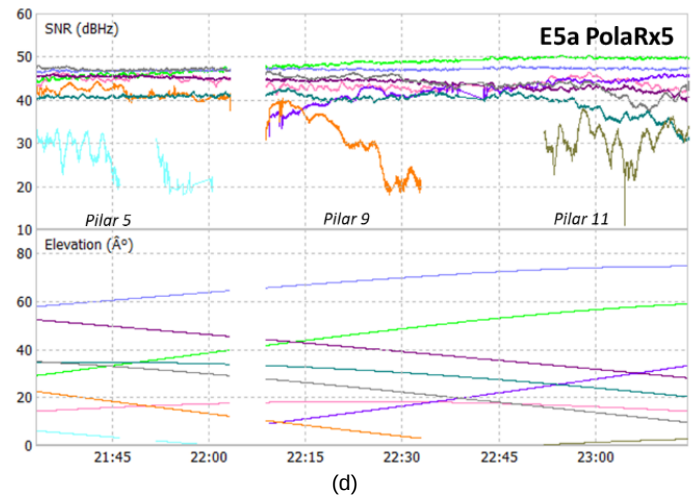
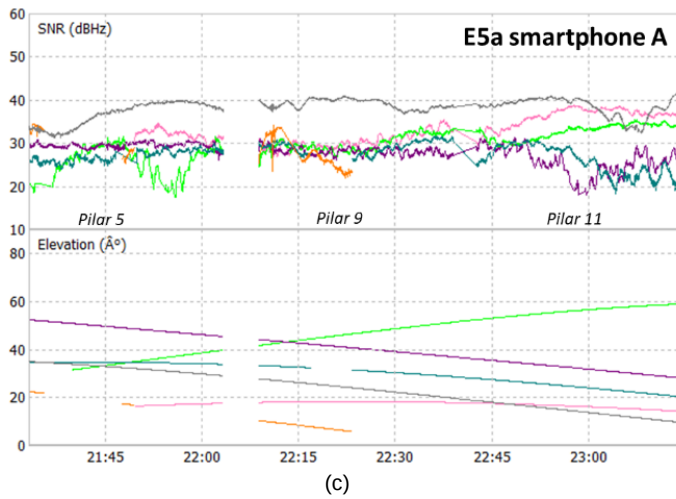


Figura 6.28 – SNR sinal Galileo, 13 de março de 2021 (Teste 3): *smartphone* E1 (a), E5a (c); PolaRx5 E1 (b), E5a (d).

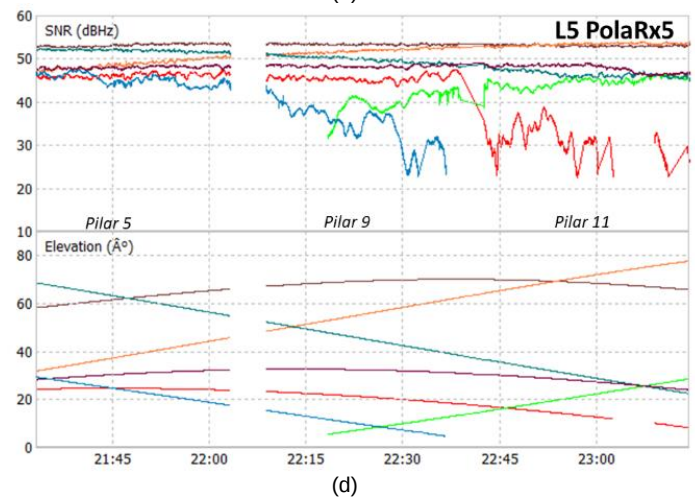
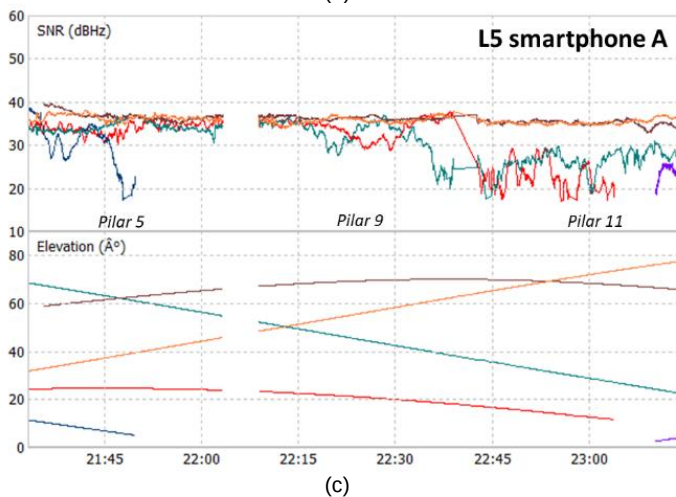
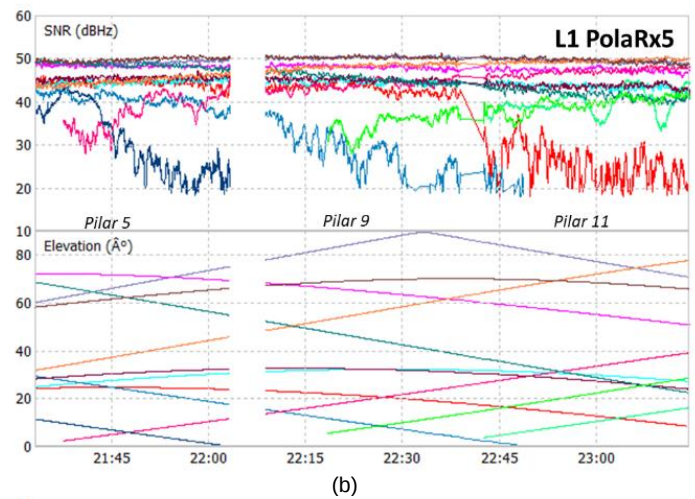
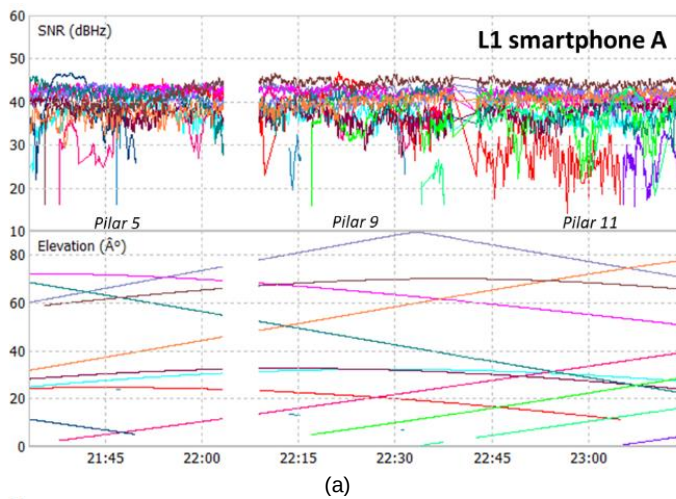


Figura 6.29 – SNR sinal GPS, 13 de março de 2021 (Teste 3): *smartphone* L1 (a), L5 (c); PolaRx5 L1 (b), L5 (d).

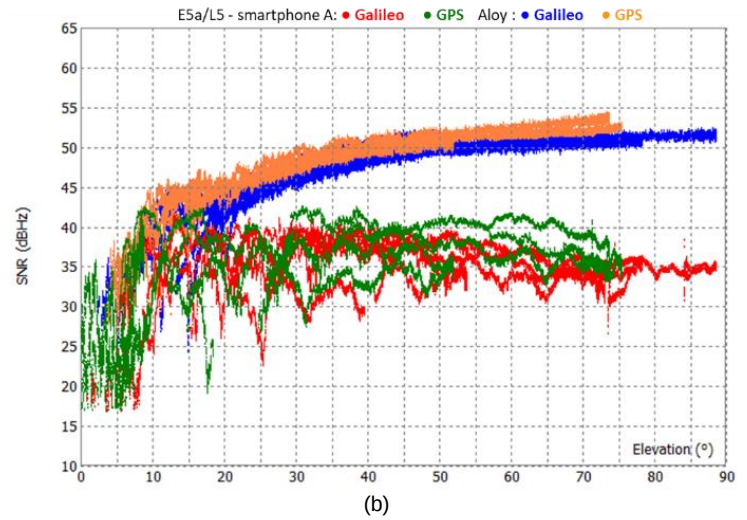
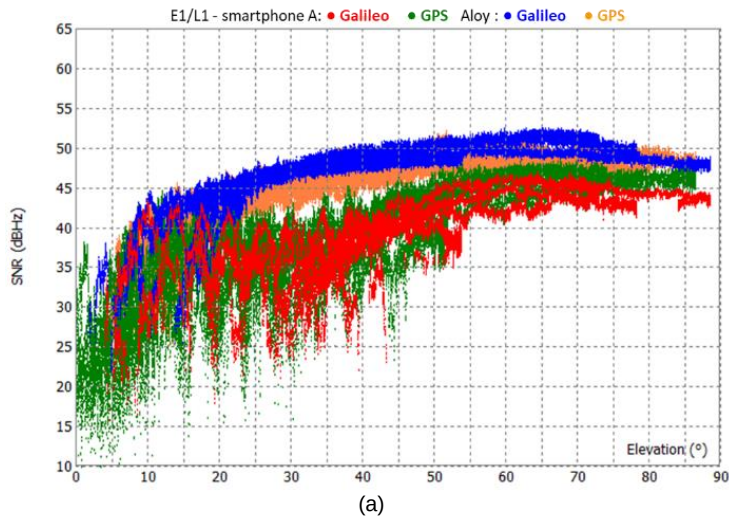


Figura 6.30 – SNR *smartphone* e Alloy versus elevação, 18 de novembro de 2021 (Teste 4): E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

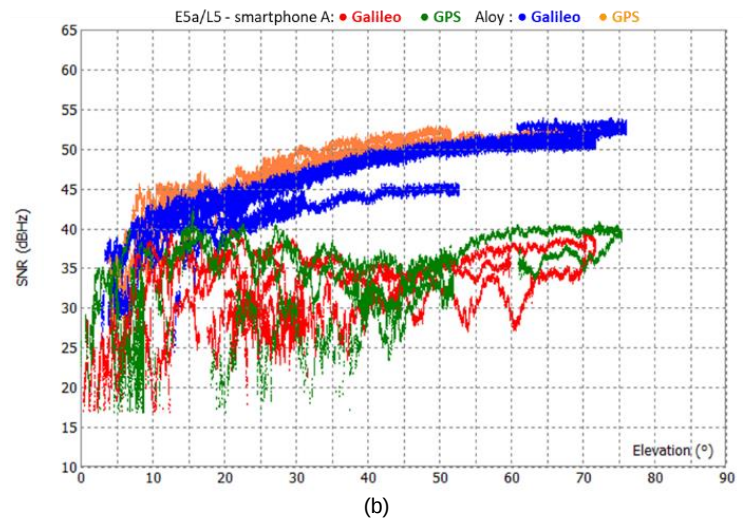
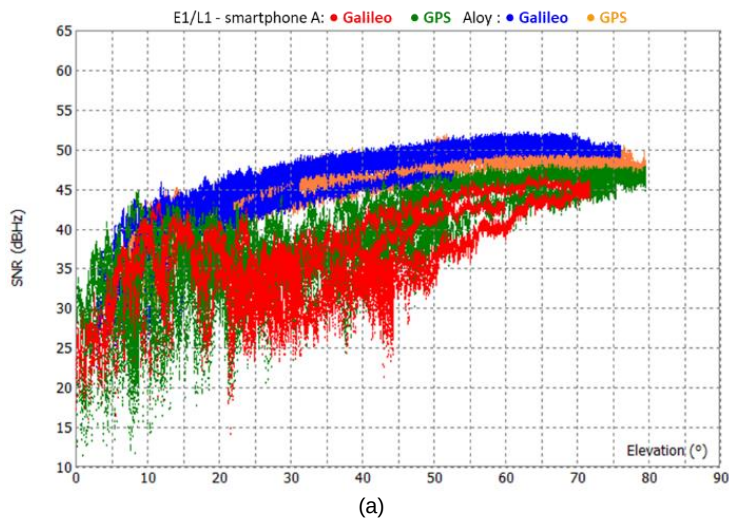


Figura 6.31 – SNR *smartphone* e Alloy versus elevação, 19 de novembro de 2021 (Teste 5): E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

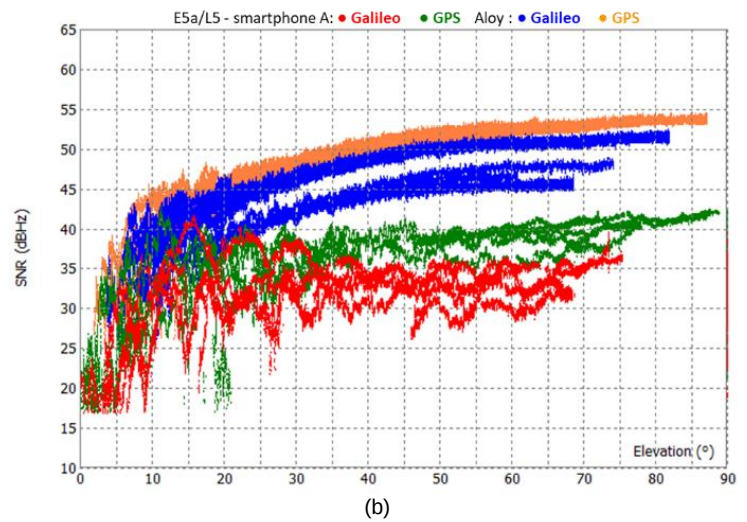
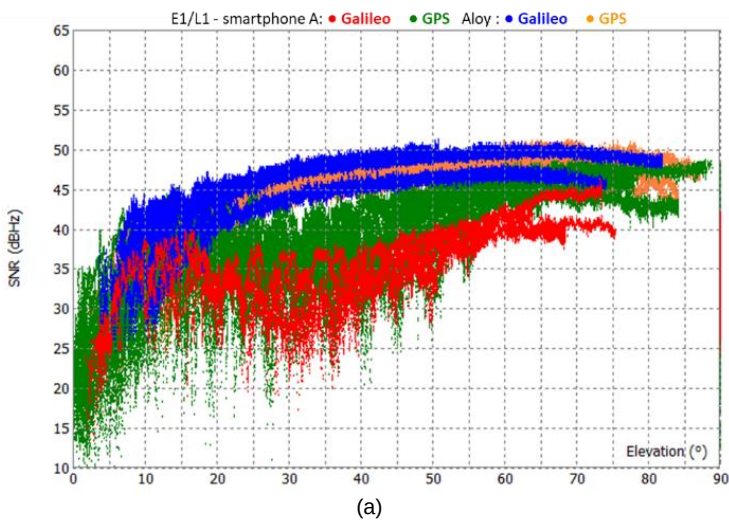


Figura 6.32 – SNR *smartphone* e Alloy versus elevação, 22 de novembro de 2021 (Teste 6): E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

Na Tabela 6.8 encontramos o resumo da estatística para a observável SNR na forma da média, desvio padrão, mínimo e máximo do Teste 1, quando se analisaram os dois *smartphones* Xiaomi Mi8 e o modo voo ligado ou desligado. Na Tabela 6.9 e Tabela 6.10 mostram-se os valores obtidos para estes parâmetros no dispositivo móvel e nos recetores geodésicos, respetivamente o Alloy nos Testes 2, 4, 5 e 6, e no recetor PolaRx5 durante o Teste 3.

Tabela 6.8 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no Teste 1.

	Smartphone A				Smartphone B				Data
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	30,0	32,1	30,3	30,7	31,0	32,8	29,0	32,2	12/02/2021 (Teste 1) Modo voo ligado
Desvio	2,9	3,4	3,0	3,9	2,9	3,6	3,0	3,5	
Mínimo	15,8	20,1	20,0	20,0	15,8	22,2	20,0	20,0	
Máximo	36,3	40,2	35,1	37,0	37,9	41,7	36,3	37,7	
Média	30,4	31,8	29,6	32,3	31,8	32,8	29,0	31,5	12/02/2021 (Teste 1) Modo voo desligado
Desvio	2,9	3,4	3,5	3,7	3,3	2,9	3,4	3,5	
Mínimo	18,7	20,5	20,0	20,0	16,6	20,1	20,0	20,0	
Máximo	37,6	40,9	36,5	38,7	37,7	40,4	35,7	38,2	

Tabela 6.9 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS nos Testes 2, 4, 5, 6.

	Smartphone A				Alloy				Data
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	37,8	38,5	35,0	35,8	46,3	44,2	46,3	47,2	25/02/2021 (Teste 2)
Desvio	5,1	5,5	3,5	4,0	5,1	5,3	5,2	4,7	
Mínimo	18,8	20,0	20,0	20,0	26,9	23,8	26,5	32,3	
Máximo	46,1	48,3	40,8	42,8	52,6	51,2	52,3	54,2	
Média	39,2	39,2	35,5	36,7	47,1	44,5	47,1	48,0	18/11/2021 (Teste 4)
Desvio	5,0	5,6	2,7	3,2	3,9	4,6	4,2	4,1	
Mínimo	18,2	20,0	20,1	20,1	22,1	21,8	19,3	31,0	
Máximo	47,1	48,9	41,7	45,9	52,6	52,3	52,5	54,5	
Média	36,8	39,1	33,0	34,9	46,1	44,1	45,7	47,5	19/11/2021 (Teste 5)
Desvio	5,4	5,6	3,6	3,8	4,3	5,0	4,5	4,3	
Mínimo	17,5	20,0	20,0	20,1	22,7	23,8	19,9	30,5	
Máximo	47,4	48,2	40,1	42,8	52,2	51,9	54,0	53,5	
Média	36,1	39,1	33,2	37,8	45,6	44,5	45,3	49,0	22/11/2021 (Teste 6)
Desvio	5,1	5,6	2,7	3,2	4,1	4,8	4,5	4,2	
Mínimo	16,4	20,1	20,0	20,0	25,6	16,9	18,6	28,7	
Máximo	46,3	49,1	41,7	42,9	51,5	51,4	52,5	54,6	

Tabela 6.10 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no Teste 3.

	Smartphone A				PolaRx5				Data
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	36,2	39,7	31,9	34,4	41,5	45,1	43,9	48,5	13/03/2021 (Teste 3)
Desvio	3,2	3,6	4,5	2,9	4,2	4,5	3,8	4,1	
Mínimo	21,4	20,1	20,0	20,0	22,7	22,9	24,5	29,1	
Máximo	43,4	46,9	41,8	39,6	48,0	51,3	50,4	54,1	

Analisando os gráficos e tabelas acima apresentados notamos que o anteriormente constatado nos outros levantamentos continua a verificar-se, com os sinais a apresentarem valores inferiores no *smartphone*, mais acentuado no caso dos sinais E5a e L5, com os máximos a não ultrapassarem os 50 dBHz.

Quando os dois *smartphones* são confrontados entre si, podemos afirmar que os valores obtidos são bastante similares, apresentando algumas diferenças, mas pouco significativas. O mesmo também se pode aplicar ao comportamento dos sinais em modo voo ligado ou desligado, com impacto que podemos considerar quase nulo. Nesta análise os gráficos do SNR em função da elevação definidos pela Figura 6.30 à Figura 6.32, além de reforçarem algumas das conclusões nos levantamentos anteriores, como os sinais GPS serem superiores aos do Galileo, permitem identificar um comportamento no *smartphone* que não acontece num recetor.

Apesar de normalmente os sinais dos satélites com alturas mais baixas apresentarem os valores do SNR menores, no caso do *smartphone* a razão sinal-ruído nos sinais E1/L1 cresce para valores da ordem dos 40-45 dBHz para as alturas baixas entre os 5° e 15°, dando-se depois uma ligeira diminuição até aos 30°, voltando a aumentar até cerca dos 55° e estabilizando a partir daí. No caso dos sinais E5a/L5 do *smartphone* estas oscilações não são tão evidentes, sendo constante com o aumento da elevação, não existindo aumentos pronunciados da razão sinal-ruído. Este comportamento pode estar dependente do software de aquisição dos dados GNSS no telemóvel, como mais à frente poderemos constatar.

6.3 Levantamentos cinemáticos

Os subcapítulos seguintes mostram a análise da geometria e sinal para cada um dos levantamentos realizados em modo cinemático em ambiente hidrográfico, aéreo e terrestre.

6.3.1 Levantamento E - Hidrográfico

O levantamento E foi realizado em modo cinemático num cenário fluvial e foi avaliada a visibilidade de satélites do Galileo e GPS e intensidade dos sinais no telemóvel.

6.3.1.1 Satélites visíveis

A Figura 6.33 e a Figura 6.34 mostram a visibilidade dos satélites Galileo e GPS no *smartphone* e no recetor PolaRx5 durante o período de observação em ambiente hidrográfico. Na Tabela 6.11 está quantificada essa visibilidade.

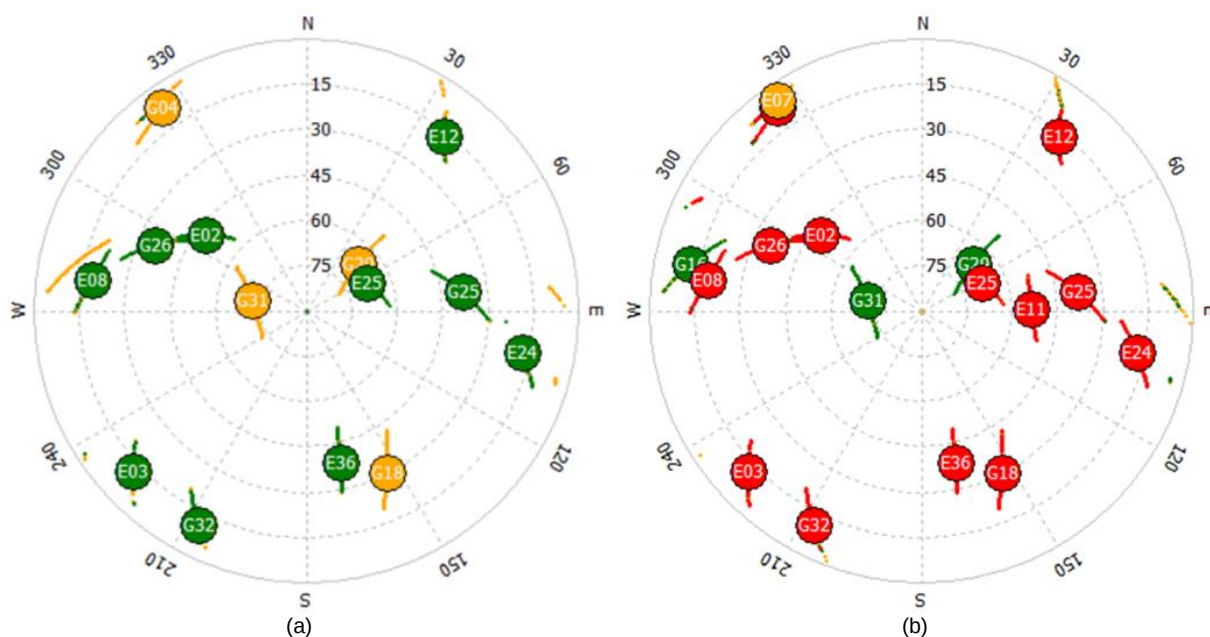


Figura 6.33 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a) e recetor geodésico (b), em 04 de maio de 2021. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

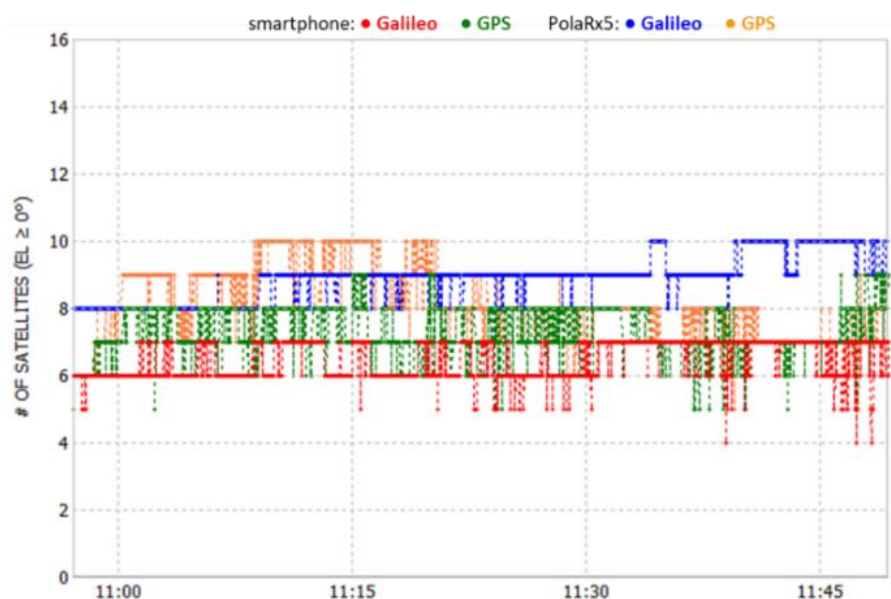


Figura 6.34 – Número de satélites no *smartphone* e recetor geodésico, em 04 de maio de 2021.

Tabela 6.11 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento E.

Galileo			GPS			Galileo+GPS			Dispositivo	Data
Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP		
5	7	2,0	5	9	2,0	11	16	1,3	Smartphone	04/05/2021
8	10	1,6	6	10	1,8	14	19	1,1	PolaRx5	

O comportamento do *smartphone* Mi8 em termos da visibilidade de satélites e geometria não sofreu alterações significativas em relação ao que se tem vindo a verificar nos levantamentos estáticos, com o *smartphone* a seguir menos satélites do que o recetor geodésico PolaRx5.

6.3.1.2 Qualidade do sinal

A Figura 6.35 e a Tabela 6.12 mostra-nos o comportamento do SNR no *smartphone* Xiaomi Mi8 e no recetor da Septentrio PolaRx5 em ambiente hidrográfico. A Figura 6.36 que mostra o comportamento de dois satélites, Galileo (E25) e GPS (G25) em cada um dos equipamentos e a sobreposição dos perfis (azul) nas coordenadas Este (superior) e Norte (inferior) no período da observação, é uma composição, onde os perfis são representados de forma simbólica.

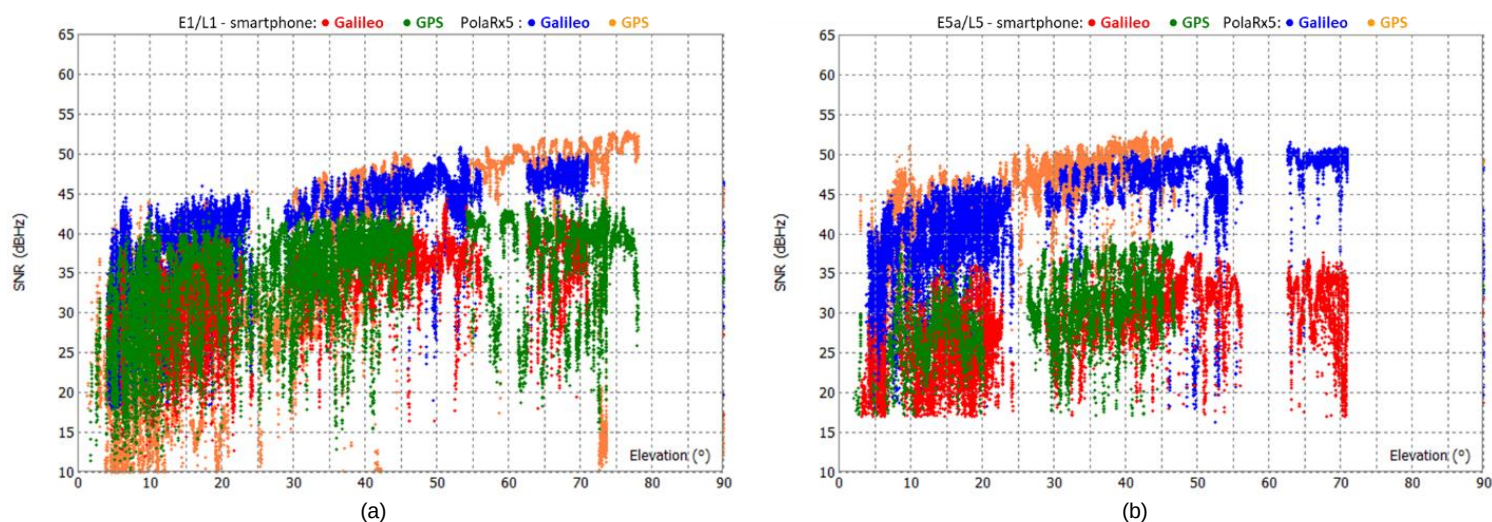


Figura 6.35 – SNR *smartphone* e PolaRx5 versus elevação, 04 de maio de 2021: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

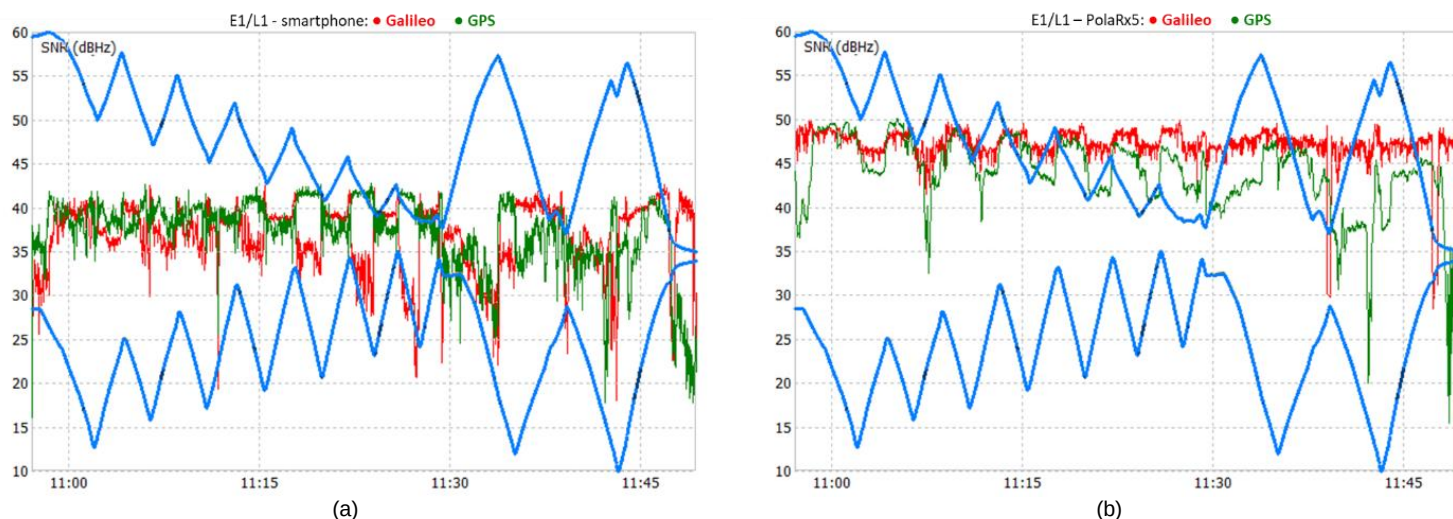


Figura 6.36 – SNR no satélite E25 (vermelho) e G25 (verde), coordenadas Este (superior azul) e Norte (inferior azul): *smartphone* (a), PolaRx5 (b).

Tabela 6.12 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento E.

	Smartphone				PolaRx5				Data
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	33,8	36,0	30,1	31,8	42,5	43,0	44,6	46,3	04/05/2021
Desvio	4,4	4,4	3,5	3,9	5,3	4,9	5,1	4,7	
Mínimo	16,3	21,0	20,0	20,1	22,1	22,4	22,3	23,8	
Máximo	44,3	44,9	37,7	39,7	51,7	52,2	53,9	53,6	

O comportamento da intensidade do sinal no ambiente hidrográfico também segue os indicadores anteriores dos outros levantamentos com o *smartphone* apresentar menor intensidade nos sinais, com as médias dentro do caso dos 30 dBHz.

Apesar do meio onde se realizou este levantamento ser propício a reflexões na superfície de água e a uma maior exposição devido à arfagem do barco, a dispersão nos gráficos dos sinais E1/L1 e E5a/L5 é menor do que no caso do levantamento terrestre em autoestrada apresentado mais à frente, sobretudo devido à inexistência de obstáculos, apesar de existir uma ponte nas proximidades. A utilização de uma base metálica por debaixo das duas antenas, também contribuiu para minimizar essa dispersão e ao mesmo tempo a mitigara a reflexão de sinais.

Observam-se na Figura 6.36 oscilações de formato tipo uma onda achatada em ambos os equipamentos, que dependem da orientação das antenas em relação os sinais recebidos. Verificamos essa dependência ao sobrepor os perfis representado pelas as suas coordenadas Este e Norte (linhas azuis) com o SNR. Nesta figura também se notam as menores oscilações, mas com maior frequência resultantes da arfagem da embarcação.

6.3.2 Levantamento F - Aéreo

Efetuuou-se uma análise do comportamento no seguimento dos satélites e intensidade do sinal no ambiente aéreo No levantamento F, para cada um dos voos que compuseram este levantamento.

6.3.2.1 Satélites visíveis

A distribuição e número de satélites Galileo e GPS seguidos pelo *smartphone* e pelo PolaRx5, durante o voo de 07 de outubro de 2019, encontram-se na Figura 6.37 e Figura 6.38. A Figura 6.39 e a Figura 6.40 são referentes ao voo de 10 de junho de 2020. A Tabela 6.13 mostra o número de satélites e PDOP em termos estatísticos.

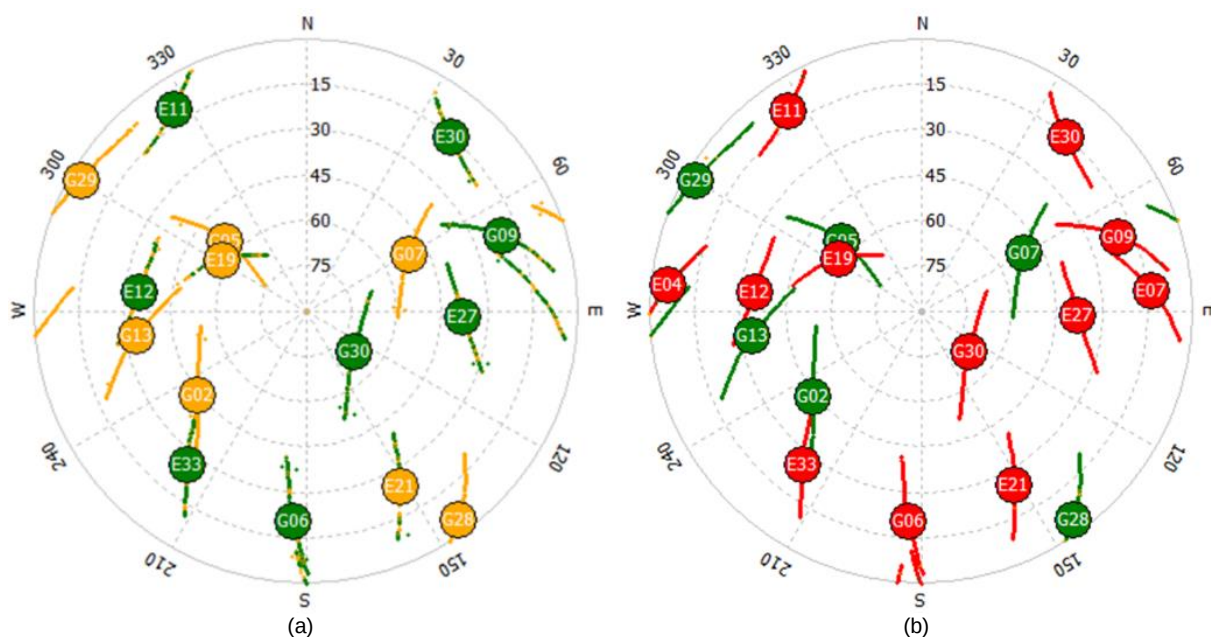


Figura 6.37 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a) e recetor geodésico (b), em 07 de outubro de 2019. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

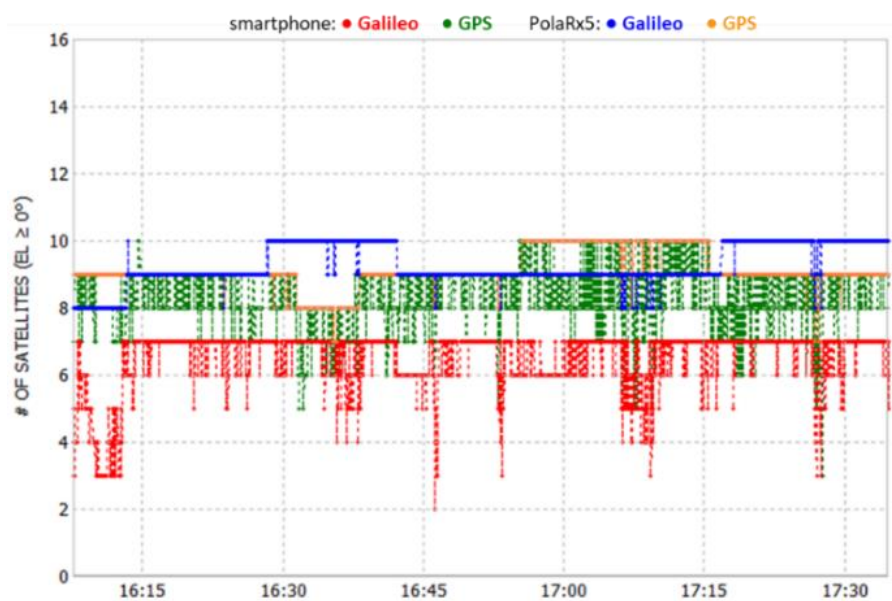


Figura 6.38 – Número de satélites no *smartphone* e recetor geodésico, em 07 de outubro de 2019..

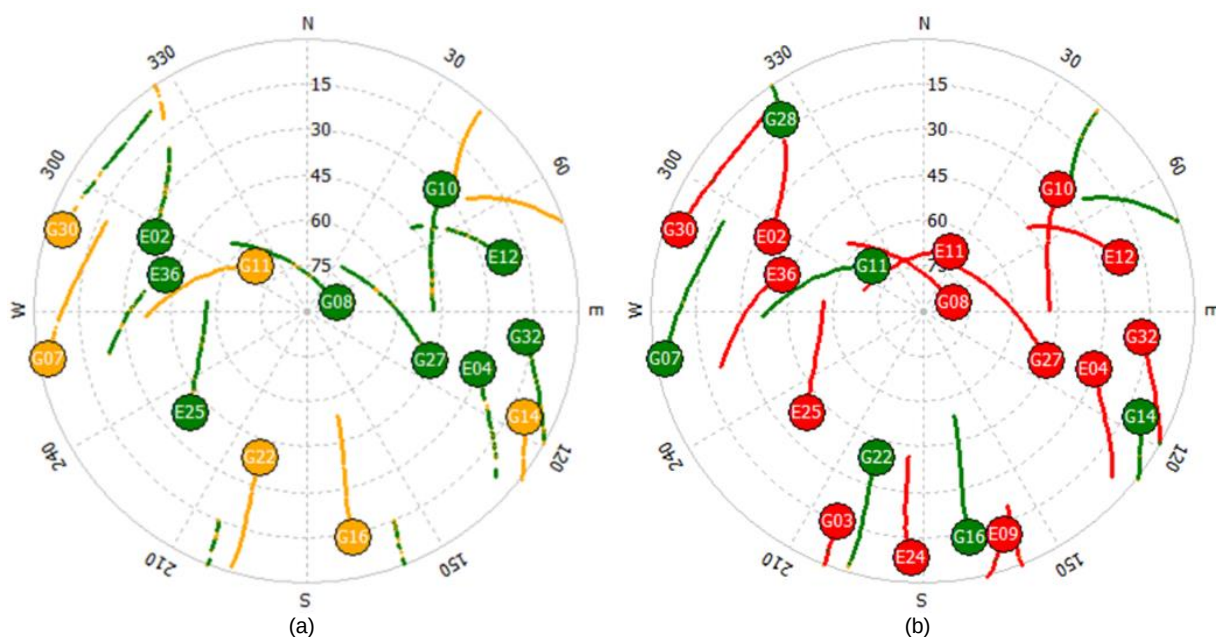


Figura 6.39 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a) e recetor geodésico (b), em 10 de junho de 2020. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

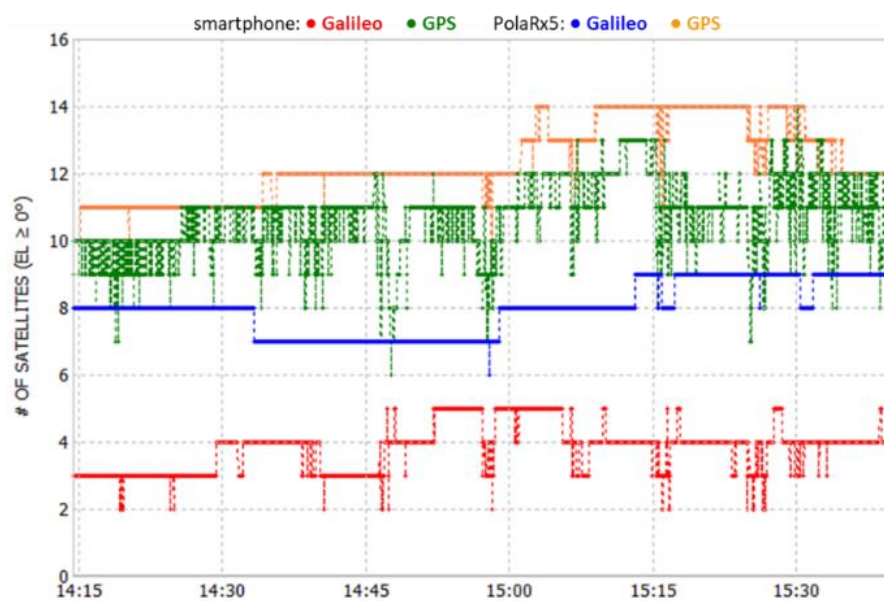


Figura 6.40 – Número de satélites no *smartphone* e recetor geodésico, em 10 de junho de 2020.

Tabela 6.13 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento F.

Galileo			GPS			Galileo+GPS			Dispositivo	Data
Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP		
2	7	2,5	6	13	1,4	11	17	1,2	Smartphone	07/10/2019
8	10	1,7	8	10	1,5	17	19	1,0	PolRx5	
2	5	5,9	8	10	1,8	11	17	1,2	Smartphone	10/06/2020
7	9	2,2	10	14	1,2	18	23	1,0	PolRx5	

O número de satélites visíveis e geometria durante este levantamento cinemático numa aeronave mantém um desempenho similar aos desempenhos obtidos nos levantamentos em modo estático, com o GPS do telemóvel a mostrar valores mais próximos do recetor PolaRX5, enquanto que para o Galileo as diferenças são maiores.

Para além das causas já anteriormente referidas, como a menor qualidade da antena, hardware e número de canais do *smartphone* ou ainda a constelação do Galileo não estar finalizada, a localização do dispositivo num local não tão favorável como no caso da antena aérea instalada no topo da fuselagem do avião, assim como também o elevado número de manobras realizadas durante o voo no desenho dos perfis, condicionou o seguimento dos satélites resultando em mínimos de apenas dois satélites Galileo observados em simultâneo, em determinadas épocas.

6.3.2.2 Qualidade do sinal

A Figura 6.41 mostra os gráficos da razão sinal-ruído para os sinais E1/L1 e E5a/L5 no dispositivo móvel e no recetor geodésico PolaRx5, em função da elevação dos satélites das constelações Galileo e GPS, para o voo realizado a 07 de outubro de 2019. A Figura 6.42 mostra o mesmo tipo de gráficos mas para o voo realizado a 10 de junho de 2020. Na Tabela 6.14 encontramos as estatísticas da intensidade do sinal obtidas em ambos os voos.

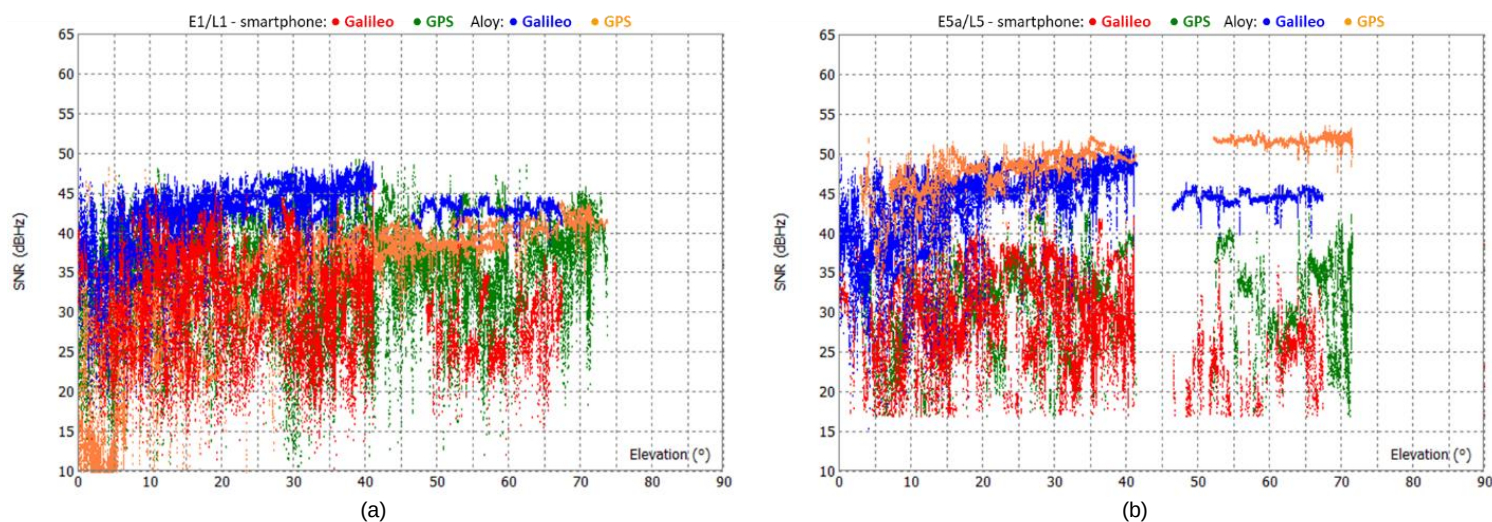


Figura 6.41 – SNR *smartphone* e PolaRx5 versus elevação, 07 de outubro de 2019: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

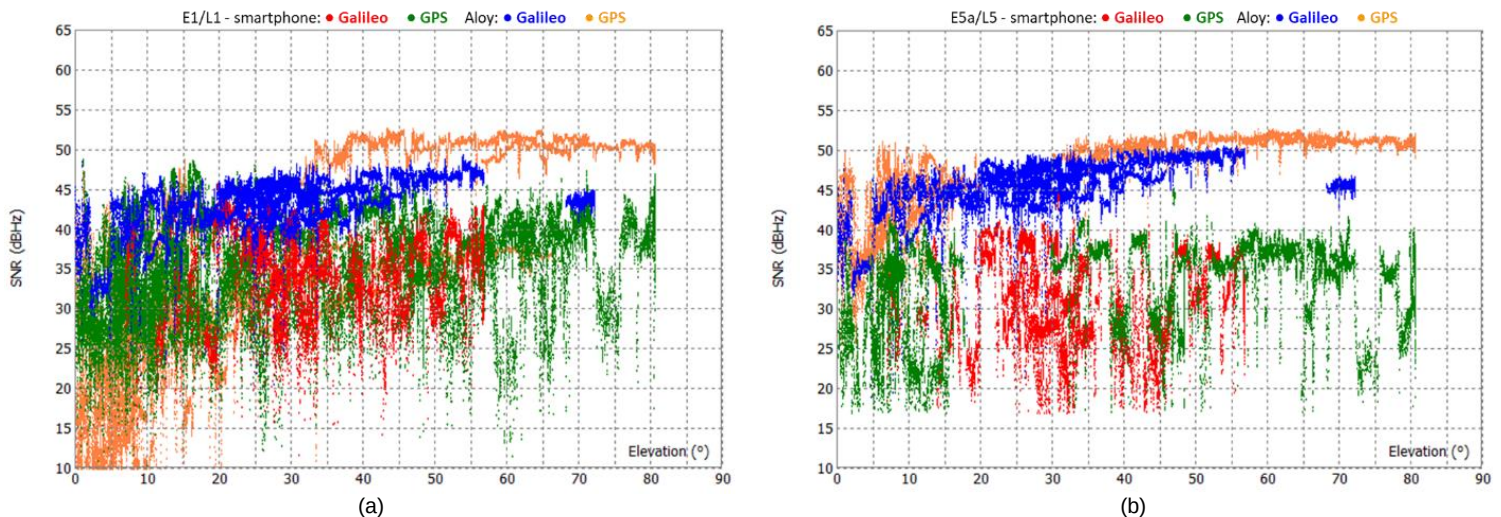


Figura 6.42 – SNR *smartphone* e PolaRx5 versus elevação, 10 de junho de 2020: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

Tabela 6.14 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento F.

	Smartphone				PolaRx5				Data
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	32,2	35,9	31,2	32,9	42,1	46,3	44,2	48,9	07/10/2019
Desvio	5,1	5,1	4,3	4,4	4,0	4,8	4,0	3,5	
Mínimo	15,1	20,0	20,0	20,1	22,3	23,1	22,2	27,4	
Máximo	46,0	49,3	42,1	44,0	49,0	52,4	51,0	53,6	
Média	35,7	36,2	33,1	34,3	43,3	43,4	45,6	47,3	10/06/2020
Desvio	4,9	5,5	4,7	4,2	3,0	5,0	3,0	4,7	
Mínimo	17,1	20,2	20,0	20,0	23,6	22,6	24,5	26,3	
Máximo	46,4	48,9	44,5	45,2	49,4	51,1	50,6	52,8	

Dos gráficos e tabela acima podemos constatar que o comportamento do SNR no *smartphone* neste levantamento em modo cinemático é idêntico aos anteriores, com valores inferiores ao recetor profissional em todos os sinais do Galileo e GPS. Encontraram-se valores médios na casa dos 30 dBHz e máximos a nunca a ultrapassar os 50 dBHz.

Comparando o SNR nas duas campanhas verificamos que os valores são similares para todos os parâmetros estatísticos. Ainda olhando para os gráficos destas campanhas, notamos que a maior dispersão habitualmente conectada com satélites de altura baixa, também é visível em alguns dos satélites mais elevados. Isto pode ser explicado por se tratar de um levantamento cinemático, onde os movimentos próprios da aeronave, juntamente com as manobras realizadas introduzem algum ruído nas medidas dos sinais.

6.3.3 Levantamento G - Aéreo

O levantamento G, tal como o F, foi realizado na mesma aeronave e com os mesmos equipamentos instalados a bordo, tendo sido também realizada a análise do sinal e visibilidade de satélites Galileo e GPS.

6.3.3.1 Satélites visíveis

Na Figura 6.43 e na Figura 6.44 podemos verificar a visibilidade durante o levantamento H no avião e na Tabela 6.15 o resumo dos valores obtidos em ambos equipamentos e constelações.

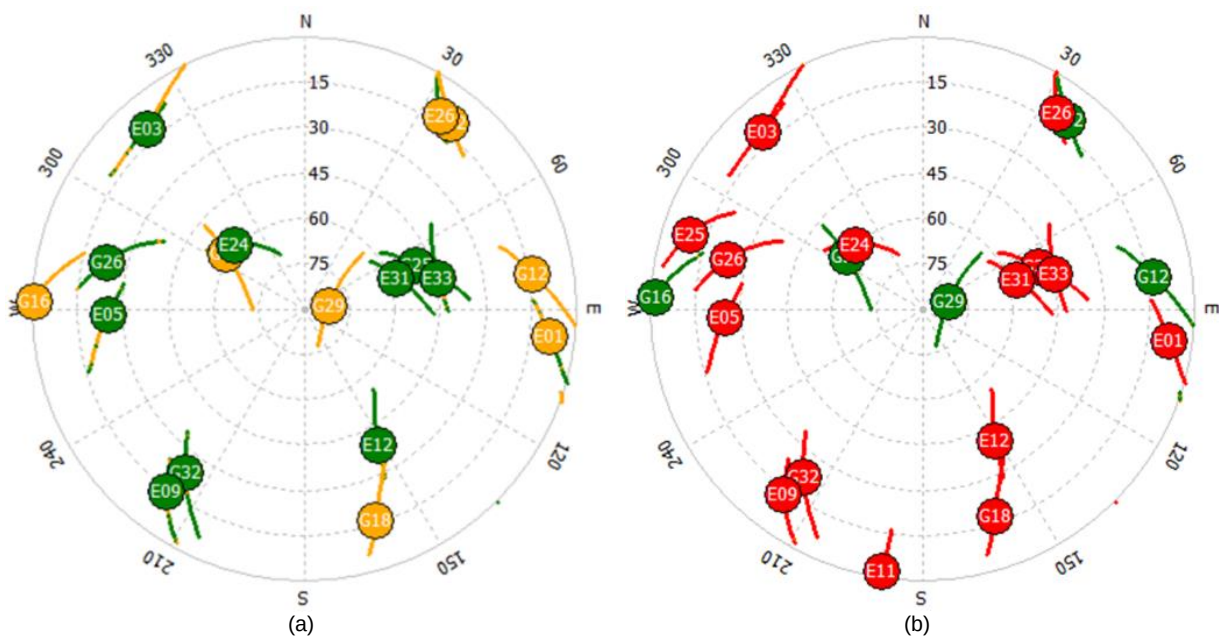


Figura 6.43 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a) e recetor geodésico (b), em 08 de maio de 2021. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

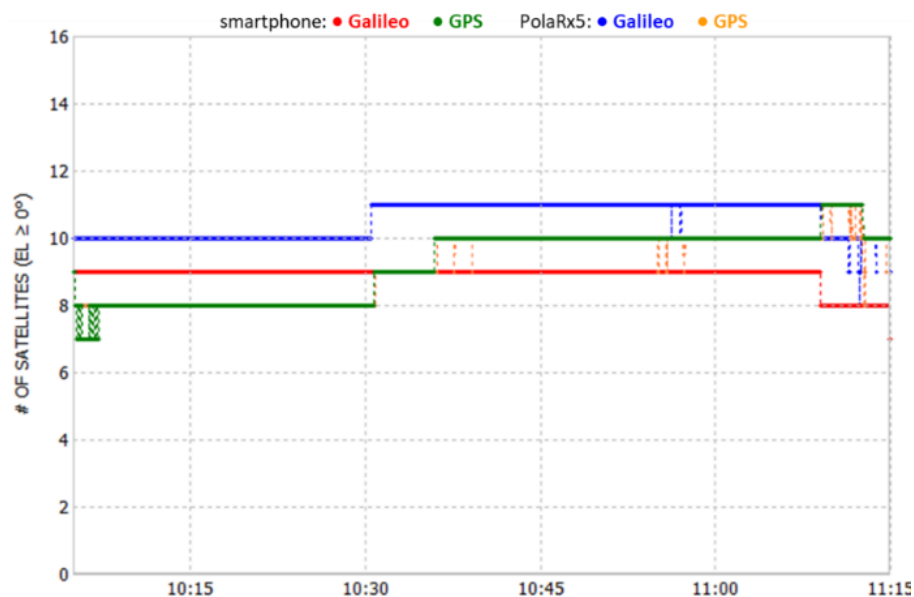


Figura 6.44 – Número de satélites no *smartphone* e recetor geodésico, em 08 de maio de 2021.

Tabela 6.15 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento G.

Galileo			GPS			Galileo+GPS			Dispositivo	Data
Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP		
7	9	1,5	7	11	1,4	16	19	1,0	Smartphone PolaRx5	08/05/2021
8	11	1,4	8	11	1,4	18	21	0,9		

O comportamento da geometria e visibilidades neste levantamento é similar aos anteriores com o telemóvel a seguir menos satélites, mas desta vez com um número mais próximo do PolaRx5, não observando os mínimos de 2 satélites Galileo, como aconteceu no levantamento anterior, encontrando-se agora um valor mínimo de 7. Isto pode ser explicado pelas características da trajetória de voo, com uma menor quantidade de manobras efetuadas.

6.3.3.2 Qualidade do sinal

A Figura 6.45 e Tabela 6.16 mostram o comportamento dos sinais E1/L1 e E5a/L5 em termos da intensidade do sinal nos dois equipamentos durante o voo realizado em 08 de maio de 2021.

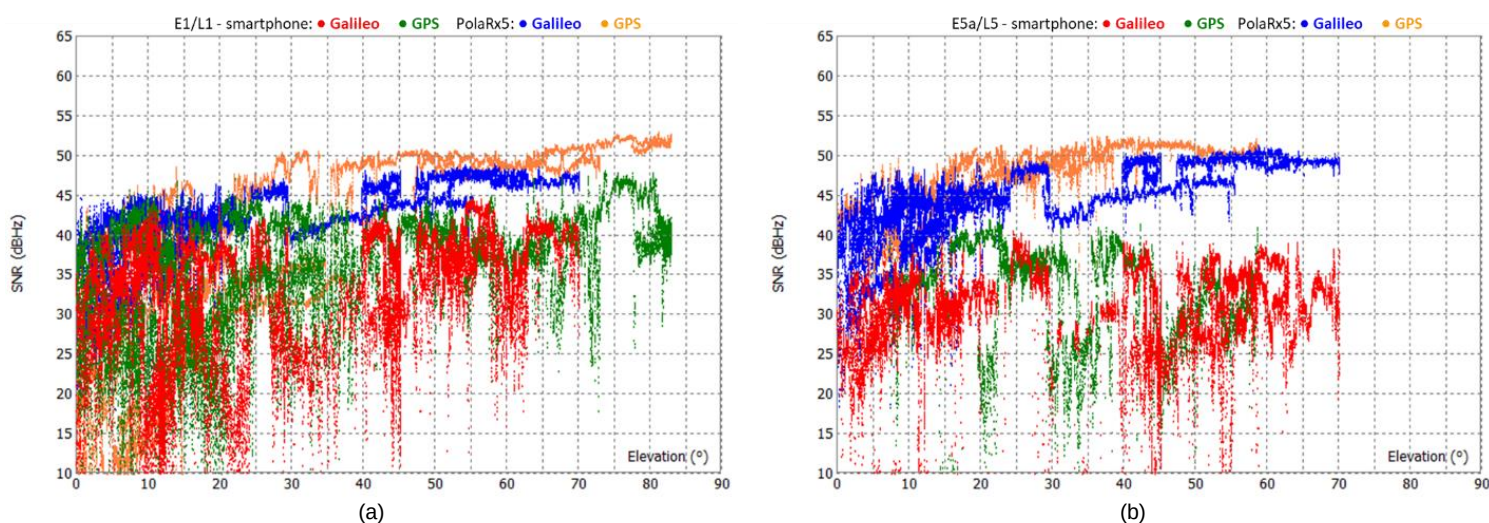


Figura 6.45 – SNR *smartphone* e PolaRx5 versus elevação, 08 de maio de 2021: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

Tabela 6.16 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento G.

	Smartphone				PolaRx5				Data
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	31,4	34,5	30,5	32,1	42,4	44,1	44,9	46,8	08/05/2021
Desvio	8,7	8,2	6,2	7,3	4,3	4,9	4,3	4,7	
Mínimo	7,0	7,0	7,0	7,0	22,2	22,4	23,1	26,4	
Máximo	44,9	48,2	42,2	42,6	48,9	50,6	51,3	52,4	

Dos gráficos e da tabela acima podemos verificar que o comportamento neste levantamento do

telemóvel continua a seguir o referido ao longo de todos os testes realizados em modo cinemático e estático, com os valores do SNR do GPS a serem superiores ao Galileo, mas inferiores na ordem da dezena de decibéis-hertz em relação ao recetor geodésico.

Tal como no levantamento C, em que foi utilizada a aplicação GNSS/IMU Logger do ISTA para medir as observáveis no telemóvel, notamos desvios maiores devido ao facto de esta aplicação recolher medidas até a um mínimo de 7 dBHz, devido a uma filtragem menos restritiva.

6.3.4 Levantamento H - Terrestre

O comportamento do telemóvel em modo cinemático terrestre foi avaliado para geometria e intensidade do sinal nos sinais Galileo e GPS disponibilizado pelo equipamento durante um levantamento efetuado na restinga do Douro em 30 de setembro de 2019.

6.3.4.1 Satélites visíveis

Mostra-se o número de satélites Galileo e GPS seguidos pelo *smartphone* e pelo NetR9 da Trimble, durante o levantamento da restinga em 30 de setembro de 2019, Figura 6.37 e na Figura 6.38. A Tabela 6.17 mostra a estatística do número de satélites e PDOP.

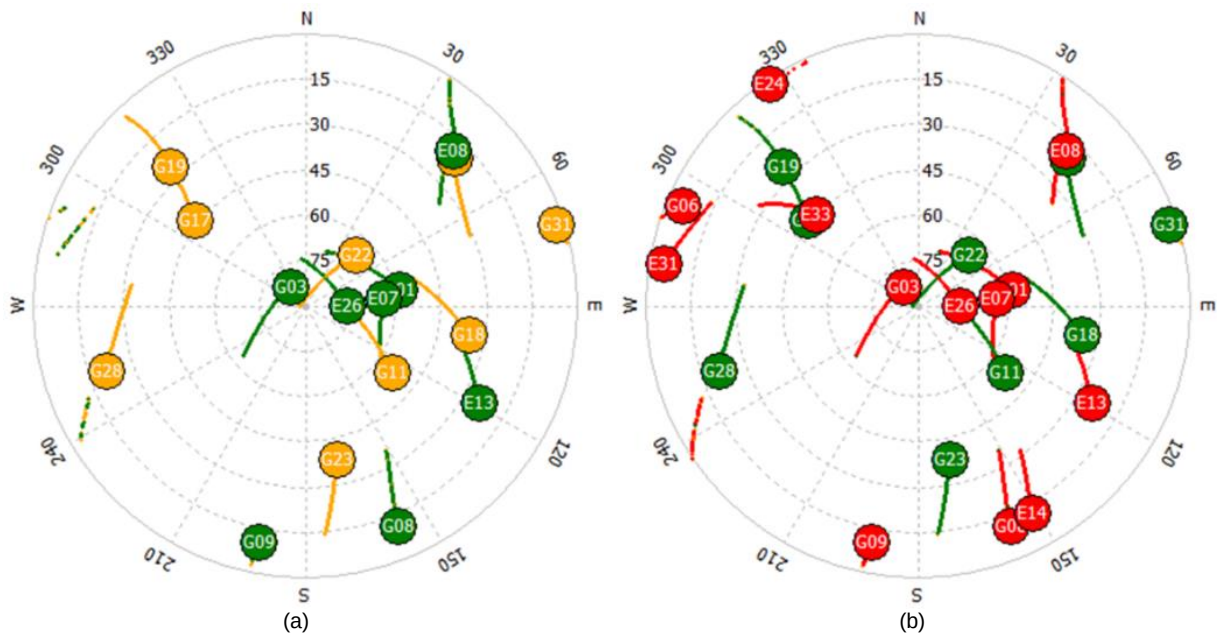


Figura 6.46 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a) e recetor geodésico (b), em 30 de setembro de 2019.
(Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

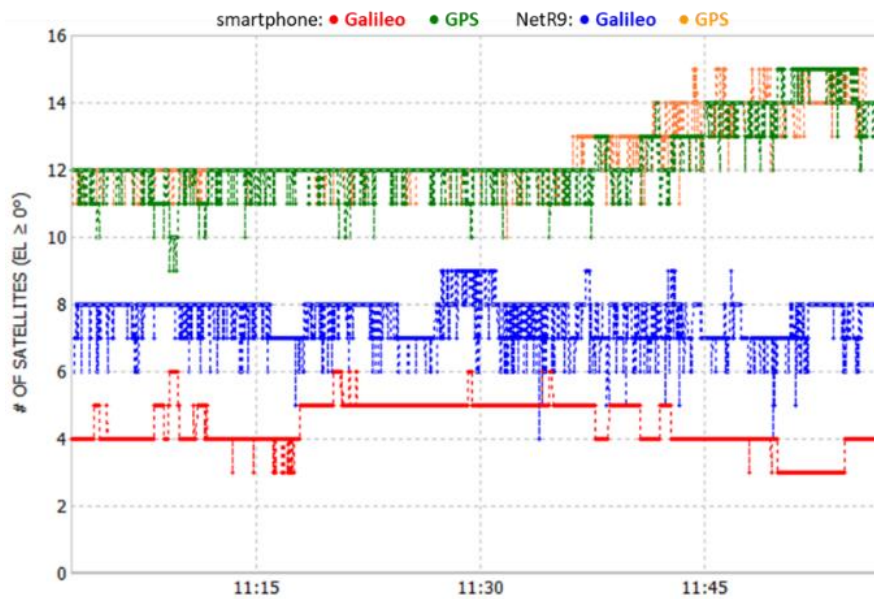


Figura 6.47 – Número de satélites no *smartphone* e recetor geodésico, em 30 de setembro de 2019.

Tabela 6.17 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento H.

Galileo			GPS			Galileo+GPS			Dispositivo	Data
Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP		
3	6	4,7	9	15	1,3	14	19	1,1	Smartphone	30/09/2019
4	9	1,9	10	15	1,3	11	23	1,0	NetR9	

O número de satélites observado pelo *smartphone* é menor, sobretudo no caso dos satélites Galileo, quando comparado com o recetor NetR9, indo de encontro ao verificado nos levantamentos anteriores apresentados neste capítulo.

No caso do GPS os números do *smartphone* são bem mais próximos do recetor geodésico, verificando-se PDOP similares. No entanto, este facto já não acontece no caso da constelação Galileo, onde encontramos um valor para o PDOP de 4,7, em resultado da menor quantidade de satélites observados.

6.3.4.2 Qualidade do sinal

Na Figura 6.48 encontramos os gráficos da razão sinal-ruído para os sinais E1/L1 e E5a/L5 no dispositivo móvel e no recetor geodésico NetR9, em função da elevação dos satélites das constelações Galileo e GPS, para as observações realizadas em 30 de setembro de 2019. Na Tabela 6.18 encontramos a estatística da intensidade para os sinais acima indicados, em cada uma das constelações referidas.

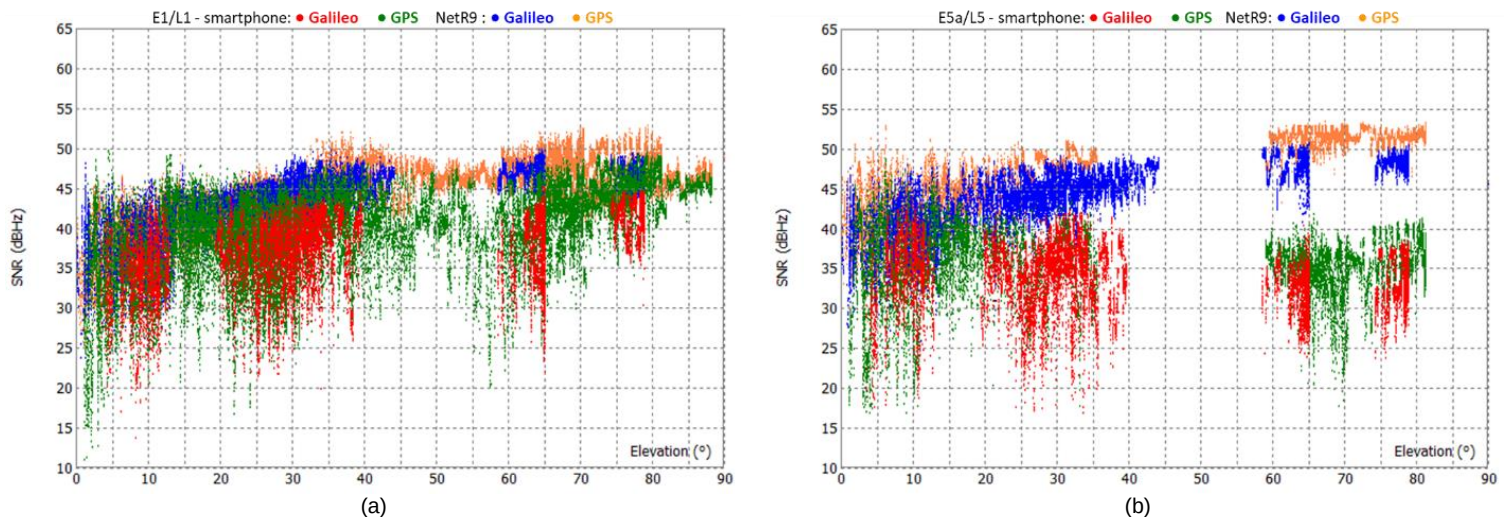


Figura 6.48 – SNR *smartphone* e NetR9 versus elevação, 30 de setembro de 2019: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

Tabela 6.18 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento H.

	<i>Smartphone</i>				<i>NetR9</i>				<i>Data</i>
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	38.6	40.7	35.9	32.9	44.1	44.8	45.1	48.1	30/09/2019
Desvio	3.6	4.2	3.9	4.4	3.1	5.1	3.5	4.2	
Mínimo	18.9	20.9	20.2	20.1	25.1	13.9	25.8	31.2	
Máximo	46.8	49.8	48.9	44.0	50.0	53.0	51.0	53.5	

O comportamento do SNR no Mi8 mostra valores E1/L1 superiores aos E5a/L5, mas inferiores aos do recetor NetR9, em linha com o obtido nos levantamentos estáticos, com as médias do telemóvel a situarem-se entre os 30 e 40 dBHz, enquanto que o recetor apresenta valores acima dos 40 dBHz.

6.3.5 Levantamento I - Terrestre

O levantamento I foi realizado, tal como o anterior, no contexto de avaliação do comportamento do *smartphone* em modo cinemático terrestre, com este instrumento instalado em conjunto com antena PolaNt associada ao recetor geodésico PolRx5 no cockpit de veículo. Foi realizada a análise das medidas dos satélites dos sistemas Galileo e GPS, que podemos ver de seguida nos gráficos de visibilidades e da razão sinal-ruído.

6.3.5.1 Satélites visíveis

Na Figura 6.49 encontramos a distribuição no céu dos satélites Galileo e GPS nos dois equipamentos, *smartphone* e recetor PolRx5, durante o período de observação e na Figura 6.50 encontramos o número de satélites em ambos equipamentos. A Tabela 6.19 tem um resumo da estatística obtida do número de satélites e do PDOP.

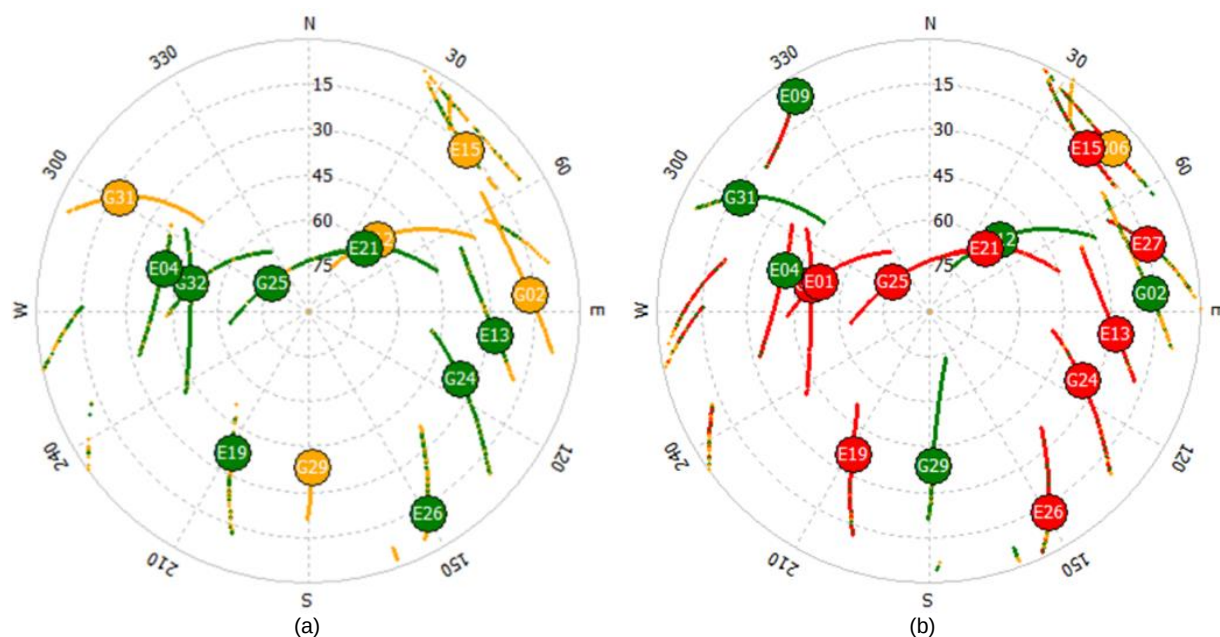


Figura 6.49 – Visibilidade satélites Galileo e GPS no *smartphone* (a) e recetor geodésico (b), em 26 de agosto de 2020. (Laranja – frequência simples; Verde – dupla frequência; Vermelho – tripla frequência)

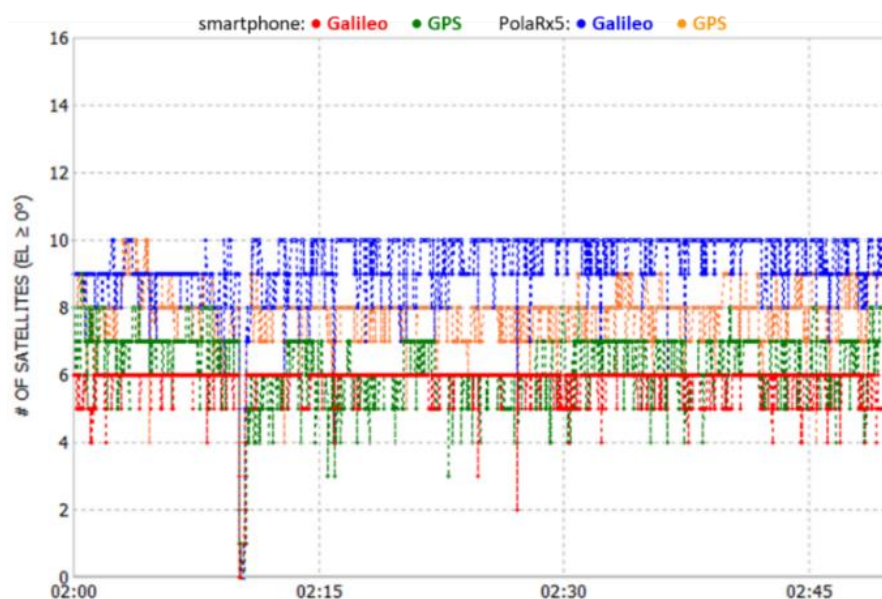


Figura 6.50 – Número de satélites no *smartphone* e recetor geodésico, em 26 de agosto de 2020.

Tabela 6.19 – PDOP e número de satélites Galileo e GPS no levantamento I.

Galileo			GPS			Galileo+GPS			Dispositivo	Data
Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP	Satélites Mínimo	Satélites Máximo	PDOP		
0	6	3,9	0	8	2,3	0	14	1,7	Smartphone	26/08/2021
0	10	1,6	0	10	2,0	0	20	1,2	PolaRx5	

Devido à natureza do trajeto ser em autoestrada com diversos viadutos, taludes e, sobretudo, com a travessia de um túnel de 430 metros de comprimento, a perda parcial ou total de satélites

como podemos verificar na tabela e figura acima caracterizaram as medições deste trabalho.

No entanto, se excluirmos estas situações, a visibilidade e seguimento de satélites, assim como a sua geometria, seguem o comportamento habitual do telemóvel verificado nos anteriores trabalhos apresentados ao longo deste capítulo, que se caracteriza por menor número de satélites seguidos, mais significativo para os satélites Galileo.

6.3.5.2 Qualidade do sinal

Na Figura 6.51 temos o comportamento da observável SNR obtida no *smartphone* e no recetor PolaRx5, e na Tabela 6.20 a estatística. Na Figura 6.52 é notória uma situação anómala de quebra do sinal GPS na banda L1 após a travessia de um túnel.

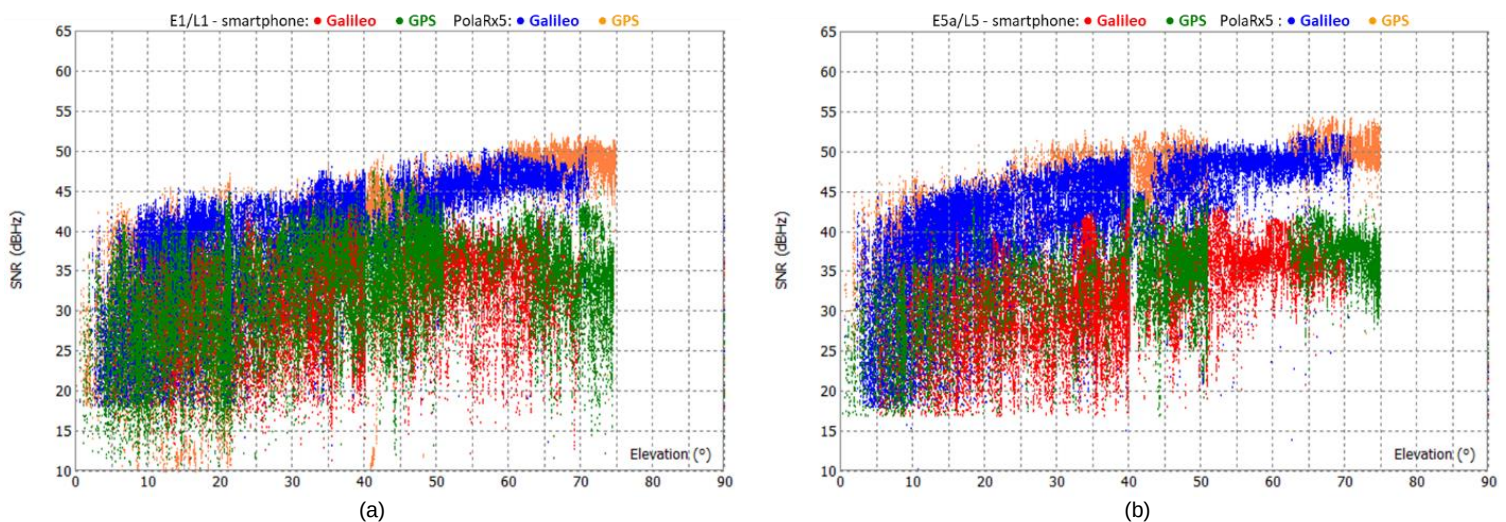


Figura 6.51 – SNR *smartphone* e PolaRx5 versus elevação, 26 de agosto de 2020: E1/L1 (a), E5a/L5 (b).

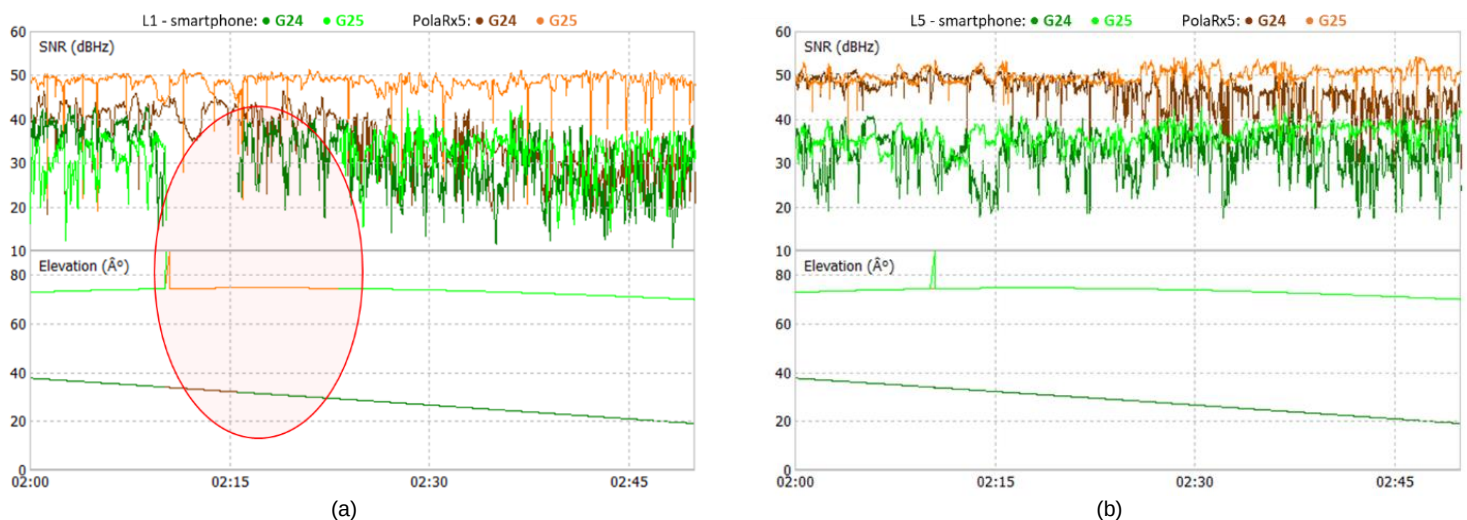


Figura 6.52 – Quebra do sinal L1 (a) em 2 satélites no *smartphone* após travessia do túnel.

Tabela 6.20 – Estatística do SNR (dBHz) dos sinais Galileo e GPS no levantamento I.

	Smartphone				PolaRx5				Data
	E1	L1	E5a	L5	E1	L1	E5a	L5	
Média	33,3	35,3	34,1	36,2	40,4	44,0	43,7	48,4	26/08/2020
Desvio	4,3	4,4	4,1	3,6	5,3	5,0	4,7	3,2	
Mínimo	15,7	20,7	20,0	20,5	22,2	22,3	23,2	24,2	
Máximo	43,7	47,8	43,2	44,9	50,6	53,6	52,7	54,5	

O comportamento da razão sinal-ruído mantém o habitual padrão de comportamento encontrado nos diferentes levantamentos realizados, com valores médios no nível dos 30 dBHz, o que em relação ao recetor geodésico são cerca de 10 dBHz, estando em concordância com as diferenças típicas entre os dois tipos de equipamentos.

Para além das características deste levantamento, referidas acima, contribuírem para uma maior dispersão dos sinais, mesmo no caso dos satélites com maiores elevações, como se nota no gráfico da Figura 6.51 (a) nos sinais E1/L1 do Galileo e GPS, o local da montagem das duas antenas, com particular impacto no caso da antena do telemóvel devido à sua menor qualidade, também veio dar um contributo negativo.

Uma breve nota para o especial impacto que a travessia do túnel teve no sinal L1 dos satélites G24 e G25, da constelação GPS, com um atraso muito significativo na reaquisição deste sinal pelo *smartphone*, como se observa na Figura 6.52 (a), o que não sucedeu no caso do sinal L5, que se mostra na Figura 6.52 (b). No caso dos sinais E1 e E5a dos satélites da constelação Galileo tal situação não se verificou. A menor qualidade em geral do dispositivo móvel pode explicar a maior dificuldade em readquirir o seguimento dos satélites, sobretudo em condições dinâmicas de um veículo.

6.4 Reflexão de sinais

A reflexão de sinais é um efeito que poderá contribuir negativamente para a exatidão obtida com os recetores GNSS através da medição de sinais refletidos em objetos ou estruturas, acrescentando uma maior distância no seu trajeto, afetando mais os códigos com erros que podem ser superiores ao metro, enquanto que no caso das fases pode atingir 5 cm em L1 (Seeber, 2003). Se o local das observações é fundamental na minimização deste erro, e pode ser controlado pelos observadores, independentemente do equipamento utilizado, o tipo de antena também é importante, sobretudo no caso dos *smartphones* onde a baixa supressão da reflexão de sinais é fator determinante, ao contrário do que acontece com as antenas geodésicas que apresentam boa supressão.

No decurso das observações efetuadas durante este estudo, sempre que foi possível e o tipo

de levantamento o permitiu, procurou minimizar-se este impacto no *smartphone* com algumas medidas, tais como a introdução de uma base metálica por baixo do *smartphone* para bloquear os sinais refletidos ou a escolha de locais desimpedidos de obstáculos por perto. No entanto estas condições que em determinados levantamentos até podem ser de fácil aplicabilidade, noutros podem ser difíceis de realizar.

Por exemplo, no caso das observações no avião a aplicação de um prato debaixo do equipamento é difícil de concretizar pela localização da montagem e também pelas rígidas regras de segurança. Já no caso do levantamento no barco a situação é mais simples, assim como nos casos dos levantamentos estáticos. O local de observação em alguns levantamentos poderá ser controlado, mas nos trabalhos em modo cinemático e mesmo em alguns cenários de pontos estáticos poderá ser difícil a sua aplicação.

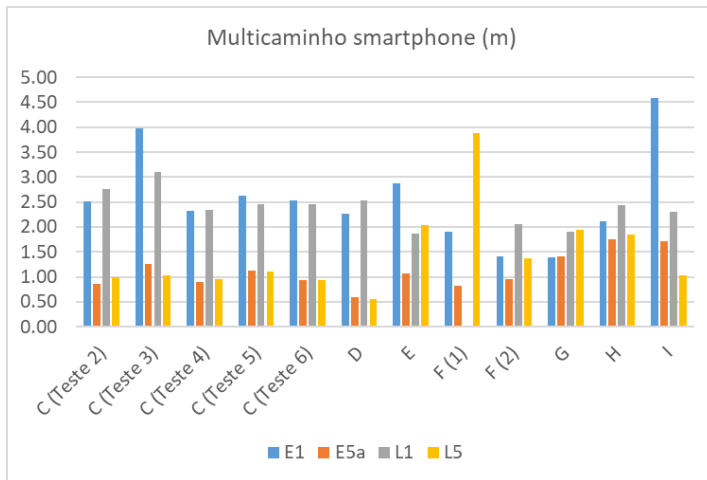
Para avaliar o efeito da reflexão de sinais nos equipamentos foi utilizada a ferramenta do software BNC (BKG Ntrip Client) para a verificação de qualidade, que assenta na utilização de uma combinação linear, expressão 5.1, (Massarweh (2020)), que exige a existência de duas frequências nas observáveis códigos e fases.

$$MLC_{i,j} = CMP_i + 2 \cdot \frac{\Phi_{r,j}^s - \Phi_{r,i}^s}{\mu_{ij} - 1} \quad (5.1)$$

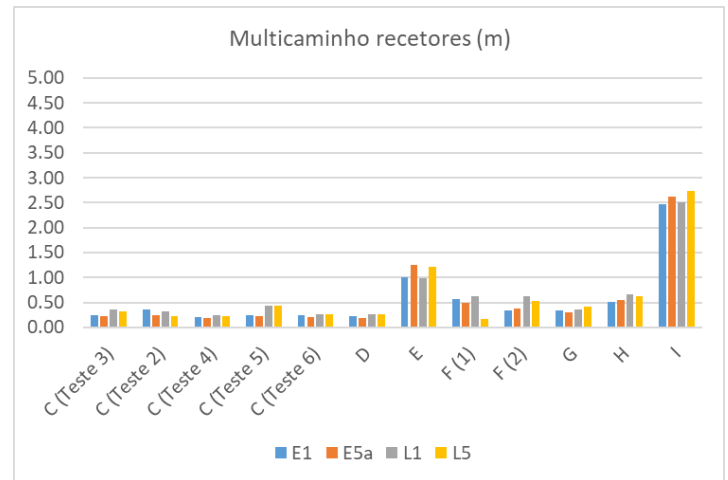
Na expressão acima o MLC_{ij} representa o efeito da reflexão de sinais através da combinação linear (Multipath Linear Combination), CMP_i é a observável resultante da combinação das diferenças entre os códigos e as fases da portadora (Code-Minus-Phase), Φ_r^s representa a fase do sinal satélite-recetor para duas frequências i e j , enquanto que μ_{ij} é o fator ionosférico resultante da razão dos quadrados das duas frequências.

No entanto, muitas das vezes não é possível determinara reflexão de sinais para as medidas do *smartphone*, devido a pelo menos uma das duas medidas da fase da portadora não estar disponível, como é no caso dos satélites GPS mais antigos que não difundem o L5, ou pelo elevado número de descontinuidades nos sinais que provocam os saltos da fase (“cycle slips”). Neste âmbito o mecanismo do ciclo de trabalho (“duty cycle”) no telemóvel é essencial encontrar-se desligado. Também é do conhecimento da comunidade científica que os sinais da banda L5 podem apresentar descontinuidades, uma vez que a modulação BPSK é mais difícil de ser observada devido à dinâmica do seu código de Doppler ser muito rápida (Massarweh et al. (2020)).

A Tabela 6.21 e a Figura 6.53 mostram os valores médios da reflexão de sinais para as observações longas, em modo estático e cinemático.



(a)



(b)

Figura 6.53 – Valor médio da reflexão de sinais no *smartphone*(a) e recetores geodésicos (b).

Tabela 6.21 – Médias da reflexão de sinais (m) obtidas em modo estático e cinemático (unidades: m).

Levantamento	Smartphone				Recetor geodésico				Modelo	Modo
	E1	E5a	L1	L5	E1	E5a	L1	L5		
D (Teste 2)	2,51	0,86	2,76	0,99	0,24	0,22	0,35	0,32	Alloy	Estático
D (Teste 3)	3,97	1,26	3,11	1,04	0,35	0,25	0,32	0,22	PolaRx5	Estático
D (Teste 4)	2,32	0,90	2,34	0,96	0,21	0,18	0,25	0,22	Alloy	Estático
D (Teste 5)	2,63	1,13	2,46	1,10	0,24	0,22	0,43	0,44	Alloy	Estático
D (Teste 6)	2,53	0,93	2,46	0,94	0,24	0,21	0,27	0,27	Alloy	Estático
C	2,26	0,60	2,53	0,55	0,23	0,18	0,26	0,26	Alloy	Estático
E	2,87	1,06	1,86	2,04	1,00	1,26	0,98	1,22	PolaRx5	Cin. hidrográfico
F (1)	1,90	0,82	n.d	3,88	0,56	0,50	0,63	0,17	PolaRx5	Cin. aéreo
F (2)	1,42	0,95	2,05	1,38	0,34	0,38	0,62	0,53	PolaRx5	Cin. aéreo
G	1,40	1,41	1,90	1,95	0,34	0,30	0,36	0,41	PolaRx5	Cin. aéreo
H	2,12	1,76	2,44	1,84	0,52	0,55	0,67	0,62	NetR9	Cin. terrestre
I	4,59	1,72	2,31	1,04	2,46	2,62	2,50	2,73	PolaRx5	Cin. terrestre

Na Figura 6.54 e Figura 6.55 ilustra-se graficamente o reflexão de sinais dos sinais a cada época em algumas das observações estáticas e cinemáticas. A letra E indica a constelação Galileo e a G é relativo ao GPS, enquanto que os números 1 e 5 indicam, respetivamente, as bandas E1/L1 e E5a/L5. A cor azul escura indica que não foi possível o cálculo de resultados.

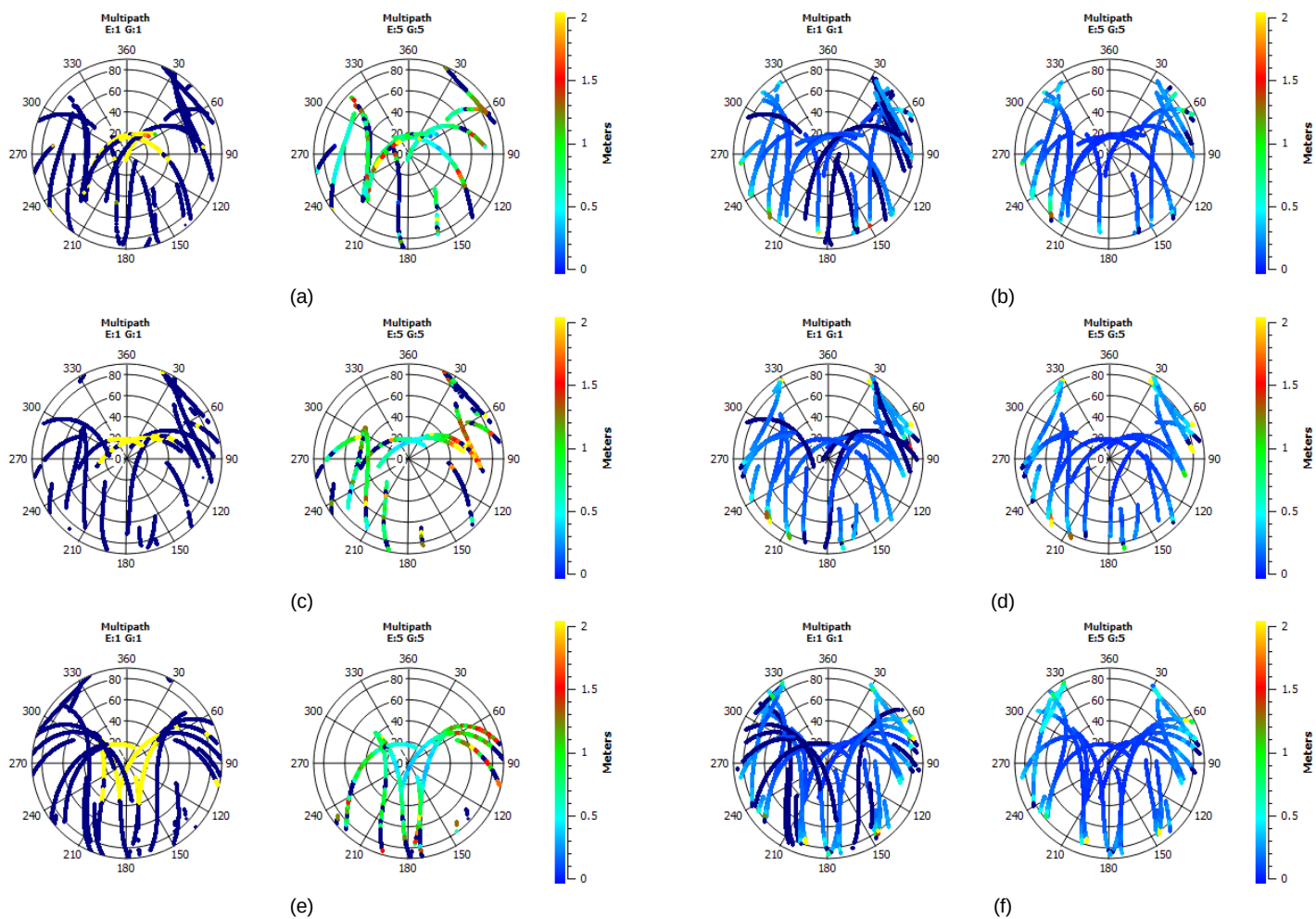
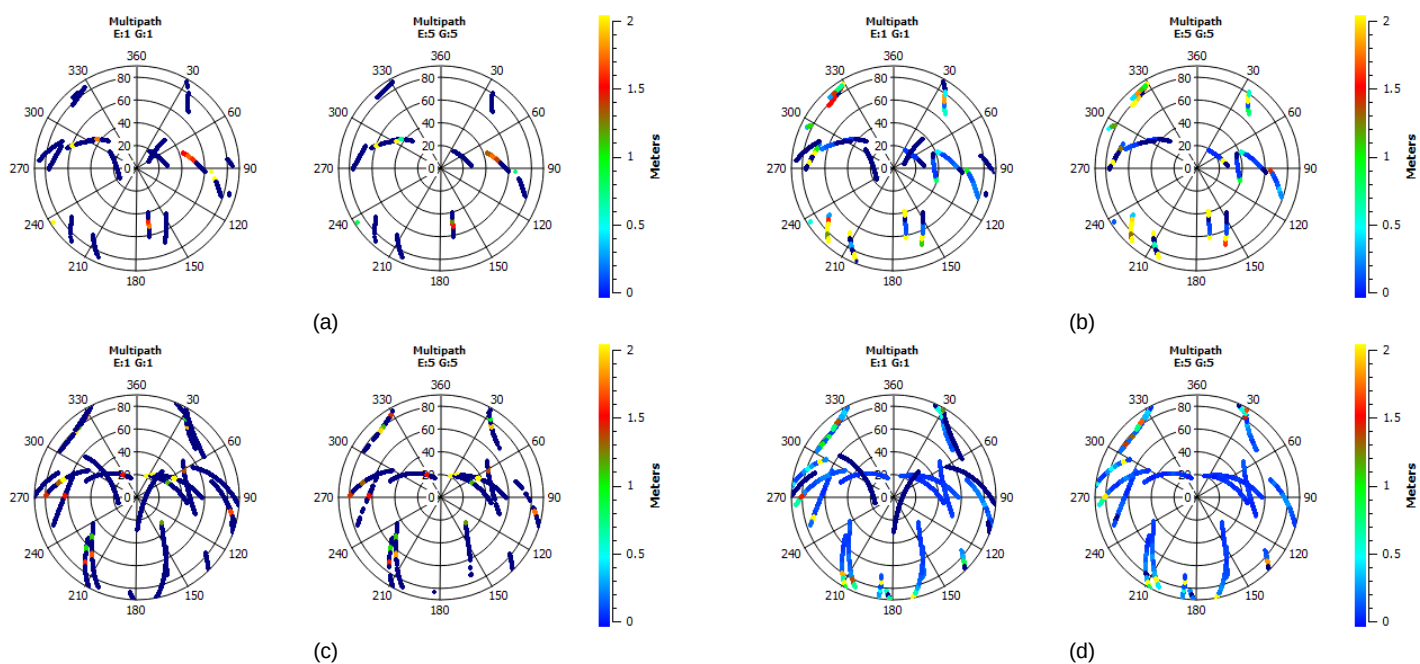


Figura 6.54 – Reflexão de sinais em E1/L1 e E5a/L5, nos levantamentos estáticos: *smartphone* (a, c, e) e *Alloy* (b, d, f).



Continua.

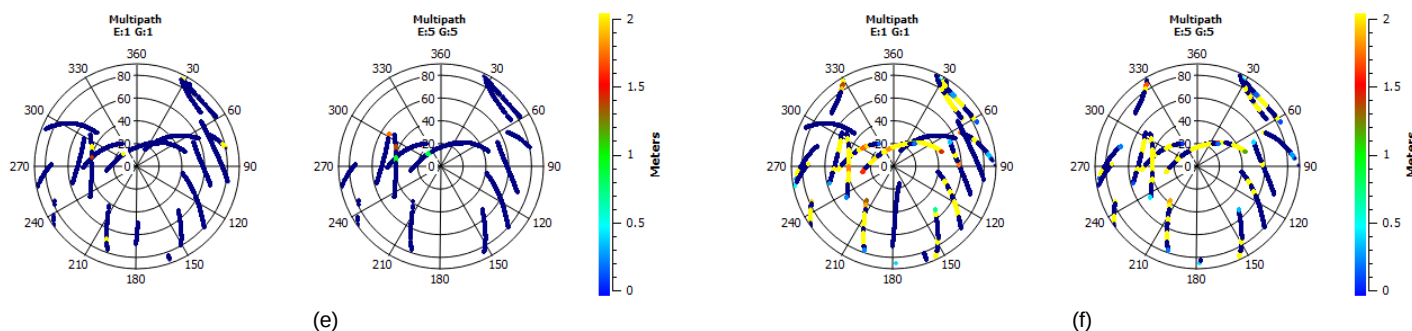


Figura 6.55 – Reflexão de sinais em E1/L1 e E5a/L5, nos levantamentos cinemáticos: E – hidrográfico, *smartphone* (a) e PolaRx5 (b); G – aéreo, *smartphone* (c) e PolaRx5 (d); I - terrestre, *smartphone* (e) e PolaRx5 (f).

Os valores da tabela e dos gráficos acima mostram uma baixa supressão da reflexão de sinais num *smartphone*, com valores na ordem dos 2 metros nos sinais E1/L1 e melhor nas frequências em E5a/L5 com valores de 1 metro. Estes valores concordantes com o apresentado em alguns estudos (Massarweh et al. (2020), Paziewski et al. (2021)), são bastante superiores aos obtidos em recetores geodésicos, que em geral, têm valores abaixo do 0,5 metros nas referidas bandas.

Verificamos que os valores das bandas E1/L1 são superiores aos das bandas E5a/L5, sendo uma tendência encontrada por alguns autores (Massarweh et al. (2020), Paziewski et al. (2021)). No entanto se as diferenças são relativamente pequenas nos recetores geodésicos, como podemos constatar na Tabela 6.21, já no caso do *smartphone* acontece o contrário com diferenças entre os sinais nas duas bandas são bastante mais significativas.

Quando avaliamos o comportamento entre os levantamentos em modo cinemático e estático no *smartphone*, verificamos que a reflexão de sinais nos sinais E1/L1 tem uma ligeira tendência de diminuição para o modo cinemático, enquanto que a reflexão de sinais associado aos sinais E5a/L5 apresentam uma tendência de aumento.

Nos recetores geodésicos é muito mais notório o agravamento da reflexão de sinais durante as observações em movimento, com especial destaque para os elevados valores no levantamento terrestre I, mas que tem a atenuante de ter sido uma observação muito especial, devido ao facto das antenas terem sido posicionadas no interior do veículo, mais propriamente no cockpit do veículo, ficando desta forma muito mais expostas à influência da reflexão de sinais, afetando bastante ambos os equipamentos. Esta exposição foi tal ordem, que o superior desempenho do recetor geodésico e da sua antena não evitaram valores elevados, ficando muito próximos dos obtidos no *smartphone*, na ordem dos 2,5 metros.

No levantamento em ambiente fluvial também encontramos o mesmo tipo de comportamento, mas de uma forma não tão expressiva, com o recetor a ficar pelo 1 metro de erro reflexão de sinais, enquanto que o *smartphone* aproxima-se mais dos 2 metros, sendo estes resultados

expectáveis devido à natureza deste ambiente que condiciona fortemente as medições devido às múltiplas reflexões no espelho de água e pelos movimentos naturais da embarcação, a arfagem e o balanço, que esta sofre.

As observações no recetor geodésico em ambiente aéreo apresentam valores em torno do 0,5 metros, tal como no levantamento terrestre em que as antenas se encontravam fora do veículo no seu topo, no *smartphone* os valores oscilam entre 1 e 2 metros.

Na Figura 6.54 e na Figura 6.55 mostra-se que um valor elevado de reflexão de sinais pode ser também encontrado a maiores elevações num *smartphone*, sobretudo no caso dos sinais nas bandas E1/L1, ao passo que no caso dos recetores geodésicos a reflexão de sinais diminui para os satélites de maior altura.

Pelas razões acima enumeradas, nem sempre é possível o cálculo da reflexão de sinais, sendo evidenciado nos gráficos do *smartphone* pela quantidade de pontos azul-escuros encontrados em ambos modos de observação estático ou cinemático. No entanto existe uma exceção para os sinais E5a/L5 no modo estático, onde na maioria das épocas foi possível efetuar o seu cálculo.

6.5 Resumo

O *smartphone* geralmente segue um menor número de satélites do que os recetores geodésicos, sendo mais significativo no caso do sistema Galileo, no entanto na maioria das vezes com número suficiente para garantir uma geometria com um bom PDOP próximo dos valores dos recetores geodésicos.

Da avaliação da intensidade do sinal no *smartphone*, podemos dizer que os valores do SNR em todas as bandas entre os 30-40 dBHz, o que são inferiores cerca de 10 dBHz, tal como verificado em vários estudos em comparação como os recetores. No entanto, notamos que se no caso dos recetores os sinais E5a/L5 mostram valores mais altos, no caso do *smartphone* a situação inverte-se, com os sinais E1/L1 a apresentarem melhores valores do que E5a/L5.

O *smartphone* apresenta maior dispersão do sinal para os satélites com alturas mais baixas, mas em modo cinemático também podem ser encontradas em satélites acima dos 30° de altura.

Da avaliação da intensidade do sinal no *smartphone*, podemos dizer que os valores do SNR em todas as bandas se encontram entre os 30-40 dBHz, inferiores em cerca de 10 dBHz aos recetores. Quanto à comparação do SNR entre bandas, notamos que se no caso dos recetores os sinais E5a/L5 mostram valores mais altos que os E1/L1, no caso do *smartphone* a situação

inverte-se, com os sinais E1/L1 a apresentarem melhores valores do que E5a/L5.

O objetivo do trabalho apresentado neste capítulo não foi determinar qual a solução ótima, mas sim avaliar o desempenho dos *smartphones*. Para isso, compreender as debilidades do instrumento face a cada situação, e como se podem contornar na prática é importante. Este estudo permitiu-nos traçar a melhor abordagem para o uso dos *smartphones* em diferentes cenários de observações GNSS.

No capítulo seguinte iremos encontrar a resposta à questão se o uso dos *smartphones* permite fornecer soluções aceitáveis e suficientemente boas para o leque de aplicações que aqui foram discutidas.

7 Análise de resultados

Os *smartphones* atuais obviamente fornecerão soluções menos precisas que os métodos topográficos tradicionais (exatidão da ordem do milímetro) e que os recetores de qualidade geodésica (melhores antenas, maior sensibilidade, melhor rejeição da reflexão de sinais). A análise dos capítulos anteriores mostrou que, adotando as metodologias adequadas, o desempenho dos *smartphones*, no que se refere a qualidade do sinal e quantidade de satélites observados, embora inferior, não se afasta demasiado daquilo que se obtém com os recetores de tipo geodésico, cuja exatidão é muitas vezes bastante superior ao que se exige em aplicações como cadastro ou navegação. O que é importante é determinar se a significativa redução de custo que se consegue com os *smartphones* compensa ou não a ligeira redução do benefício, em particular se conseguimos atingir a mínima exatidão exigida. Vamos também explorar outras funcionalidades dos *smartphones*, pois estes permitem combinar simultaneamente posicionamento e imagem, vamos assim complementar as observações GNSS com técnicas de fotogrametria.

Neste capítulo vamos quantificar o desempenho dos *smartphones*, determinando a exatidão em vários cenários de interesse prático. Neste capítulo encontramos os resultados posicionais obtidos para as soluções da combinação Galileo+GPS nos levantamentos realizados, mas também alguns resultados quando possíveis para o Galileo e GPS isoladamente. A análise desses resultados fez-se através da comparação com as coordenadas de referência, as quais podem ter origem em medições com equipamentos de topo como os recetores geodésicos e taqueómetro eletrónico, ou então em coordenadas conhecidas. As comparações obtidas são apresentadas na forma de tabelas, gráficos e estatísticas das diferenças encontradas. Como referido anteriormente os resultados obtidos permitiram a publicação de um artigo no jornal *Sensors*, intitulado “Relative positioning in remote areas using a GNSS dual frequency Smartphone”, Magalhães et al. (2021).

7.1 Levantamento de pontos de cadastro

Seguem-se os resultados dos levantamentos de pontos de cadastro realizados através da georreferenciação com a observação direta nos pontos e com o método fotogramétrico.

7.1.1 Levantamento A - Método fotogramétrico

Neste levantamento que teve como objetivo a primeira abordagem do método fotogramétrico terrestre com a câmara do *smartphone*, na obtenção de coordenadas de pontos de cadastro de um prédio, existiam no terreno nove pontos para coordenar, no entanto nem todos reuniram

condições para se realizarem medições GNSS, independentemente da gama do equipamento, tendo sido seleccionados seis dos pontos, respetivamente os pontos 1, 3, 4, 5, 6, 7 (Figura 5.1 no capítulo 5).

As coordenadas dos pontos foram calculadas em modo diferencial usando a estação de referência instalada no OAUP com as configurações referidas anteriormente neste documento, usando a aplicação RTKLib Demo5, com as medidas Galileo+GPS combinadas.

Na Tabela 7.1 encontramos a percentagem de soluções em que a resolução da ambiguidade foi fixa ou flutuante. Estas coordenadas serviram para georreferenciar as respetivas fotografias no processo de geração de uma nuvem de pontos densa no Agisoft Metashape Professional, permitindo a partir dela extrair as coordenadas dos pontos cadastrais; no entanto não foi possível no caso dos pontos 3 e 4 devido a falha no alinhamento das respetivas fotografias.

Tabela 7.1 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento A.

Ponto 1		Ponto 5		Ponto 6		Ponto 7	
Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante
0,0%	100,0%	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%

A resolução das ambiguidades foi em todos os pontos 100% em modo flutuante, no entanto isto não quer significar que as soluções sejam menos precisas, uma elevada taxa de ambiguidades inteiras fixas, mas mal estimadas pode resultar em soluções piores.

Na Figura 7.1 encontramos as diferenças obtidas entre as coordenadas obtidas pelo método fotogramétrico e as coordenadas de referência para os pontos 1, 5, 6 e 7, enquanto que na Tabela 7.2 é mostrada a estatística obtida nestes pontos.

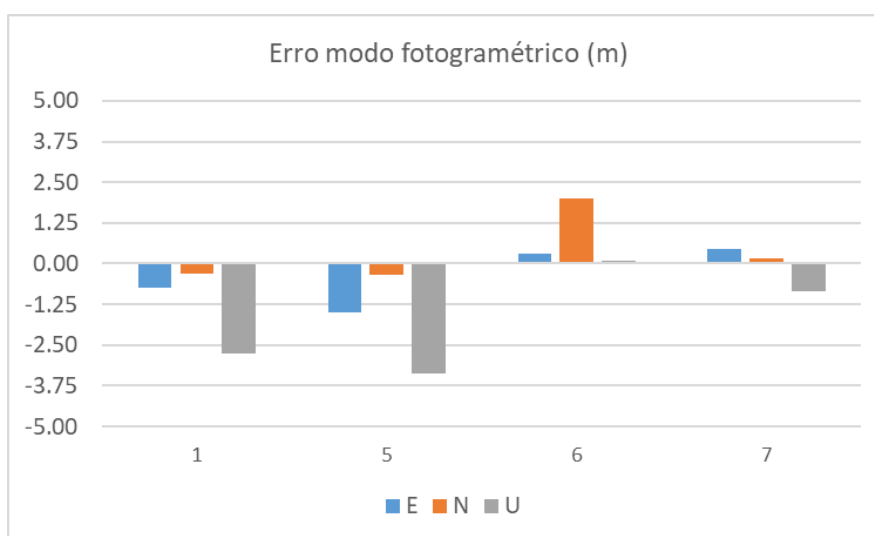


Figura 7.1 – Erros obtidos nos pontos com o método fotogramétrico no levantamento A.

Tabela 7.2 – Estatística dos resultados do levantamento A (unidades: m).

	Levantamento A		
	E	N	U
Média	-0,373	0,380	-1,728
Desvio Padrão	0,923	1,103	1,606
EMQ	0,777	1,057	4,920

Dos resultados obtidos neste levantamento podemos verificar que, apesar de alguns valores serem elevados sobretudo no caso da altimetria, o que não tem muito peso na definição das extremas, os valores no plano mostram um erro médio quadrático (EMQ) entre os 77 cm e 1 metro. Estes resultados deixaram antever que a utilização do método para uma georreferenciação em planimetria era uma possibilidade a ser explorada e mais a frente iremos verificar. Como já anteriormente referido, o local deste levantamento não era dos mais fáceis para observações GNSS devido a um número ainda considerável de obstáculos ao sinal.

7.1.2 Levantamento B - Método direto

Em seguida são apresentados os resultados dos três testes realizados no levantamento B, as coordenadas foram calculadas com o RTKLib Demo5 em modo diferencial com a estação de referência do OAUP, através da combinação das medidas Galileo+GPS. A Tabela 7.3 mostra as percentagens de ambiguidades fixas ou flutuantes obtidas nos três testes realizados.

Tabela 7.3 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento B.

Teste 1		Teste 2		Teste 3	
Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante
77,8%	22,2%	11,1%	88,9%	66,7%	33,3%

O Teste 1 obteve uma elevada taxa de ambiguidades fixas de 77,8%, apesar do menor tempo de observação. Um maior número de satélites do sistema Galileo, como é mostrado no subcapítulo 6.1.2, contribuiu para este desempenho. Com os satélites Galileo é sempre garantido a presença das duas frequências E1/E5a, ao passo que no caso dos satélites GPS no momento ainda nem todos os satélites transmitem L5. Com dupla frequência a resolução das ambiguidades torna-se muito mais eficiente.

No caso do Teste 2 a menor quantidade de satélites Galileo, apesar do maior tempo de observação, trouxe uma diminuição significativa de soluções fixas, apenas 11%, enquanto que no Teste 3 a diminuição ficou-se um valor de 66,7%. Tal como referido anteriormente, uma elevada taxa de ambiguidade fixa não implica obrigatoriamente que as soluções calculadas sejam totalmente precisas, podendo em alguns casos as soluções flutuantes apresentarem

também bons resultados.

Na Figura 7.2 mostram-se os erros obtidos para cada ponto e na Tabela 7.4 a estatística em cada um dos três testes efetuados.

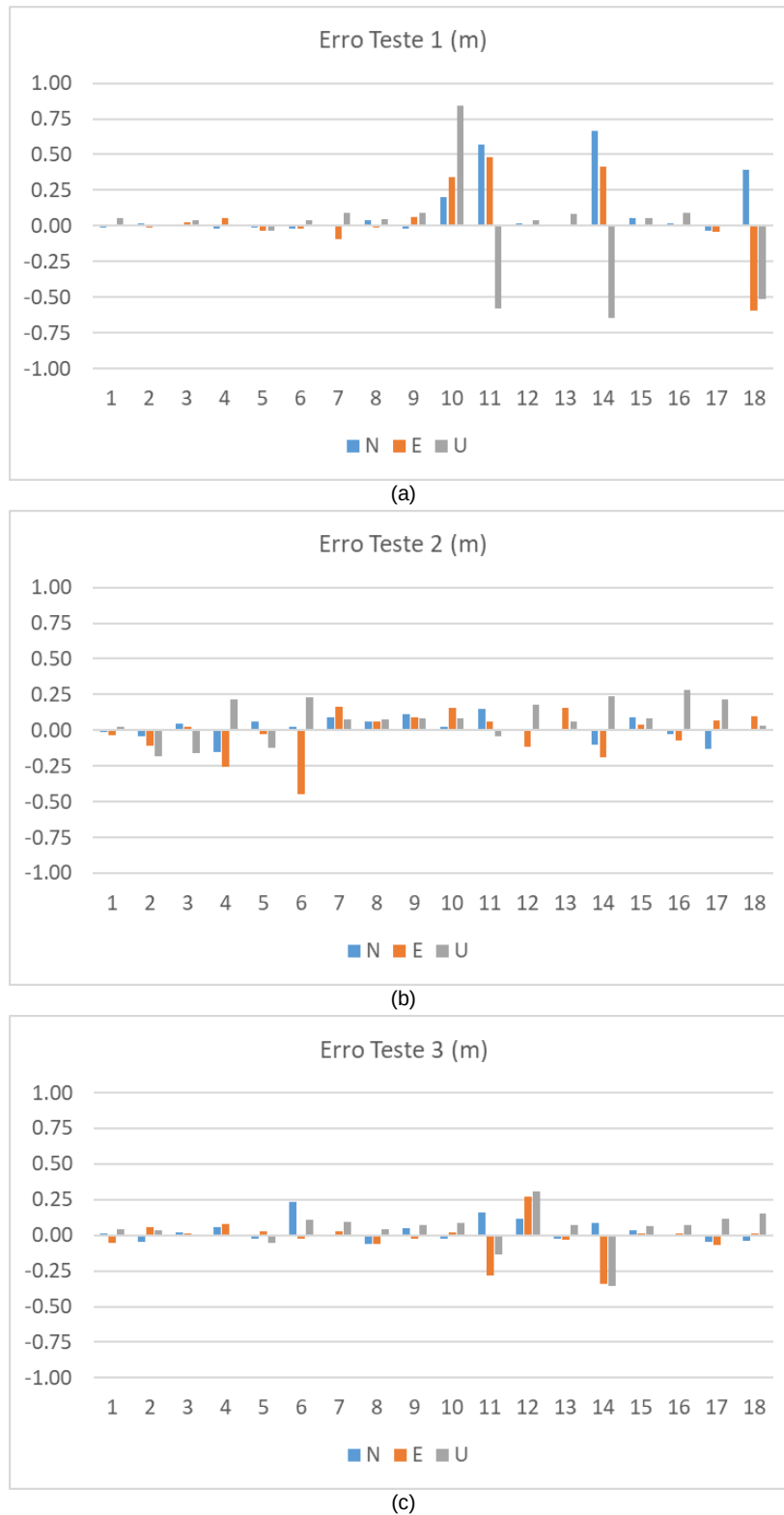


Figura 7.2 – Erros do *smartphone* em cada ponto nos teste: 1(a), 2(b) e 3(c) do levantamento B.

Tabela 7.4 – Estatística dos resultados do levantamento B (unidades: m).

	Teste 1			Teste 2			Teste 3		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Média	0,033	0,104	-0,015	-0,018	0,011	0,076	-0,019	0,028	0,039
Desvio Padrão	0,227	0,214	0,322	0,161	0,082	0,138	0,130	0,078	0,132
EMQ	0,223	0,232	0,313	0,160	0,083	0,159	0,128	0,081	0,135

Os resultados obtidos com o *smartphone* quando comparados com as posições do recetor geodésico para os três testes são bastante bons para um equipamento de baixo custo. Verificando-se que os requisitos para levantamentos cadastrais foram cumpridos, com o EMQ a oscilar entre 8 cm e 23 cm nas componentes planas, enquanto que na componente vertical o erro situou-se entre os 13 cm e 31 cm. Perante isto, podemos afirmar que o benefício custo e exatidão do *smartphone* é evidente e que estamos perante uma nova ferramenta que pode dar um grande contributo no campo da georreferenciação cadastral com um baixo custo.

O Teste 1, com um período de observação inferior a 1 minuto, apresenta maiores desvios devido à contribuição de quatro pontos, que se destacam na Figura 7.2 (a) pelos seus erros elevados, coincidentes com soluções flutuantes. Se descartarmos esses pontos o EMQ cai para valores abaixo dos 6 cm. Com base nisto podemos dizer que para se obterem boas exatidões num levantamento de duração muito rápida é importante fixar as ambiguidades, pois as flutuantes degradam essa exatidão para as dezenas de centímetros.

Quando o tempo de observação é maior, como nos casos dos testes 2 e 3, com 10 e 5 minutos, respetivamente, mesmo as soluções flutuantes permitem boas exatidões, como podemos verificar nos gráficos apresentados acima. Destes dois testes podemos ainda concluir que a diferença entre eles, não é muito significativa, o que naturalmente num cenário de trabalho nos levaria a optar por observações de 5 minutos elevando desta forma o rendimento.

A utilização de uma linha de base relativamente curta de aproximadamente 200 metros também ajudou a minimizar erros e a melhorar os resultados, no entanto poderemos verificar mais à frente no trabalho com linhas de base longas que podemos ainda assim alcançar exatidões melhores que 30 cm, o que podemos considerar bastante bom.

7.1.3 Levantamento C - Método fotogramétrico e direto

No levantamento C, o recurso à técnica GNSS de posicionamento diferencial foi usada na georreferenciação das imagens capturadas pelo *smartphone*, usando os dados GNSS medidos por este equipamento, permitindo desta forma a aplicação do método fotogramétrico terrestre na obtenção das coordenadas de pontos cadastrais.

Esta técnica diferencial também sido adotada na observação direta de pontos cadastrais para o cálculo das coordenadas destes pontos de cadastro. As coordenadas de referência para comparação foram obtidas com muita exatidão, através de um levantamento com o taqueómetro eletrónico. Para validar os resultados obtidos foi considerado um valor de 40 cm para o EMQ, conforme indicado nas Normas e Especificações Técnicas – Delimitação, Demarcação e Qualidade dos Dados da DGT.

Na Figura 7.3 podemos ver de forma esquematizada a localização dos pontos observados de forma direta e fotogramétrica. Com a cor verde está representada a distribuição dos pontos GNSS observados de forma direta durante um período mínimo de 5 minutos com *smartphone*. Os pontos a partir dos quais se capturaram as fotografias estão definidos pelo símbolo em cor amarela, enquanto que os pontos de referência calculados pelo método de levantamento clássico com o taqueómetro eletrónico estão simbolizados a vermelho.

Devido à proximidade das coordenadas em alguns dos pontos, a sobreposição dos símbolos dos pontos de referência e pontos GNSS fez com que não se notem alguns dos símbolos. Refira-se que todos as soluções GNSS foram calculadas usando a combinação de medições Galileo e GPS, devido às razões já referidas anteriormente.

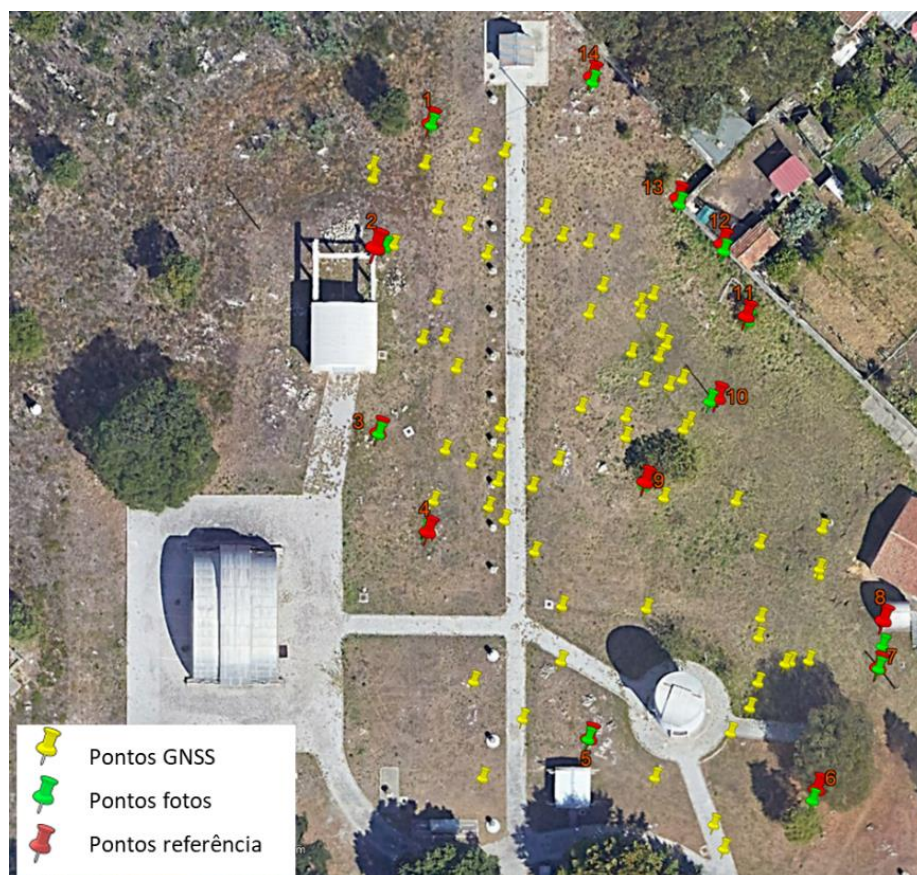


Figura 7.3 – Distribuição dos pontos de GNSS, das fotos e de referência do levantamento D.

O método fotogramétrico apresentou uma dificuldade, que foi a ligação de pontos conjugados entre fotos com poucos objetos, sobretudo nos cenários com poucas construções. A dificuldade no alinhamento das imagens e na elaboração de uma nuvem de pontos do objeto a coordenar com o software Metashape está exemplificada na Figura 7.4 (a), onde não foi possível definir o ponto 9, impossibilitando a extração das respetivas coordenadas.

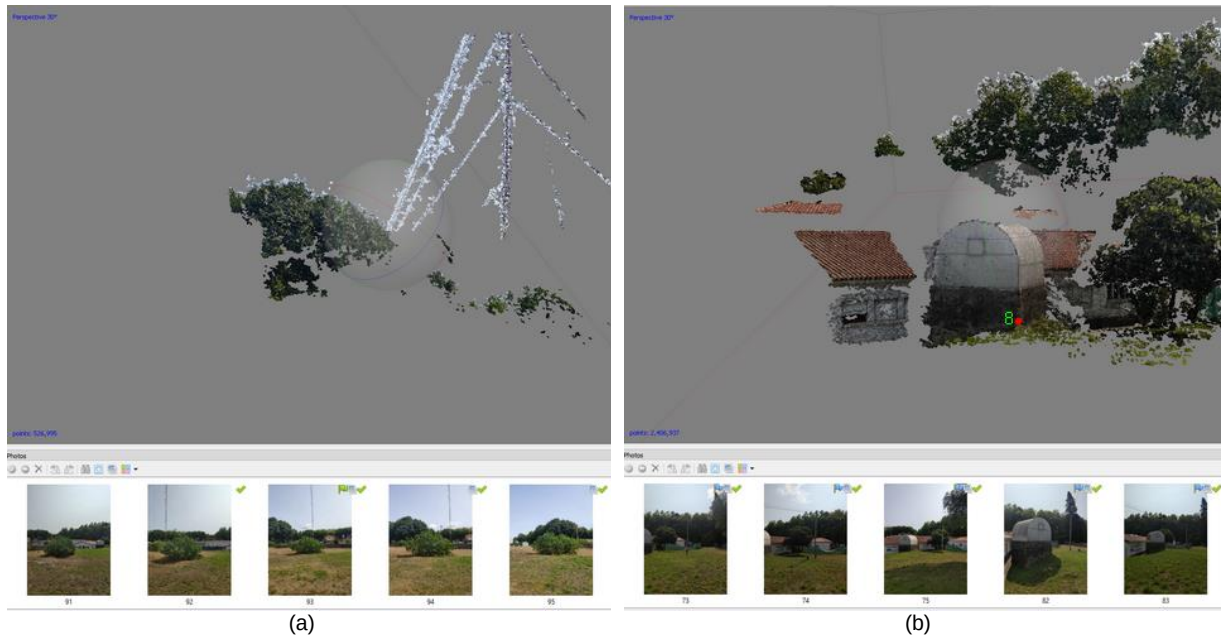


Figura 7.4 – Marco do ponto 9 não definido no modelo (a) e marca do ponto 8 bem definido no modelo (b).

No entanto uma outra dificuldade, que está diretamente relacionada com o rigor posicional das imagens obtidas, resultou da realização de um levantamento muito rápido, 40 segundos, que em muitos dos casos implicou uma menor exatidão. Desta forma, alguns pontos como o da Figura 7.4 (b), onde apesar de ter sido possível criar uma nuvem de pontos do ponto, o método fotogramétrico também falhou no cumprimento do valor de referência.

Na Tabela 7.5 estão indicadas as taxas de resolução das ambiguidades nas soluções GNSS obtidas nas observações diretas dos pontos e as soluções relativas a cada uma das fotos usadas no método fotogramétrico.

Tabela 7.5 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento D.

Posicionamento GNSS		Posicionamento fotogramétrico	
Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante
14,3%	85,7%	0,0%	100,0%

A resolução das ambiguidades no posicionamento GNSS com o telemóvel teve uma taxa de sucesso de soluções fixas de 14,3%, enquanto que para as posições da câmara para georreferenciar o método fotogramétrico só se obtiveram ambiguidades flutuantes. Este

resultado explica-se, pelo no primeiro caso as observações terem tido uma duração de 5 minutos, ao passo que no segundo caso, cada observação foi limitada a 40 segundos.

Na Figura 7.5 podemos ver os erros encontrados para cada ponto, com as duas metodologias. A Tabela 7.6 mostra-nos as estatísticas obtidas, na observação GNSS fez-se uma separação dos valores que cumpriam a norma da DGT. Os valores entre parêntesis indicam o número de pontos válidos.

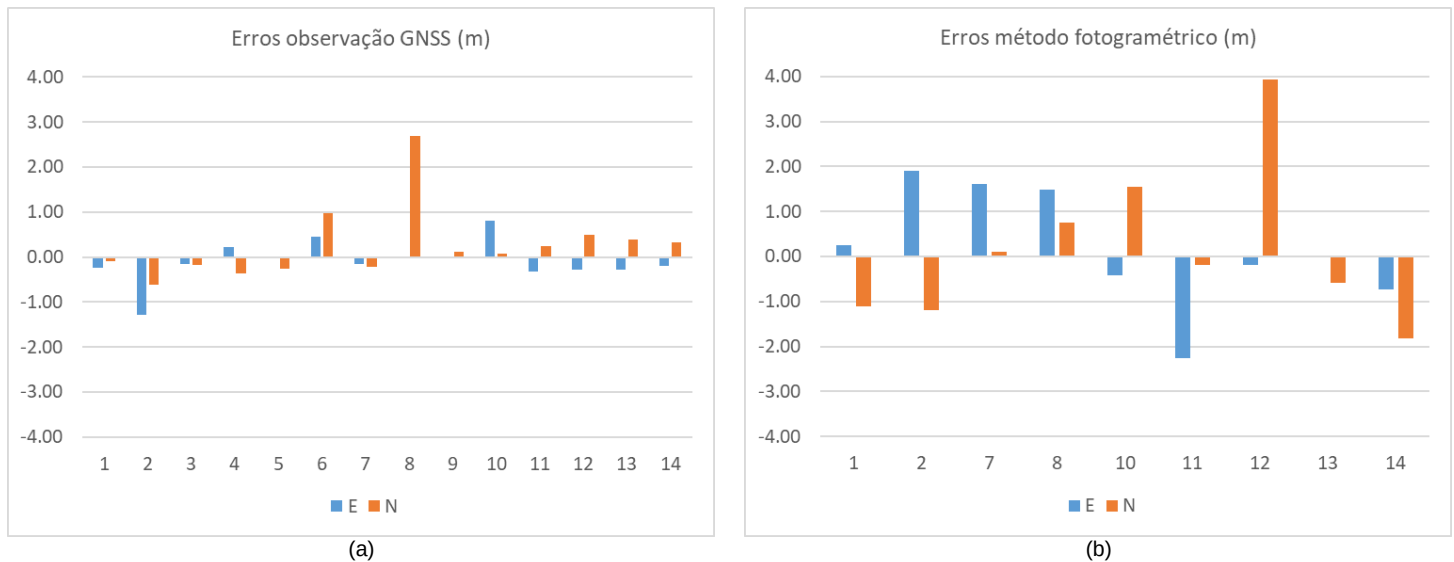


Figura 7.5 – Erros nos pontos na observação GNSS (a) e no método fotogramétrico (b).

Tabela 7.6 – Estatística observação GNSS e fotogramétrica (unidades: m).

	Posicionamento GNSS									Posicionamento fotogramétrico		
	Total (14)			EMQ < 0,40 m (10)			EMQ > 0,40 m (4)			Total (9)		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Média	-0,11	0,26	-0,44	-0,15	0,05	-0,20	-0,06	0,68	-0,98	-0,50	-0,01	-0,78
Desvio	0,46	0,81	0,96	0,16	0,31	0,67	0,91	1,25	1,28	2,48	1,74	4,82
EMQ	0,46	0,82	1,02	0,22	0,31	0,70	0,79	1,28	1,48	2,40	1,65	4,64

Os resultados do levantamento GNSS direto apresentam em 10 dos pontos EMQ inferior aos 40 cm, conforme exigido pela DGT, com 22 cm e 31 cm, respetivamente, na componente Este e Norte, a componente vertical, que para o efeito cadastral não é de fundamental, apresenta um valor de 70 cm.

No entanto, quatro pontos (2, 8, 6 e 10) que se encontravam junto a construções e árvores, o que perturbou a medição dos sinais, não satisfizeram o valor de referência de 40 cm, apresentando erros superiores a 79 cm. Estes pontos foram concebidos de forma propositada, para ilustrar cenários onde as debilidades dos *smartphones* poderiam ser mais óbvias.

Nos casos dos pontos 2 e 8 as medições foram realizadas junto a construções, enquanto que a existência de árvores e de um poste de telefone condicionaram, respetivamente, os pontos 6 e 10, nestes cenários com maior efeito de reflexão de sinais, a baixa supressão da antena do *smartphone* em relação às antenas geodésicas torna-se mais evidente com soluções de menor qualidade.

Para confirmação disto, realizou a medição dos pontos 2 e 8, com o recetor geodésico PolaRx5 usando a antena PolaNt-MF que tem uma maior supressão à reflexão de sinais. Os erros nas coordenadas foram inferiores a 29 cm, bem inferior ao erro acima dos 2 metros que podemos encontrar para o ponto 8 na Figura 7.5 (a), confirmando a maior debilidade da antena do *smartphone* em pontos desta natureza, mas que no entanto, se tornam atrativos para a aplicação do método fotogramétrico.

Daí a importância que estes resultados negativos tiveram, pois sugeriram algumas modificações imediatas à metodologia adotada, tais como por exemplo um maior tempo de observação ou uma captura de mais algumas fotos que poderiam impulsionar a qualidade dos resultados.

A experiência levou-nos a optar pela primeira ideia, porque mesmo com um aumento de imagens se estas não tiverem um bom rigor posicional de pouco serviria. Tendo sempre em conta o objetivo de um levantamento rápido, porque tempos muito longos tornariam o método menos eficiente e rentável, decidiu-se efetuar medições com tempos observação até 3 minutos. Esta escolha foi feita com base nos conhecimentos adquiridos neste e em outros trabalhos.

Escolhemos os pontos 1, 2, 8 e 13, pela estarem definidos em construções e assim poderem dar garantias na obtenção de uma boa nuvem de pontos. Os resultados obtidos nesses pontos para o intervalo de observação de 180 segundos encontram-se na Figura 7.6 e Tabela 7.7, onde também podemos ver a comparação com os resultados obtidos com 40 segundos.

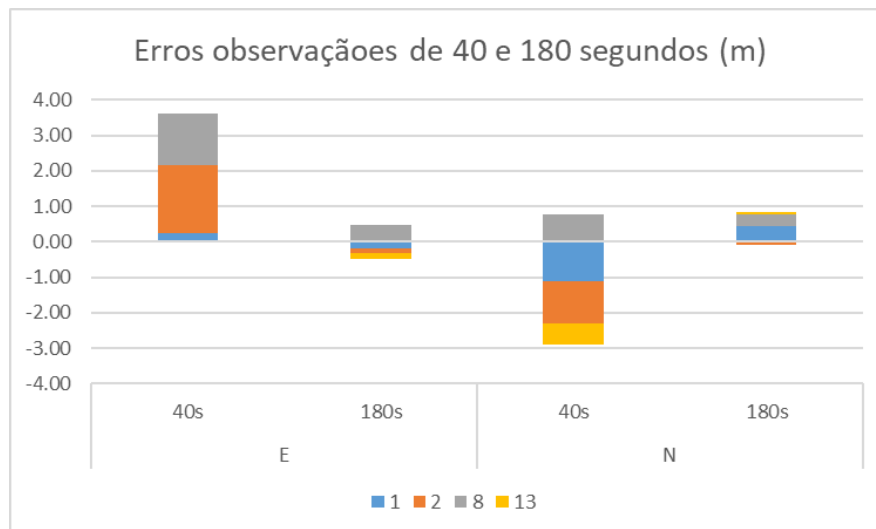


Figura 7.6 – Erros em Este e Norte para cada ponto por tempo de observação.

Tabela 7.7 – Estatística observação GNSS com 40 e 180 segundos nos pontos 1, 2, 8 e 13 (unidades: m).

	Observação 40s			Observação 180s		
	E	N	U	E	N	U
Média	0,90	-0,53	-0,17	-0,01	0,19	0,25
Desvio	0,93	0,90	5,22	0,31	0,24	0,69
EMQ	1,21	0,95	4,53	0,27	0,28	0,64

Os resultados acima apresentados, mostram uma melhoria significativa dos erros das coordenadas, com o tempo de observação maior, com as coordenadas planimétricas a satisfazerem agora o valor de referência.

7.2 Levantamento estático

De seguida são mostrados os resultados e análises destes cada um dos levantamentos efetuados em modo estático no contexto do trabalho de bases longas.

7.2.1 Levantamento D – Bases longas

O levantamento D teve como objetivo a avaliação do posicionamento em modo relativo, mas com estações de referência a grandes distâncias. As coordenadas foram calculadas segundo a metodologia indicada nos levantamentos anteriores pela combinação de medidas Galileo+GPS e comparadas com as coordenadas conhecidas dos pilares da base de calibração. Na Tabela 7.8 encontram-se as percentagens de soluções fixas e flutuantes obtidas nos seis testes realizados durante este levantamento. Nas figuras seguintes podemos ver os EMQ obtidos para cada estação de referência durante cada teste, enquanto que nas tabelas podemos ver as estatísticas em cada teste, através da média, desvio padrão e EMQ. Devido ao grande

número de testes realizados neste tipo de levantamento e que resultou num significativo volume de resultados, este subcapítulo foi subdividido em seis secções referentes a cada teste realizado.

Tabela 7.8 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento C.

	CASC		CEUT		GAIA		VIGO	
	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante
Teste 1	0,4%	99,6%	0,3%	99,7%	1,7%	98,3%	0,1%	99,9%
Teste 2	0,9%	99,1%	0,0%	100,0%	89,3%	10,7%	8,3%	91,7%
Teste 3	0,0%	100,0%	0,0%	100,0%	78,5%	21,5%	66,8%	33,2%
Teste 4	11,0%	89,0%	1,0%	99,0%	83,3%	16,7%	20,3%	79,7%
Teste 5	45,7%	54,3%	3,6%	96,4%	57,8%	42,2%	88,9%	11,2%
Teste 6	6,4%	93,6%	10,7%	89,3%	15,8%	84,2%	6,8%	93,2%

Na Tabela 7.8 vemos que a quantidade de soluções fixas é maior nas linhas de base mais curtas e em combinação com tempos de pesquisa mais longos. Nas linhas de base longas, o número de soluções fixas é residual com quase todas as soluções flutuantes. No Teste 5, as estações de CASC e VIGO, duas linhas de base longas com 277 e 121 km, respetivamente, encontramos uma boa relação de soluções fixas, que para além da importância do longo tempo de observação, também beneficiou de um bom número de satélites Galileo. Os testes 2, 4 e 6 também tiveram longa duração, mas um menor número de satélites Galileo influenciou a possibilidade de obter mais soluções fixas.

7.2.1.1 Teste 1

A Figura 7.7 mostra o EMQ de todas as soluções obtidas durante o Teste 1 e na Tabela 7.9 além deste parâmetro estatístico também temos a média e o desvio padrão.

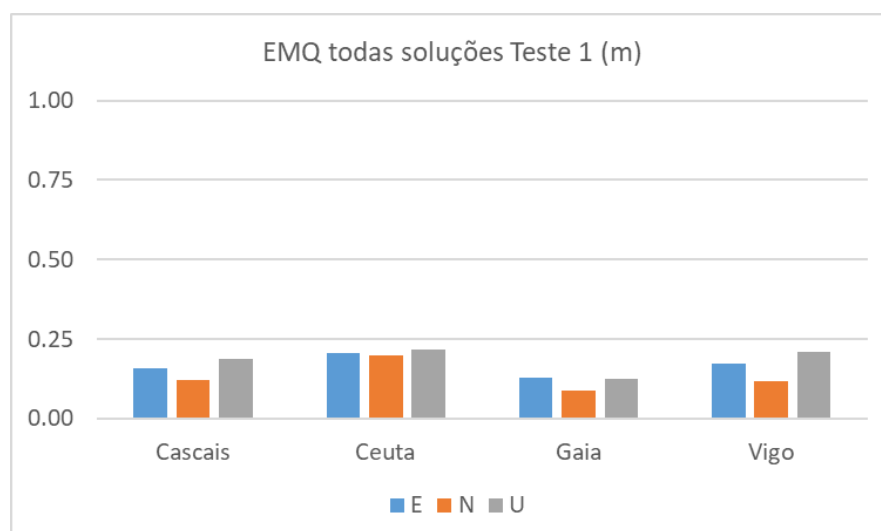


Figura 7.7 – EMQ de todas soluções no *smartphone* do Teste 1.

Tabela 7.9 – Estatística dos resultados do Teste 1 (unidades: m).

	CASC			CEUT			GAIA			VIGO		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Média	-0,024	-0,059	-0,099	-0,076	-0,100	-0,101	-0,007	0,013	-0,044	-0,042	0,077	-0,075
Desvio	0,162	0,107	0,162	0,195	0,178	0,198	0,132	0,088	0,122	0,171	0,090	0,202
EMQ	0,160	0,120	0,186	0,205	0,200	0,218	0,129	0,087	0,126	0,172	0,117	0,211

Do gráfico e tabela apresentados acima vemos valores do EMQ entre 20 e 22 cm nas três componentes para a estação mais distante CEUT (645 km), o que é muito interessante e promissor para este nível de equipamento utilizado no levantamento rápido (10 min de observação). As outras duas linhas de base longas VIGO (121 km) e CASC (277 km) apresentam praticamente todos os valores abaixo de 20 cm, com as componentes E e N tendendo a ter valores em torno de 15 cm.

Como esperado, os melhores resultados foram obtidos usando GAIA, uma linha de base curta, com a componente Norte abaixo de 10 cm e as outras duas componentes entre 12 e 13 cm. De facto, esperava-se que valores ainda melhores pudessem ser alcançados com esta estação GAIA, mas a experiência anterior com levantamentos rápidos (<10 min) mostrou valores desse nível para uma linha de base da mesma ordem (≈ 200 m), o que parece ser uma exatidão típica para um levantamento rápido usando um *smartphone* em modo diferencial.

A Figura 7.8 mostra o EMQ para as soluções Galileo+GPS calculado com dois *smartphones* Xiaomi Mi8 considerando as diferentes estações de referência, com o modo de voo ligado e desligado, na Tabela 7.10 encontramos toda a estatística.

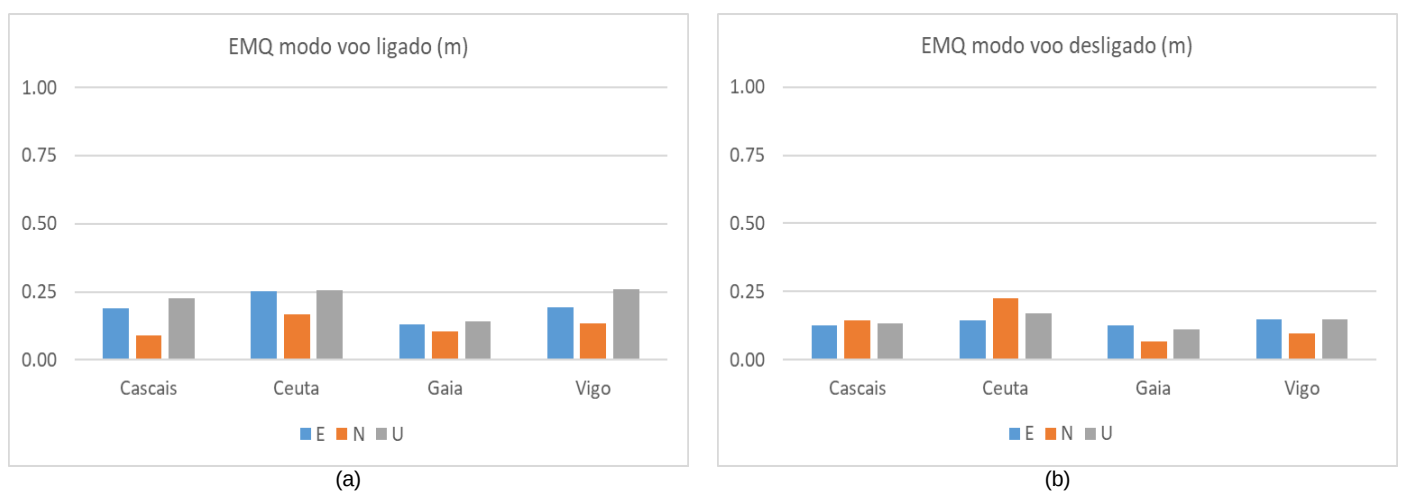


Figura 7.8 – EMQ com o modo de voo ligado (a) e desligado (b) no *smartphone*.

Tabela 7.10 – Estatística comparando o modo de voo ligado e desligado (unidades: m).

Modo		CASC			CEUT			GAIA			VIGO		
		E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Ligado	Média	-0,047	-0,023	-0,172	-0,092	-0,036	-0,151	-0,002	0,030	-0,064	-0,014	0,086	-0,127
	Desvio	0,192	0,091	0,156	0,246	0,174	0,218	0,138	0,105	0,133	0,203	0,107	0,238
	EMQ	0,188	0,089	0,227	0,251	0,168	0,256	0,131	0,104	0,141	0,193	0,133	0,259
Desligado	Média	-0,002	-0,095	-0,026	-0,059	-0,164	-0,050	-0,013	-0,005	-0,024	-0,069	0,068	-0,024
	Desvio	0,132	0,114	0,137	0,139	0,165	0,172	0,132	0,070	0,113	0,137	0,075	0,153
	EMQ	0,125	0,144	0,133	0,145	0,227	0,171	0,126	0,066	0,110	0,147	0,098	0,147

Ao observar o impacto do modo de voo ligado ou desligado, notamos que no caso do modo de voo desligado, os resultados são um pouco melhores, com valores do EMQ na maioria das vezes abaixo de 15 cm e quando em modo de voo, os resultados são ligeiramente piores, com valores chegando a 26 cm. Aparentemente, os sinais WIFI ou GSM ligados (modo voo desligado), não interferem de forma que possa degradar a qualidade das soluções, apresentando desempenho ainda melhor neste modo, o que permite dizer que *smartphones* podem ser usados para medição de dados GNSS em bruto no seu modo de operação normal.

A Figura 7.8 mostra o EMQ para as soluções Galileo+GPS calculado com dois *smartphones* Xiaomi Mi8 considerando as diferentes estações de referência e na Tabela 7.10 a estatística.

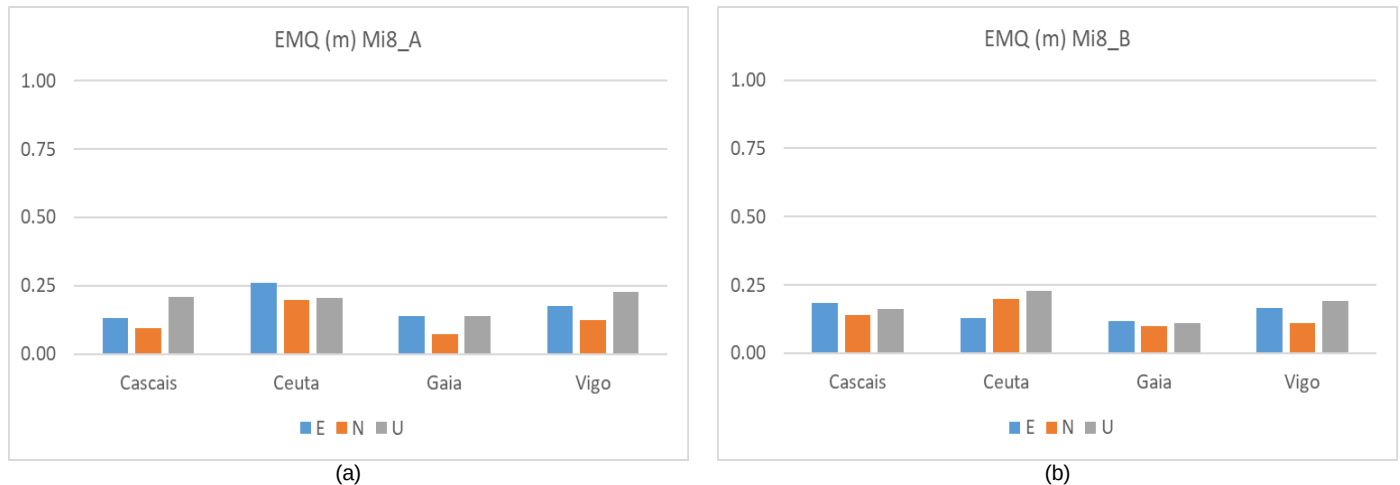


Figura 7.9 – EMQ nos *smartphones* A (a) e B (b).

Tabela 7.11 – Estatística comparando dois equipamentos do mesmo modelo (unidades: m).

Smartphone		CASC			CEUT			GAIA			VIGO		
		E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
A	Média	-0,093	-0,041	-0,159	-0,190	-0,127	-0,122	-0,070	0,015	-0,076	-0,125	0,084	-0,126
	Desvio	0,097	0,090	0,142	0,185	0,162	0,174	0,126	0,076	0,123	0,131	0,096	0,199
	EMQ	0,131	0,095	0,208	0,259	0,200	0,205	0,138	0,074	0,139	0,176	0,124	0,227
B	Média	0,044	-0,077	-0,039	0,038	-0,072	-0,080	0,055	0,011	-0,012	0,041	0,069	-0,025
	Desvio	0,188	0,124	0,164	0,132	0,196	0,227	0,110	0,103	0,118	0,170	0,088	0,201
	EMQ	0,184	0,140	0,161	0,131	0,200	0,230	0,118	0,098	0,112	0,167	0,109	0,192

Ao comparar os dois *smartphones*, não encontramos diferenças significativas, embora os *smartphones* A e B, como vimos no capítulo 6, não tenham seguido exatamente os mesmos satélites. Os resultados são semelhantes com um EMQ máximo que não ultrapassa os 30 cm, mesmo para Ceuta, mas com a maioria dos valores abaixo de 20 cm.

Neste Teste 1, também foi comparado o desempenho posicional entre as soluções só com Galileo e só GPS. A Figura 7.10 mostra os erros obtidos para cada um dos sistemas GNSS usando observações de dois pilares (3 e 5).

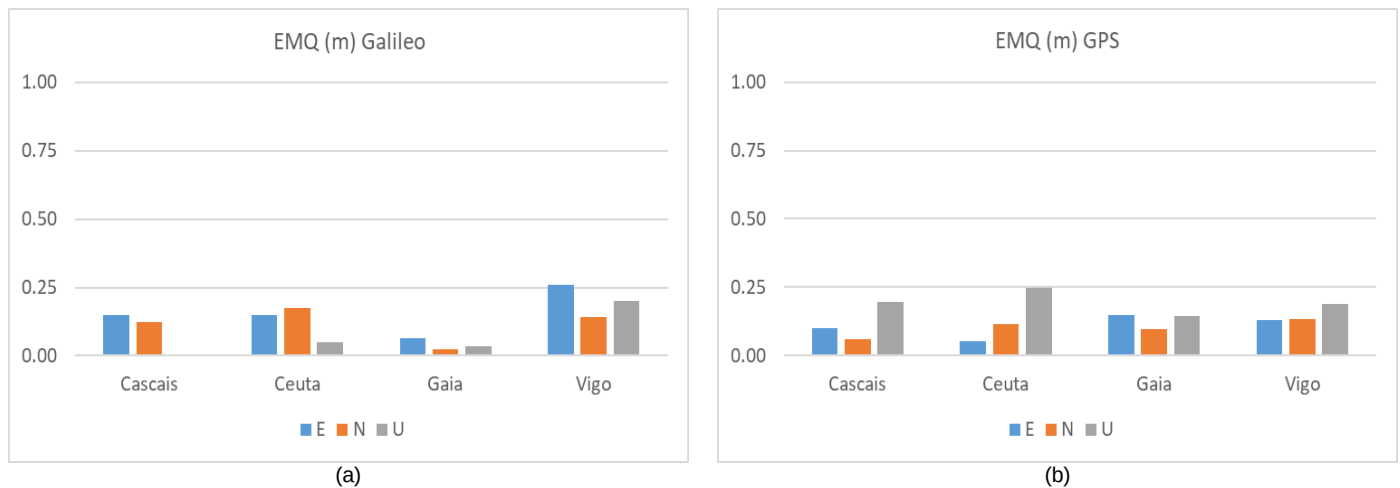


Figura 7.10 – EMQ das soluções Galileo (a) e GPS (b).

Devido ao menor número de satélites Galileo disponíveis, pois como anteriormente referido esta constelação ainda não está finalizada, na maioria das vezes não havia satélites Galileo suficientes para processar soluções diferenciais em todos os pontos, mas foi possível obter resultados em dois pontos.

Verificamos um desempenho posicional do Galileo semelhante ao GPS, com a maioria dos erros abaixo de 15 cm, superando até mesmo o GPS em alguns casos, como podemos ver de forma mais evidente na componente vertical.

Em geral, os resultados de posicionamento com os dois sistemas GNSS sozinhos também são interessantes, sendo semelhantes à solução obtida com a combinação de ambos. Os melhores resultados foram para as componentes horizontais das soluções Galileo em relação à estação GAIA, respetivamente, 6 cm em Este e 2 cm em Norte, enquanto a componente altitude teve um erro de 1 cm com a estação CASC. Olhando para os maiores erros, encontramos 26 cm para o componente E nas soluções Galileo usando a estação VIGO e 25 cm para o componente altimétrica do GPS usando a estação CEUT.

Tendo em conta que a limitação do número de satélites na constelação do Galileo deixará de

existir no futuro, o desempenho do posicionamento com este sistema por si só é bastante promissor.

7.2.1.2 Teste 2

A Figura 7.11 e a Tabela 7.12 mostram os resultados obtidos durante o Teste 2 para a combinação Galileo+GPS usando o *smartphone* no pilar 9, num período de observação mais longo de duas horas, superior às observações do Teste 1, permitindo assim além de validar os resultados anteriores, também avaliar a consistência do comportamento do dispositivo.

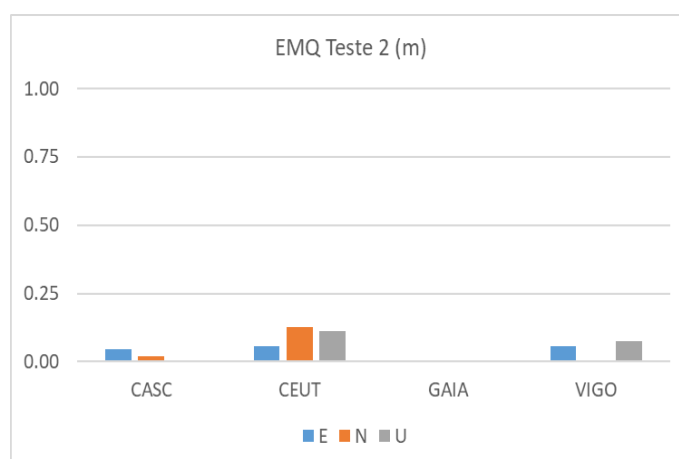


Figura 7.11 – EMQ obtido no Teste 2.

Tabela 7.12 – Estatística do Teste 2 (unidades: m).

	CASC			CEUT			GAIA			VIGO		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Média	-0,207	0,144	-0,028	-0,237	0,354	0,334	0,006	0,002	0,053	0,222	-0,019	0,236
Desvio	0,047	0,005	0,034	0,016	0,013	0,018	0,013	0,008	0,024	0,082	0,018	0,143
EMQ	0,045	0,021	0,002	0,056	0,125	0,112	0,000	0,000	0,003	0,056	0,001	0,076

Os resultados deste teste mostram um comportamento melhor do que os obtidos para o Teste 1, devido à maior duração das observações, tal como veremos mais adiante nos Testes 4, 5 e 6, também com um longo tempo de observação.

A estação CEUT com a linha de base de 645 km apresenta erros inferiores a 15 cm, enquanto as estações CASC e VIGO apresentam valores inferiores a 10 cm e GAIA, a linha de base mais curta, é inferior a 1 cm.

7.2.1.3 Teste 3

A Figura 7.12 contém os gráficos relativos ao EMQ obtidos das observações com *smartphone* e o recetor geodésico PolaRx5 em simultâneo em três pilares durante 30 minutos. Na Tabela 7.13 encontramos a estatística das soluções Galileo+GPS de ambos equipamentos.

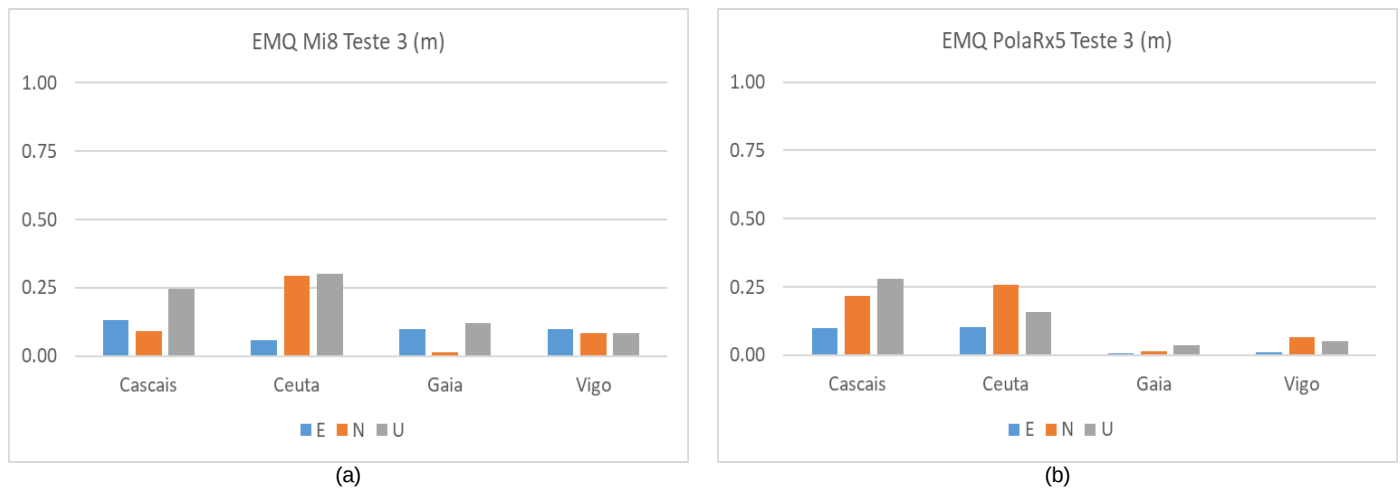


Figura 7.12 – EMQ das soluções do *smartphone* (a) e recetor geodésico (b) no Teste 3.

Tabela 7.13 – Estatística do Teste 3 (unidades: m).

		CASC			CEUT			GAIA			VIGO		
		E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Smartphone	Média	0,087	-0,013	-0,160	0,048	-0,122	-0,059	0,062	0,003	-0,097	0,082	0,072	-0,074
	Desvio	0,121	0,112	0,229	0,036	0,325	0,362	0,092	0,018	0,091	0,064	0,051	0,049
	EMQ	0,132	0,092	0,246	0,057	0,292	0,301	0,097	0,015	0,122	0,097	0,083	0,085
Recetor	Média	-0,047	-0,213	0,244	-0,043	-0,173	-0,053	0,000	-0,003	0,008	-0,009	0,067	0,025
	Desvio	0,105	0,050	0,169	0,116	0,235	0,182	0,009	0,019	0,044	0,007	0,005	0,057
	EMQ	0,098	0,216	0,280	0,104	0,258	0,158	0,007	0,015	0,037	0,011	0,067	0,053

A partir dos resultados do Teste 3, vemos que os erros obtidos para as soluções do *smartphone* são semelhantes às outras soluções nos Testes 1 e 2, embora os maiores erros EMQ cheguem aos 30 cm na estação CEUT, respetivamente, nas componentes N e U.

Comparando os dois dispositivos, vemos que o recetor geodésico teve um melhor desempenho, o que não é surpresa devido a gama de cada um deles, principalmente nas duas linhas de base menores, GAIA e VIGO, com valores abaixo de 7 cm, enquanto o dispositivo móvel mostra para essas estações valores abaixo de 12 cm.

7.2.1.4 Teste 4

A Figura 7.13 e a Tabela 7.14 mostram os resultados obtidos durante o Teste 4 para um período de observação quatro horas, numa avaliação de longa duração do comportamento do dispositivo, tal como nos testes 2, 5 e 6.

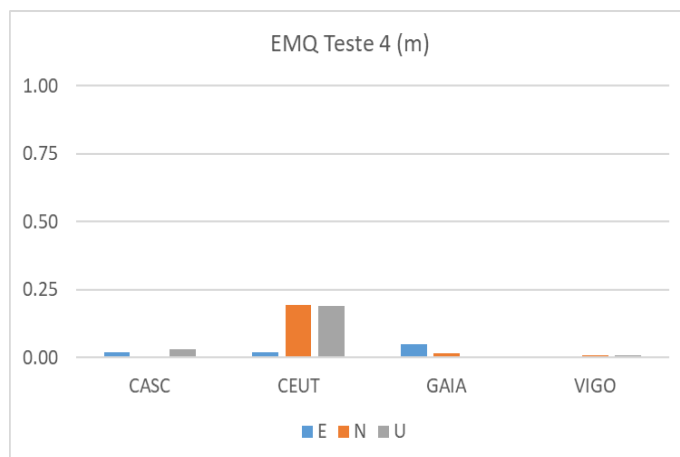


Figura 7.13 – EMQ obtido no Teste 4.

Tabela 7.14 – Estatística do Teste 4 (unidades: m).

	CASC			CEUT			GAIA			VIGO		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Média	0,078	-0,033	0,092	0,005	-0,396	-0,392	-0,220	-0,117	-0,058	0,002	-0,083	0,045
Desvio	0,054	0,026	0,079	0,140	0,194	0,186	0,008	0,005	0,021	0,048	0,054	0,068
EMQ	0,018	0,004	0,030	0,020	0,194	0,188	0,048	0,014	0,004	0,002	0,010	0,007

Os resultados do Teste 4 mostram valores ao nível dos outros testes, muito semelhantes ao Teste 2, o que é expectável devido serem ambos testes de longa duração. A estação CEUT apresenta valores par ao EMQ abaixo de 20 cm, enquanto as outras três estações apresentam valores abaixo de 5 cm.

7.2.1.5 Teste 5

Na Figura 7.14 temos o gráfico do EMQ do Teste 5 para um período de observação três horas e na Tabela 7.15 a respetiva estatística.

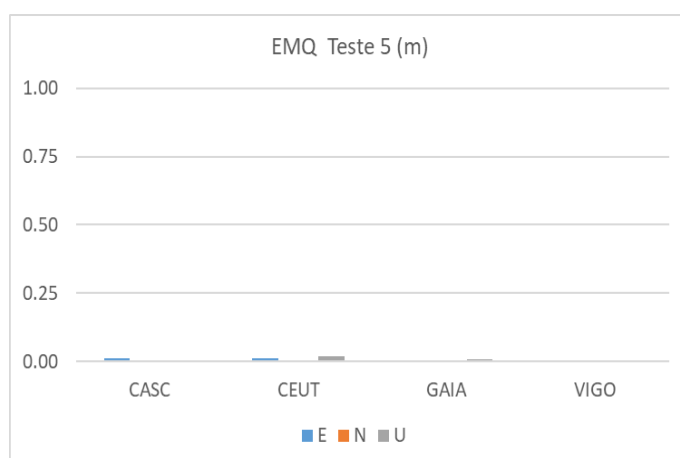


Figura 7.14 – EMQ obtido no Teste 5.

Tabela 7.15 – Estatística do Teste 5 (unidades: m).

	CASC			CEUT			GAIA			VIGO		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Média	0,068	0,038	0,042	0,086	0,035	0,133	-0,008	-0,005	0,048	-0,016	-0,040	-0,031
Desvio	0,091	0,033	0,044	0,030	0,018	0,040	0,026	0,025	0,057	0,014	0,017	0,026
EMQ	0,010	0,003	0,004	0,012	0,002	0,019	0,001	0,001	0,008	0,001	0,003	0,002

Os resultados do Teste 5 mostram o melhor desempenho de todos os testes realizados, com valores abaixo de 5 cm para todas as estações de referência consideradas. Um período de tempo de observação longo com um bom número de satélites Galileo durante esse período, permitiu um melhor contributo no cálculo das soluções Galileo+GPS.

7.2.1.6 Teste 6

A Figura 7.15 e a Tabela 7.16 mostra-nos o gráfico do EMQ e a estatística do último teste realizado no contexto de avaliação do posicionamento com linhas de base longas, com um intervalo de observação de cinco horas.

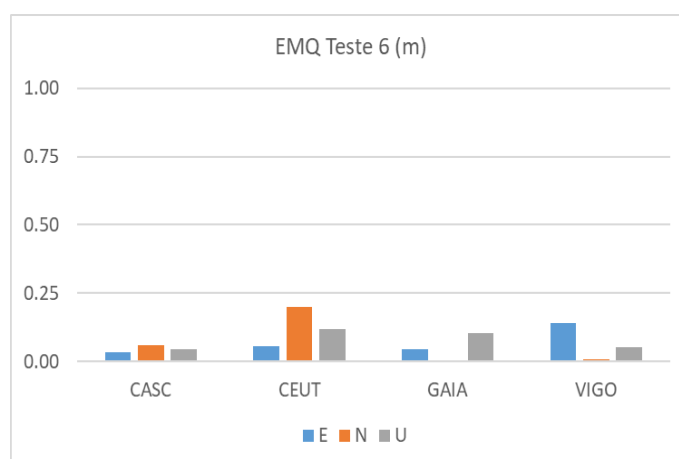


Figura 7.15 – EMQ obtido no Teste 6.

Tabela 7.16 – Estatística do Teste 6 (unidades: m).

	CASC			CEUT			GAIA			VIGO		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	E	N	U
Média	0,084	0,240	0,195	-0,117	0,441	0,329	-0,191	0,010	0,296	-0,355	-0,054	0,223
Desvio	0,168	0,033	0,076	0,209	0,077	0,098	0,083	0,006	0,117	0,123	0,064	0,049
EMQ	0,035	0,059	0,044	0,057	0,200	0,118	0,043	0,000	0,101	0,141	0,007	0,052

Os resultados do Teste 6 mostram exatidões semelhantes às obtidas nos demais testes, com valores abaixo de 20 cm para a estação CEUT, enquanto nas demais estações de referência obtivemos exatidões abaixo de 10 cm para a maioria dos componentes.

Estes resultados não são melhores do que no Teste 5, apesar do maior tempo de observação,

o que é devido a um menor número de satélites Galileo observados pelo *smartphone*, (Figura 6.25) notando-se uma quebra no número de satélites Galileo observados na parte final da observação. Observando os satélites seguidos pelo recetor Alloy nesse gráfico, notamos que o número de satélites Galileo não diminuiu tão drasticamente, então o problema estará relacionado com as capacidades do *smartphone* durante este teste em manter o seguimento dos satélites Galileo.

Os testes neste levantamento mostram resultados consistentes para posicionamento diferencial utilizando linhas de base longas e, como esperado, o desempenho do posicionamento do *smartphone* foi pior no caso da estação CEUT mais distante, mas ainda com valores abaixo de 30 cm, o que pode ser considerado muito bom, tendo sido encontrados valores abaixo dos 20 cm e até mesmo aos 10 cm em observações de maior duração.

Na interpretação destes resultados, é importante perceber se desempenhos semelhantes podem ser esperados em outros lugares do mundo. Os sinais GNSS são afetados por atrasos atmosféricos, ionosfera e troposfera, que podem ser minimizados ou mesmo eliminados pela aplicação de técnicas de posicionamento relativo no caso de linhas de base curtas, pois os recetores estão sujeitos a efeitos semelhantes. Para o nosso trabalho, esperamos que as condições ionosféricas sejam o facto limitante para a exatidão, em particular, porque uma combinação de dupla frequência “ionosphere-free” não pode ser usada para muitos dos satélites GPS devido à ausência do sinal L5.

Nas latitudes do sul da Europa, como são as deste estudo, sob condições solares mínimas, mesmo para linhas de base da ordem de 100 km, os erros máximos de posicionamento usando a técnica de diferenças duplas são de cerca de 20 cm e o EMQ de cerca de 5 cm, como apresentado por Crocetto et al. (2008). Esses valores estão de acordo com este estudo. No entanto durante tempos de condições ionosféricas perturbadas, durante o máximo solar, mesmo em latitudes médias, erros máximos em torno de 100 cm e EMQ de dezenas de cm podem ser esperados para linhas de base da ordem de 100 km (Crocetto et al. (2008)).

Assim, para regiões equatoriais onde a ionosfera é muito mais perturbada, mesmo durante o mínimo solar, não esperamos linhas de base com centenas de km de comprimento para atingir a exatidão apresentada neste artigo, embora esperemos que as soluções com um *smartphone* de baixo custo ainda funcionam num nível próximo ao obtido por equipamentos mais caros.

Com um tempo acumulado de observação de 16 h, baseado na comparação com as coordenadas de referência dos pilares, em geral, os erros são inferiores a 25 cm na maioria das linhas de base longas, 277 km (CASC) e 645 km (CEUT), com os melhores resultados obtidos com as linhas de base mais curtas, com a estação GAIA (0,2 km) mostrando resultados

melhores que 15 cm. As exatidões obtidas nos levantamentos de longa duração apresentam os melhores resultados, com EMQ na maioria dos casos abaixo de 5 cm, com a estação mais distante, CEUT, a apresentar valores que nos piores casos chegaram aos 20 cm.

Com base nisto, podemos concluir que um dispositivo GNSS de baixo custo como o *smartphone* com acesso a medições de dupla frequência revela um bom potencial para ser uma ferramenta de qualidade para georreferenciação, com tendência a melhorar o seu desempenho com a finalização da constelação Galileo e da modernização da constelação GPS. Podendo dar resposta às necessidades de posicionamento existentes, particularmente em lugares remotos de África, América do Sul e zonas polares como a Antártica, onde o acesso a redes densas de estações de referência ainda é muito limitado e onde também os baixos orçamentos dificultam a compra de alguns equipamentos GNSS de alta qualidade.

7.3 Levantamentos cinemáticos

Os subcapítulos seguintes mostram os resultados em cada levantamento realizado em modo cinemático, em ambiente hidrográfico, aéreo e terrestre.

7.3.1 Levantamento E - Hidrográfico

O levantamento E foi realizado em ambiente hidrográfico num trabalho abordo de uma embarcação de realização de sondagens. As soluções diferenciais usando a dupla frequência (DF – Dupla Frequência) e em posicionamento por pontos (SPP – Single Point Positioning) foram calculadas com o RTKLib Demo5 e comparadas com as soluções de tripla frequência Galileo+GPS do recetor PolaRx5. Na Tabela 7.17 encontramos a percentagem de fixação das ambiguidades.

Tabela 7.17 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento E.

	Smartphone		Recetor geodésico	
	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante
Galileo	2,1%	97,9%	82,0%	18,0%
GPS	14,2%	85,8%	73,6%	26,4%
Galileo+GPS	3,2%	96,8%	81,0%	19,0%

A percentagem de fixação no *smartphone* é inferior à do recetor PolaRx5, só nas soluções Galileo+GPS se obtiveram soluções fixas com um valor de 3,2%. O recetor apresenta soluções fixas acima dos 73,6%, como Galileo ter o melhor desempenho com 82%.

Na Figura 7.16 encontramos o EMQ para as soluções em modo diferencial das componentes

ENU para a constelação Galileo, GPS e a combinação de ambas Galileo+GPS. Na Tabela 7.18 vemos a respetiva estatística.

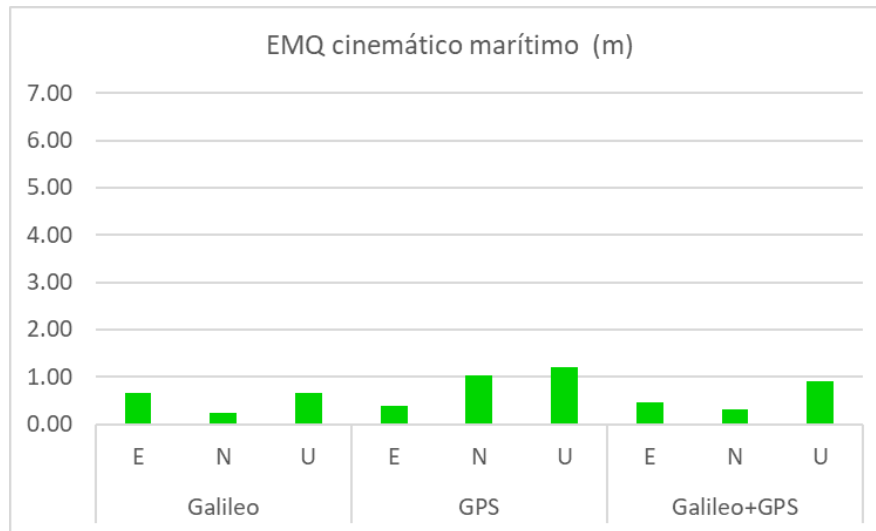


Figura 7.16 – EMQ obtido no levantamento E hidrográfico, em modo diferencial.

Tabela 7.18 – Estatística do levantamento E (unidades: m).

	Galileo			GPS			Galileo+GPS			Modo
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	
Média	-0,631	-0,073	-0,576	-0,269	0,431	-0,877	-0,418	0,091	-0,047	DF
Desvio	0,226	0,216	0,322	0,274	0,930	0,824	0,194	0,289	0,898	
EMQ	0,670	0,227	0,660	0,384	1,025	1,203	0,461	0,303	0,899	
Média	-1,441	-0,598	3,702	-0,886	0,530	2,362	-1,286	-0,121	3,243	SPP
Desvio	2,082	2,042	4,660	3,241	3,995	6,423	2,579	2,446	4,368	
EMQ	2,531	2,127	5,951	3,360	4,029	6,842	2,881	2,448	5,439	

As soluções diferenciais apresentam valores bastante prometedores com EMQ respetivamente, de 46,1 cm, 30,3 cm e 89,9 cm nas coordenadas ENU das soluções combinadas Galileo+GPS. Enquanto que nas soluções Galileo tivemos EMQ de 67 cm, 22,7 cm e 66 cm. No caso do GPS os resultados foram piores, só a coordenada E com 38,4 cm se ficou abaixo do 1 metro.

Os resultados SPP apresentam EMQ na casa dos 2 metros nas coordenadas planimétricas, o que para navegação podemos considerar aceitável, e acima de 5 metros na vertical.

Na Figura 7.17 e Figura 7.18 podemos ver os resíduos do código e da fase da portadora nos sinais E1/E5a e L1/L5, calculados no programa RTKLib Demo5. Os resíduos entre as observáveis do código ou fase da portadora medidas e estimadas contêm o erro de posição do recetor e do relógio, juntamente com os erros de modelação e ruído das medidas, sendo os dados de entrada para as equações de navegação. Estas equações consistem num sistema linear, cuja solução por mínimos quadrados ou filtro de Kalman nos permite separar as

diferentes componentes do erro dos resíduos pré-ajustados e determinar as coordenadas do recetor e do relógio. Quanto mais precisa a modelagem das medidas, melhor será a decorrelação dos erros e mais precisas serão as coordenadas obtidas, Subirana et al. (2013).

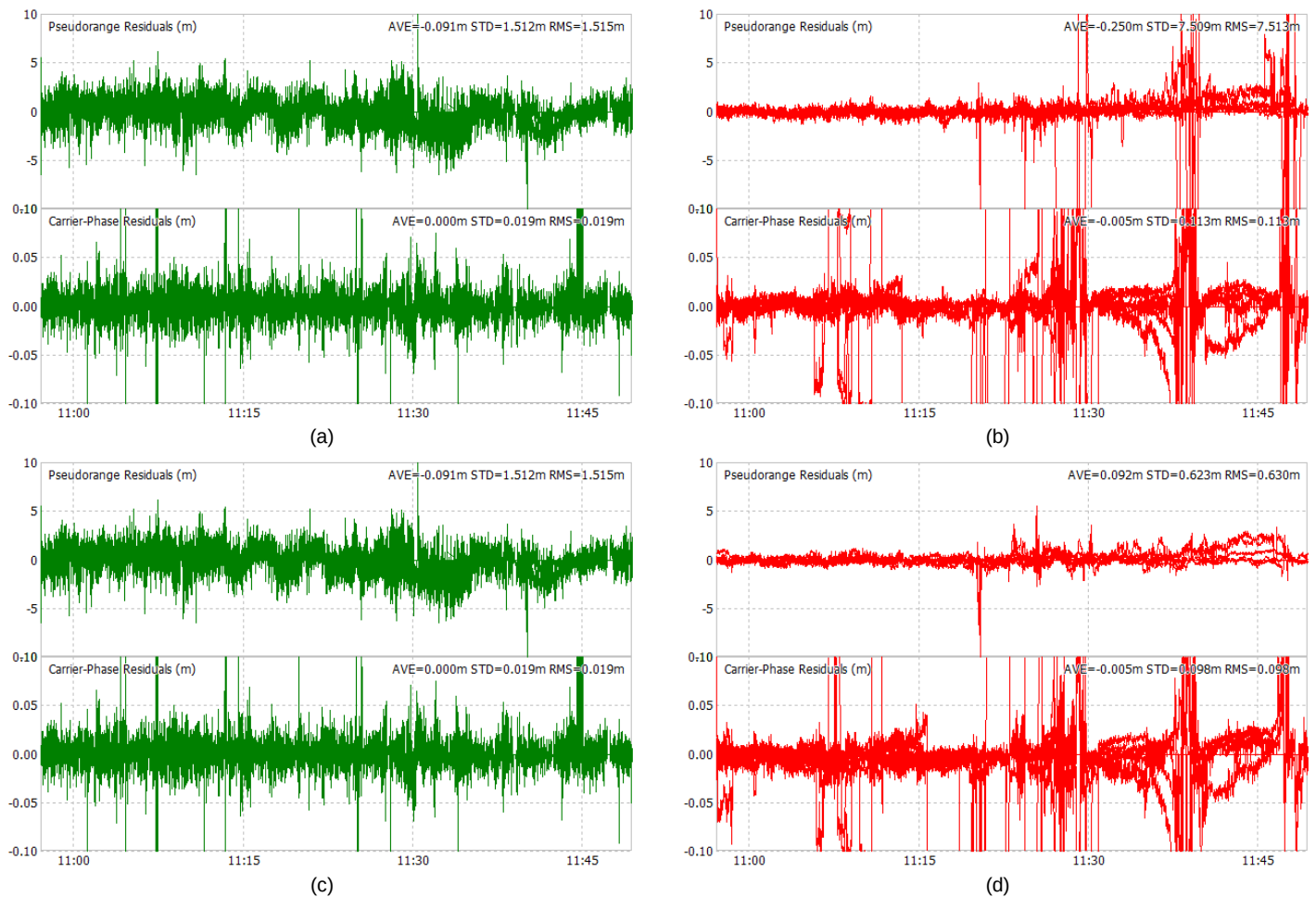
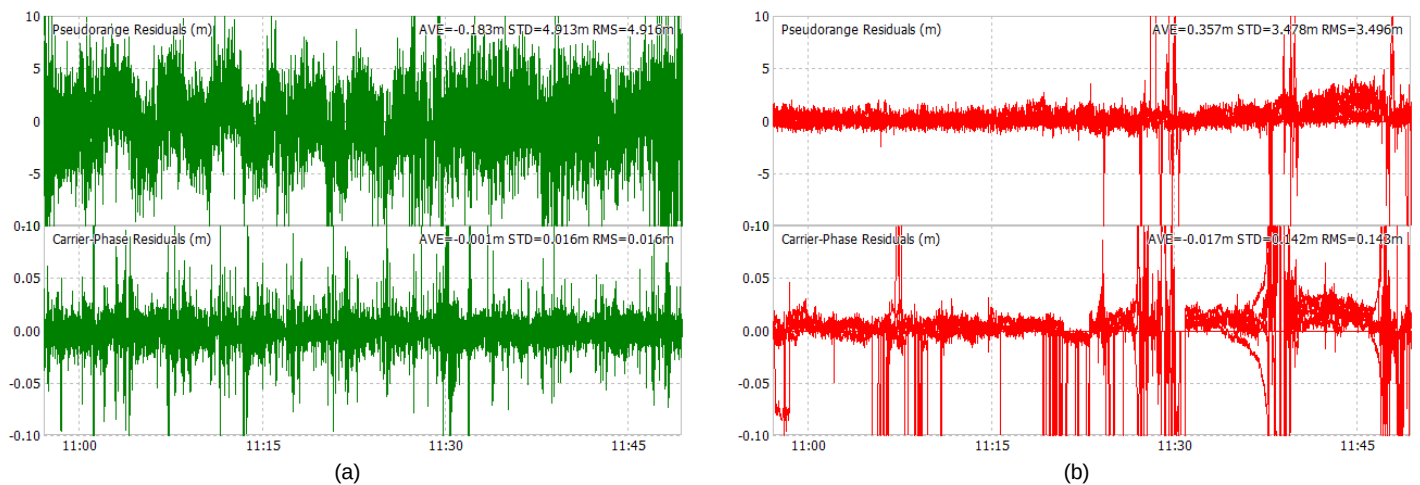


Figura 7.17 – Resíduos no levantamento hidrográfico: E1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b); E5a no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).



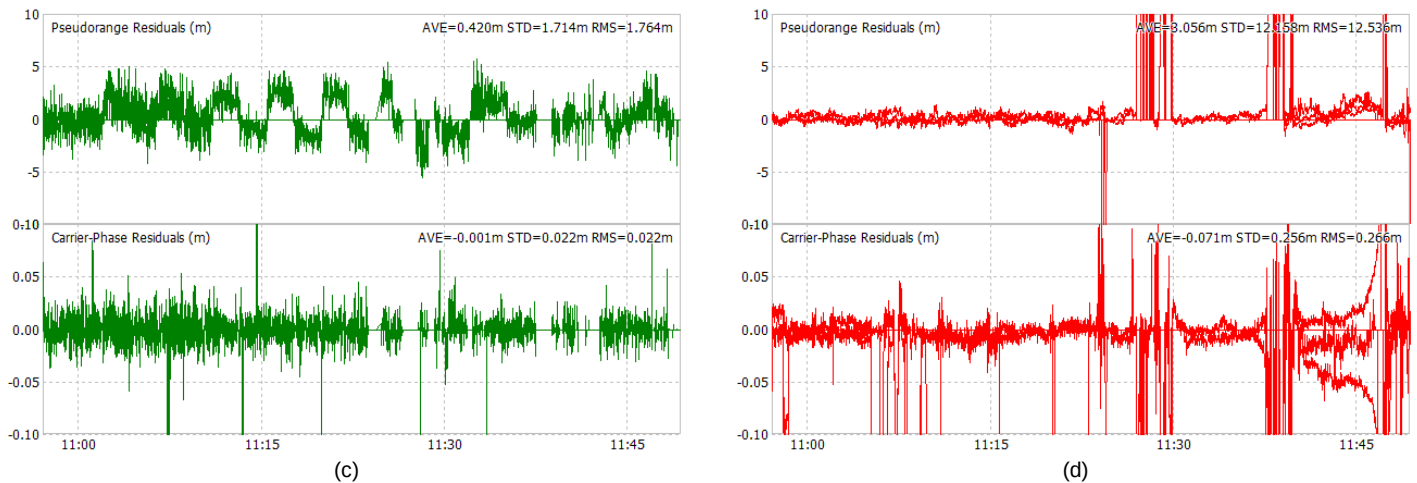


Figura 7.18 – Resíduos no levantamento hidrográfico: L1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b); L5 no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).

Das figuras acima, nota-se uma maior amplitude dos resíduos do *smartphone* ao longo do tempo do que no recetor, embora este último mostre saltos muito significativos em determinados instantes, que contaminam os valores dos desvios de forma mais expressiva nas pseudodistâncias, como é o caso dos 12 metros encontrados na frequência L5, as amplitudes neste equipamento são menores. Os valores mais baixos são observados para as fases das portadoras para todos sinais de ambos dispositivos.

Os picos existentes, sobretudo no recetor podem ser explicados por quebras no número de satélites nos dois sistemas GNSS durante manobras ou obstáculos, mas que no caso do GPS com menos satélites com o L5 disponível, se torna ainda mais efetivo. No caso do *smartphone* não encontramos picos tão grandes, porque nesses instantes não se conseguiu sequer gerar soluções devido a um número insuficiente de satélites. Relembre-se que no capítulo 6 vimos que este equipamento segue um menor número de satélites.

Com base nos resultados deste levantamento podemos dizer que os resultados são promissores na possível aplicação de um *smartphone* com as características do usado neste trabalho em trabalhos de natureza hidrográfica e revelando também potencial em navegação marítima.

7.3.2 Levantamento F - Aéreo

O levantamento F foi realizado no âmbito das campanhas do projeto GRC-MS a bordo de uma aeronave e os seus resultados das soluções obtidas em modo cinemático, usando a habitual configuração de processamento diferencial, são apresentados neste subcapítulo.

As soluções diferenciais e em modo absoluto do Galileo, GPS e Galileo+GPS do *smartphone* foram comparadas com as soluções de tripla frequência Galileo+GPS do recetor geodésico

PolaRx5. Em todas as campanhas do GRC as soluções do recetor quando comparadas com soluções GNSS/IMU e GPS/GLONASS PPP apresentou valores inferiores a 5 cm nas componentes horizontais em 95% das vezes, enquanto que componente vertical os valores variaram entre 13-25 cm.

Na Tabela 7.19 encontramos a percentagem de fixação das ambiguidades para as soluções obtidas no RTKLib Demo5 para os sistemas Galileo, GPS e combinação de ambos.

Tabela 7.19 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento F.

	Smartphone		Recetor geodésico	
	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante
Galileo	1,1%	98,9%	99,3%	0,7%
GPS	3,9%	96,1%	99,5%	0,5%
Galileo+GPS	1,4%	98,6%	99,6%	0,4%

Verificamos que a percentagem de fixação das ambiguidades de parte do *smartphone* é inferior à do recetor PolaRx5, semelhante aos outros levantamentos cinemáticos, com o telemóvel a apresentar soluções fixas entre 1% e 4%, enquanto que o recetor apresenta 99%.

Na Figura 7.19 temos os EMQ das soluções diferenciais referentes aos perfis dos trajetos realizados nos voos de outubro de 2019 e junho de 2020. Na Tabela 7.20 mostra a estatística das soluções diferenciais e do posicionamento por pontos (SPP).

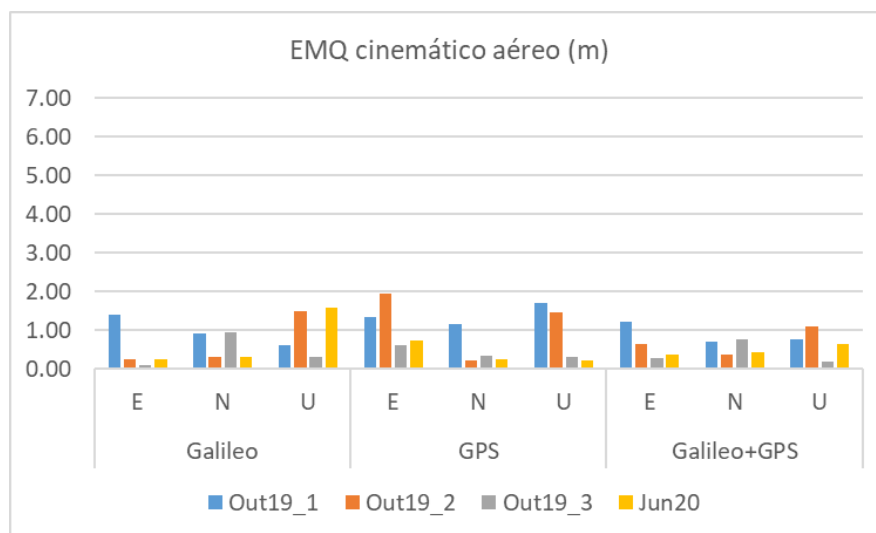


Figura 7.19 – EMQ obtido no levantamento F aéreo, em modo diferencial.

Tabela 7.20 – Estatística do levantamento F para soluções diferenciais (unidades: m).

	Galileo			GPS			Galileo+GPS			Data	
	E	N	U	E	N	U	E	N	U		
Média	-1,411	-0,914	-0,599	-1,325	-1,158	1,696	-1,222	-0,693	0,768	Out19_1	DF
Desvio	0,010	0,020	0,054	0,158	0,077	0,145	0,012	0,029	0,046		
EMQ	1,411	0,915	0,602	1,334	1,161	1,702	1,223	0,694	0,769		
Média	0,202	-0,232	1,436	-1,942	0,032	1,453	-0,615	-0,342	1,067	Out19_2	
Desvio	0,135	0,199	0,407	0,149	0,210	0,148	0,141	0,157	0,232		
EMQ	0,243	0,305	1,493	1,948	0,212	1,460	0,631	0,376	1,092		
Média	0,010	0,928	0,290	0,568	0,262	0,058	0,265	0,735	0,052	Out19_3	
Desvio	0,094	0,135	0,134	0,193	0,200	0,314	0,099	0,223	0,188		
EMQ	0,095	0,938	0,319	0,600	0,329	0,319	0,282	0,768	0,195		
Média	0,230	-0,308	1,588	0,742	-0,227	0,062	0,365	-0,421	0,608	Jun20	
Desvio	0,073	0,037	0,112	0,085	0,132	0,196	0,047	0,075	0,165		
EMQ	0,241	0,310	1,592	0,747	0,262	0,206	0,368	0,427	0,630		

Tabela 7.21 – Estatística do levantamento F para soluções SPP (unidades: m).

	Galileo			GPS			Galileo+GPS			Data	
	E	N	U	E	N	U	E	N	U		
Média	0,698	-0,750	5,508	0,687	-0,494	4,275	0,800	-0,527	4,250	Out19	SPP
Desvio	3,737	5,025	13,372	5,335	6,151	12,848	3,998	4,328	10,264		
EMQ	3,801	5,080	14,460	5,379	6,170	13,540	4,077	4,360	11,108		
Média	0,005	-1,751	3,148	0,790	-1,325	1,829	0,313	-1,148	1,857	Jun20	
Desvio	3,046	4,728	20,015	3,448	5,008	6,565	2,025	3,182	4,754		
EMQ	3,045	5,041	20,257	3,537	5,180	6,815	2,049	3,382	5,103		

Das soluções diferenciais verificamos que o desempenho do *smartphone* para o Galileo é semelhante ou melhor que o GPS, aproximando-se muito das soluções resultantes da combinação dos dois sistemas. Os melhores resultados foram obtidos nos perfis Out19_3 e Jun20, com o Galileo a atingir o valor mais baixo de 9,5 cm na componente E e o GPS o pior com quase 2 metros.

Se no posicionamento diferencial se seleccionaram perfis que não incluíssem manobras da aeronave, que provocaram quebras no sinal e dessa foram perturbando a resolução das ambiguidades e até a inviabilizando a obtenção de soluções, no caso das soluções SPP estas referem-se ao trajeto todo.

Encontramos EMQ superiores a 10 metros nas cotas no voo de outubro de 2019 em todas as combinações, enquanto que no voo de junho de 2020 é nas soluções Galileo que se atinge esse valor. Nas componentes planas os melhores valores situam-se aproximadamente entre os 2 e 3 metros para as soluções Galileo+GPS.

Da exatidão dos resultados do SPP podemos ver que eles não cumprem os requisitos para

navegação aérea baseada no valores indicados no GSA GNSS Market Report (EUSPA, 2019) para as Regras de Voo por Instrumentos (IFR), que permitem uma navegação sem ser pela orientação visual através de referências no terreno.

De facto, enquanto para as componentes horizontais a exatidão está bem abaixo dos 16 m requeridos em qualquer uma das soluções, para a componente vertical os valores estão acima dos 4 metros regulamentados. Como o *smartphone* estava mais exposto a interferências, devido à cauda e à fuselagem, do que a antena aérea usada como referência, ao que ainda podemos acrescentar a menor qualidade da sua antena, pode explicar os resultados.

7.3.3 Levantamento G - Aéreo

O levantamento G, também efetuado durante um voo das campanhas do projeto GRC, foi realizado nas mesmas condições do anterior, com as soluções diferenciais e em modo SPP do telemóvel a serem comparadas da mesma forma.

Na Tabela 7.22 encontramos os resultados da fixação das ambiguidades para as três combinações de soluções.

Tabela 7.22 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento G.

	Smartphone		Recetor geodésico	
	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante
Galileo	0,6%	99,4%	92,6%	7,4%
GPS	9,3%	90,7%	79,8%	20,2%
Galileo+GPS	0,1%	99,9%	74,4%	25,6%

A percentagem de fixação das ambiguidades no *smartphone* é semelhante à dos resultados anteriores. O melhor desempenho foi para o recetor com as soluções do Galileo, 92,6% respetivamente, enquanto que o GPS e a combinação dos dois sistemas tiveram taxa de sucesso de ambiguidade fixas entre 74% e 80%.

A Figura 7.20 mostra o EMQ e a Tabela 7.23 a estatística das soluções diferenciais e do posicionamento por pontos.

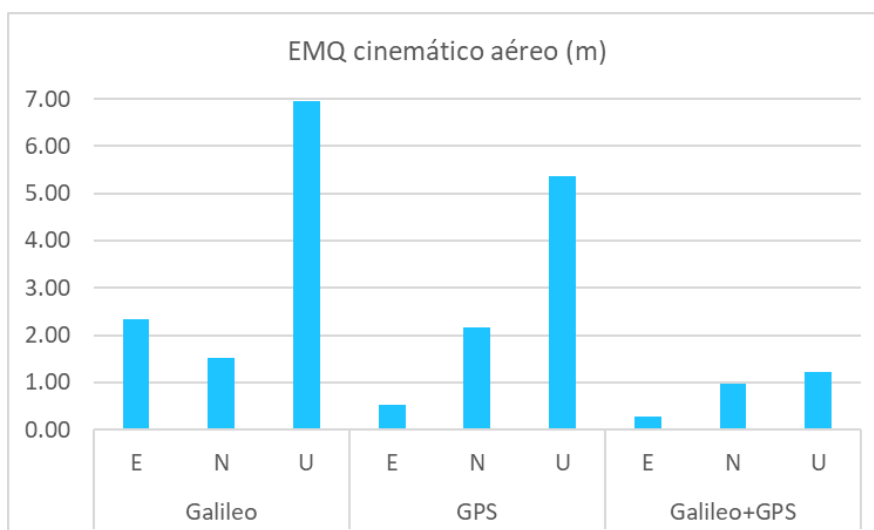


Figura 7.20 – EMQ obtido no levantamento G aéreo, em modo diferencial.

Tabela 7.23 – Estatística do levantamento G (unidades: m).

	Galileo			GPS			Galileo+GPS			
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	
Média	-2,319	-1,351	6,832	0,337	-2,137	5,299	-0,206	-0,938	1,214	DF
Desvio	0,187	0,698	1,263	0,420	0,408	0,794	0,172	0,276	0,171	
EMQ	2,326	1,521	6,948	0,538	2,176	5,358	0,268	0,978	1,226	
Média	2,240	0,641	8,141	1,924	1,116	3,104	0,359	2,723	5,408	SPP
Desvio	3,679	4,740	6,373	3,986	4,420	6,358	4,349	4,766	5,431	
EMQ	4,305	4,779	10,335	4,425	4,557	7,073	4,362	5,488	7,663	

Os resultados diferenciais aéreos do *smartphone* não foram muito bons nas soluções Galileo e GPS sozinhos, mas na combinação deles os resultados foram bem melhores, com um erro de 27 cm na coordenada E e 98 cm na N, na componente vertical o erro foi de 1,23 metros.

Se no levantamento F foram só extraídos alguns perfis onde foi possível calcular soluções diferenciais, neste levantamento temos uma amostra de resultados de todo o voo, incluindo as manobras que geralmente perturbam as medições do sinal.

Apesar disto, nota-se uma melhoria expressiva nos resultados de posicionamento por pontos para a componente vertical no entanto não suficiente para cumprir os requisitos das Regras de Voo por Instrumentos (IFR) de 4 metros.

Na Figura 7.21 e Figura 7.22 podemos ver os resíduos obtidos para as soluções calculadas para todos os sinais de cada constelação.

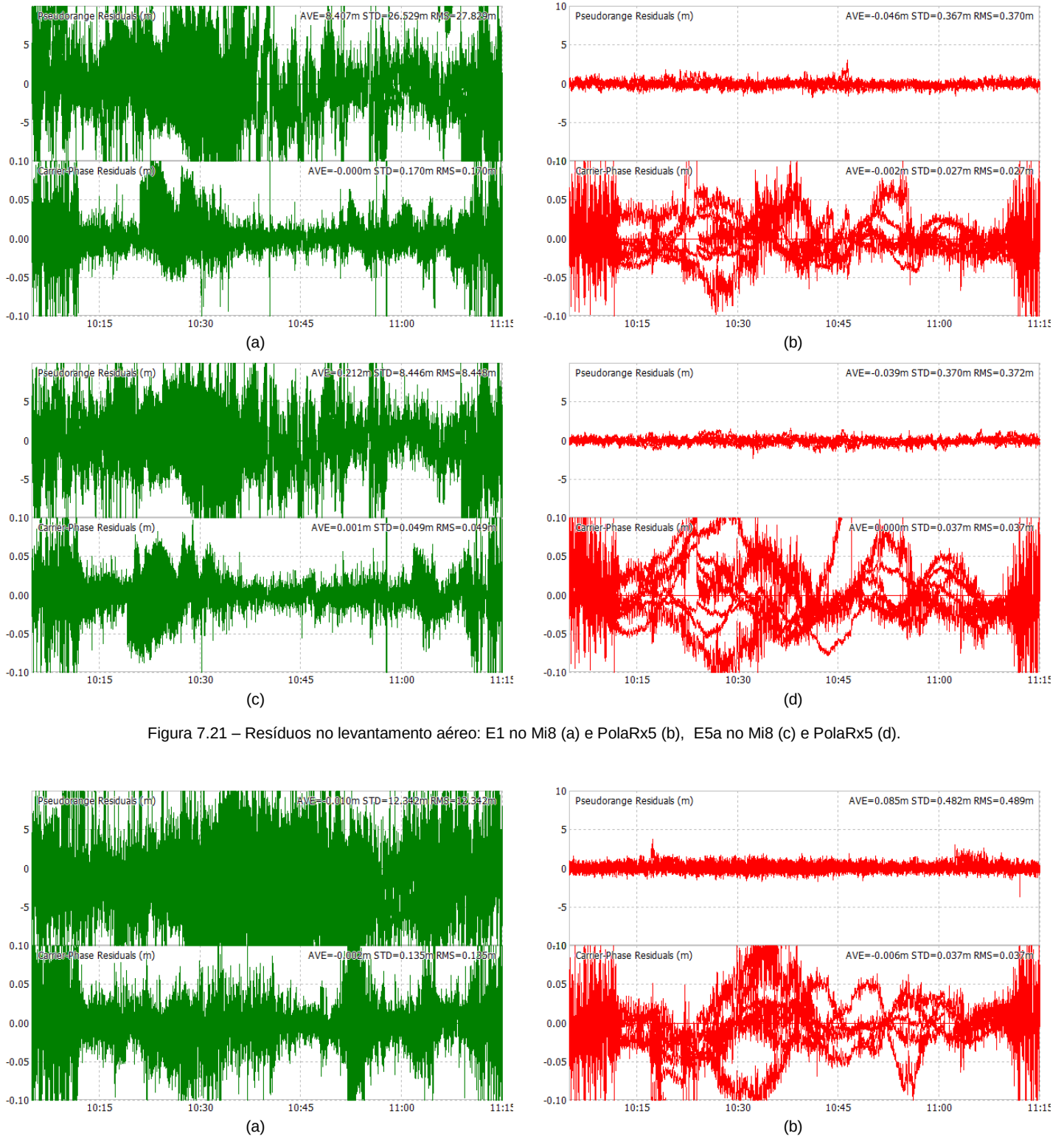


Figura 7.21 – Resíduos no levantamento aéreo: E1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b), E5a no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).

Continua.

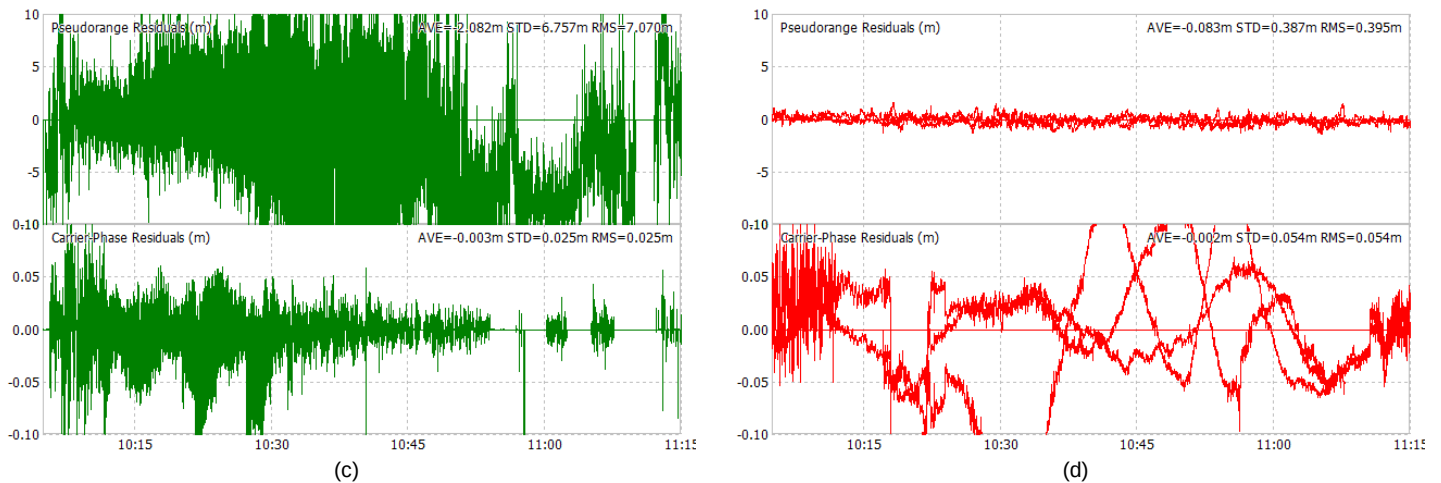


Figura 7.22 – Resíduos no levantamento hidrográfico: L1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b), L5 no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).

Podemos verificar que os resíduos apresentam um comportamento dentro do anteriormente verificado no levantamento hidrográfico, notando-se que neste caso o recetor não apresenta picos tão fortes como nesse levantamento.

As pseudodistâncias apresentam os valores maiores tanto no Galileo como no GPS, mais significativos no *smartphone* com EMQ acima dos 12 metros para os sinais E1 e L1, e abaixo deste valor para o E5a e L5. Tal como visto antes e de forma mais perceptível, vemos que as amplitudes dos resíduos são menores no recetor os valores encontram-se abaixo dos 40 cm em todos sinais.

No caso da fase da portadora, a diferença entre os dispositivos não é tão significativa, apresentando EMQ abaixo de 5 cm em E5a e L5, e 17 cm nos sinais E1 e L1, já o recetor em todos eles apresenta valores inferiores a 6 cm.

Sobre os resultados deste levantamento podemos dizer que apesar de não cumprirem os requisitos, no entanto não deixam de deixar boas indicações para o uso do *smartphone* em cenário aéreo, tanto em georreferenciação geodésica como auxiliar em navegação.

7.3.4 Levantamento H - Terrestre

No levantamento H terrestre, as soluções diferenciais e SPP do Galileo, GPS e Galileo+GPS do *smartphone* foram calculadas com as habituais configurações e comparadas com as soluções de tripla frequência Galileo+GPS do recetor geodésico, neste caso o Trimble NetR9. A Tabela 7.24 mostra a taxa de resolução da ambiguidade para as soluções calculadas.

Tabela 7.24 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento H.

	Smartphone		Recetor geodésico	
	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante
Galileo	0,6%	99,4%	n.d	n.d
GPS	2,8%	97,2%	n.d	n.d
Galileo+GPS	2,7%	97,5%	96,3%	3,7%

A taxa de soluções no *smartphone* com ambiguidade fixa é inferior a 2,8%. Comparando com recetor, verificamos uma taxa de 96,3% de soluções fixas e o *smartphone* 2,7%. Estando em linha com o anteriormente obtido nos resultados de outros levantamentos.

Na Figura 7.23 está esquematizado o gráfico do EMQ obtidos para as soluções Galileo, GPS e na sua combinação, enquanto que a Tabela 7.25 mostra a estatística dessas mesmas soluções.

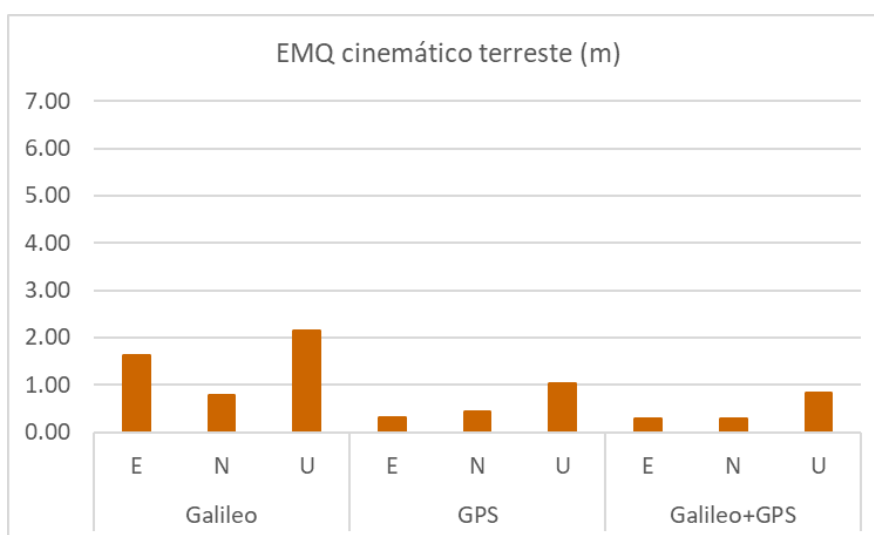


Figura 7.23 – EMQ obtido no levantamento H terrestre, em modo diferencial.

Tabela 7.25 – Estatística do levantamento H (unidades: m).

	Galileo			GPS			Galileo+GPS			
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	
Média	-0,458	-0,163	-1,005	0,047	-0,067	-0,052	0,067	0,074	-0,151	DF
Desvio	1,570	0,760	1,892	0,320	0,426	1,042	0,292	0,275	0,809	
EMQ	1,635	0,777	2,142	0,323	0,431	1,043	0,299	0,284	0,823	
Média	-1,798	-2,056	0,357	-1,538	-1,049	2,420	-1,475	-1,194	2,076	SPP
Desvio	6,671	3,962	7,137	1,565	1,790	2,570	1,426	1,568	2,197	
EMQ	6,907	4,463	7,144	2,194	2,074	3,530	2,052	1,970	3,022	

Nas soluções diferenciais os resultados obtidos mostram a melhor performance na combinação dos dois sistemas GNSS, com os valores do EMQ nas componentes horizontais inferiores a 30 cm e de 82 cm na componente vertical.

O Galileo sozinho teve os piores resultados com valores a oscilarem entre os 77,7 cm e os 2,14 metros, o que se deve a um baixo número de satélites, atingindo um mínimo de três satélites.

No posicionamento por pontos a combinação dos dois sistemas também apresenta melhores resultados, com os valores entre os 2 e 3 metros nas três componentes, enquanto pelas razões acima descritas o Galileo tem o pior desempenho com os valores entre 4,46 e 7,14 metros.

Podemos concluir, que o resultado da combinação Galileo+GPS do telemóvel em modo diferencial é bastante animador para um trabalho desta natureza, mostrando potencial para ser usado como uma ferramenta em aplicações cinemáticas com níveis de exigência inferior ao metro ou mesmo da ordem do decímetro. O seu desempenho em modo absoluto, soluções SPP na ordem dos dois metros, mostra potencial em navegação.

7.3.5 Levantamento I - Terrestre

O levantamento I teve uma abordagem com o objetivo da possibilidade de se usar o *smartphone* num contexto de possível “crowdsourcing” em navegação terrestre. As soluções diferenciais e em modo absoluto foram comparadas com as soluções de tripla frequência Galileo+GPS do recetor geodésico PolaRx5.

Na Tabela 7.26 encontramos os resultados da fixação das ambiguidades das soluções diferenciais.

Tabela 7.26 – Percentagem de resolução da ambiguidade das soluções GNSS no levantamento I.

	Smartphone		Recetor geodésico	
	Fixa	Flutuante	Fixa	Flutuante
Galileo	0,0%	100,0%	14,0%	86,0%
GPS	0,0%	100,0%	11,0%	89,0%
Galileo+GPS	1,0%	99,0%	16,0%	84,0%

A percentagem de fixação das ambiguidades no *smartphone* apresenta valores inferiores ao recetor e semelhante ao outro levantamento terrestre, mas desta vez só nas soluções da combinação do Galileo+GPS existiram algumas soluções fixas que se ficaram pelo 1%, devido à particularidade desta observação, o recetor apresenta soluções fixas entre os 84% e 89%.

A Figura 7.24 mostra o EMQ obtido e na Tabela 7.27 a estatística das soluções diferenciais e do posicionamento por pontos, para os três tipos de combinações.

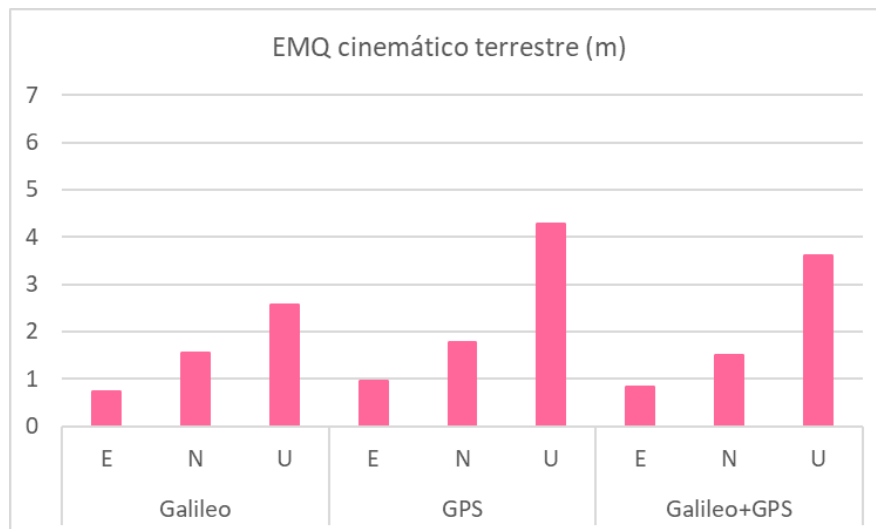


Figura 7.24 – EMQ obtido no levantamento I terrestre, em modo diferencial.

Tabela 7.27 – Estatística do levantamento I (unidades: m).

	Galileo			GPS			Galileo+GPS			
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	
Média	-0,088	0,227	-0,253	0,104	-0,536	2,841	0,059	-0,009	1,081	DF
Desvio	0,733	1,545	2,550	0,955	1,700	3,216	0,826	1,513	3,443	
EMQ	0,738	1,561	2,562	0,960	1,782	4,290	0,828	1,513	3,608	
Média	-0,372	-0,114	1,692	-0,166	-0,917	2,046	-0,224	-0,758	2,562	SPP
Desvio	2,252	4,228	7,942	2,480	4,446	6,750	1,797	3,060	5,583	
EMQ	2,282	4,228	8,119	2,485	4,538	7,051	1,811	3,151	6,142	

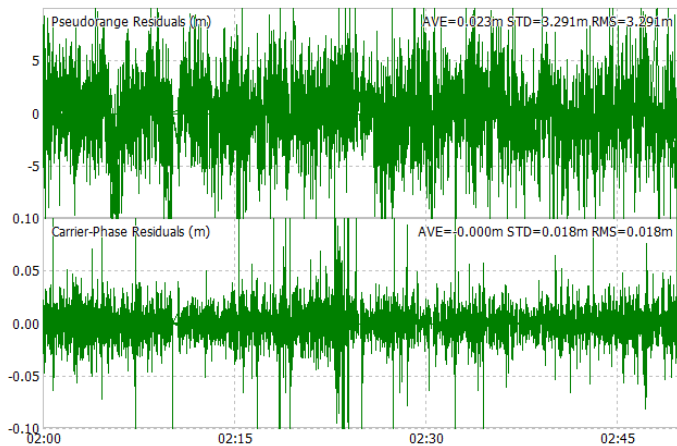
Quando comparamos estes resultados cinemáticos terrestres com os do levantamento E, notamos resultados piores, notando-se um crescimento do EMQ nas combinações Galileo+GPS e GPS, para os resultados diferenciais em todas as coordenadas, mas de forma mais expressiva na componente vertical ao ultrapassar 4 metros.

No Galileo os resultados são mais semelhantes aos do outro levantamento terrestre, e melhores que as duas combinações anteriores.

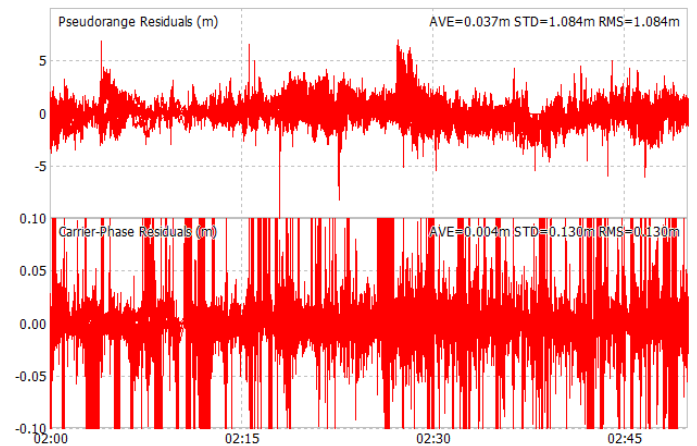
As diferenças obtidas eram expetáveis a priori e como explicado no capítulo 5, relembramos que as antenas se encontravam dentro do veículo, sobre o cockpit do veículo, o que perturbou mais significativamente os sinais, aumentando os possíveis saltos e quebras nos sinais, o que torna muito mais difícil a determinação da ambiguidade.

Nas soluções SPP só os códigos são utilizados nas equações de navegação, não existindo o problema da ambiguidade, daí que os resultados sejam semelhantes aos anteriores.

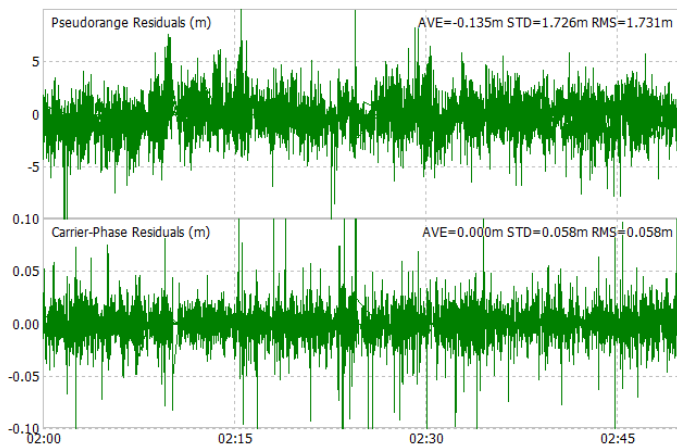
Na Figura 7.25 e Figura 7.26 podemos ver os resíduos entre as medições de código e da fase da portadora nas bandas E1/L1 e E5a/L5, e os valores estimados.



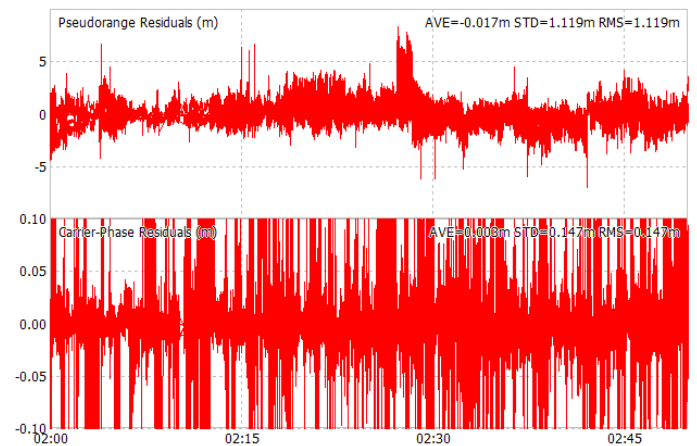
(a)



(b)

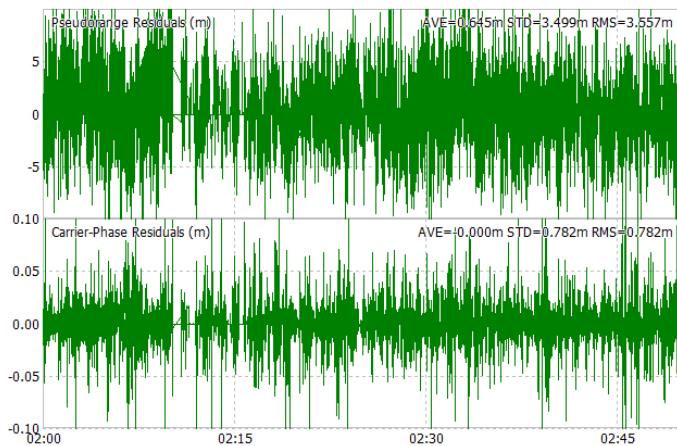


(c)

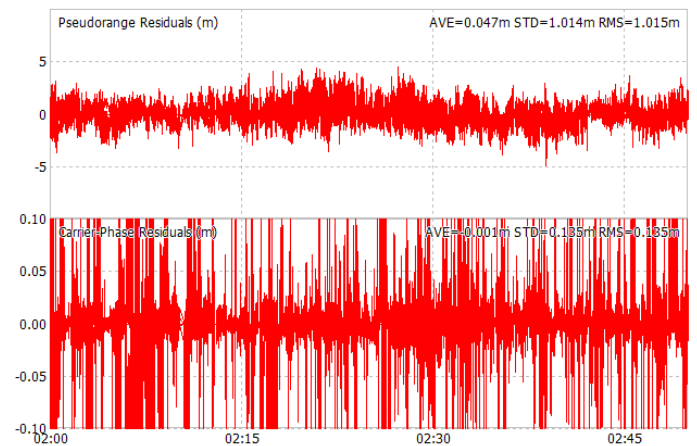


(d)

Figura 7.25 – Resíduos no levantamento terrestre: E1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b), E5a no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).



(a)



(b)

Continua.

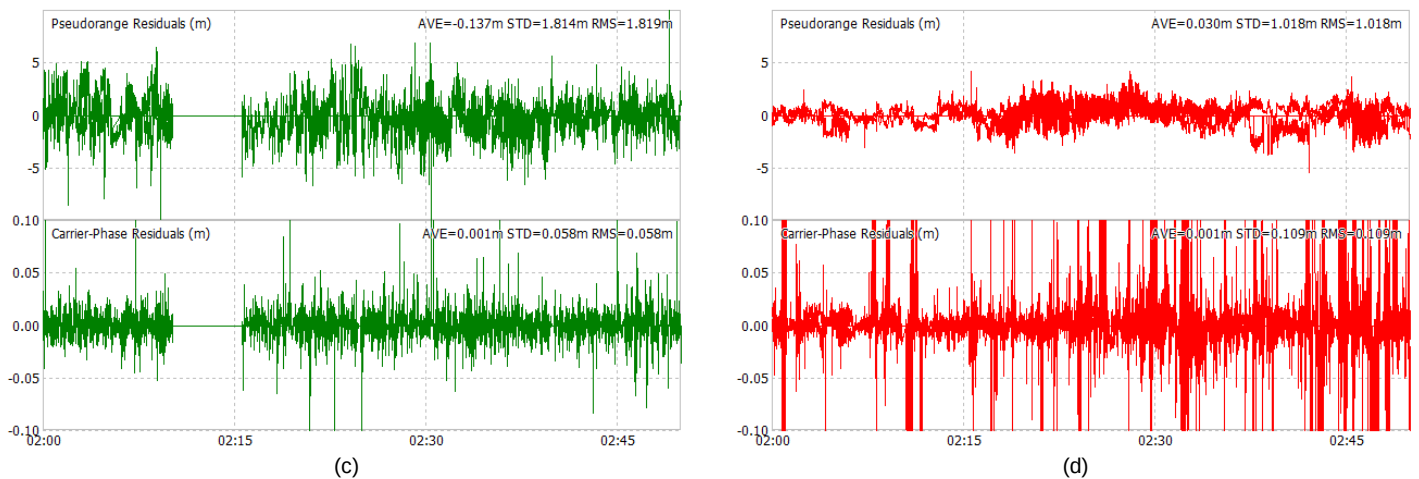


Figura 7.26 – Resíduos no levantamento terrestre: L1 no Mi8 (a) e PolaRx5 (b), L5 no Mi8 (c) e PolaRx5 (d).

Dos resíduos do *smartphone*, podemos verificar que estes apresentam valores semelhantes aos encontrados no levantamento E no rio e inferiores aos do levantamento G aéreo.

O ambiente onde se efetuou este levantamento com viadutos, tuneis e taludes, assim como a localização das antenas no veículo, não favoreceram a fixação das ambiguidades devido as interrupções dos sinais, refletindo-se graficamente pelas diversas oscilações ao longo do tempo, sendo mais notado nos gráficos das fases do recetor em todas as bandas.

No entanto, ao compararmos os dois dispositivos verificamos, que tanto nas pseudodistâncias como nas fases, e apesar de os resíduos não terem diferenças tão significativas como em anteriores resultados, nota-se ainda desvios maiores no *smartphone*.

No caso dos códigos os valores são aproximadamente 3 metros em E1 e L1 e nos dos sinais E5a e L5 os desvios encontram-se em torno dos 1,8 metros. No recetor os valores dos desvios são no caso das pseudodistâncias na ordem do 1 metro em todas as bandas.

Nos resíduos da fase portadora os valores estão mais próximos entre os dois dispositivos, com valores abaixo de 10 cm para o *smartphone*, exceto para o sinal GPS L1 com 78 cm, enquanto em oposição o sinal E1 apresenta o melhor valor dos dois dispositivos com 1,8 cm. Isto mostramos que o *smartphone* ao permitir o acesso à fase da portadora permite uma aproximação do equipamento de baixo custo ao profissional.

A lacuna existente na Figura 7.26 (c), como já explicado anteriormente, foi devido a uma falha que afetou a banda L1 do GPS, com um grande atraso no recomeço do seguimento deste sinal em alguns satélites GPS após a travessia de um túnel.

Os resultados obtidos neste levantamento terrestre em modo diferencial, apesar das condições em relação ao outro levantamento terrestre serem menos favoráveis, começando logo pela

localização das antenas, mostra-nos uma boa resposta das soluções calculadas só com medidas Galileo do telemóvel. Este facto mostra-nos o potencial que o sistema europeu tem, quando se trata de observações em cenários mais difíceis, pelo facto de usar o sinal E5a.

Quanto ao seu desempenho em modo absoluto, as soluções SPP tiveram um melhor desempenho na combinação dos dois sistemas concorrentes, Galileo e GPS, do que em modo individual. No entanto, podemos afirmar que todas as soluções se encontram numa gama de valores típicos para um posicionamento deste tipo, mesmo que em diferentes condições.

7.4 Resumo

De uma forma em geral, verificou-se que a combinação dos sistemas Galileo e GPS usando a dupla frequência do *smartphone* obteve os melhores resultados, com casos mesmo muito bons para um dispositivo desta gama, atingindo praticamente os patamares dos equipamentos geodésicos, tanto no caso de medições em modo estático como em cinemático.

Usando as constelações de forma individual nem sempre se consegue uma boa quantidade de satélites com as duas frequências, dificultando a obtenção de bons resultados, ou até em alguns casos impossibilitando o seu cálculo, sobretudo no caso do Galileo.

Nos levantamentos A, B e C de pontos cadastrais encontramos resultados bastante bons, tanto na medição direta do ponto com o *smartphone*, como na coordenação do ponto através do método fotogramétrico, com valores abaixo do EMQ de referência de 40 cm.

Por vezes não se cumpriram os requisitos de exatidão exigidos, em situações muito específicas, onde a proximidade dos pontos em construções, provocou sobretudo um maior efeito da reflexão de sinais sobre as medições diretas com o *smartphone* nesses pontos. É nestes pontos que a inclusão de técnicas de fotogrametria evidencia todo o seu potencial, respondendo de uma forma bastante efetiva no melhoramento das soluções, sobretudo se as medições GNSS da posição da câmara tiveram um tempo maior, preferencialmente entre o minuto e os 3 minutos.

Olhando para os resultados em modo estático do levantamento D, verificamos que em condições normais de observação, ou seja, com boa duração de observação e de visibilidade, e um bom número de satélites, preferencialmente da constelação Galileo, por todos os seus satélites transmitirem o sinal E5a, ao passo que os satélites GPS ainda nem todos difundem o L5, permitiu-nos obter resultados com EMQ inferiores a 30 cm nas coordenadas ENU.

Se separarmos as componentes planas Norte e Este, da componente vertical encontramos

valores abaixo dos 20 cm, mesmo para linhas de base bastante longas com tempos curtos de observação. Em observações de maior duração os valores descem abaixo dos 5 cm na maioria das vezes, o que é bastante bom num equipamento desta gama, tendo contribuído para estes resultados a boa percentagem de fixação da ambiguidade em particular no processamento das soluções diferenciais combinadas do Galileo e GPS, chegando-se a atingir um sucesso de 89%.

No caso dos levantamentos cinemáticos os erros encontrados, como é expectável, não atingem os valores dos estáticos, mas isto não depende exclusivamente da gama de equipamento utilizada; as observações em movimento são suscetíveis a apresentarem erros maiores.

Do conjunto de todos os trabalhos cinemáticos os erros mais pequenos foram encontrados nas componentes planas, o que também não é surpresa, visto que a componente vertical é por norma a que apresenta resultados piores, com o valor de 9,5 cm na coordenada Este do sistema Galileo no avião a ser o melhor valor encontrado. Ainda nos trabalhos aéreos, obtiveram-se os melhores valores para as coordenadas Norte e vertical, respetivamente, no GPS com 21,2 cm, enquanto que a combinação Galileo+GPS obteve na componente vertical um valor de 19,5 cm.

No trabalho no barco o Galileo também apresentou melhores valores em relação ao GPS, nas componentes N com 22,7 cm e U com 66 cm, superando os resultados do GPS sozinho e mesmo da combinação dos dois sistemas. O GPS só foi melhor na coordenada E com 38,4 cm.

Nos levantamentos terrestres, obtiveram-se para as coordenadas ENU respetivamente os valores de 28,4 cm em E, 29,9 cm em N e 82,3 cm em U, para a combinação Galileo+GPS.

Quando analisamos a taxa de soluções do *smartphone* com ambiguidades fixas nos levantamentos cinemáticos verificamos ser inferior à dos recetores geodésicos, não superando o 14% no melhor caso.

Dentro dos trabalhos cinemáticos os resultados do posicionamento por pontos SPP, também é nos aéreos que encontramos os melhores valores com 2,0 m, 3,4 m e 5,1 m, respetivamente nas componentes Este, Norte e altitude, da combinação Galileo+GPS.

No caso do levantamento hidrográfico os melhores resultados nas coordenadas ENU foram, respetivamente 2,5 m em Este e 2,1 m em Norte nas soluções Galileo, e 5,4 m nas soluções verticais da combinação Galileo+GPS.

Os levantamentos em terra mostram valores na ordem dos 2 metros como melhores resultados nas componentes no plano, Este e Norte, e em torno dos 3 metros na componente vertical, todos relativos a soluções da combinação do sistema Galileo e GPS.

A situação à data dos levantamentos não era ainda a mais favorável, pois como referido nem todos os satélites GPS possuem L5 e a constelação Galileo ainda era algo esparsa, no entanto num futuro muito próximo é esperada uma melhoria em ambos neste capítulo, o que irá influenciar de uma forma muito positiva a qualidade dos resultados em qualquer uma das três combinações usadas no cálculo das soluções.

8 Conclusões

A primeira conclusão que ressalta deste trabalho é o grande potencial da aplicabilidade do *smartphone* como ferramenta de georreferenciação GNSS de baixo custo, mas mantendo um bom nível de exatidão, tirando partido das capacidades do sistema Galileo e dos dados em bruto da sua dupla frequência E1/E5a. No entanto, por esta constelação ainda se encontrar em fase de finalização, a melhor abordagem assentou na sua combinação com o sistema GPS, que também ainda não se encontra totalmente modernizado, com só cerca de metade dos satélites a transmitirem o sinal L5. Foi com base nestas capacidades que nos centrámos nos trabalhos de posicionamento de pontos cadastrais, como principal desafio deste trabalho. Podemos afirmar que este equipamento pode ser muito eficiente devido à sua relação preço/exatidão, no apoio a trabalhos de cadastro.

Os resultados obtidos, com erros inferiores a 30 cm em planimetria, ficam abaixo da referência de 40 cm exigidos em pontos de cadastro rústico, quer na medição direta de pontos cadastrais, quer na utilização da metodologia fotogramétrica descrita, com recurso às imagens de alta resolução que este dispositivo permite adquirir. Apesar de não atingir a performance de um recetor geodésico, este equipamento pode equiparar-se a recetores GNSS de utilização específica (i.e., de utilização profissional) de custo mais elevado. Em determinados casos, os erros chegaram a ser inferiores a 16 cm e mesmo com alguns valores abaixo dos 10 cm para observações diretas do ponto da estrema, com durações de 5 a 10 minutos.

Na metodologia fotogramétrica a extração de coordenadas dos pontos cadastrais, a partir do modelo tridimensional definido pela nuvem de pontos densa, apresentou dificuldades em cenários onde o objeto se encontrava isolado no terreno. Mesmo com um aumento do número de imagens a situação não foi resolvida. Por outro lado, nos objetos materializados em construções este método revelou-se muito eficiente e preciso, sobretudo nos casos de maior tempo de observação GNSS.

Neste aspeto, um intervalo de 3 minutos revelou-se um bom compromisso, atendendo à adoção de registar 5 fotografias, por forma a garantir o mínimo de 3 imagens necessárias no processo de alinhamento. Com este intervalo, o levantamento terá entre 15 e 20 minutos por ponto cadastral, mas em situações mais favoráveis de observação, como a boa visibilidade de um bom número de satélites, aumentando desta forma a obtenção de soluções com maior exatidão. O intervalo pode ser reduzido para cerca do minuto, reduzindo o processo para levantamentos inferiores a 10 minutos. De forma, a assegurar resultados que satisfaçam os valores de referência, sobretudo nas observações mais rápidas, aconselha-se a um planeamento prévio das observações e na monitorização das constelações durante o trabalho no campo, para evitar

possíveis janelas com menor número de satélites e de pior geometria.

A resposta às dificuldades dos pontos isolados pode ser dada pela aplicação do método de medição direta no ponto com o *smartphone*, até porque em muitos destas situações a sua localização reúne condições suficientes para efetuar as observações dos sinais GNSS. No caso dos pontos em construções nem sempre essas condições se encontram reunidas, sobretudo devido a uma pior visibilidade e a reflexão de sinais.

Com base no apresentado acima, podemos afirmar que, apesar de nenhuma das metodologias ser por si só a solução ideal na georreferenciação de pontos de cadastro com recurso a um *smartphone*, o dispositivo permite que no terreno possamos fazer a melhor escolha e assim combinar as duas abordagens, fazendo deste uma ferramenta de uso duplo.

Apesar de a componente vertical não ter grande importância no cadastro, salienta-se que alguns resultados tiveram erros abaixo dos 30 cm em ambas metodologias. Não sendo a informação essencial para o fim cadastral, pode ainda assim ser de alguma utilidade.

Desta forma, no contexto atual do cadastro simplificado gerido pela estrutura eBUPi, em que se procura dar uma resposta rápida e eficiente na identificação do território, com estes resultados este equipamento com tecnologia inovadora poderá ser um valioso contributo para este processo pelo seu baixo custo e exatidão, mas também pela simplicidade de manuseamento. Aliás, a inovação tecnológica faz parte dos desígnios deste projeto, como referido no relatório do primeiro ano de expansão do BUPi: “Outra das dimensões do trabalho passa pela inovação tecnológica: para que o processo de identificação do território seja mais rápido, é necessária inclusão de novas fontes de informação.” (2021).

A elevada versatilidade encontrada neste equipamento na aquisição de dados GNSS colocou-nos outras questões para além do cadastro, levando à exploração do seu potencial em trabalhos de natureza estática ou cinemática. Essas outras aplicações foram consideradas numa avaliação global da performance do equipamento, mas algumas delas, como o posicionamento a grande distância, poderão ter interesse indireto no levantamento cadastral.

Num contexto de medições em modo estático surgiu uma questão que no nosso território não se coloca por as redes de estações permanentes terem uma boa distribuição com uma cobertura densa. As linhas de base são da ordem dos 40 km, permitindo um elevado desempenho na realização do posicionamento diferencial. O mesmo cenário não se encontra em determinadas zonas do mundo, onde nos deparamos com um défice destas infraestruturas. Nestes locais a utilização das metodologias acima indicadas para coordenar pontos cadastrais ou em outros tipos de aplicações, pode ser extremamente difícil. Deste modo, a avaliação do

potencial do *smartphone* neste tipo de posicionamento, com estações localizadas a grandes distâncias, de mais de 100 km, foi também um trabalho inovador, tendo sido salientado durante a revisão do artigo publicado em dezembro de 2021(Magalhães et al. (2021)).

Os resultados obtidos foram bastante bons, mostrando que mesmo na linha de base mais longa, com 645 km, localizada no norte de África em Ceuta, foi possível obter erros inferiores a 30 cm. O método pode ser usado em aplicações de densificação de redes de apoio, úteis para o cadastro, ou para a cartografia, em zonas remotas. Nos casos de observações de maior duração chegamos a encontrar valores inferiores a 10 cm, para esta linha de base, mas também nas linhas de base situadas aproximadamente entre os 100 e 300 km, como os casos das estações de Cascais e Vigo.

Neste contexto, uma vantagem do *smartphone* já referida anteriormente, e que adquire maior importância em locais com poucos recursos, tem a ver com as limitações orçamentais para a aquisição de equipamentos profissionais mais caros. Essa realidade, que afeta por exemplo o continente africano, pode ser contornada com o baixo custo de um *smartphone*. Uma outra vantagem está relacionada com o transporte de equipamentos, que nem sempre é um processo fácil, estando sujeito a diversas regras e autorizações, enquanto que ninguém questionará o telemóvel.

Os resultados obtidos nos trabalhos cinemáticos para as soluções diferenciais para as combinações Galileo, GPS e Galileo+GPS, foram bastante interessantes nos ambientes terrestre, fluvial e aéreo. Há potencial para a exploração deste tipo de dispositivos de baixo custo em levantamentos cinemáticos independentemente do meio. Os resultados mais consistentes nas coordenadas foram obtidos com a combinações Galileo+GPS, com a maioria dos erros abaixo dos 20 cm, porém o menor erro de 9,5 cm foi obtido num dos voos nas coordenadas planimétricas das soluções Galileo.

Considerando o posicionamento standard (SPP), baseado apenas em códigos, nos trabalhos cinemáticos os melhores valores para a planimetria foram de 2,0 m e na altimetria 3,0 m, para Galileo+GPS em trabalho terrestre. No caso aéreo a exatidão não cumpre os requisitos para navegação aérea. Apesar das componentes horizontais estarem bem abaixo dos 16 m requeridos, maioritariamente a rondar os 5 m, para a componente vertical os valores estão acima dos 4 metros exigidos, sendo 5 m o melhor valor para o Galileo+GPS.

De todos os resultados encontrados ficou bem vincado que estes são em geral muito prometedores, sendo em alguns deles bastante bons para um dispositivo desta gama, que no início do trabalho levantava algumas dúvidas sobre o seu potencial no alcance das exigências da exatidão GNSS, devido sobretudo à qualidade inferior da sua antena, em relação aos

equipamentos geodésicos. No entanto, no final deste trabalho, essas dúvidas encontram-se esclarecidas devido aos resultados com exatidão decimétrica e centimétrica ao longo dos vários levantamentos efetuados em diferentes modos. Para tal, contribuiu o acesso às fases e aos códigos em bruto da dupla frequência dos satélites Galileo e GPS, diminuindo logo à partida o tempo de observação com a maior rapidez na resolução das ambiguidades, mas também trazendo melhorias sobre os efeitos ionosféricos e de reflexão de sinais. No caso dos resultados de qualidade menor, as expectativas de uma exploração mais aprofundada das metodologias ou técnicas poderá trazer uma melhoria dos resultados.

Na generalidade do trabalho, os resultados só com a constelação Galileo, em determinadas situações, não foram tão bons devido à geometria e ao número de satélites. É difícil satisfazer estes dois aspetos em alguns períodos por a constelação não se encontrar finalizada, tendo por esse motivo sido necessário fazer testes em horários noturnos. Além disso, a modernização da constelação GPS ainda não está concluída e, portanto, o sinal L5 não é transmitido por todos os satélites, o que também dificulta a obtenção de soluções só com esta constelação em duas frequências.

Outra evolução a ser explorada neste equipamento é o posicionamento em tempo real, método RTK, mas para tal será necessário o desenvolvimento de aplicações robustas e adequadas a este modo, o que poderá não ser fácil de alcançar devido à complexidade deste tipo de abordagem num equipamento deste tipo e que só poderá ser ultrapassado com programadores especializados. No caso dos levantamentos de pontos cadastrais, trazer uma base de coordenadas do campo, seria uma forma de agilizar o processo. Havendo um posicionamento RTK poderia pensar-se num eventual uso destas coordenadas para colocar nos metadados das fotografias, em substituição das habituais do posicionamento por códigos. Desta forma, as fotos ficariam desde logo georreferenciadas, sendo apenas necessário carregá-las nos programas de construção de modelos tridimensionais em gabinete.

Os resultados dos estudos efetuados deixam em aberto um futuro promissor para o posicionamento de exatidão em *smartphones*, numa diversidade de aplicações, em particular para a finalidade do levantamento cadastral.

Referências

- 3Dflow SRL. (2022). *3df-zephyr-free*. Obtido em 07 de 01 de 2022, de <https://www.3dflow.net/>: <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-free/>
- Agisoft. (2021). *Agisoft Metashape*. Obtido em 13 de 07 de 2021, de Agisoft : <https://www.agisoft.com>
- AliceVision. (2021). *#meshroom*. Obtido em 20 de 12 de 2021, de AliceVision: <https://alicevision.org/#meshroom>
- Android Developers. (2019). *Raw GNSS Measurements*. Obtido de Android Developers: <https://developer.android.com/>
- Broadcom. (2017). *BCM47755 Third-Generation GNSS Location Hub with Dual Frequency Support*. Obtido de <https://www.broadcom.com/products/wireless/gnss-gps-socs/bcm47755>
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. (2021). *BKG Ntrip Client - BNC*. Obtido de BKG GNSS Data Center: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/bnc>
- Carrivick, J., Quincey, D., & Smith, M. (2016). *Structure from motion in the geosciences*. Wiley Blackwell.
- Casella, V., Franzini, M., & Manzano, A. (2021). GNSS AND PHOTOGRAMMETRY BY THE SAME TOOL: A FIRST EVALUATION OF THE LEICA GS18I RECEIVER. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, (pp. 709-716). doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-709-2021
- Centre National d'Études Spatiales. (2021). Obtido de CNES: <https://cnes.fr>
- Chiang, K.-W., Le, D., Duong, T., & Sun, R. (2020). The Performance Analysis of INS/GNSS/V-SLAM Integration Scheme Using Smartphone Sensors for Land Vehicle Navigation Applications in GNSS-Challenging Environments. *Remote Sens.*, 12, 1732. doi:10.3390/rs12111732
- Chio, S.-H., & Hou, K.-W. (2021). Application of a Hand-Held LiDAR Scanner for the Urban Cadastral Detail Survey in Digitized Cadastral Area of Taiwan Urban City. *Remote Sens.*, 13, . <https://doi.org/10.3390/rs13244981>
- Cienciała, A., Mikulska, K. S., & Sobura, S. (2021). Credibility of the cadastral data on land use and the methodology for their verification and update. *Land Use Policy*, 102, 105204. doi:10.1016/j.landusepol.2020.105204
- Contreras-Naranjo, J. C., Wei, Q., & Ozcan, A. (2016). Mobile Phone-Based Microscopy, Sensing, and Diagnostics. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Volume: 22, Issue: 3. doi:10.1109/JSTQE.2015.2478657
- Costa, EUSPA. (28 de Dezembro de 2021). *At EUSPA, we do: After a year of action, we are ready for a year of delivery!* Obtido em 30 de Dezembro de 2021, de LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/euspa-we-do-after-year-action-ready-delivery-rodrigo-da-costa/?trackingId=Gqm6PM%2FQS5yO0tGaEMCvCQ%3D%3D>
- Critchley-Marrows, J., Fortunato, M., & Roberts, W. (March/April de 2020). Accuracy for the Masses. *Inside GNSS*, pp.58-65. Obtido em 5 de Agosto de 2021, de <https://insidegnss.com/accuracy-for-the-masses>
- Crocetto, N., Pingue, F., Ponte, S., Pugliano, G., & Sepe, V. (2008). Ionospheric error analysis in GPS measurements. *Ann. Geophys.*, 51, 585–589. doi: <https://doi.org/10.4401/ag-4456>
- Dabov, P., Grasso, N., & Piras, M. (2019). Smartphone-Based Photogrammetry for the 3D Modeling of a Geomorphological Structure. *Appl. Sci.*, 9(18), 3884. doi:10.3390/app9183884
- DGT - Direção-Geral Território. (2021). *Cadastro Geométrico da Propriedade Rústica*. Obtido de dgTerritorio: <https://www.dgterritorio.gov.pt>
- DGT. (2021). *Sistemas de Referência*. Obtido em 2021, de Direção Gerl do Território: <https://www.dgterritorio.gov.pt/geodesia/sistemas-referencia>
- Diário da República. (30 de julho de 2013). Regulamento do Projeto Geopredial. *Diário da República*, 2.ª série — N.º 145 .

- Direção de Serviços de Informação Cadastral – DGT. (2021). (Direção-Geral do Território) Obtido em 1 de Dezembro de 2021, de https://www.dgterritorio.gov.pt/sites/default/files/ficheiros-cadastral/NETCP_DelimDemQD_v1_0.pdf
- eBUPi – Estrutura de Missão Para a Expansão do Sistema de Informação Cadastral Simplificado. (2021). *1 ano de expansão do BUPi*. Obtido em 2021, de BUPi - Balcão Único do Prédio: <https://blog.bupi.gov.pt/1-ano-expansao-do-bupi>
- eBUPi – Estrutura de Missão Para a Expansão do Sistema de Informação Cadastral Simplificado. (2021). *BUPi - Balcão Único do Prédio*. Obtido em 2021, de BUPi - Balcão Único do Prédio: <https://bupi.gov.pt>
- El-Ashmawy, K. L. (2017). Using smart phones for deformations measurements of structures. *Geodesy and Cartography*, 43(2), 66-72. doi: <https://doi.org/10.3846/20296991.2017.1330770>
- EUREF Permanent Network. (2021). *EUREF Permanent GNSS Network*. Obtido de EUREF Permanent GNSS Network: <https://epncb.eu/>
- European Commission. (2021). *Galileo Drawing Competition*. (E. Commission, Produtor) Obtido de Defence Industry and Space: https://ec.europa.eu/defence-industry-space/eu-space-policy/galileo/galileo-drawing-competition_pt
- European GNSS Service Center. (2021). *System | European GNSS Service Centre*. Obtido de European GNSS Service Center: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/system>
- European GNSS Service Centre. (2021). *Orbital and Technical Parameters*. Obtido de European GNSS Service Centre: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/orbital-and-technical-parameters>
- European Space Agency. (2017). *Loading Galileo*. Obtido de ESA: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2017/12/Loading_Galileo
- European Union. (2021). *Open Service Signal-In-Space Interface Control Document (OS SIS ICD)* (Vol. 2.0). European Union. Obtido de <https://www.gsc-europa.eu/electronic-library/programme-reference-documents>
- EUSPA. (2017). *White Paper on using GNSS Raw Measurements on Android devices*. GSA. doi:doi:10.2878/449581
- EUSPA. (2019). *GNSS Market Report* (6 ed.). EUSPA. doi:10.2878/031762
- EUSPA. (2020). *GNSS Raw Measurements Task Force*. Obtido de European Union Agency for the Space Programme: <https://www.euspa.europa.eu/euspace-applications/gnss-raw-measurements>
- Everett, T. (2021). *rtkexplorer*. Obtido de github: <https://github.com/rtklibexplorer/RTKLIB>
- FLAMINGO. (2017). *FLAMINGO*. Obtido em 2021, de FLAMINGO GNSS: <https://www.flamingognss.com/>
- Forsyth, D. A., & Ponce, J. (2012). *COMPUTER VISION* (Second ed.). Pearson Education, Inc.,
- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 32 , Issue 8, 1362–1376. doi:10.1109/TPAMI.2009.161
- Geo++ GmH. (2020). *Geo++ RINEX Logger (beta)*. Obtido de Google Play: https://play.google.com/store/apps/details?id=de.geopp.rinexlogger&hl=pt_PT&gl=US
- GmbH, G. (2018). *Home - Geo++ | GNSS technology*. Obtido em 2021, de GEOPP: <https://www.geopp.de/>
- Gómez-Gutiérrez, Á., De Sanjosé-Blasco, J. J., De Matías-Bejarano, J., & Berenguer-Sempere, F. (2014). Comparing Two Photo-Reconstruction Methods to Produce High Density Point Clouds and DEMs in the Corral del Veleta Rock Glacier (Sierra Nevada, Spain). *Remote Sensing*, 6, 5407-5427. doi: <https://doi.org/10.3390/rs6065407>
- GPS.GOV. (2021). *GPS.gov: Control Segmen*. (U.S. government) Obtido de GPS GOV: <https://www.gps.gov/>
- Groves, P., & Adjrad, M. (2017). 3D-mapping-aided GNSS exploiting Galileo for better accuracy in dense urban environments. *European Navigation Conference (ENC)*. Lausanne, Swiss. doi:10.1109/EURONAV.2017.7954199

- Groves, P., & Adjrard, M. (2019). Performance assessment of 3D-mapping-aided GNSS part 1: Algorithms, user equipment, and review. *Navigation*, 66, 341-362. doi:DOI: 10.1002/navi.288
- GSA. (2019). *GNSS Market Report*. Luxembourg: European GNSS Agency. doi:10.2878/031762
- Gura, D. A., & Nedyakina, A. P. (2021). Geodesic provision for cadastral works: development prospects. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1083 , p. 012057. 012057: IOP Publishing Ltd. doi:10.1088/1757-899X/1083/1/012057
- He, G. B., & Li, L. L. (2020). RESEARCH AND APPLICATION OF LIDAR TECHNOLOGY IN CADASTRAL SURVEYING AND MAPPING. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. . XLIII-B1-2020*, pp. 33-37. ISPRS. doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-33-2020
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS Global Navigation Satellite Systems*. Austria: Springer.
- Hsu, G.-S., Wu, C.-Y., & Lin, J.-S. (2009). Real-time 3-D Object Recognition Using Scale. *Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents* (pp. 239-244). Wellington, New Zealand: IEEE.
- IGN (French National Geographic Institute) and ENSG (French National School for Geographic Sciences). (2018). *MicMac*. Obtido em 20 de 12 de 2021, de MicMac: <https://micmac.ensg.eu/index.php/Accueil>
- IGS. (2020). *RINEX Working Group*. Obtido de <https://www.igs.org/wg/rinex/>
- IGS RINEX Working Group e RTCM-SC104. (2018). *RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 3.04*. IGS.
- Inside GNSS. (28 de February de 2010). *UK Focuses on GPS Jamming & Interference*. Obtido de Inside GNSS: <https://insidegnss.com/uk-focuses-on-gps-jamming-interference/>
- International GNSS Service. (2021). *Products International GNSS Service*. Obtido de International GNSS Service: <https://igs.org/>
- International Telecommunication Union. (2021). *About International Telecommunication Union (ITU)*. Obtido de International Telecommunication Union (ITU): <https://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>
- ISTA - Institute of Space Technology & Space Applications. (2021). *ISTA Logger*. (Universität der Bundeswehr München) Obtido de google Play: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ista.android.apps.location.gps.gnssllogger&hl=pt_PT&gl=US
- Jaud, M., Kervot, M., Delacourt, C., & Bertin, S. (2019). Potential of Smartphone SfM Photogrammetry to Measure Coastal Morphodynamics. *Remote Sens*, 11, 2242. doi:<https://doi.org/10.3390/rs11192242>
- Jiao, C., & Hurni, L. (2021). A survey on the evolution of the Chinese cadastral system. *Proc. Int. Cartogr. Assoc*, 4, p. 47. Proc. Int. Cartogr. Assoc., 4, 47, <https://doi.org/>, 2021. doi:10.5194/ica-proc-4-47-2021
- Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2017). *Understanding GPS/GNSS Principles and Applications* (3rd ed.). Boston, London: Artech House.
- Klobuchar, J. (1987). Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *AES-23 n.3*, 325-331. doi:10.1109/TAES.1987.310829
- Koeva, M., & Elberink, S. O. (2016). Challenges for Updating 3D Cadastral Objects using LiDAR and Image-based Point Clouds. *5th International FIG 3D Cadastre Workshop*, (pp. 169-182). Athens, Greece. Obtido de http://www.gdmc.nl/3DCadastres/workshop2016/programme/Workshop2016_09.pdf
- Kysel, P., & Hudecova, L. (2021). Cadastral Survey of a Fishpond Using UAV Photogrammetry. *FIG e-Working Week 2021, Smart Surveyors for Land and Water Management - Challenges in a New Reality*, (p. 10952).
- Laurichesse, D., Rouch, C., Marmet, F.-X., & Pascaud, M. (2017). Smartphone Applications for Precise Point Positioning. *Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017)*, (pp. 171-187). Portland, Oregon. doi:<https://doi.org/10.33012/2017.15149>

- Leica Geosystems AG. (2020). *Leica GS18 I GNSS RTK Rover*. Obtido em 20 de Agosto de 2021, de Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-gs18i>
- Leick, A. (2004). *GPS Satellite Surveying* (3 ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. Obtido em 2022, de https://books.google.pt/books?id=4qE6xYjYSHgC&printsec=frontcover&hl=pt-PT&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Liu, Q., Gao, C., Peng, Z., Zhang, R., & Shang, R. (2021). Smartphone Positioning and Accuracy Analysis Based on Real-Time Regional Ionospheric Correction Model. *Sensors* 3879. *Sensors*, 21(11)(3879). doi:<https://doi.org/10.3390/s21113879>
- Liu, W., Shi, X., Zhu, F., Tao, X., & Wang, F. (2019). Quality analysis of multi-GNSS raw observations and a velocity-aided positioning approach based on smartphones. 2019, 63, 2358–2377. *Advances in Space Research*, 63(8), 2358-2377. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.004>
- Lowe, D. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, Volume 60, Issue 2, 91-110. doi:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94
- M. Fortunato, J. C.-M. (2019). Enabling High Accuracy Dynamic Applications in Urban Environments Using PPP and RTK on Android Multi-Frequency and Multi-GNSS Smartphones. *European Navigation Conference*, (pp. 1-9). doi:10.1109/EURONAV.2019.8714140.
- Magalhães, A., Bastos, L., Maia, D., & Gonçalves, J. (2021). Relative positioning in remote areas using a GNSS dual frequency Smartphone. *Sensors*, 21(24), 8354. doi:<https://doi.org/10.3390/s21248354>
- Magalhães, A., Gonçalves, J. A., & Bastos, L. (2021). Assessing Galileo Positioning Using a Smartphone in an Airborne Platform. *WiP Proceedings of the International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS 2021)*. 2880, p. paper10. CEUR-WS. Obtido de <http://ceur-ws.org/Vol-2880/paper10.pdf>
- Masiero, A., Fissore, F., Pirotti, F., Guarnieri, A., & Vettore, A. (2016). Toward the use of smartphones for mobile mapping. *Geo-spatial Information Science*, 19:3, 210-221. doi:10.1080/10095020.2016.1234684
- Massarweh, L., Fortunato, M., & Gioia, C. (2020). Assessment of Real-time Multipath Detection with Android Raw GNSS Measurements by Using a Xiaomi Mi 8 Smartphone. *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, (pp. 1111-1122). doi:10.1109/PLANS46316.2020.9110169
- Moulon, P. (2014). *openMVG: "open Multiple View Geometry"*. Obtido em 21 de 12 de 2021, de Imagine- Research Group in Computer Vision, Machine Learning and Optimization: <http://imagine.enpc.fr/~moulonp/openMVG/>
- Navarro-Gallardo, M., Bernhardt, N., Kirchner, M., Musial, J. R., & Sunkevic, M. (2017). Assessing Galileo Readiness in Android Devices Using Raw Measurements. *Proceedings of the 30th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017)*, (pp. 85-100). Portland, USA.
- Navipedia. (2014). *Antennas*. (ESA, Produtor) Obtido de Navipedia: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Antennas>
- Navipedia. (2014). *Receiver Operations - Navipedia*. (ESA, Produtor) Obtido de Navipedia: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Receiver_Operations
- Navipedia. (2018). *Generic Receiver Description - Navipedia*. (ESA, Produtor) Obtido de Navipedia: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Generic_Receiver_Description
- Navipedia. (2019). *Navipedia*. (GNSS Science Support Centre ESA) Obtido de <https://gssc.esa.int/navipedia>
- Navipedia. (2020). *CDMA FDMA Techniques - Navipedia*. (ESA, Produtor) Obtido de Navipedia: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/CDMA_FDMA_Techniques
- Navipedia. (2020). *GPS Services*. (ESA, Produtor) Obtido de Navipedia: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Services
- Niederheiser, R. M. (2016). Deriving 3d point clouds from terrestrial photographs comparison

- of different sensors and software. In *The International Archives*, 41, pp. 685-692.
doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B5-685-2016
- Nottingham Scientific Ltd. (2020). *FLAMINGO GNSS*. Obtido de Google Play:
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.eu.nsl.rinexON&hl=pt_PT&gl=US
- OpenDroneMap. (2022). *OpenDroneMap*. Obtido em 09 de 01 de 2022, de OpenDroneMap:
<https://www.opendronemap.org/>
- OpenSeaMap. (2021). *OpenSeaMap*. Obtido de OpenSeaMap: <http://openseamap.org/>
- OpenStreetMap. (2021). *OpenStreetMap*. Obtido de OpenStreetMap:
<https://www.openstreetmap.org>
- OSAE. (2021). *Geopredial*. (Ordem dos Solicitadores e dos Agentes de Execução) Obtido de Geopredial: <https://www.geopredial.pt>
- P. Lourenço, A. T. (2021). Assessing the performance of different OBIA software approaches for mapping invasive alien plants along roads with remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 95(102263).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102263>.
- Paziewski, J., Fortunato, M., Mazzoni, A., & Odolinski, R. (April de 2021). An analysis of multi-GNSS observations tracked by recent Android smartphones and smartphone-only relative positioning results. *Measurement*, 175.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109162>
- Paziewski, J., Sieradzki, R., & Baryla, R. (2019). Signal characterization and assessment of code GNSS positioning with low-power consumption smartphones. *GPS Solut.* 2019, 23, 98. *GPS Solutions*, 23(98). doi:<https://doi.org/10.1007/s10291-019-0892-5>
- Pesyna, K. M., Heath, R. W., & Humphreys, T. E. (2014). Centimeter Positioning with a Smartphone-Quality GNSS Antenna. *oceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014)*, (pp. 1568-1577). Tampa, FL, USA.
- Petovello, M., & O'Driscoll, C. (2018). What is navigation message authentication? (InsideGNSS, Ed.) *Inside GNSS, Jan-Feb 2018*, 26-31. Obtido de <https://insidegnss.com/wp-content/uploads/2018/04/janfeb18-SOLUTIONS.pdf>
- Pirazzi, G., Mazzoni, A., Biagi, L., & Crespi, M. (2017). Preliminary Performance Analysis with a GPS+Galileo Enabled Chipset Embedded in a Smartphone. *Proceedings of the 30th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017)*, (pp. 101-115). Portland, USA.
- Pix4D. (2022). *Pix4D*. Obtido em 09 de 01 de 2022, de Pix4D: <https://www.pix4d.com/>
- Rama Rao, B., Kunysz, W., Fante, R., & McDonald, K. (2013). *GPS/GNSS Antennas*. Boston, London: Artech House.
- Regard3D. (2018). *WELCOME TO THE HOME OF REGARD3D*. Obtido em 20 de 12 de 2021, de Regard3D: <http://www.regard3d.org/index.php>
- Ribera, C. F., Navarro, G. M., & Pérez, L. J. (2022). Evaluating the use of old cadastral maps. *Land Use Policy*, 114(105984). doi:10.1016/j.landusepol.2022.105984
- Robustelli, U., Paziewski, J., & Pugliano, G. (2021). Observation Quality Assessment and Performance of GNSS Standalone Positioning with Code Pseudoranges of Du-al-Frequency Android Smartphones. 2021, 21, 2125. . *Sensors*, 21, 2125.
doi:<https://doi.org/10.3390/s21062125>
- Saastamoinen, J. (1973). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bull Geodesique* , 107, 13–34. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02522083>
- Šafář, V., Potůčková, M., Karas, J., Tlustý, J., Štefanová, E., Jančovič, M., & Cígler Žofková, D. (2021). The Use of UAV in Cadastral Mapping of the Czech Republic. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 10(6), 380. doi:10.3390/ijgi10060380
- Schoenberger, J. L. (2020). *COLMAP*. Obtido em 21 de 12 de 2021, de COLMAP:
<https://colmap.github.io/index.html>
- Seeber, G. (2003). *Satellite geodesy : foundations, methods, and applications*. Hannover, Germany: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.
- Septentrio. (2018). GPS spoofing Is your receiver ready for an attack? *Insights by Septentrio*. Measur . Obtido de <https://www.measur.ca/blog/2018/01/22/gps-spoofing-is-your->

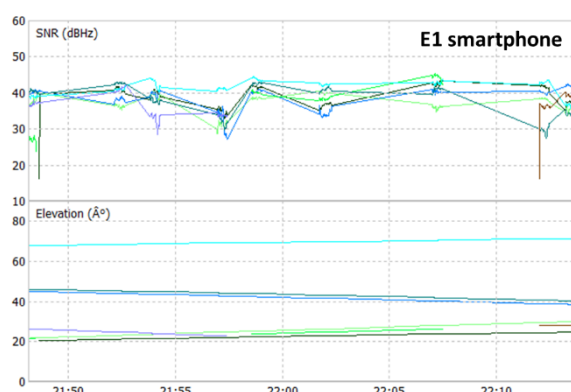
- receiver-ready-for-an-attack/
- Septentrio NV/SA. (2021). RxConverter. *RxTools*.
- Septentrio NV/SA. (2021). RxPlanner. *RxTools*.
- Serviços de Informação Aeronáutica (AIS) . (2021). *Manual VFR*. Obtido em 2022, de AIS-NAV Portugal: <https://ais.nav.pt/ais/vfr-manual/vfr-manual>
- Sharma, H., Bochkati, M., Lichtenberger, C., Pany, T., Darugna, F., & Wübbena, J. (September de 2021). Smartphone-based GNSS Positioning – Today and Tomorrow. doi:<https://insidegnss.com/smartphone-based-gnss-positioning-today-and-tomorrow/>
- Sharma, H., Bochkati, M., Lichtenberger, C., Pany, T., Darugna, F., & Wübbena, J. (21 de September de 2021). Smartphone-Based GNSS Positioning—Today and Tomorrow. *Inside GNSS*. Obtido de <https://insidegnss.com/smartphone-based-gnss-positioning-today-and-tomorrow/>
- Shervais, K., & Dietrich, J. (2016). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry Data Exploration and Processing Manual. UNAVCO. Obtido de <https://kb.unavco.org/kb/article/structure-from-motion-sfm-agisoft-photoscan-processing-guide-848.html>
- Shinghal, G., & Bisnath, S. (2021). Conditioning and PPP processing of smartphone GNSS measurements in realistic environments. *Satell Navig*, 2(10). doi:10.1186/s43020-021-00042-2
- Subirana, J. S., Zornoza, J. J., & Hernandez-Pajares, M. (2013). *GNSS DATA PROCESSING - Volume I: Fundamentals and Algorithms* (Vol. 1). ESA. Obtido de Navipedia.
- T.TAKASU. (2018). *RTKLib*. Obtido de <http://www.rtklib.com>
- Tavani, S., Pignalosa, A., Corradetti, A., Mercuri, M., Smeraglia, L., Riccardi, U., . . . Billi, A. (2020). Photogrammetric 3D Model via Smartphone GNSS Sensor: Workflow, Error Estimate, and Best Practices. *Remote Sens*, 12, 3616;. doi:<https://doi.org/10.3390/rs12213616>
- The MathWorks, Inc. (2021). *MATLAB - MathWorks*. Obtido em 2021, de MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- Trimble Geospatial. (2018). Obtido de <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-business-center>
- Trimble Inc. (2018). *Trimble GNSS Planning*. Obtido em 20 de Novembro de 2021, de <https://www.gnssplanning.com/#/charts>
- Trimble Inc. (2021). *GNSS Planning Online*. Obtido em 21 de Novembro de 2021, de Trimble GNSS Planning: <https://www.gnssplanning.com>
- Trimble, Inc. (2020). *Support Trimble RINEX*. Obtido de Trimble - Support: https://www.trimble.com/support_trl.aspx?Nav=Collection-40773&pt=Trimble%20RINEX
- Tungol, Z., Toriya, H., Owada, N., Kitahara, I., Inagaki, F., Saadat, M., . . . Kawamura, Y. (2021). Model Scaling in Smartphone GNSS-Aided Photogrammetry for Fragmentation Size Distribution Estimation. *Minerals*, 11(12), 1301. doi:10.3390/min11121301
- u-blox AG. (2009). GPS Essentials of Satellite Navigation. *Compendium*. u-blox AG. Obtido de https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium_Book_%28GPS-X-02007%29.pdf
- u-blox AG. (2019). *GNSS antennas*. UBlox.
- UNAVCO. (2020). *TEQC | Software | UNAVCO*. doi:<https://doi.org/10.1007/PL00012778>
- United Nations. (2010). *Current and Planned Global and Regional Navigation Satellite* (Vol. V10).
- Uradzinski, M., & Bakula, M. (2020). Assessment of Static Positioning Accuracy Using Low-Cost Smartphone GPS Devices for Geodetic Survey Points' Determination and Monitoring. *Applied Sciences*, 10. doi:<https://doi.org/10.3390/app10155308>
- USEGALILEO.EU. (2019). *Accuracy matters*. (EUSPA) Obtido de USEGALILEO: <https://www.usegalileo.eu/accuracy-matters/PT>
- Vallozzi, L., Hertleer, C., & Rogier, H. (2016). Latest developments in the field of textile antennas. Em V. Koncar, *Smart Textiles and their Applications* (pp. 599-626). Woodhead Publishing. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00026-6>

- Wang, L., Li, Z., Wang, N., & Wang, Z. (March de 2021). Real-time GNSS precise point positioning for low-cost smart devices. *GPS Solutions*, 25, 69. doi:10.1007/s10291-021-01106-1
- Wikimedia Commons. (2009). *File:Patch antenna pattern.gif*. (D. M. Dobkin, Produtor) Obtido de Wikimedia Commons.
- Woo, H., Kim, I., & Choi, B. (2021). Computer Vision Techniques in Forest Inventory Assessment: Improving Accuracy of Tree Diameter Measurement Using Smartphone Camera and Photogrammetry. *Sensors and Materials*, 33(11), 3835-3845. doi:10.18494/SAM.2021.3605
- Wróżyński, R., Pyszny, K., Sojka, M., & Przybyła, C. & -B. (2017). Ground volume assessment using 'Structure from Motion' photogrammetry with a smartphone and a compact camera. *Open Geosciences*, 9(1), 281-294. doi:10.1515/geo-2017-0023
- Wu, C. (2012). *VisualSFM : A Visual Structure from Motion System*. Obtido em 21 de 12 de 2021, de ccwu.me: <http://ccwu.me/vsfm/>
- Wu, Q., Sun, M., Zhou, C., & Zhang, P. (2019). Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GNSS Observations on Smartphone. *Sensors*, 19, 2189. doi:10.3390/s19092189
- Yan, W., Bastos, L., & Magalhães, A. (2019). Performance Assessment of the Android Smartphone's IMU in a GNSS/INS Coupled Navigation Model. *IEEE Access*, 7, 171073-171083. doi:10.1109/ACCESS.2019.2956239
- Yan, W., Bastos, L., Magalhães, A., Zhang, Y., & Wang, A. (2020). Assessing Android Smartphone Based GNSS Positioning Accuracy. Em J. Sun, C. Yang, & J. Xie (Ed.), *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020 Proceedings: Volume III*. 652. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-15-3715-8_14
- Yilmazturk, F., & Gurbak, A. E. (2019). Geometric Evaluation of Mobile-Phone Camera Images for 3D Information. *International Journal of Optics*. doi:<https://doi.org/10.1155/2019/8561380>
- Zangenehnejad, F., & Gao, Y. (2021). GNSS smartphones positioning: Advances, challenges, opportunities, and future perspectives . *Satell. Navig*, 2, 24. doi:<https://doi.org/10.1186/s43020-021-00054-y>
- Zrinjski, M., Barković, Đ., Tupek, A., & Kober, S. (2019). Accuracy Analysis of the Applicability of UAVs in Cadastral Surveys. *7th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering* , (pp. 985-993). Subotica, Serbia. doi:10.14415/konferencijaGFS2019.091

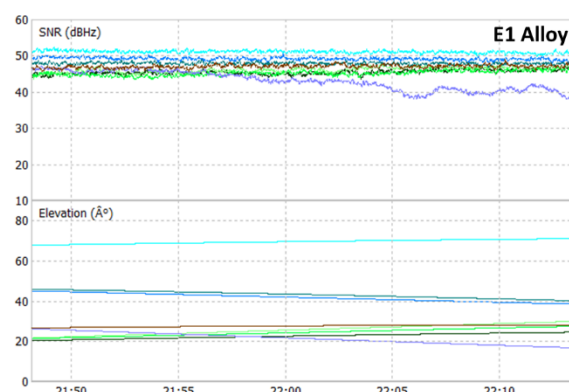
Anexo A. Análise do sinal

A.1 Levantamento B

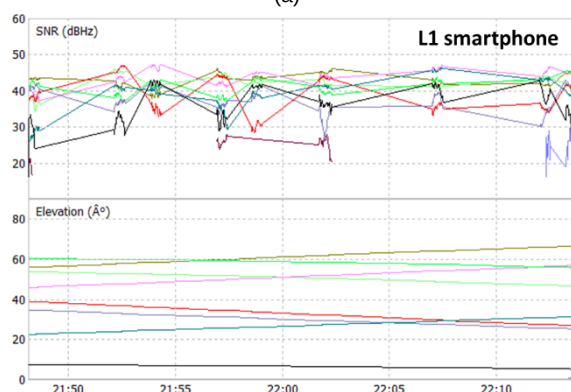
Nas figuras seguintes podemos ver a continuação da análise da intensidade do sinal em outras datas de observação no levantamento B (subcapítulo 6.1.2.2) com o telemóvel Xiaomi Mi8 e o recetor Alloy da Trimble. A Figura A.1 e Figura A.2 mostram a razão sinal-ruído relativo das observações realizadas com um intervalo de observação de 1 minuto, nas datas de 03 e 16 de julho de 2020. Na Figura A.3 podemos verificar o comportamento no levantamento realizado em 24 de julho de 2020, com observações de 5 minutos.



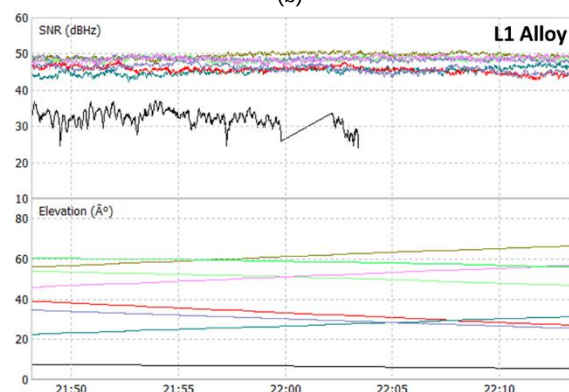
(a)



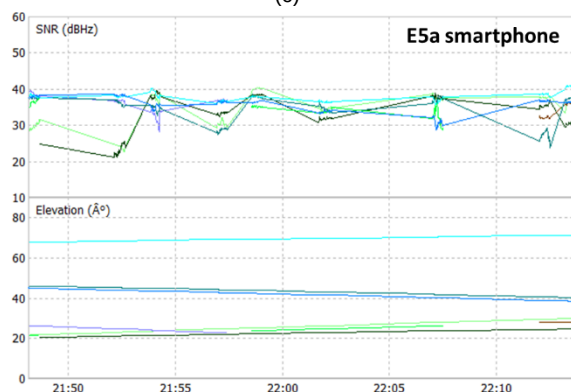
(b)



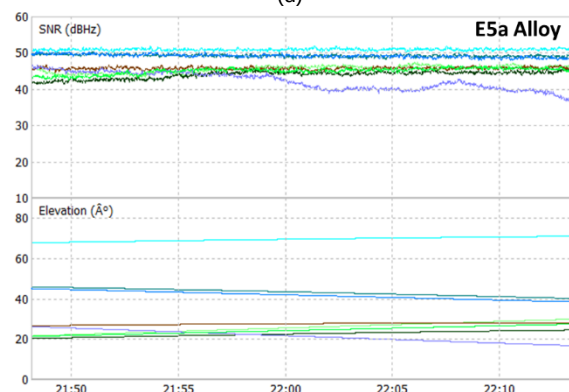
(c)



(d)



(e)



(f)

Conti.

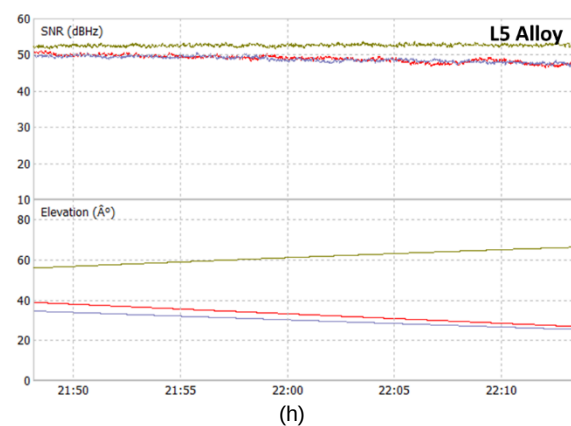
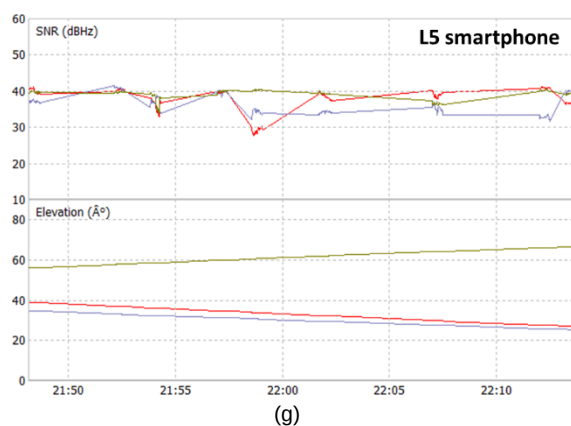
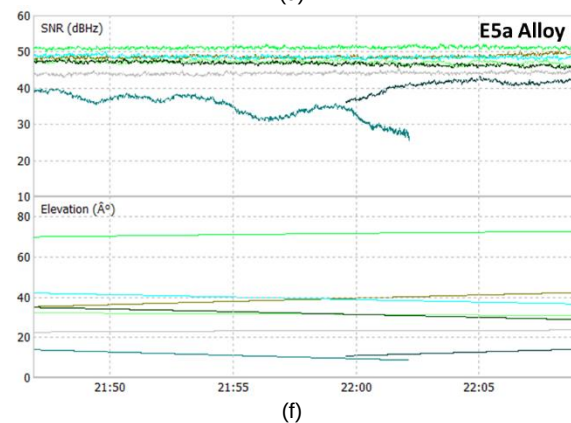
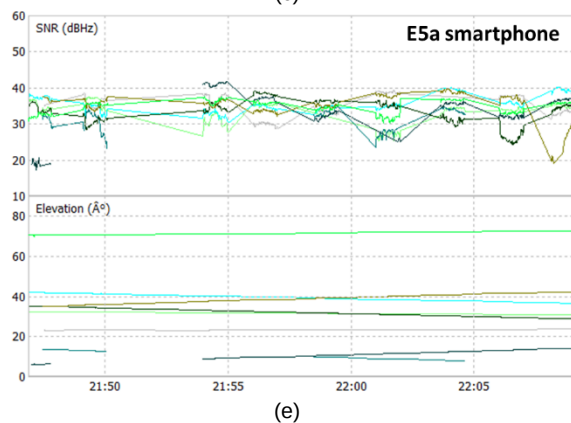
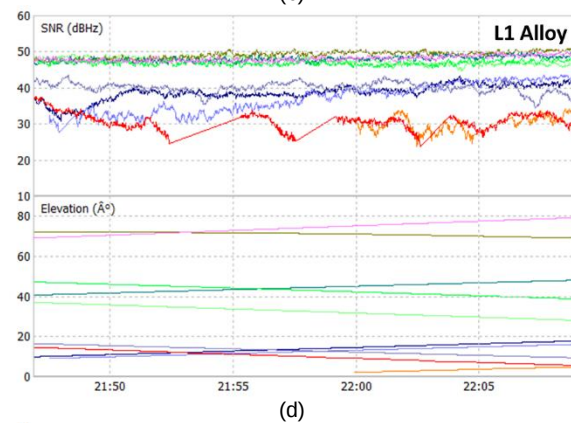
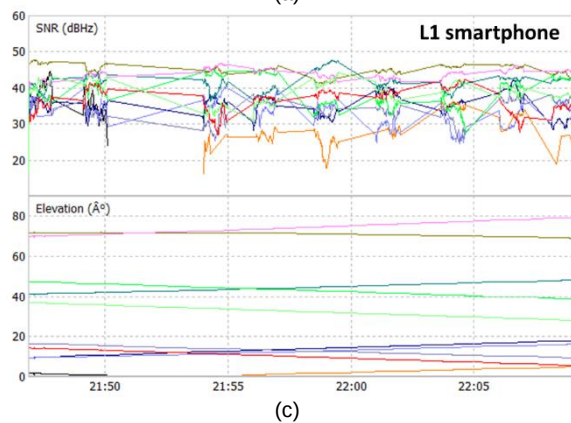
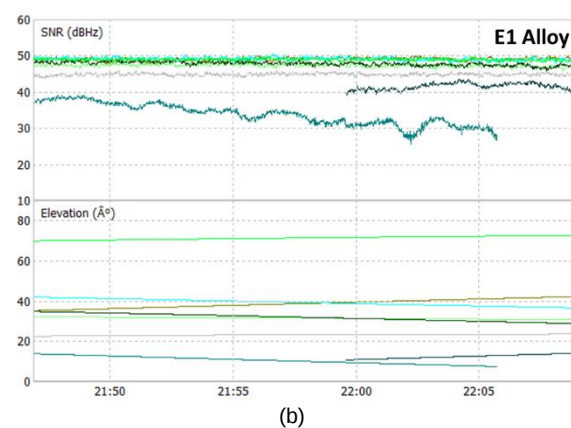
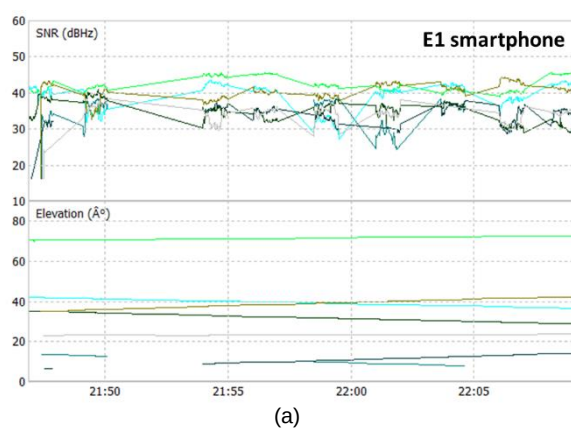


Figura A.1 – SNR em 03 de julho de 2020: *smartphone* E1 (a), L1 (c), E5a (e), L5 (g); recetor E1 (b), L1 (d), E5a (f), L5 (h).



Conti.

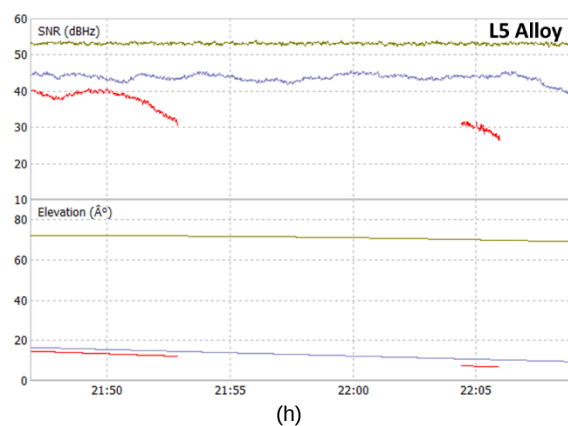
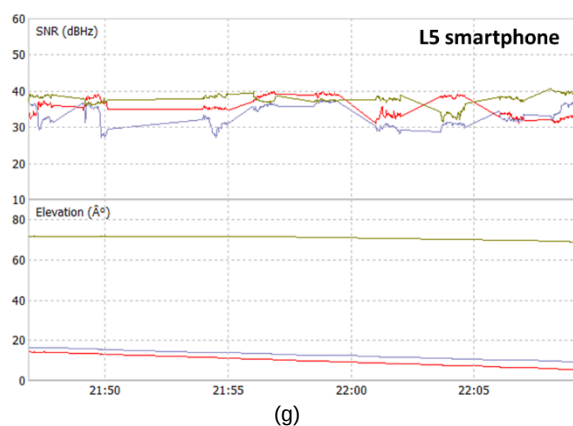
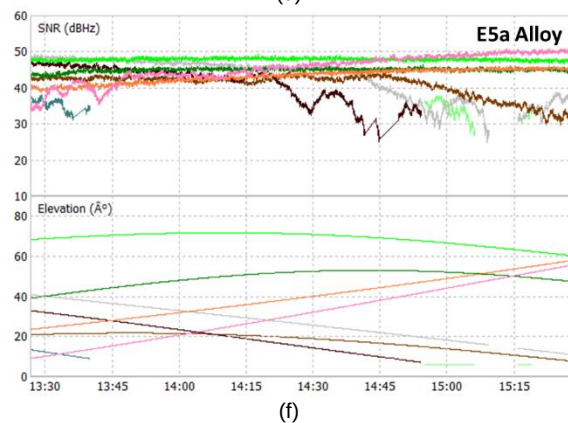
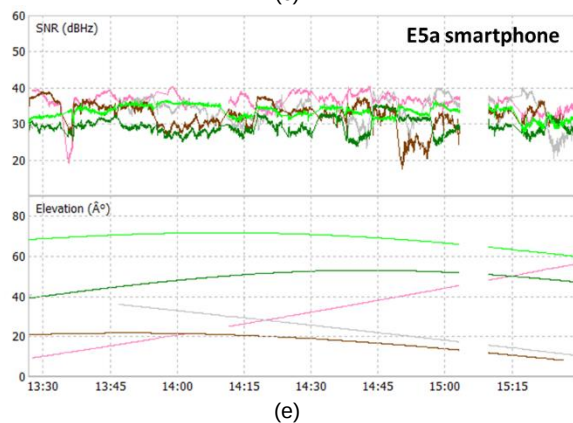
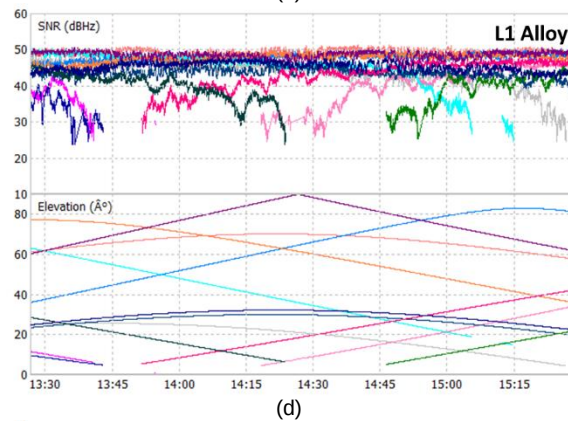
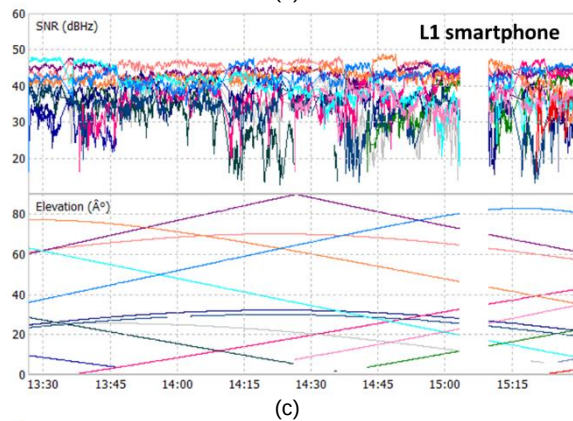
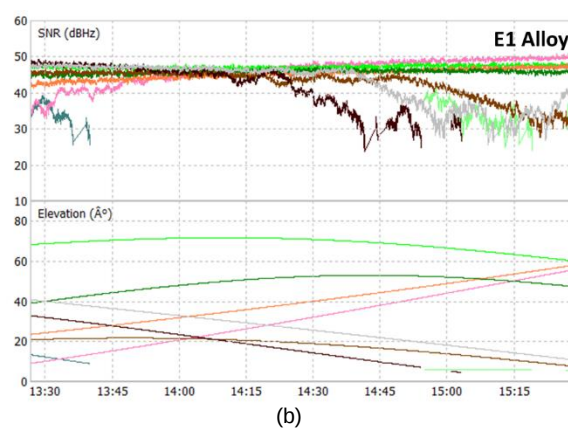
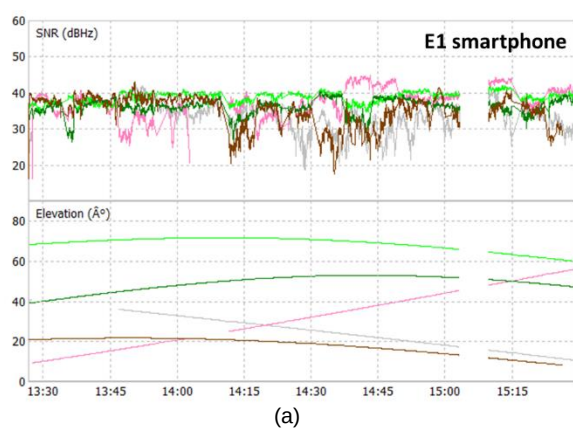


Figura A.2 – SNR em 16 de julho de 2020: *smartphone* E1 (a), L1 (c), E5a (e), L5 (g); recetor E1 (b), L1 (d), E5a (f), L5 (h).



Conti.

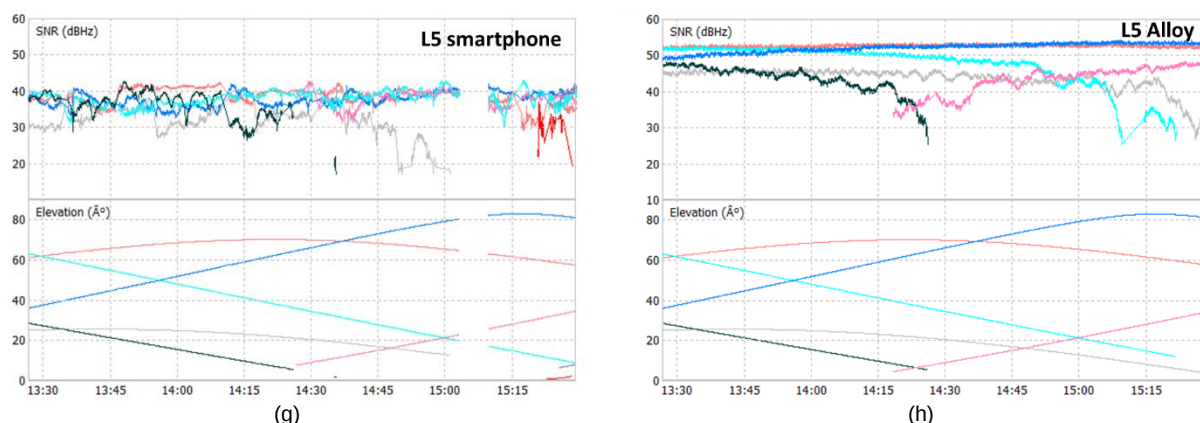


Figura A.3 – SNR em 24 de julho de 2020: *smartphone* E1 (a), L1 (c), E5a (e), L5 (g); recetor E1 (b), L1 (d), E5a (f), L5 (h).

A.2 Levantamento D

Neste subcapítulo podemos encontrar a análise dos alguns dos outros testes realizados no âmbito do levantamento D, subcapítulo 6.2.1.2, para a avaliação do posicionamento relativo com um *smartphone* de dupla frequência usando estações de referência localizadas a grandes distâncias. As figuras abaixo mostram o SNR obtidos em alguns dos testes.

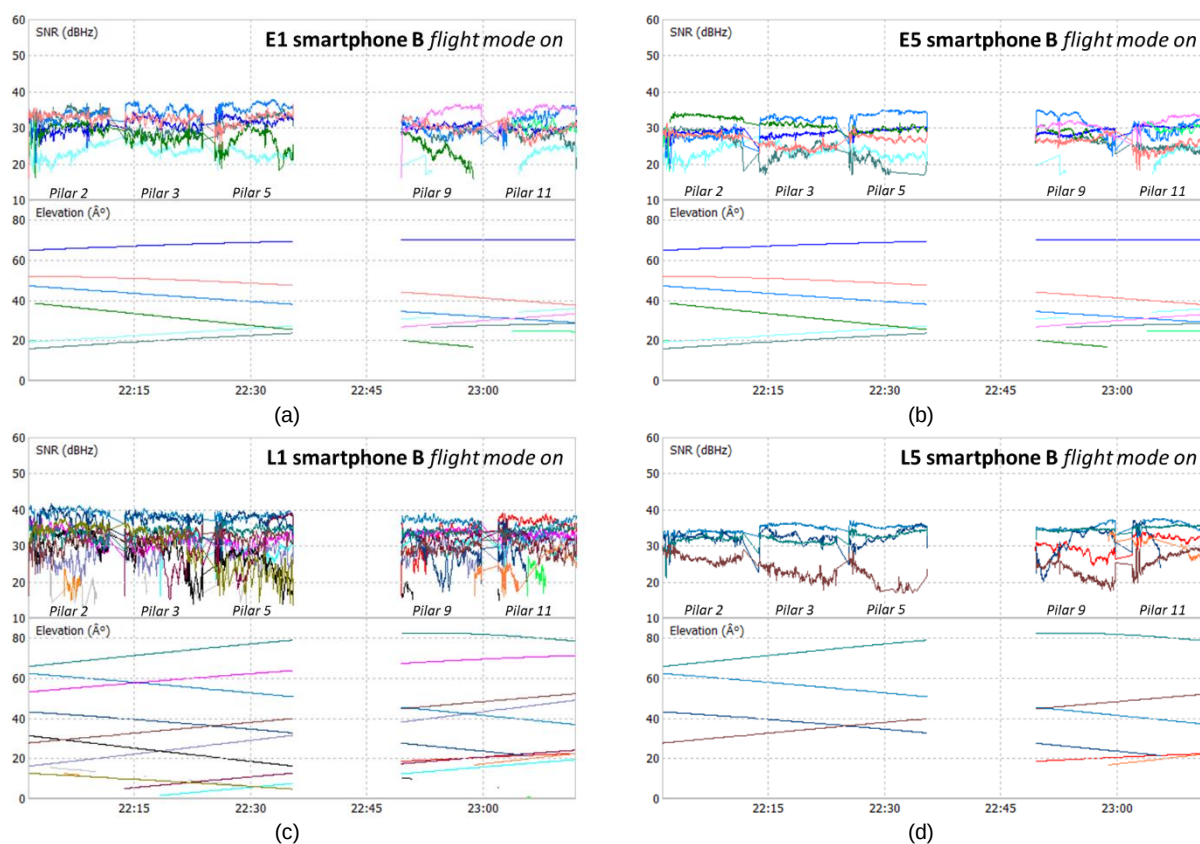
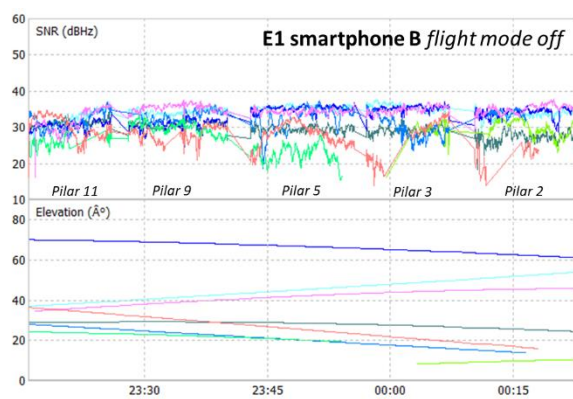
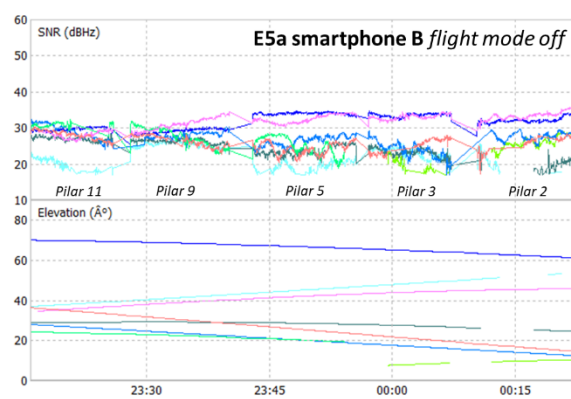


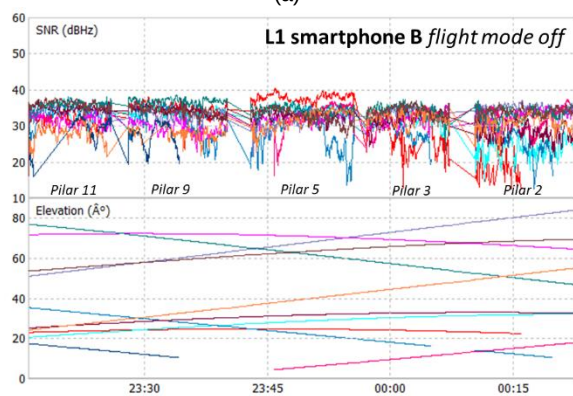
Figura A.4 – SNR do *smartphone* B em modo voo ligado, 12 de fevereiro de 2021 (Teste 1): E1 (a), L1 (b), E5a (c), L5 (d).



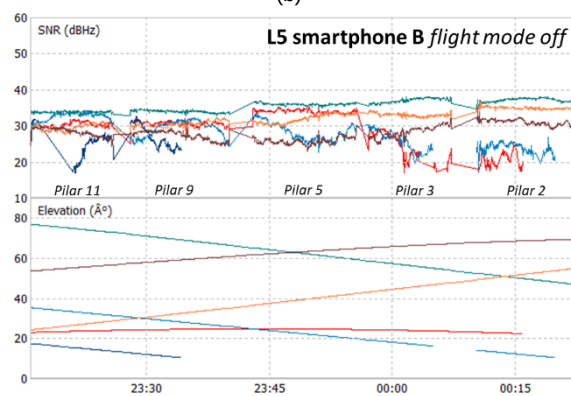
(a)



(b)

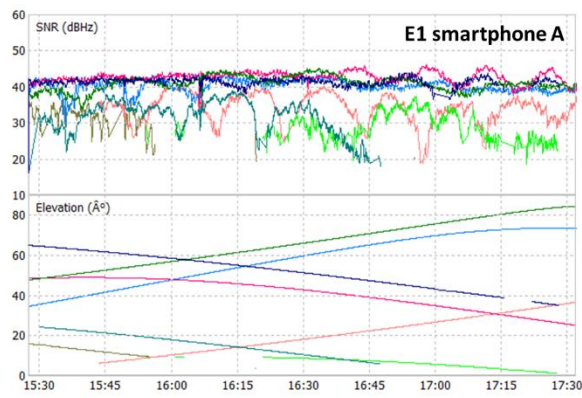


(c)

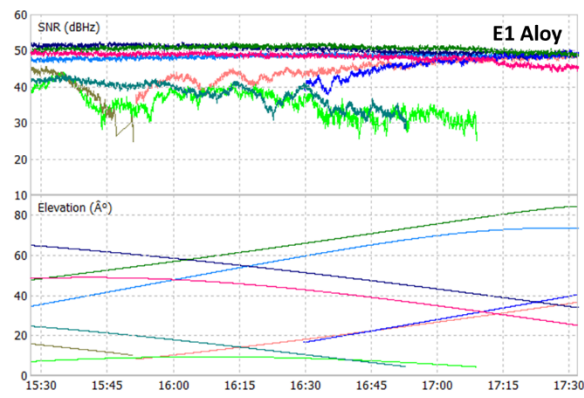


(d)

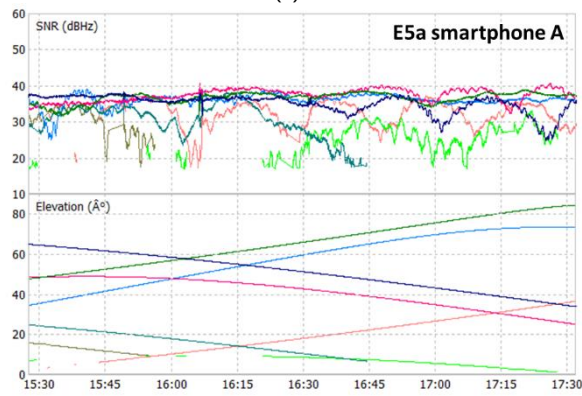
Figura A.5 – SNR do *smartphone* B em modo voo desligado, 12 de fevereiro de 2021 (Teste 1): E1 (a), L1 (b), E5a (c), L5 (d).



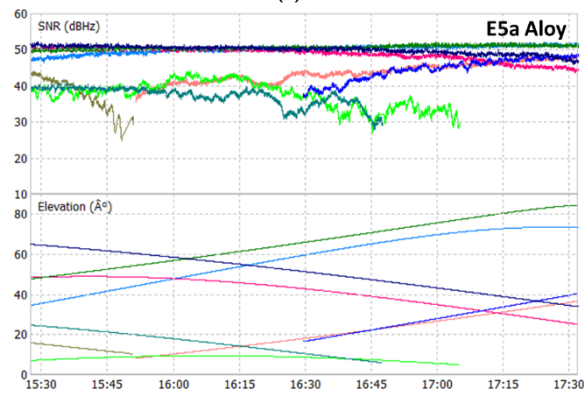
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura A.6 – SNR sinal Galileo, 25 de fevereiro de 2021 (Teste 2): *smartphone* E1 (a), E5a (c); Alloy E1 (b), E5a (d).

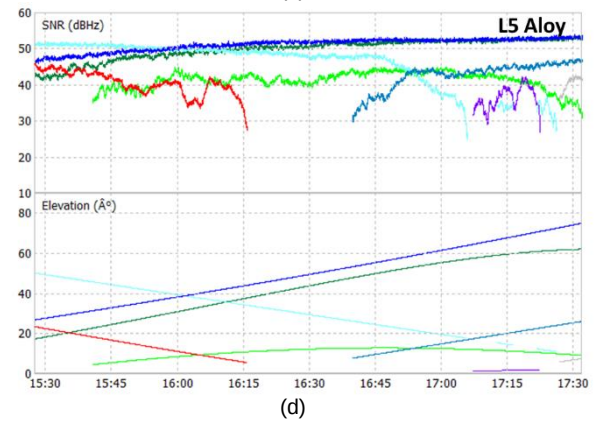
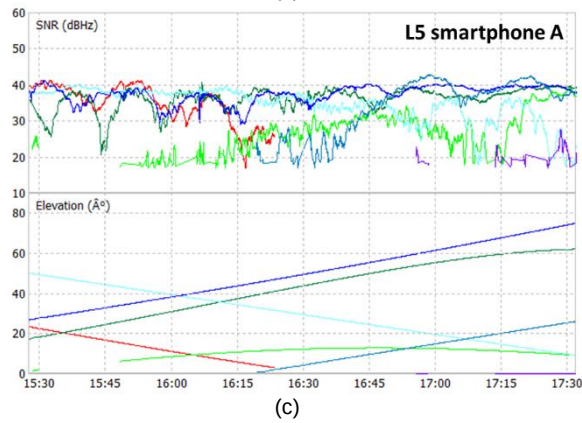
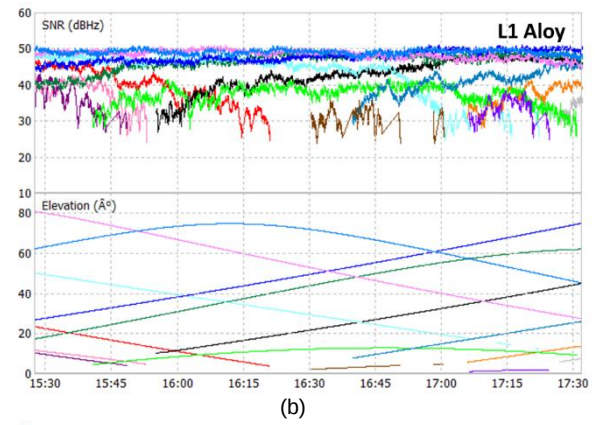
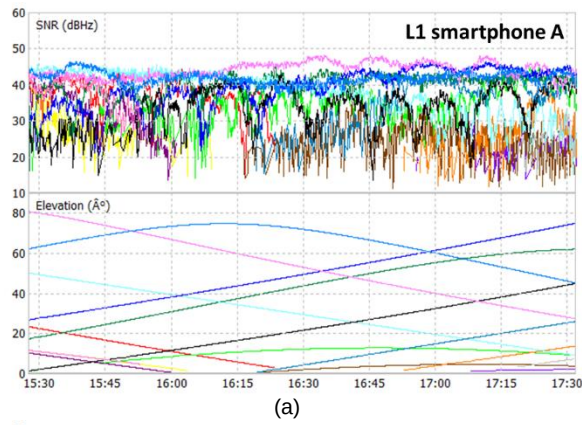


Figura A.7 – SNR sinal GPS, 25 de fevereiro de 2021 (Teste 2): *smartphone* L1 (a), L5 (c); Alloy L1 (b), L5 (d).