

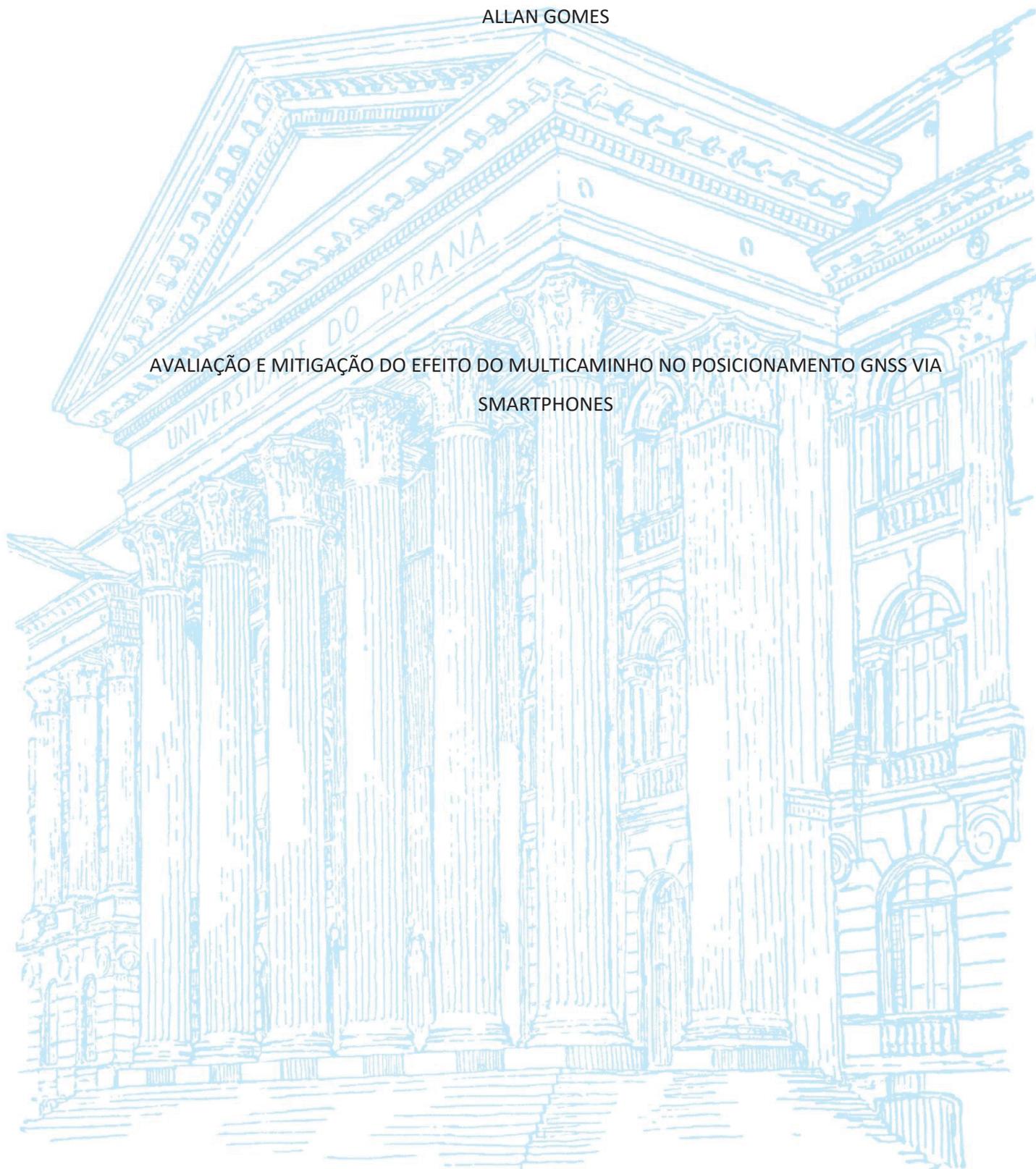
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALLAN GOMES

AVALIAÇÃO E MITIGAÇÃO DO EFEITO DO MULTICAMINHO NO POSICIONAMENTO GNSS VIA
SMARTPHONES

CURITIBA

2023



ALLAN GOMES

AVALIAÇÃO E MITIGAÇÃO DO EFEITO DO MULTICAMINHO NO POSICIONAMENTO GNSS VIA
SMARTPHONES

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Comitê de orientação: Prof.^a Dr.^a Claudia Pereira Krueger, Prof. Dr. Paulo Sergio de Oliveira Junior e Prof. Dr. Juan Francisco Reinoso Gordo.

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Gomes, Allan

Avaliação e mitigação do efeito do multicaminho no posicionamento GNSS via smartphones. / Allan Gomes. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientadores: Prof.^a. Dr.^a. Cláudia Pereira Krueger, Prof. Dr. Paulo Sérgio de Oliveira Júnior e Prof. Dr. Juan Francisco Reinoso Gordo.

1. Dispositivos móveis. 2. Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS). I. Krueger, Claudia Pereira. II. Oliveira Júnior, Paulo Sérgio de. III. Gordo, Juan Francisco Reinoso. IV. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. V. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **ALLAN GOMES** intitulada: **Avaliação e mitigação do efeito do multicaminho no posicionamento GNSS via smartphones**, sob orientação da Profa. Dra. CLAUDIA PEREIRA KRUEGER, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 13 de Junho de 2023.

Assinatura Eletrônica

14/06/2023 13:31:04.0

CLAUDIA PEREIRA KRUEGER
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

14/06/2023 11:26:11.0

SILVIO JACKS DOS ANJOS GARNES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO)

Assinatura Eletrônica

27/06/2023 11:29:11.0

TIAGO LIMA RODRIGUES
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

13/06/2023 16:51:25.0

IVANDRO KLEIN
Avaliador Interno (INSTITUTO FED. DE EDUC., CIÊNC. E TECNOL.
DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

16/06/2023 06:55:04.0

ENIUCE MENEZES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ)

Dedico esse trabalho aos meus pais Edvilson e Rosi, e a minha irmã Ellen.

AGRADECIMENTOS

A Deus. A Ele, toda honra e toda glória.

Agradeço aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram e que, mesmo diante das dificuldades da vida, sempre lutaram pelo progresso de seus filhos.

À minha amada irmã Ellen, por todo o seu apoio, carinho e por me presentear com minha linda afilhada Bárbara.

À minha companheira Izadora, por todo o seu suporte e incentivo que me dão a energia e tranquilidade necessárias para atingir meus objetivos.

A todos os meus familiares que me acompanharam e torceram pelo meu sucesso.

Agradeço especialmente aos meus avós, José e Ofélia (in memoriam), por me acolherem de braços abertos em Guarapuava, no período em que estive em busca das aprovações nos vestibulares que viriam.

A todos os colegas e amigos que me acompanharam nessa trajetória, especialmente aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia.

Aos meus amigos e amigas que me fortaleceram durante essa trajetória e que me trouxeram momentos de paz e felicidade (Saimon, Tales, Venâncio, Eduardo, Fabiano, Samara, Thiago, Christian, Evandro, Lucas, Jair, Domingos).

Agradeço ao meu amigo Sérgio pela parceria e companheirismo nas etapas difíceis percorridas em busca dos nossos objetivos.

Ao meu irmão e conselheiro Jorge, por sua amizade, importante nos momentos bons e essencial nos momentos difíceis.

À minha orientadora Prof^a Claudia Pereira Krueger, por acreditar no meu potencial, pelos conselhos e ensinamentos dados ao longo de todos esses anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Sérgio de Oliveira Júnior, por toda sua ajuda e tranquilidade transmitidas.

Ao Prof. Dr. Juan Francisco Reinoso Gordo, por sua orientação e por todo seu auxílio, principalmente no período em que estive desenvolvendo minhas atividades em Granada.

A CAPES, pelo fomento das bolsas de pesquisa durante o doutorado no Brasil e no período em que estive como discente na Universidade de Granada.

Finalmente, gostaria de agradecer à UFPR por todos os seus programas e ações de apoio acadêmico, principalmente, aqueles criados para estudantes com fragilidade econômica.

RESUMO

As informações provenientes do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) são amplamente utilizados nas atividades de engenharia, na investigação científica e nos diversos serviços baseados na localização (SBL), como a geolocalização, a navegação, a saúde, os transportes, os jogos de realidade aumentada, entre outros. O GNSS tem se popularizado nas últimas décadas em razão de dispositivos como *smartphones*, que constituem mais de 90% dos dispositivos equipados com um sensor GNSS. Atualmente, é possível obter informações GNSS brutas coletadas por sensores GNSS em *smartphones* compatíveis com o sistema operacional Android Nougat e superiores, como as mensagens que possibilitam o cálculo das pseudodistâncias, informações Doppler e observações da fase da onda portadora. A partir de determinadas técnicas de posicionamento, o GNSS pode fornecer coordenadas geodésicas de acurácia milimétrica, principalmente, após o pós-processamento dos dados e o ajustamento das observações. No entanto, é importante destacar que a qualidade do posicionamento está diretamente ligada a determinadas interferências, como multicaminho. Nos *smartphones* esse fenômeno é ainda mais acentuado devido à baixa qualidade da antena GNSS. Entre as ferramentas utilizadas para mitigar esse efeito, pode-se utilizar antenas modernas e materiais atenuadores. Nessa pesquisa foram avaliadas mais de 280 horas de dados coletados via o *smartphone* Xiaomi Mi 8, o qual possui um sensor GNSS de dupla frequência. Pela primeira vez a terceira versão do Atenuador do Efeito do Multicaminho (AEM) desenvolvido pelo Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH), AEM-LAGEH 3, foi avaliado em aplicações móveis e, um protótipo denominado AEM-LAGEH *Smart* foi desenvolvido com design específico voltado ao uso com *smartphones*. Os resultados dessa pesquisa indicam que há alta correlação, de aproximadamente 93%, entre a acurácia posicional planimétrica e planialtimétrica e o multicaminho influente na onda portadora L1. Além disso, ambos os materiais atenuadores demonstraram ser efetivos na minimização deste efeito na onda portadora L1. Ainda, os resultados demonstram que a supressão do efeito do multicaminho na onda portadora L5 foi superior a L1 entre 73% e 83%. Por fim, além da relação *smartphone*-multicaminho, essa pesquisa apresenta indicações e cuidados necessários para obtenção de coordenadas geodésicas mais acuradas via *smartphones*.

Palavras-chave: Dispositivos móveis; Posicionamento GNSS; Multicaminho; Atenuadores.

ABSTRACT

The information from the Global Navigation Satellite System (GNSS) is widely used in engineering activities, scientific research, and various Location-Based Services (LBS), such as geolocation, navigation, healthcare, transportation, augmented reality games, among others. GNSS has become popular in recent decades due to devices such as smartphones, which constitute over 90% of devices equipped with a GNSS sensor. Currently, it is possible to obtain raw GNSS information collected by GNSS sensors on smartphones compatible with the Android Nougat operating system and above, such as messages that enable the calculation of pseudoranges, Doppler information, and carrier phase observables. Through certain positioning techniques, GNSS can provide geodetic coordinates with millimeter-level accuracy, especially after data post-processing and observation adjustment. However, it is important to note that the quality of positioning is directly linked to certain interferences, such as multipath. In smartphones, this phenomenon is even more pronounced due to the low quality of the GNSS antenna. Among the tools used to mitigate this effect, modern antennas and attenuating materials can be employed. In this research, over 280 hours of data collected via the Xiaomi Mi 8 smartphone, which has a dual-frequency GNSS sensor, were evaluated. For the first time, the third version of the Multipath Effect Attenuator (AEM) developed by the Laboratory of Space Geodesy and Hydrography (LAGEH), AEM-LAGEH 3, was evaluated in mobile applications, and a prototype called AEM-LAGEH Smart was developed with a specific design for use with smartphones. The results of this research indicate a high correlation, around 93%, between horizontal (2D) and spatial (3D) position quality and the multipath effect on the L1 carrier phase. In addition, both attenuating materials proved to be effective in minimizing this effect on the L1 carrier phase. Additionally, the results demonstrate that the suppression of the multipath effect on the L5 carrier phase was superior to the L1, ranging from 73% to 83%. Finally, in addition to the smartphone-multipath relationship, this research presents indications and necessary precautions for obtaining more accurate geodetic coordinates via smartphones.

Key words: Mobile devices; GNSS positioning; Multipath; Attenuators.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO CONTEÚDO DE PESQUISA	16
2 ARTIGOS CIENTÍFICOS DESENVOLVIDOS.....	17
2.1 ARTIGO 1 - POSICIONAMENTO PELO GNSS VIA SMARTPHONES: BREVE HISTÓRICO E CONTEXTUALIZAÇÃO DE NOVAS FERRAMENTAS E TECNOLOGIAS.....	18
2.2 ARTIGO 2 - CIRCLE FITTING FOR IMPROVED GNSS POSITIONING VIA SMARTPHONES FOR ENGINEERING PURPOSES	39
2.3 ARTIGO 3 - ANALYSIS OF MULTIPATH EFFECTS AND MITIGATION TECHNIQUES FOR ENHANCED SMARTPHONE GNSS POSITIONING	51
3 INDICAÇÕES AOS USUÁRIOS.....	71
3.1 COLETA DE DADOS GNSS BRUTOS A PARTIR DE SMARTPHONES	71
3.2 TÉCNICAS E ACESSÓRIOS.....	72
4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	74
4.1 CONCLUSÕES.....	74
4.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS) possibilita a obtenção de informações de Posição, Navegação, Velocidade e Tempo (PNT e PVT), por meio de um receptor compatível com o sistema e que seja capaz de processar os sinais provenientes dos satélites de posicionamento.

O GNSS atua como ferramenta fundamental dando suporte a diversos Serviços Baseados em Localização (SBL) e outras aplicações presentes no dia a dia. Todavia, destaca-se que a popularização do GNSS na última década ocorreu principalmente em função de novos dispositivos que apresentam esse sensor integrado, como os dispositivos móveis (*smartphones, tablets, smartwatches, etc.*).

Segundo a GSA (*European GNSS Agency*), em 2019 haviam cerca de 6,4 bilhões de dispositivos GNSS em uso, estima-se que no ano de 2029 haverá aproximadamente 10 bilhões de unidades (GSA, 2019). Contudo, majoritariamente os *smartphones* são os dispositivos que mais apresentam os sensores GNSS integrados, com um percentual superior a 90% (MORTON et al., 2020).

Grande parte dos *softwares* instalados nesses aparelhos (aplicativos – *apps*), utilizam informações PVT e/ou PNT em diversas aplicações dos SBL, como geolocalização, redes sociais, navegação, saúde, rastreamento, alimentação, transporte, jogos de realidade aumentada, entre outros. Atualmente, pode-se dizer que alguns desses serviços transformaram diversas atividades do cotidiano, afinal, hoje em dia é comum o usuário solicitar transporte ou buscar a melhor rota para seu destino via determinados *apps*.

Embora o GNSS seja popularmente usado para fins de navegação, ele possibilita obter coordenadas geodésicas de alta acurácia (milímetros), após o pós-processamento dos dados, e por isso, é amplamente utilizado em atividades relacionadas a engenharia. Além disso, as informações derivadas do GNSS são essenciais em estudos científicos, como no monitoramento de ciclones tropicais (HE et al., 2020), determinação da umidade e salinidade do solo (WAN et al., 2012; WU et al., 2019), precipitação e vapor d'água (HE et al., 2020; ZHANG et al., 2019a), perturbações ionosféricas (GONZÁLEZ-CASADO et al., 2016; KONG et al., 2018; MATSUOKA; CAMARGO; BATISTA, 2009; WALTER; OLIVEIRA, 2009), entre outros. No entanto, é importante salientar que a maioria das pesquisas científicas e aplicações que utilizam informações do GNSS, são possíveis apenas por meio da

utilização dos dados GNSS brutos, como as informações referentes às ondas portadoras e as mensagens de navegação.

Apesar de haver a possibilidade de utilizá-los em tempo real, os dados GNSS podem ser armazenados em arquivos no formato universal *RINEX (Receiver Independent Exchange Format)*. Neste contexto, uma das principais inovações tecnológicas relacionadas aos *smartphones* e *tablets*, consiste na possibilidade de obter as informações GNSS brutas coletadas por sensores GNSS compatíveis com o sistema operacional Android Nougat e superiores (MALKOS, 2016). Dentre as principais informações, agora é possível acessar as mensagens que possibilitam o cálculo das pseudodistâncias, informações *Doppler* e observações da fase da onda portadora (ZHANG et al., 2018).

De uma maneira geral, atualmente o usuário pode ter acesso as mesmas informações coletadas por receptores geodésicos convencionais. Dessa forma, combinando essa ferramenta com determinados métodos de posicionamento pode-se obter coordenadas mais acuradas.

A maioria das pesquisas desenvolvidas até o momento, nessa temática, são direcionadas a avaliações de performance de dispositivos móveis quanto a obtenção de coordenadas geodésicas, seja para navegação ou para posicionamento (BANVILLE; DIGGELEN, 2016; GOMES; KLEIN; KRUEGER, 2021; GOMES; KRUEGER, 2020; HÅKANSSON, 2019; HUMPHREYS et al., 2016; PRIVAT; PASCAUD; LAURICHESSE, 2018; REALINI et al., 2017; ROBUSTELLI; BAIOCCHI; PUGLIANO, 2019; SHETA et al., 2018).

Os sistemas de posicionamento, de modo geral, receberam uma série de modernizações e melhorias nos últimos anos, dentre as quais, destacam-se a inserção de novos sinais (ex.: L5 e E5a), e a inclusão de novos sistemas de posicionamento globais (ex.: Galileo e BeiDou). Por conseguinte, pode-se obter soluções multi-GNSS (múltiplas constelações e múltiplos sinais) a partir de sensores GNSS modernos. Além disso, alguns sinais modernos, como o sinal L5, apresentam uma relação sinal-ruído melhor em comparação com o sinal L1. Isso os torna menos suscetíveis ao multicaminho e, portanto, podem fornecer melhores resultados (SALEEM et al., 2017).

O multicaminho é um fenômeno que afeta consideravelmente a qualidade do posicionamento GNSS. Em ambientes desafiadores, como em áreas urbanas e com presença de muita vegetação por exemplo, muitos sinais são prejudicados devido ao

multicaminho. Além do aperfeiçoamento dos sinais GNSS, há dezenas de técnicas e metodologias que podem mitigar o efeito do multicaminho, como a utilização de antenas modernas, máscaras de elevação acima de 10° e materiais atenuadores por exemplo (MORTON et al., 2020).

O Atenuador do Efeito do Multicaminho AEM-LAGEH 3 é um material que foi desenvolvido no Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH), com o objetivo de minimizar o erro advindo do efeito do multicaminho. Esse material tem a propriedade de refletir ou absorver as ondas eletromagnéticas, transformando-as em calor (VISKI, 2012). Contudo, seu design foi desenvolvido para suportar antenas GNSS geodésicas convencionais e, além disso, seu desempenho ainda não foi avaliado considerando sinais modernos, como a L5 por exemplo.

Apesar dos consideráveis avanços direcionados à busca pelo aumento da qualidade posicional obtida pelos *smartphones*, os erros inerentes ao posicionamento GNSS, como o multicaminho, afetam consideravelmente a qualidade da posição obtida a partir destes dispositivos. Por conseguinte, deve-se buscar soluções que possam mitigar seus efeitos, proporcionando soluções mais robustas e consistentes. Assim, define-se o problema desta pesquisa como: o quanto determinadas técnicas e materiais atenuadores, como o AEM-LAGEH, podem minimizar o efeito do multicaminho no posicionamento GNSS via *smartphones*?

Como solução do problema é estabelecida a seguinte hipótese: Se há possibilidade de obter as informações GNSS brutas a partir de determinados *smartphones* com sistema operacional Android, então, pode-se mensurar e avaliar a influência do multicaminho no posicionamento via *smartphones*, e ainda, avaliar a efetividade do AEM-LAGEH em minimizá-lo, logo, é possível obter coordenadas mais acuradas.

A metodologia da pesquisa consistiu em realizar o posicionamento em modo estático utilizando o *smartphone* Xiaomi Mi 8. Para isso, foram combinados diferentes materiais, como o AEM-LAGEH 3, AEM Smart, capa protetora e uma espuma. A fim de induzir o efeito do multicaminho, uma placa de alumínio foi posicionada próxima ao *smartphone*. Os dados RINEX foram analisados utilizando o software TEQC para obter os valores de multicaminhamento nos sinais L1 e L5. Posteriormente, a acurácia posicional foi avaliada a partir das coordenadas geodésicas obtidas via o serviço online IBGE-PPP.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diversas aplicações SBL surgiram e/ou se modificaram nos últimos anos, principalmente, em virtude da qualidade posicional obtida a partir dos dispositivos móveis. Algumas aplicações móveis atuais necessitam de informações de localização cada vez mais robustas e acuradas, como a realidade aumentada, segurança e navegação por exemplo.

Há um cenário bastante promissor no emprego de smartphones em atividades das engenharias. Isso ocorre em virtude de seu custo ser relativamente baixo, quando comparado ao custo de receptores geodésicos convencionais. Além disso, um diferencial importante é a flexibilidade da fusão das ferramentas e funcionalidades dos diversos sensores presentes em *smartphones*. Exemplos de atividades profissionais na engenharia, que se beneficiam da integração de receptores GNSS em *smartphones*, dentro de um certo limite de qualidade posicional e de tempo de uso, são: levantamentos cadastrais, posicionamento de embarcações, atualizações de cartas, mapeamento e georreferenciamento de imagens de satélites de média e baixa resolução. Dessa forma, avaliar o efeito do multicaminho no posicionamento pelo GNSS via *smartphones* é muito relevante.

O cenário atual possibilita a realização de diversos estudos que anteriormente eram restritos aos receptores geodésicos. O Brasil, além de sua extensão territorial, possui outras características que o diferem de outros países, seja quanto a dinâmica das perturbações ionosféricas sofridas ou, ainda, quanto a ausência de um sistema de posicionamento regional ou aumentado, como o NavIC (*Indian Regional Navigation Satellite System*), QZSS (*Japanese Quasi-Zenith Satellite System*), o WAAS (*Wide Area Augmentation System*) e o EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) por exemplo. Dessa forma, observa-se que há uma variedade de pesquisas que podem ser realizadas empregando os dispositivos móveis, principalmente no cenário nacional onde há escassez de estudos relacionados a essa temática.

As antenas de alta performance, como a Choke Ring 3D, são eficazes na redução dos efeitos do multicaminho. No entanto, elas têm um alto custo e peso médio de cerca de 10 kg, limitando sua utilização a aplicações específicas. Por outro lado, os atenuadores desenvolvidos no LAGEH, que utilizam materiais leves, como espumas, apresentam outra vantagem importante: a portabilidade.

Apesar de algumas pesquisas indicarem a possibilidade de integração de uma antena GNSS externa em determinados dispositivos móveis, possibilitando contornar o problema referente à baixa qualidade da antena interna, essa integração entre *hardwares*, normalmente, não é uma tarefa simples. Dessa forma, propõe-se uma abordagem inovadora, mais prática e econômica ao empregar o AEM-LAGEH 3 em aplicações móveis.

Os estudos conduzidos com o AEM-LAGEH 3 demonstraram resultados satisfatórios na minimização do efeito de multicaminho em antenas geodésicas (KRUEGER et al., 2012). Entretanto, seu desempenho foi avaliado considerando apenas as ondas portadoras L1 e L2, ou seja, não foram realizadas investigações quanto a outros sinais, como a L5 por exemplo.

Outra questão diz respeito ao design do AEM-LAGEH 3, o qual foi idealizado para suportar determinados modelos de antenas geodésicas (ex.: LEIAX 1203, ASHTECH). Logo, além de avaliar a performance deste equipamento em campanhas realizadas com um *smartphone*, durante essa pesquisa foi desenvolvido um protótipo denominado AEM-LAGEH Smart, visando aplicações móveis.

1.2 OBJETIVOS

Como consequência da hipótese apresentada, tem-se como objetivos desta pesquisa os subitens apresentados na sequência.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar e mitigar a influência do efeito do multicaminho na qualidade posicional GNSS obtida por via *smartphones*.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- a) Analisar e avaliar a influência do efeito do multicaminho sob diferentes cenários e condições;
- b) Verificar a efetividade do AEM-LAGEH 3 no posicionamento GNSS realizado por *smartphone*;

- c) Desenvolver e avaliar a performance do protótipo AEM-LAGEH Smart no posicionamento GNSS realizado por *smartphone*; e
- d) Recomendar ao usuário de *smartphone* quais ferramentas, técnicas e cuidados podem ser utilizados visando à obtenção de coordenadas mais acuradas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO CONTEÚDO DE PESQUISA

Esta tese está organizada em formato de seções. A seção 2 contém os artigos desenvolvidos durante o período de pesquisa, sendo que dois deles já foram publicados e o terceiro submetido para publicação. As indicações quanto as técnicas, metodologias e cuidados relacionados à obtenção de dados GNSS via *smartphones*, são apresentadas na seção 3. Por fim, as conclusões e recomendações estão na seção 4.

2 ARTIGOS CIENTÍFICOS DESENVOLVIDOS

Esta seção contém os artigos desenvolvidos durante a pesquisa de doutorado do autor. A formatação dos artigos segue as normas da revista que o artigo foi publicado.

Na sequência, apresenta-se uma breve contextualização referente aos artigos.

O artigo intitulado “Posicionamento pelo GNSS via *smartphones*: breve histórico e contextualização de novas ferramentas e tecnologias” teve como objetivo apresentar a evolução dos meios de se obter a geolocalização em ambientes externos, com ênfase nos *smartphones*, com sistema operacional Android e na utilização do receptor GNSS presente nesses dispositivos, até o ano de 2022. Foram descritas as principais ferramentas e tecnologias relacionadas à temática, bem como os desafios e perspectivas futuras deste objeto no cenário mundial. Ainda, o artigo destacou a importância do receptor GNSS presente nos dispositivos móveis, possibilitando uma maior acurácia na geolocalização em ambientes externos.

O artigo “*Circle fitting for improved GNSS positioning via smartphones for engineering purposes*” apresenta a possibilidade de usar técnicas de ajustamento de observações baseadas nos mínimos quadrados como ferramenta na obtenção de soluções mais acuradas a partir de *smartphones*. As coordenadas geodésicas foram obtidas via o serviço IBGE-PPP. O estudo indica que a partir da remoção de *outliers* é possível obter soluções mais acuradas. Ainda, na pesquisa realizada obteve-se acurácia horizontal (planimétrica) de aproximadamente 12 cm e 25 cm em diferentes sessões de coleta de dados.

De modo a atingir os objetivos estabelecidos nessa pesquisa, foram realizadas várias campanhas de coleta de dados com a presença de uma obstrução próxima ao *smartphone*, visando induzir o efeito do multicaminho. Os resultados desse estudo são apresentados no artigo intitulado “Analysis of Multipath Effects and Mitigation Techniques for Enhanced Smartphone GNSS Positioning”. Foram coletadas mais de 280 horas de dados GNSS com o *smartphone* Xiaomi Mi 8 para avaliar a qualidade posicional e sua relação com o multicaminho. Além disso, a performance do atenuador AEM-LAGEH 3 foi avaliada, assim como a efetividade do protótipo desenvolvido para uso com *smartphones*, denominado AEM-LAGEH Smart. Entre os

resultados obtidos, destaca-se que houve uma alta correlação entre a qualidade do posicionamento e o efeito do multicaminho.

2.1 ARTIGO 1 - POSICIONAMENTO PELO GNSS VIA SMARTPHONES: BREVE HISTÓRICO E CONTEXTUALIZAÇÃO DE NOVAS FERRAMENTAS E TECNOLOGIAS

GOMES, A.; DE OLIVEIRA JÚNIOR, P. S.; KRUEGER, C. P. Posicionamento pelo GNSS via smartphones: breve histórico e contextualização de novas ferramentas e tecnologias. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 74, n. 3, p. 518–535, 2022.

DOI: 10.14393/rbcv74n3-64507. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/64507>.

Posicionamento pelo GNSS via smartphones: breve histórico e contextualização de novas ferramentas e tecnologias

Positioning by GNSS via smartphones: brief history and contextualization of new tools and technologies

Allan Gomes ¹, Paulo Sergio de Oliveira Júnior ², Claudia Pereira Krueger ³

¹ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba, Brasil. allangmss@gmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0730-0287>

² Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba, Brasil. psergio.j@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7000-6924>

³ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba, Brasil. cpkrueger64@gmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4839-1317>

Recebido: 02.2022 | Aceito: 05.2022

Resumo: O propósito deste artigo é resgatar o histórico dos meios de se obter a geolocalização em ambientes externos, enfatizando os smartphones com sistema operacional Android e a utilização do receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) presente no mesmo. Além disso, são apresentadas as principais ferramentas e tecnologias relacionadas a temática, alguns resultados promissores quanto à qualidade posicional passível de ser obtida atualmente, e ainda, os desafios e perspectivas futuras deste objeto no cenário mundial. Devido aos avanços tecnológicos direcionados aos dispositivos móveis, tais como os smartphones, smartwatches e tablets, surgiram diversas aplicações que movimentam importantes segmentos do mercado global. Atualmente, os dispositivos móveis possuem diversos sensores, os quais possibilitam centenas de aplicações e funcionalidades. Neste sentido, o receptor GNSS presente nestes dispositivos se destaca por dar suporte a geolocalização com uma maior acurácia em ambientes externos. O posicionamento a partir de sensores presentes em dispositivos móveis vem ganhando atualizações e melhorias à medida que inovações tecnológicas surgem. Dentre as inovações nesta temática, destaca-se a possibilidade de aquisição dos dados GNSS brutos a partir de determinados dispositivos com sistema operacional Android igual ou superior a versão Nougat. Dessa forma, o usuário pode obter informações essenciais, como as informações da fase da onda portadora, que corroboram com a obtenção de coordenadas mais acuradas. Do mesmo modo, o surgimento de

smartphones que empregam receptores multi-GNSS, como o Xiaomi mi 8, podem contribuir com uma maior qualidade do posicionamento. Aliado a estas inovações e a partir de determinados métodos de posicionamento pode-se, atualmente, obter coordenadas com acurácia ao nível centimétrico a partir de smartphones.

Palavras-chave: Dispositivos. Android. Inovação. Satélite. Acurácia.

Abstract: The purpose of this article is to rescue the history of the means of obtaining geolocation in external environments, emphasizing smartphones with Android operating system and the use of the GNSS (Global Navigation Satellite System) receiver present in it. In addition, the main tools and technologies related to the theme are presented, some promising results regarding the positional quality that can be obtained today, as well as the challenges and future perspectives of this object on the world stage. Because the technological advances aimed at mobile devices, such as smartphones, smartwatches and tablets, several applications have emerged that move important segments of the global market. Currently, mobile devices have several sensors, which enable hundreds of applications and functionalities. In this sense, the GNSS receiver present in these devices stands out for supporting geolocation with greater accuracy in external environments. Positioning from sensors present in mobile devices has been gaining updates and improvements as technological innovations emerge. Among the innovations in this theme, the possibility of acquiring raw GNSS data from certain devices with an Android operating system equal to or greater than the Nougat version stands out. In this way, the user can obtain essential information, such as information on the phase of the carrier wave, which corroborates with obtaining more accurate coordinates. In the same way, the emergence of smartphones that employ multi-GNSS receivers, such as the Xiaomi mi 8, can contribute to a higher quality of positioning. Allied to these innovations and from certain positioning methods, it is currently possible to obtain coordinates with accuracy at the centimeter level from smartphones.

Keywords: Devices. Android. Innovation. Satellite. Accuracy.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos diversas tecnologias vêm sendo agregadas aos dispositivos móveis, de modo que esses aparelhos passaram a ser chamados de dispositivos inteligentes (smart). De acordo com DiMarzio (2017), os dispositivos smart são aqueles que possuem sistemas operacionais (plataformas), como os telefones celulares (smartphones), tablets e relógios (smartwatches). Graças a mobilidade, ao poder de processamento, armazenamento, comunicação, heterogeneidade de sensores, dentre outras características, os smartphones tornaram-se item essencial para diversos usuários, além de um sofisticado suporte as centenas de atividades individuais e colaborativas. Segundo Tilak (2013), havia mais de 3 bilhões de usuários no ano de 2013, além disso, estima-se que no ano de 2020 o smartphone tenha sido o dispositivo eletrônico mais utilizado no mundo, com aproximadamente 3,5 bilhões de usuários (GSA, 2019). No Brasil, o número de dispositivos é maior que a população desde o ano de 2017. Ainda, estima-se que no ano de 2021 haviam cerca de 250 milhões de aparelhos operacionais (MEIRELLES, 2021).

Diante do número expressivo de smartphones operacionais existentes, é interessante observar que cerca de 50% de todos os aplicativos (apps) disponíveis na Google Play (Android) e Apple App Store (iOS) utilizam informações de localização (GSA, 2017a).

Com a popularização do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), devido principalmente a sua disponibilidade ser global e gratuita, houve um aumento expressivo no número de receptores GNSS inseridos nos smartphones. Segundo a GSA (2017), cerca de 80% dos dispositivos GNSS ativos em 2017 estavam instalados em smartphones, enquanto que apenas 8% estavam ativos em receptores geodésicos convencionais, isto se deve, em parte, ao seu baixo custo e a facilidade com que se pode obter informações de Posição, Velocidade, Navegação e Tempo (PVT e PNT) provenientes principalmente do GNSS.

As informações PVT e/ou PNT são necessárias em diversas aplicações, especialmente nos Serviços Baseados em Localização (SBL) os quais possibilitam que determinados serviços usufruam do conhecimento da localização do usuário (DEFENSE; SECURITY; TRANSPORTATION, 2019).

Algumas das aplicações do SBL incluem as cidades inteligentes¹, redes sociais, jogos, marketing, assistência médica, vigilância, segurança pública, rastreamento, dentre outros (USMAN et al., 2018).

Uma das principais inovações relacionadas aos dispositivos smart, consiste na possibilidade de obter as informações brutas coletadas por receptores GNSS compatíveis com o sistema operacional Android Nougat e superiores (MALKOS, 2016).

No contexto das inovações tecnológicas destaca-se o surgimento de aparelhos como o Xiaomi Mi 8. Ele foi o primeiro smartphone no mundo a integrar um receptor GNSS de dupla frequência (GPS (L1 e L5), GLONASS (L1), Galileo (E1 e E5a), BeiDou (B1C) e QZSS (L1 e L5)), possibilitando uma maior confiabilidade aos usuários principalmente em cenários urbanos, pois, se uma das frequências falhar a outra poderá ser usada como alternativa (GPS WORLD STAFF, 2018).

Diante do exposto nota-se que, ao longo dos anos houve transformações tecnológicas significativas no âmbito dos smartphones, que, de certo modo, contribuíram para que este equipamento se tornasse praticamente onipresente no cotidiano da sociedade. Assim, esta pesquisa norteia-se em apresentar as evoluções tecnológicas/científicas relacionadas à obtenção de informações de geolocalização via smartphones, buscando discutir e apontar alguns dos seus desafios. Salienta-se, no entanto, que será dada ênfase aos casos onde o posicionamento é realizado em ambiente externo (outdoor), considerando ainda, o emprego do receptor GNSS.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 aborda algumas características e tecnologias relacionadas ao posicionamento via smartphones. Os métodos e tecnologias que possibilitam realizar o posicionamento via smartphones são indicados na seção 3. A qualidade posicional dos smartphones é discutida na seção 4. A seção 5 apresenta alguns dos desafios e perspectivas futuras relacionadas a temática. As considerações finais estão na seção 6.

2 FATOS HISTÓRICOS E TECNOLOGIAS RELACIONADAS AO POSICIONAMENTO VIA SMARTPHONES

Diversas tecnologias e fatos históricos estão relacionados à obtenção da geolocalização pelos usuários de dispositivos móveis. Dentre os fatos, destaca-se a técnica denominada Disponibilidade Seletiva (Selective Availability – SA), empregada no sistema NAVSTAR-GPS (NAVigation Satellite with Time And Ranging – Global Positioning System) pelo departamento de defesa dos Estados Unidos da América (EUA) até maio de 2000. De forma geral, esta técnica degradava a qualidade do posicionamento na ordem de dezenas de metros (LEICK; RAPOPORT; TATARNIKOV, 2015). Desde então, as informações provenientes do GPS passaram a ser essenciais em diversos setores, incluindo o setor de Telecomunicações.

Segundo O'Connor et al. (2019), o GPS gerou cerca de 686 milhões de dólares em benefícios econômicos para o setor de Telecomunicações entre os anos de 1984 e 2017. Ainda, os autores estimam que em eventual interrupção do GPS durante 30 dias, haveriam perdas de aproximadamente 10 milhões de dólares nos Estados Unidos da América (EUA).

Destaca-se ainda o Ato 911 ou Lei de Comunicações Sem Fio e Segurança Pública de 1999 (The Wireless Communications and Public Safety Act of 1999), estabelecido nos EUA pela Comissão Federal de Comunicações (Federal Communications Commission - FCC). O objetivo do Ato 911 consiste em melhorar a segurança pública do país através de uma infraestrutura de comunicação contínua para os

¹ Uma cidade inteligente é um lugar onde as redes e serviços tradicionais se tornam mais eficientes com o uso de soluções digitais em benefício de seus habitantes e negócios (COMMISSION, [s.d.]).

serviços de emergência. Além de tornar o “911”, um número de emergência Norte Americano, a FCC buscou aprimorar a ajuda em situações de emergência a partir de determinadas regras envolvendo as tecnologias sem fio, como a norma Enhanced 911 (E911) (FCC, 2020).

O E911 exige que as operadoras de celular disponibilizem a localização do usuário quando uma chamada de emergência for acionada. No contexto dos telefones móveis, a operadora deve fornecer a latitude e longitude do dispositivo com acurácia entre 50 a 300m, dependendo do tipo de tecnologia utilizada (via internet ou GPS por exemplo) (DIGGELEN, 2009; FCC, 2020). Por conseguinte, os requisitos estabelecidos pelo E911 e iniciativas semelhantes como o E112 (União Europeia) estimularam a adoção global de receptores GPS em telefones celulares (BANVILLE; DIGGELEN, 2016).

Em determinadas situações de emergência como em um foco de incêndio, acidente de trânsito, resgate de pessoas perdidas e/ou desorientadas, acidentes domésticos, entre outras, a acurácia posicional em torno de 50 metros é um valor adequado. Neste contexto, em um estudo realizado em quatro Estados-Membro da União Europeia, foi identificado que 71% das chamadas de emergências realizadas em 2017 foram feitas por smartphones (EC, 2018).

Em dezembro de 2018 o Código Europeu de Comunicações Eletrônicas tornou obrigatório que a partir de dezembro de 2020 todos os Estados-Membros da União Europeia utilizem as informações de localização para identificar pessoas que ligam para serviços de emergência (EU, 2018). O projeto AML (Advanced Mobile Location) é uma tecnologia que visa atender a este requisito aprimorando a localização fornecida pela rede de telefonia mediante a utilização de informações complementares via GNSS ou via internet (EENA, 2016). Mais de 13 países já aderiram a esta tecnologia, incluindo a Nova Zelândia, onde as mensagens “AML” referente as posições das chamadas realizadas por aparelhos Android e iOS, apresentaram acurácia média melhor que 50 e 100m em mais de 72% e 84% dos casos, respectivamente (EENA, 2019).

Visando aprimorar ainda mais as informações de localização do usuário em situações de emergência, a Comissão Europeia estabeleceu que todos os smartphones vendidos na União Europeia, a partir de 17 de março de 2022, tenham receptor GNSS e, ainda, que sejam compatíveis com o sistema Galileo (EC, 2018).

Além das situações de emergência mencionadas anteriormente diversas aplicações móveis buscam por soluções cada vez mais acuradas, tais como: publicidade (Location-based advertising), realidade aumentada, saúde (mhealth), mapeamento, gerenciamento de ativos em cidades inteligentes (smart city), dentre outros (GSA, 2017b).

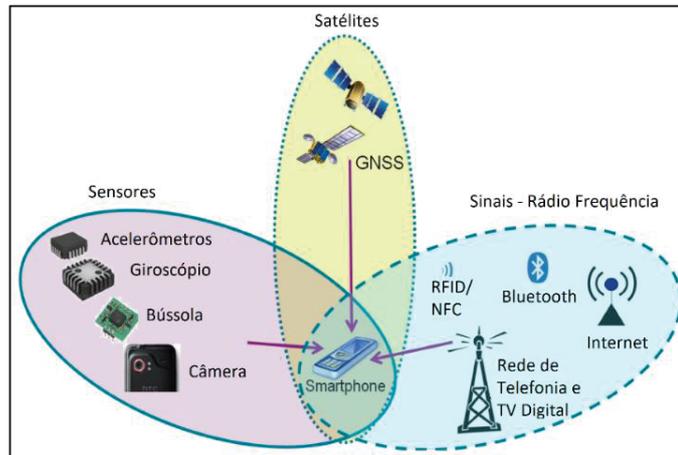
Em virtude dos avanços tecnológicos mencionados anteriormente, além de outros fatores, o posicionamento e navegação via smartphones se modificou ao longo dos anos. As principais maneiras de se obter dados PVT (Posição, Velocidade e Tempo) e/ou PNT (Posição, Navegação e Tempo) são abordados na próxima seção.

3 CARACTERÍSTICAS DO POSICIONAMENTO VIA SMARTPHONES

Usualmente a maneira de se obter a localização a partir de smartphones consiste na combinação/fusão de informações provenientes de diversas fontes. De acordo com Heuberger, Elst e Hanke (2011), o posicionamento a partir de smartphones pode ser realizado utilizando o receptor GNSS, através de um Sistema Global para Comunicações Móveis (GSM: originalmente, Groupe Special Mobile) e via Redes Locais (Local Area Network - LAN). Por outro lado, de uma maneira genérica, Gikas e Perakis (2016) classifica as tecnologias de localização em smartphones como Rádio Frequência, GNSS e Inerciais.

Atualmente a maior parte dos modelos de smartphones disponíveis possuem sensores como acelerômetro, magnetômetro, giroscópio, receptor GNSS, câmera, de proximidade, pressão, temperatura, humidade, dentre outros (GIKAS; PERAKIS, 2016; KOS et al., 2016; PEI et al., 2013; TILAK, 2013). Além do receptor GNSS, alguns destes sensores também podem fornecer informações de posição ao usuário. A Figura 1 apresenta algumas das ferramentas utilizadas para obtenção da posição do smartphone.

Figura 1 – Algumas das técnicas e ferramentas que podem ser utilizadas para obter a posição a partir dos smartphones. RFID significa identificação por radiofrequência (do inglês Radio-Frequency Identification). NFC significa comunicação de campo próximo (do inglês Near-Field Communication).



Elaboração: Adaptada de PEI et al. (2013).

Em relação ao posicionamento GNSS a posição do usuário é estimada utilizando as distâncias medidas entre a antena do receptor do usuário e a posição de pelo menos quatro satélites. Atualmente, há quatro constelações GNSS operacionais ou em desenvolvimento: GPS (EUA), GLONASS (Rússia), BeiDou (China) e Galileo (Estados membros da União Europeia). Dessa forma, combinando sinais de múltiplas constelações é possível aprimorar a acurácia posicional, principalmente em ambientes de difícil captação dos sinais, como em cânions urbanos por exemplo. Vale mencionar que em junho de 2020 a constelação BeiDou se tornou completa (BDS, 2020).

Outro fator que corrobora com a qualidade do posicionamento diz respeito aos sinais enviados pelos satélites rastreados. Segundo Laurichesse e Banville (2018), todos os satélites pertencentes às constelações Galileo e BeiDuo têm capacidade de envio de pelos menos três frequências. Dessa forma, quanto mais sinais o usuário recebe maior será a sua flexibilidade na escolha dos satélites e sinais que ele pode incluir no pós-processamento dos dados, por exemplo.

De acordo com Diggelen, Want e Wang (2018), todos os smartphones possuem receptor GPS ou GNSS capaz de rastrear a frequência L1 (1575,42 MHz). Até maio de 2018 os receptores GNSS presentes em smartphones operavam com apenas uma frequência.

O smartphone Xiaomi Mi 8 foi o primeiro no segmento a empregar um receptor GNSS de dupla frequência. Esse receptor foi desenvolvido pela empresa Broadcom, e se pode defini-lo como um receptor multi-GNSS, pois tem capacidade de coleta de dados provenientes de múltiplas constelações (GPS, GLONASS, Galileo, QZSS e BeiDou) e múltiplas frequências (L1, E1, L5 e E5a) (TECHNOLOGY, 2018). A frequência L5 (1176,45 MHz) é compatível com as constelações GPS, Galileo, BeiDou, QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) e NAVIC (Indian Regional Navigation Satellite System - IRNSS). A Tabela 1 apresenta os principais sistemas de posicionamento e seus respectivos sinais e frequências disponíveis.

Tabela 1 – Principais sistemas de posicionamento, sinais e frequências disponíveis. SBAS (*Satellite Based Augmentation System*)

Sistema	Sinal	Frequência (MHz)	Sistema	Sinal	Frequência (MHz)
GPS	L1 C/A	1575,42	BeiDou	B1I	1561,09
	L1C	1575,42		B2I	1207,14
	L2C	1227,60		B3I	1268,52
	L2P	1227,60		B1C	1575,42
	L5	1176,45		B2a	1176,45
GLONASS	L1 C/A	1598,06 - 1609,31	NAVIC	L5	1176,45
	L2 C	1242,93 - 1251,68		SBAS	L1
	L2 P	1242,93 - 1251,68	QZSS		L5
	L3 OC	1202,02		L1C/A	1575,42
Galileo	E1	1575,42		L1C	1575,42
	E5a	1176,45		L2C	1227,60
	E5b	1207,14		L5	1176,45

Elaboração: Os autores (2022).

Em 2021 a Xiaomi lançou o Mi 11, cujo receptor é capaz de coletar informações de um número maior de satélites, principalmente aqueles pertencentes a constelação BeiDou, e também, informações referentes a frequência B2a (BeiDou). A Figura 2 expõe uma comparação entre os dois smartphones durante um rastreo GNSS simultâneo realizada em Curitiba-PR no dia 5 de outubro de 2021.

Figura 2 – Constelações e frequências rastreadas simultaneamente pelos smartphones Xiaomi Mi 8 e Mi 11 em Curitiba-PR, em 05 de outubro de 2021.

Xiaomi Mi 8					Xiaomi Mi 11				
ID	GNSS	Frequência	Elevação	Azimute	ID	GNSS	Frequência	Elevação	Azimute
10		L5	38°	335°	5		L1	10°	141°
10		L1	38°	335°	10		L1	37°	335°
15		L1	22°	94°	10		L5	37°	335°
16		L1	17°	220°	13		L1	3°	115°
18		L1	55°	186°	15		L1	21°	93°
23		L1	73°		16		L1	16°	220°
25		L5	22°	15°	18		L1	55°	186°
25		L1	22°	15°	18		L5	55°	186°
26		L1	46°	248°	23		L1	72°	359°
26		L5	46°	248°	23		L5	72°	359°
29		L1	45°	98°	25		L1	22°	15°
1		L1	19°	7°	25		L5	22°	15°
7		L1	34°	123°	26		L1	46°	247°
8		L1	46°	55°	26		L5	46°	247°
12		L1	28°	326°	29		L1	45°	98°
13		L1	36°	265°	31		L1	9°	303°
22		L1	28°	134°	1		L1	18°	7°
23		L1	32°	210°	7		L1	34°	122°
1		E1	56°	291°	8		L1	45°	53°
7		E5a	56°	291°	12		L1	28°	325°
7		E1	29°	81°	13		L1	36°	264°
21		E5a	33°	358°	14		L1	8°	214°
21		E1	33°	358°	22		L1	28°	134°
26		E1	51°	174°	23		L1	31°	210°
26		E5a	51°	174°	24		L1	8°	246°
31		E1	24°	228°	1		E1	56°	289°
31		E5a	24°	228°	7		E5a	56°	289°
33		E1	36°	244°	7		E1	28°	80°
33		E5a	36°	244°	7		E5a	28°	80°
19		B1C	50°	101°	8		E1	9°	128°
22		B1C	45°	14°	8		E5a	9°	128°
24		B1C	17°	248°	13		E1	16°	121°
26		B1C	27°	297°	13		E5a	16°	121°
29		B1C	26°	99°	21		E1	33°	358°
35		B1C	54°	160°	21		E5a	33°	358°
					26		E1	50°	174°

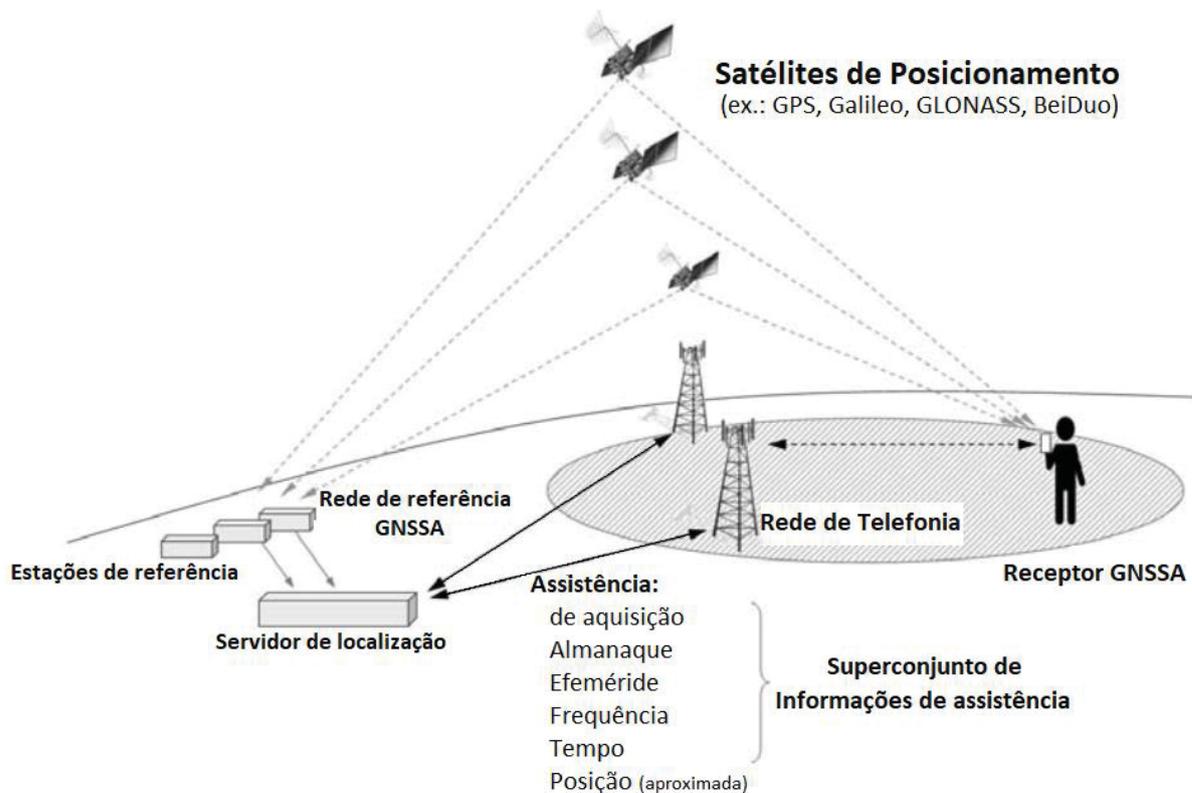
Fonte: O autor (2022).

3.1 GNSS Assistido (GNSSA)

Receptores GPS convencionais normalmente necessitam da denominada inicialização, onde são necessários vários segundos para rastrear as efemérides transmitidas, contendo os parâmetros de órbitas e correções dos relógios dos satélites, e aproximadamente 30s para a decodificação dos dados dos satélites, de modo que o tempo total para se obter uma posição com precisão almejada (Time to first fix – TTFF), seja de aproximadamente 1 minuto (DIGGELEN, 2009).

O GNSS Assistido (GNSSA, do inglês Assisted GNSS - AGNSS) é uma técnica que utiliza fontes alternativas de comunicação com o intuito de aprimorar a performance do posicionamento no smartphone. O GNSSA combina a CNT (Cellular tower triangulation), WPS (Wi-Fi positioning system) e o GNSS, conforme ilustrado na Figura 3 (DIGGELEN, 2009).

Figura 3 – Funcionamento do GNSSA.



Fonte: Adaptado de DIGGELEN (2009).

O GNSSA permite, por exemplo, que o receptor GNSS conheça quais frequências espera captar mesmo antes de efetuar esta busca, reduzindo o TTFF de minutos para milissegundos (DIGGELEN, 2009; GOOGLE DEVELOPERS, 2020). Com esta redução o consumo de energia também é menor, além disso, mesmo em situações onde o posicionamento GNSS é dificultado, como em cânions urbanos por exemplo, os usuários podem obter a localização graças a esta assistência (GIKAS; PERAKIS, 2016).

Ao ligar um receptor o TTFF depende das informações referente às órbitas e dos relógios dos satélites, logo, três diferentes tipos de inicialização (start) são possíveis: Cold start (início frio); Warm start (início morno); e Hot start (início quente) (DIGGELEN, 2009; ZHANG; GAO, 2015). Segundo Zhang e Gao (2015), o Warm start é o mais comum, onde o receptor tem conhecimento acerca do tempo (time).

Ao utilizar fontes externas como a rede 4G ou a rede WiFi por exemplo, pode-se obter: a posição estimada do smartphone, dados de assistência que incluem as efemérides dos satélites, data e tempo,

modelos ionosféricos, almanaque, frequências de referência, dentre outros (DIGGELEN, 2009; GSA, 2017b). O almanaque dos satélites contém as informações essenciais para o cálculo das posições aproximadas dos satélites, mesmo daqueles que não estão sendo rastreados. Os modelos ionosféricos, por outro lado, são essenciais para correção dos efeitos ionosféricos. Tais correções são importantes pois os erros sistemáticos provocados pelos efeitos ionosféricos degradam substancialmente a qualidade do posicionamento (MONICO, 2008).

No que se refere as redes locais sem fio (Wireless Local Area Networks – WLAN), vale mencionar que estas redes possuem alcance de comunicação que varia entre 50 e 100 metros, logo, é necessário que exista uma rede de pontos de acesso densa para que esta tecnologia funcione adequadamente (GIKAS; PERAKIS, 2016). Dessa forma, esta tecnologia normalmente é utilizada em ambientes internos (indoor).

3.2 Acesso aos dados GNSS brutos

Os aplicativos (apps) em si não podem acessar diretamente os sensores físicos (Sistemas Micro-Eletrô-Mecânicos - MEMS), pois os sinais provenientes destes são processados pelo sistema operacional do smartphone e disponibilizados em um formato padronizado compatível (KOS et al., 2016). Por conseguinte, o tipo de sistema operacional (ex.: Android e iOS) torna-se outro obstáculo no desenvolvimento de aplicativos para o posicionamento (DABOVE; PIETRA; LINGUA, 2017).

O conjunto de protocolos que fornece aos desenvolvedores acesso às funções do sistema é denominado de Interface de Programação de Aplicativos (IPA, do inglês Application Programming Interface – API). Na plataforma Android, os aplicativos têm acesso aos dados GNSS através da IPA de localização `android.gsm.location`. Essa IPA possibilita a otimização da localização mediante o emprego do GNSS Assistido, porém, o cálculo das soluções PVT é realizado internamente pelo módulo GNSS, de modo que apenas as soluções finais possam ser acessadas (GSA, 2017b). Vale destacar que cada versão do Android é caracterizada com determinado “nível de IPA”, como exemplo cita-se o Android 11 que possui IPA de nível 30 e o Android 12 que possui IPA de nível 31.

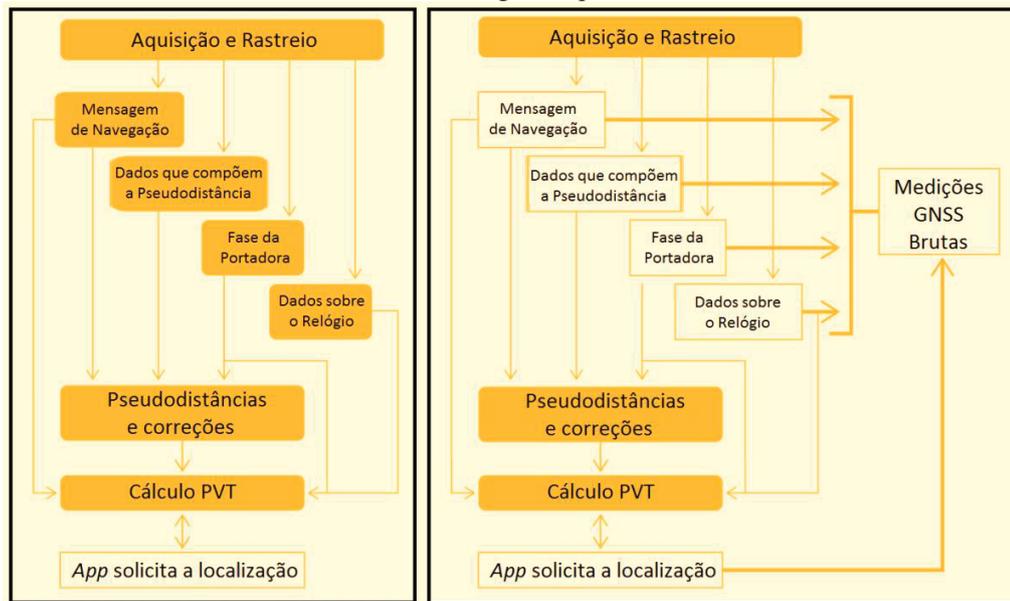
Em virtude da restrição e/ou limitação da IPA, em algumas aplicações os desenvolvedores não têm acesso a todas as informações coletadas por determinado sensor. Para Realini et al. (2017), a acurácia posicional via smartphones se torna limitada devido às restrições mencionadas anteriormente, pois elas dificultam a implementação de determinadas técnicas e métodos de posicionamento por satélites, obstando a possibilidade de melhora na acurácia posicional e minimização e/ou correção dos erros inerentes ao posicionamento.

No ano de 2016 surgiu uma das principais inovações relacionadas ao posicionamento GNSS via dispositivos móveis. A Google, desenvolvedora da plataforma Android, anunciou durante a conferência “I/O 2016” a possibilidade de aquisição dos dados GNSS brutos pela primeira vez, graças a uma nova IPA (`android.location`) implementada no sistema operacional Android Nougat (IPA de nível 24) e sucessores (MALKOS, 2016).

Dentre as principais informações pode-se acessar as mensagens que possibilitam o cálculo das pseudodistâncias, informações Doppler e observações da fase da onda portadora (ZHANG et al., 2018). As técnicas de posicionamento GNSS que buscam alta acurácia recorrem a utilização das informações da fase, o que possibilita a obtenção de acurácia posicional ao nível centimétrico (até milimétrico) (LEICK; RAPOPORT; TATARNIKOV, 2015).

A Figura 4 apresenta de forma simplificada as diferenças entre as IPA’s mencionadas.

Figura 4 – À esquerda a API *android.gms.location* e à direita a IPA *android.location* disponível na plataforma Android Nougat e superiores.



Elaboração: Gomes (2019).

É importante mencionar que embora as IPA's permitam o acesso à determinada informação, os fabricantes não são obrigados a adotar estes recursos nos seus dispositivos móveis. Atualmente já existem smartphones capazes de captar informações da fase, dentre eles destaca-se o smartphone Xiaomi Mi 8, o qual também possibilita o armazenamento de mensagens de navegação². Contudo, embora o receptor GNSS presente no Mi 11 seja capaz de interpretar um número maior de informações que seu antecessor Mi 8, o mesmo não possibilita o acesso as informações referentes a observação da fase da onda portadora.

Os dados GNSS brutos podem ser utilizados por desenvolvedores de apps para aprimorar a qualidade do posicionamento obtido via dispositivos compatíveis, havendo ainda, a possibilidade de criar soluções multi-GNSS (múltiplas frequências e constelações), proporcionando assim, maior flexibilidade na realização de integrações entre os diversos sensores presentes nos smartphones (CECCATO et al., 2018; MIRALLES et al., 2018). Antes do sistema operacional Android Nougat, era impossível aprimorar o posicionamento GNSS sem o emprego de um hardware externo (ZHANG et al., 2018).

As observáveis GNSS contêm diversos erros devido à propagação do sinal GNSS na atmosfera, localização geográfica do usuário, multicaminho, dentre outros erros que degradam a qualidade posicional. Estes erros podem ser modelados, minimizados e/ou eliminados. O multicaminho ocorre quando o sinal emitido pelo satélite de posicionamento é refletido ou difratado em superfícies, normalmente próximas ao receptor GNSS. Esse fenômeno pode causar erros nas medições do código e na fase da portadora e, portanto, é tratado como interferência prejudicial (LEICK; RAPOPORT; TATARNIKOV, 2015).

Além das técnicas de posicionamento, existem ainda, ferramentas e metodologias que podem ser utilizadas para minimizar e/ou eliminar estes erros. No entanto, algumas destas correções só são possíveis mediante a utilização dos dados GNSS brutos, normalmente armazenados em arquivos no formato universal Receiver Independent Exchange Format (RINEX).

² As mensagens de navegação fornecem as informações necessárias para o cálculo das posições dos satélites e que permitem efetuar correções da ionosfera (MATSUOKA; CAMARGO, 2002).

Especificamente para o posicionamento com smartphones alguns erros são amplificados, como os efeitos de multicaminhamento dos sinais e a variação do centro de fase da antena, haja vista as dificuldades advindas do formato do dispositivo (YAN et al., 2020). O centro de fase da antena é o ponto virtual onde as medidas dos sinais são referenciadas, porém, além de ser diferente para cada portadora o centro de fase não é estável e varia com a intensidade e a direção dos sinais (MONICO, 2008). Além da posição receptor, o usuário não tem o conhecimento acerca das informações das variações do centro de fase da antena de alguns dispositivos, as quais são fundamentais para o posicionamento de alta acurácia (DABOVE; PIETRA, 2019; LEICK; RAPOPORT; TATARNIKOV, 2015). Para Netthonglang, Thongtan e Satirapod (2019) os smartphones podem fornecer informações de posição, mediante o pós-processamento dos dados, com acurácia ao nível centimétrico desde que as informações de posição e do centro de fase da antena GNSS sejam conhecidas.

No ano de 2020 a Google lançou a plataforma Android 11 (IPA de nível 30), nessa versão foi introduzida uma nova ferramenta com o intuito de contornar o problema da ausência de informações da antena GNSS. Os dispositivos compatíveis com essa versão podem fornecer informações como os offsets do centro de fase da antena (Phase Center Offset - PCO) e a variação do centro de fase (Phase Center Variation - PCV) para a frequência empregada (GOOGLE, [s.d.]). Contudo, a Google não informa qual foi a metodologia adotada para a obtenção desses parâmetros.

A Figura 5 apresenta algumas informações referente a antena GNSS presente no smartphone Xiaomi Mi 11. Estas informações foram obtidas através de dois aplicativos, denominados GPSTest (v.3.9.16) e GnsLogger (v.3.0.0.10). Porém, há uma incoerência nos dados apresentados pelos aplicativos, pois até o momento não existe indícios de que há algum dispositivo móvel capaz de armazenar dados provenientes da frequência 1227.6 MHz (L2). Dessa forma, acredita-se que essas informações se referem a frequência 1176,45 MHz (L5).

Figura 5 – Informações de PCO e PCV da antena GNSS presente no *smartphone* Xiaomi Mi 11.

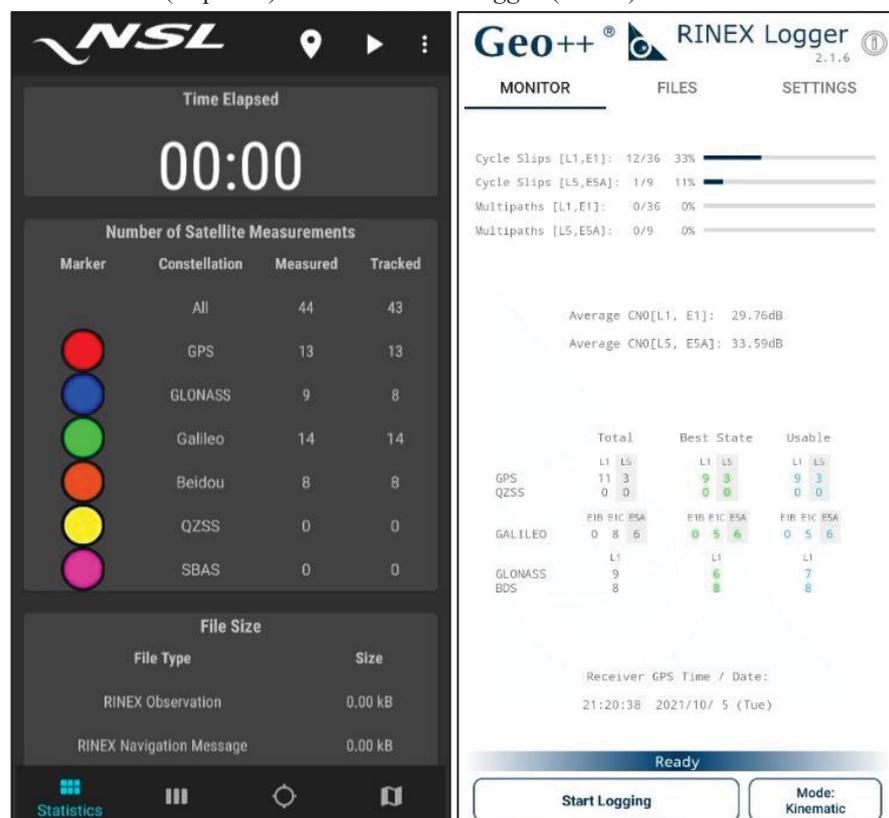
Carrier Frequency (MHz) = 1575.42				
PCO Measurements:				
PCO (mm)	X	Y	Z	
	1,200000 ± 0,100000	3,400000 ± 0,200000	5,600000 ± 0,300000	
PCV (mm):				
Elev (deg)	0	60	120	180
Azim (deg)				
0	11,220000 ± 0,100000	33,440000 ± 0,200000	55,660000 ± 0,300000	77,880000 ± 0,400000
120	10,200000 ± 1,100000	30,400000 ± 1,200000	50,600000 ± 1,300000	70,800000 ± 1,400000
240	12,200000 ± 2,100000	34,400000 ± 2,200000	56,600000 ± 2,300000	78,800000 ± 2,400000
Signal Gain (DbHz):				
Elev (deg)	0	60	120	180
Azim (deg)				
0	9,800000 ± 0,110000	8,700000 ± 0,220000	7,600000 ± 0,330000	6,500000 ± 0,440000
120	5,400000 ± 0,550000	4,300000 ± 0,660000	3,200000 ± 0,770000	2,100000 ± 0,880000
240	1,300000 ± 0,910000	2,400000 ± 0,920000	3,500000 ± 0,930000	4,600000 ± 0,940000
Carrier Frequency (MHz) = 1227.6				
PCO Measurements:				
PCO (mm)	X	Y	Z	
	3,400000 ± 0,200000	5,600000 ± 0,300000	1,200000 ± 0,100000	
PCV (mm):				
Elev (deg)	0	180		
Azim (deg)				
0	55,660000 ± 0,300000	77,880000 ± 0,400000		
90	11,220000 ± 1,100000	33,440000 ± 1,200000		
180	56,600000 ± 2,100000	78,800000 ± 2,200000		
270	12,200000 ± 0,100000	34,400000 ± 0,200000		
Signal Gain (DbHz):				
Elev (deg)	0	60	120	180
Azim (deg)				
0	7,600000 ± 0,910000	6,500000 ± 0,920000	5,400000 ± 0,550000	4,300000 ± 0,660000
120	1,300000 ± 0,110000	2,400000 ± 0,220000	9,800000 ± 0,930000	8,700000 ± 0,940000
240	1,400000 ± 0,950000	2,500000 ± 0,960000	3,600000 ± 0,330000	4,700000 ± 0,440000

Fonte: O autor (2022).

Darugna et al. (2020), observaram que a calibração da antena do smartphone Huawei Mate20X é evidenciada como um recurso para o posicionamento com resolução de ambiguidades³. Ainda, de acordo com Wanninger e Hesselbarth (2020), mediante a utilização dos parâmetros de calibração da antena GNSS presente no smartphone Huawei P30, pode-se obter com sucesso a solução das ambiguidades apenas para o GPS (L1). Mediante o pós-processamento de dados com uma estação de referência geodésica, os autores obtiveram desvios-padrão de poucos centímetros após 5 min e 2 cm após 60 min.

Após o lançamento do Android 7 foram desenvolvidos diversos apps que realizam o acesso aos dados brutos e os armazenam, seja em formato específico ou no formato universal RINEX. Dentre estes, citam-se: GPSTest, GnsLogger, Geo++ RINEX Logger, Rinex On, Gnut Client, GNSS Compare, RTCM Converter, PPP WizLite (GOOGLE PLAY, 2020).

Figura 6 – Aplicativos que permitem o armazenamento de informações GNSS em formato RINEX. *RinexOn* (esquerda) e *Geo++RINEX Logger* (direita).



Elaboração: Os autores (2022).

Caso o usuário não disponha de um aparelho, mas queira verificar se determinado dispositivo é compatível, o mesmo pode consultar a lista de dispositivos que suportam o acesso aos dados GNSS brutos no site de desenvolvimento Android (ANDROID DEVELOPERS, [s.d.]). Contudo, sugere-se utilizar como fonte de pesquisa o banco de dados do aplicativo GPSTEST (GPSTEST, [s.d.]), cujo acesso pode ser realizado através do navegador Google Chrome. Nesse banco de dados há um número maior de informações sobre a compatibilidade de milhares de dispositivos, normalmente, este banco de dados é atualizado à medida que um novo dispositivo realiza um rastreamento. Vale ressaltar que o modelo

³ Ambiguidade é o número de ciclos inteiros entre as antenas do satélite e do receptor na primeira época de coleta de dados GNSS.

do aparelho pode variar frente a diversos fatores, por exemplo, o Mi 8 versão Global fornece informações da fase da onda portadora, diferentemente das versões Mi 8 Lite e Mi 8 SE (GPSTEST, [s.d.]).

Outra questão relevante aos usuários diz respeito a versão do aplicativo utilizado e a sua otimização quanto a versão do Android e do sistema do fabricante. Nos testes realizados com os smartphones Xiaomi Mi 8 (Android 10 e MIUI 12.0.1) e Mi 11 (Android 12.5.4 e MIUI 12.5.4.0), os aplicativos RinexOn (versão 1.3) e GNSS Compare (versão 0.53) não funcionaram no modelo Mi 11. No entanto, após a atualização do sistema MIUI da Xiaomi para a versão 13.0.4, o app RinexOn (versão 1.3) funcionou corretamente. Dessa forma, recomenda-se que o usuário realize testes com diferentes aplicativos, e que mantenha seu dispositivo e aplicativos sempre atualizados.

Mediante uma análise sobre a relevância deste novo cenário no posicionamento GNSS, os autores sugerem classificar os métodos de aquisição de dados via dispositivos móveis com sistema operacional Android, como:

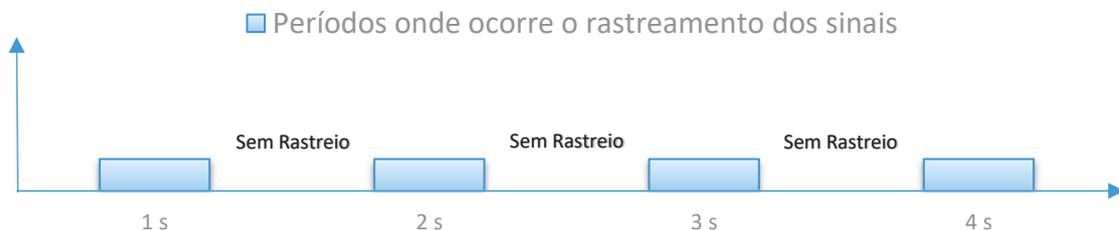
- **Método Clássico:** realizado via a IPA `android.gsm.location`, onde só é possível a obtenção de soluções PVT computadas internamente pelo módulo GNSS;
- **Método Moderno:** caracterizado pelo acesso aos dados GNSS brutos (principalmente pelas informações da fase da portadora), através da IPA `android.location`, sendo possível o desenvolvimento de soluções multi-GNSS e a realização do pós-processamento dos dados brutos.

3.3 Controle Automático de Ganho (CAG)

Os receptores geodésicos convencionais priorizam a performance do equipamento e a qualidade dos dados obtidos, por sua vez, o consumo de energia não é prioridade. Por outro lado, os smartphones utilizam a técnica denominada Duty Cycle justamente para reduzir o consumo de energia, porém, esta técnica afeta diretamente a qualidade do posicionamento (GSA, 2017b).

O Duty Cycling ou Controle Automático de Ganho (CAG) é uma ferramenta implementada no sistema Android que tem a função de ativar e desativar o rastreamento dos sinais GNSS durante curtos intervalos de tempo (milissegundos) (Figura 7). Essa alternância, no entanto, provoca discontinuidades nas observações da fase interferindo na qualidade do posicionamento (LIU et al., 2019; REALINI et al., 2017).

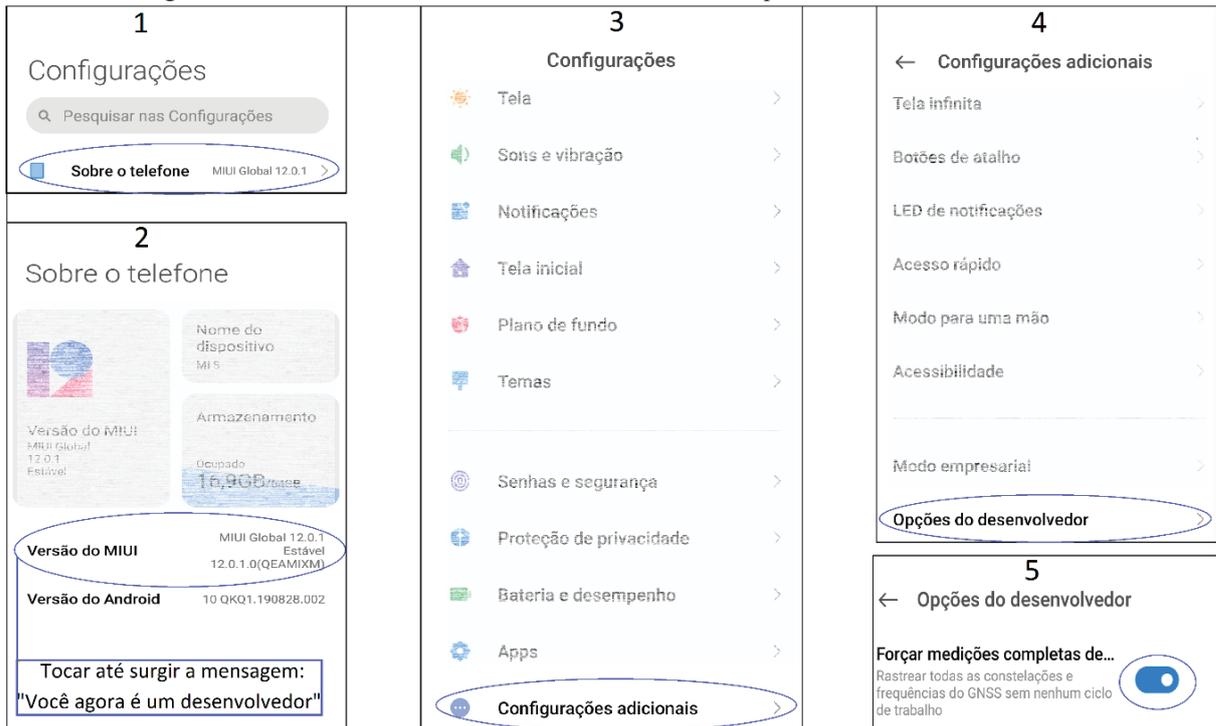
Figura 7 – Funcionamento da ferramenta *Duty Cycle* ou Controle Automático de Ganho



Elaboração: Os autores (2022).

No ano de 2017 a Google lançou o Android Oreo (IPA de nível 25), o qual possibilita que o CAG seja desabilitado neste sistema e em versões superiores. Para desativar a ferramenta CAG em seu dispositivo, o usuário deve acessar as configurações do desenvolvedor e ativar a função “Forçar medições completas de GNSS”, conforme demonstrado na Figura 8. Contudo, ressalta-se novamente que, embora a plataforma permita esta funcionalidade, os fabricantes não são obrigados a implementar tais ferramentas nos dispositivos.

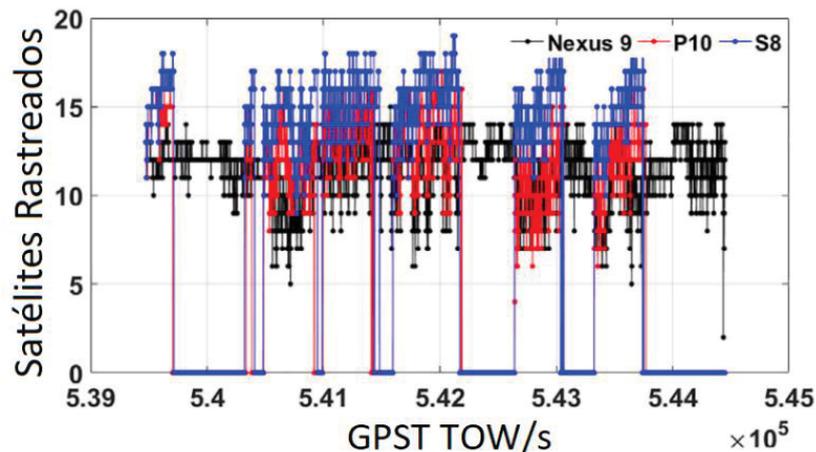
Figura 8 – Maneira de ativar o rastreo contínuo nos *smartphones* Xiaomi Mi 8 e Mi 11



Elaboração: Os autores (2022).

Liu et al. (2019) observaram a existência de vários períodos de tempo onde os smartphones HUAWEI P10 e Samsung S8 não rastrearam nenhum satélite, enquanto que o tablet Nexus 9 com a função CAG desabilitada, rastreou normalmente, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Número de satélites rastreados pelo *Tablet* Nexus 9 (preto) e pelos *smartphones* P10 (vermelho) e S8 (azul).



Elaboração: Adaptada de Liu et al. (2019).

Além da baixa qualidade da antena presente no smartphone, a ferramenta CAG também é outra barreira quanto à obtenção de soluções com alta acurácia via estes dispositivos (BANVILLE; DIGGELEN, 2016; HÅKANSSON, 2019). Os resultados obtidos por Paziewski, Sieradzki e Baryla (2019), mostraram uma divergência crescente entre os dados de fase e de código após a ativação da ferramenta CAG a partir do smartphone Huawei P20. Além disso, a ativação da ferramenta CAG causou repetidas variações nos dados do código, o que também é considerado um efeito relacionado ao relógio

do receptor. Finalmente, os autores salientam que a ativação da ferramenta CAG impede que as ambiguidades sejam solucionadas, por conseguinte, ela pode ser considerada um fator limitante no que se refere à utilização de determinados métodos de posicionamento.

4 QUALIDADE DO POSICIONAMENTO GNSS VIA SMARTPHONES

Dentre as tecnologias apresentadas nas seções anteriores, o GNSS é aquele mais adequado para aplicações que requerem alta acurácia e em ambientes externos (outdoor). No entanto, é difícil obter um posicionamento de alta acurácia via smartphones sem a necessidade de um hardware externo e sem as observações GNSS brutas.

O primeiro telefone celular comercial com receptor GPS foi lançado no ano de 1999 (BANVILLE; DIGGELEN, 2016). No entanto, pode-se estimar que a acurácia posicional deste telefone tenha sido superior a 30 m, visto que apenas no ano seguinte a Disponibilidade Seletiva foi desativada.

O posicionamento por GNSS via smartphones é afetado por erros atmosféricos, erros das órbitas de satélites, dos relógios, multicaminho, dentre outros (PESYNA et al., 2017). Para Li e Geng (2019), o multicaminho e o ruído do receptor são as duas principais fontes de erros nas medições. Gogoi et al. (2018) ressaltam que as interferências diretas na intensidade do sinal provocadas pelo multicaminho, tem sido o principal fator limitante na obtenção de coordenadas acuradas. Em condições de pouco multicaminho pode-se obter acurácia posicional em torno de 2 a 3 metros, porém, sob condições adversas, a acurácia é degradada em 10 m ou mais (PESYNA; HEATH; HUMPHREYS, 2014; ZHANG et al., 2018). Neste contexto, Pesyna et al. (2014) e Pesyna et al. (2017), consideram que a antena GNSS (de baixo custo) presente nos smartphones, é uma das principais barreiras na obtenção de acurácias ao nível centimétrico.

Nos últimos anos os estudos direcionados à determinação da precisão e acurácia alcançável com dispositivos smartphones se multiplicaram. Pesyna, Heath e Humphreys (2014) conectaram uma antena externa a um smartphone possibilitando a geração de observações de fase e do código. Logo, mediante o pós-processamento dos dados, os autores obtiveram acurácia ao nível centimétrico. Entretanto, os resultados obtidos pelos autores limitaram-se à demonstração da possibilidade do emprego de uma antena GNSS junto ao smartphone, isto é, eles contornaram as limitações do smartphone, como a versão da plataforma operacional e a qualidade da antena presente no dispositivo, conforme salienta Realini et al. (2017). De forma semelhante, Li e Geng (2019) utilizaram uma antena externa e comprovaram a baixa capacidade de supressão do multicaminho pelas antenas GNSS presente nos dispositivos móveis. Em sua pesquisa os autores descobriram que o ruído da pseudodistância nos dispositivos móveis é cerca de 10 vezes maior que o de receptores geodésicos.

Dentre as pesquisas relacionadas ao acesso aos dados GNSS brutos, cita-se a pesquisa desenvolvida por Realini et al. (2017). Os autores demonstraram ser possível obter precisão com nível decimétrico com um tablet mediante o pós-processamento de dados obtidos a partir de levantamentos realizados pelo método de posicionamento relativo estático rápido. Nesse método de posicionamento, a posição de um ponto é determinada com relação à de um ou mais pontos, cujas coordenadas são conhecidas (KAPLAN; HEGARTY, 2017). Ambos os métodos (relativo estático e relativo estático rápido) tem o mesmo princípio, o que os difere é a duração da campanha coleta de dados.

Dabove e Pietra (2019) demonstraram que o uso do posicionamento GNSS diferencial com dados oriundos de aparelhos smartphones pode produzir resultados melhores que 60 cm em tempo real, se uma rede de estações de referência estiver disponível. Nesse estudo foram analisados os aparelhos Samsung Galaxy S8+ e Huawei P10 plus, ambos com sistema operacional Android. O método de posicionamento diferencial consiste no uso de um receptor estacionário em um ponto com coordenadas

conhecidas, de modo que as correções geradas são enviadas em tempo real por meio de um sistema de comunicação (KAPLAN; HEGARTY, 2017).

Yan et al. (2020) realizaram testes que produziram resultados promissores com dois aparelhos: Huawei P10 (simples frequência) e Xiaomi Mi 8 dotado de módulo de dupla frequência. Os autores efetuaram o pós-processamento pelo método de posicionamento relativo e compararam os resultados obtidos com os dados GNSS dos smartphones aos resultados obtidos com um receptor geodésico convencional. Em termos de acurácia horizontal, o Huawei P10 proporcionou 50 cm de discrepância em relação ao posicionamento efetuado com receptor geodésico. Por outro lado, o Xiaomi 8 apresentou 10 cm de acurácia evidenciando o ganho da dupla frequência.

No Brasil, Gomes e Krueger (2020) avaliaram a acurácia do smartphone Xiaomi Mi 8 em modo estático a partir de diferentes métodos de posicionamento, mediante o pós-processamento dos dados a partir do método relativo e obtiveram acurácia planimétrica entre 49 e 98 cm, enquanto que o método de posicionamento por ponto preciso (PPP) proporcionou acurácia planimétrica entre a 22 e 100 cm. O método PPP utiliza as observáveis da fase da onda portadora e informações precisas referente às órbitas e erros dos relógios dos satélites, além de outros modelos matemáticos (KAPLAN; HEGARTY, 2017). Além disso, o PPP não requer outro receptor tornando-o vantajoso em relação ao método de posicionamento relativo.

Gomes, Klein e Krueger (2021), alcançaram acurácia planimétrica de aproximadamente 12 cm em modo estático com o Xiaomi Mi 8. Os autores obtiveram as coordenadas via o serviço online IBGE-PPP, utilizando apenas as constelações GPS e GLONASS e a frequência L1, e combinaram técnicas de ajustamento baseado nos mínimos quadrados para obter uma solução mais acurada.

A Tabela 2 apresenta os resultados da acurácia posicional obtida por algumas investigações no âmbito dos dispositivos móveis.

Tabela 2 – Acurácia posicional obtida a partir de dispositivos móveis de acordo com algumas pesquisas.

Publicação	Dispositivo móvel utilizado na pesquisa	Acurácia 2D aproximada (m)
(SIKIRICA et al., 2017)	Huawei P10	5,00 – 10,00
(ZHANG et al., 2018)	Tablet Google Nexus 9	< 0,60
(SPECHT et al., 2018)	Samsung Galaxy: Y, S3 Mini, S4, S5, S6 e S7	3,67 – 9,62
(LACHAPELLE; GRATTON, 2019)	Huawei Mate 20X	1,00
(LIU et al., 2019)	Tablet Google Nexus 9, Huawei P10 e Samsung S8	< 2,00
(FORTUNATO et al., 2019)	Xiaomi Mi 8	1,00 – 2,00
(ROBUSTELLI et al., 2020)	Xiaomi Mi 8 e Samsung S8	0,51 (Mi 8) e 5,64 (S8)
(GOMES; KRUEGER, 2020)	Xiaomi Mi 8	0,22 – 1,00
(GOMES; KLEIN; KRUEGER, 2021)	Xiaomi Mi 8	0,12 – 0,88

Elaboração: Os autores (2022).

5 DESAFIOS RELACIONADOS AO POSICIONAMENTO GNSS VIA SMARTPHONES

O posicionamento via smartphones baseado no GNSS está inerente as mesmas influências que os receptores GNSS convencionais, especialmente, quanto as perturbações sofridas pela onda eletromagnética durante sua trajetória. Além dessas perturbações existem ainda outras vulnerabilidades e/ou interferências, como os ataques jamming e spoofing e falhas nas antenas, que podem comprometer a qualidade do posicionamento (ACHANTA; WATT; SAGEN, 2015).

O jamming é um bloqueio provocado nos sinais GNSS rastreados e que pode trazer riscos aos usuários. Existem equipamentos que bloqueiam os sinais GNSS e por isso, em determinados países como os EUA, eles são proibidos (ACHANTA; WATT; SAGEN, 2015).

O spoofing trata-se de uma interferência intencional ou não que pode fornecer uma solução de tempo ou posição incorreta. Isso pode ocorrer quando o receptor do usuário não consegue identificar a diferença entre os sinais reais dos satélites e os sinais falsificados. Ataques spoofing vem se tornando uma séria ameaça às aplicações que utilizam informações provenientes do GNSS via dispositivos móveis (CECCATO et al., 2018).

De acordo com Akos (2012) o CAG pode ser uma ferramenta complementar a outras metodologias para prevenir e detectar os ataques spoofing. Além disso, o autor menciona a combinação de acelerômetros (ou outros sensores) e CAG, como um meio muito eficaz de detecção destes ataques.

Receptores GNSS de dupla frequência além de proporcionarem uma melhor acurácia são mais resistentes aos ataques jamming e spoofing. Os sinais L5/E5a estão localizados em bandas compartilhadas com o Serviço de Rádio Navegação Aeronáutica (ARNS, sigla em inglês para Aeronautical Radio Navigation Service), ou seja, estão sujeitas a maiores proteções regulamentais (LEICK; RAPOPORT; TATARNIKOV, 2015).

Segundo Liu et al. (2019) os principais motivos que interferem na qualidade do posicionamento obtido por smartphones são as antenas e o receptor GNSS de baixo custo e baixa potência. De acordo com Monico (2008), devido a estrutura dos sinais, todas as antenas devem ser polarizadas circularmente. Contudo, usualmente a antena utilizada em smartphones é uma Antena Planar F Invertida (Planar Inverted-F Antenna - PIFA) de baixo custo, a qual usa polarização linear (em vez de circular), tornando os smartphones mais susceptível aos efeitos do multicaminho (BANVILLE; DIGGELEN, 2016; GSA, 2017b).

Outro fator relevante consiste na localização da antena no smartphone, a qual é ditada mais pelo seu design do que pelas restrições de Rádio Frequência, o que pode resultar em locais inadequados tendo em vista que a manipulação do dispositivo pelo usuário pode degradar ainda mais a recepção dos sinais GNSS (GSA, 2017b; HUMPHREYS et al., 2016).

É válido ressaltar que o posicionamento GNSS no Brasil tem desafios ainda maiores no que concerne a mitigação dos efeitos da ionosfera, haja visto que o país está localizado, em grande parte, na região equatorial e de baixas latitudes caracterizada pela presença da cintilação ionosférica (VANI et al., 2019). Nesse sentido, os novos smartphones capazes de rastrear duas frequências ou mais, poderão proporcionar avanços para mitigação do efeito ionosférico.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este artigo fornece uma visão geral sobre as potencialidades do posicionamento GNSS via smartphones na atualidade.

Em virtude de seu custo ser relativamente baixo, quando comparado a receptores geodésicos, aliado, ainda, a flexibilidade da fusão das várias ferramentas e funcionalidades dos diversos sensores presentes no mesmo, observa-se que há um cenário promissor no emprego de smartphones como ferramenta para atividades profissionais na engenharia, como por exemplo: levantamentos cadastrais, posicionamento de embarcações, atualizações de cartas, mapeamento e georreferenciamento de imagens de satélites LANDSAT.

Com base nas pesquisas citadas, pode-se estabelecer que a acurácia atual do posicionamento absoluto com smartphones é da ordem de 2 a 3m sob boas condições de visibilidade e disponibilidade de satélites. Diante do novo cenário, onde as observações GNSS brutas são utilizadas, os autores já verificaram resultados de qualidade decimétrica no modo PPP. No que se refere ao posicionamento relativo, embora ainda existam muitos desafios a literatura traz resultados da ordem de 10 cm para o posicionamento relativo estático pós-processado e de aproximadamente 10 a 30 cm para o tempo real.

O uso de soluções multi-GNSS, receptores de dupla frequência e o emprego de informações externas, possibilitam elevar a acurácia para níveis ainda mais significativos. Espera-se que futuramente seja possível empregar os smartphones em aplicações que antes eram restritas apenas aos receptores geodésicos.

Embora tenham surgido diversas tecnologias e ferramentas com o propósito de melhorar a acurácia posicional obtida a partir dos smartphones, ainda há limitações. Dentre essas, cita-se a baixa qualidade da antena GNSS e sua alta sensibilidade quanto as interferências sofridas pelos sinais, o que corrobora com a suscetibilidade ao efeito do multicaminho.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor, número do processo 40001016002P6.

Contribuição dos Autores

O primeiro autor (Allan Gomes) foi responsável pela conceptualização, pesquisa, visualização, redação e edição. Os demais autores foram responsáveis pela supervisão e revisão.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesse.

Referências

- ACHANTA, S.; WATT, S. T.; SAGEN, E. Mitigating GPS Vulnerabilities. In: POWER AND ENERGY AUTOMATION CONFERENCE, 2015. Spokane. **Anais...** Spokane, 2015. p. 6-7.
- AKOS, D. M. Who's Afraid of the Spoofer? GPS/GNSS Spoofing Detection via Automatic Gain Control (AGC). **Navigation: Journal of The Institute of Navigation**, U.S.A, 2012. v. 59, n. 4, p. 281–290.
- ANDROID DEVELOPERS. **Raw GNSS Measurements**. Disponível em: <<https://developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss>>. Acesso em: 21 mai. 2019.
- BANVILLE, S.; DIGGELEN, F. VAN. Precise positioning using raw GPS measurements from Android smartphones. **GPS WORLD**. Disponível em: <<https://www.gpsworld.com/innovation-precise-positioning-using-raw-gps-measurements-from-android-smartphones/>>. Acesso em: 6 dez. 2018.
- BDS, B. N. S. S. **The BDS-3 Constellation Deployment Is Fully Completed Six Months Ahead of Schedule UNOOSA Sends a Congratulation Letter**. Disponível em: <http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/202006/t20200623_20692.html>. Acesso em: 8 ago. 2020.
- CECCATO, S.; FORMAGGIO, F.; CAPARRA, G.; LAURENTI, N.; TOMASIN, S. Exploiting side-information for resilient GNSS positioning in mobile phones. In: IEEE/ION POSITION, LOCATION AND NAVIGATION SYMPOSIUM (PLANS), 2018, Monterey. **Anais...** Monterey, 2018. p.1515–1524.
- COMMISSION, E. **Smart cities**. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban>>

- development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en>. Acesso em: 27 jan. 2022.
- DABOVE, P.; PIETRA, V. DI. Towards high accuracy GNSS real-time positioning with smartphones. **Advances in Space Research**, v. 63, n. 1, p. 94–102, 2019. DOI. 10.1016/j.asr.2018.08.025.
- DABOVE, P.; PIETRA, V. DI; LINGUA, A. M. Positioning Techniques with Smartphone Technology: Performances and Methodologies in Outdoor and Indoor Scenarios. In: MOHAMUDALLY N. (Ed.). **Smartphones from an Applied Research Perspective**. London: InTech, 2017. p. 163-183.
- DARUGNA, F.; WÜBBENA, J. B.; WÜBBENA, G.; et al. Impact of robot antenna calibration on dual-frequency smartphone-based high-accuracy positioning: a case study using the Huawei Mate20X. **GPS Solutions**, v. 25, n. 1, p. 1–12, 2020. DOI. 10.1007/s10291-020-01048-0
- DEFENSE, D. OF; SECURITY, D. OF H.; TRANSPORTATION, D. OF. **2019 Federal Radionavigation Plan**. Springfield, 2019.
- DIGGELEN, F. VAN. **A-GPS : assisted GPS, GNSS, and SBAS**. London: Artech House, 2009.
- DIGGELEN, F. VAN; WANT, R.; WANG, W. **How to achieve 1-meter accuracy in Android**. Disponível em: <<http://gpsworld.com/how-to-achieve-1-meter-accuracy-in-android/>>. Acesso em: 3 out. 2018.
- DIMARZIO, J. F. **Beginning Android® Programming with Android Studio**. 4o ed. Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- EC, E. C. **COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2019/320 of 12 December 2018**. Official Journal of the European Union. Brussels: 2018. Regulamento oficial.
- EENA, E. E. N. A. **EENA Operations Document: Advanced Mobile Location (AML) Specifications & Requirements**. 2016. Relatório de Operações.
- EENA, E. E. N. A. **Advanced Mobile Location AML Report card**. 2019. Relatório de Operações.
- EU, E. U. **DIRECTIVE (EU) 2018/1972 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018**. Official Journal of the European Union. Strasbourg: 2018. Regulamento oficial.
- FCC, F. C. C. **911 and E911 Services**. Disponível em: <<https://www.fcc.gov/general/9-1-1-and-e9-1-1-services>>. Acesso em: 4 ago. 2020.
- FORTUNATO, M.; CRITCHLEY-MARROWS, J.; SIUTKOWSKA, M.; et al. Enabling High Accuracy Dynamic Applications in Urban Environments Using PPP and RTK on Android Multi-Frequency and Multi-GNSS Smartphones. In: 2019 EUROPEAN NAVIGATION CONFERENCE (ENC), 2019, Warsaw **Anais...** .Warsaw: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc (IEEE), 2019. p.1-9.
- GIKAS, V.; PERAKIS, H. Rigorous Performance Evaluation of Smartphone GNSS/IMU Sensors for ITS Applications. **Sensors**, v. 16, n. 8, p. 1240, 2016. DOI. 10.3390/s16081240.
- GOGOI, N.; MINETTO, A.; LINTY, N.; DOVIS, F. A Controlled-Environment Quality Assessment of Android GNSS Raw Measurements. **Electronics**, v. 8, n. 1, p. 5, 2018. DOI. 10.3390/electronics8010005.
- GOMES, A. **Avaliação da qualidade posicional de um sensor GNSS de dupla frequência presente em um smartphone sob diferentes cenários e métodos de posicionamento**. 2019. p. 1-117. Dissertação - Universidade Federal Paraná, Curitiba, 2019.
- GOMES, A.; KLEIN, I.; KRUEGER, C. P. Circle fitting for improved GNSS positioning via smartphones for engineering purposes Ajustamento de circunferência como melhora do posicionamento GNSS via smartphones para fins de engenharia. **Bulletin of Geodetic Sciences**, v.

- 27, Special Issue XI CBCG ORIGINAL, p. 1-10, 2021. DOI. 10.1590/s1982-21702021000s00021.
- GOMES, A.; KRUEGER, C. P. Evaluation of the positional quality through the post-processing of raw GNSS data from a smartphone via different satellite positioning methods. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 26, n. 4, p. 1–15, 2020. DOI. 10.1590/S1982-21702020000400020.
- GOOGLE. **GnssAntennaInfo - Android Developers**. Disponível em: <<https://developer.android.com/reference/kotlin/android/location/GnssAntennaInfo>>. Acesso em: 8 out. 2021.
- GOOGLE DEVELOPERS. **Fused Location Provider API - Google Developers**. Disponível em: <<https://developers.google.com/location-context/fused-location-provider>>. Acesso em: 28 abr. 2020.
- GOOGLE PLAY. **Apps Android no Google Play**. Disponível em: <<https://play.google.com/store/apps>>. Acesso em: 28 abr. 2020.
- GPS WORLD STAFF. **Dual-frequency GNSS smartphone hits the market: GPS World**. Disponível em: <<https://www.gpsworld.com/dual-frequency-gnss-smartphone-hits-the-market/>>. Acesso em: 29 abr. 2020.
- GPSTEST. **GPSTest Database**. Disponível em: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1jXtRCoEnnFNWj6_oFIVWflsf-b0jZpyhN-BXsv7uo/edit#gid=0>. Acesso em: 8 out. 2021.
- GSA. **White Paper on using GNSS Raw Measurements on Android Devices**. 2017a. p. 1-48. Relatório Técnico.
- GSA. **GNSS Market Report, Issue 5**. 2017b. p. 1-100. Relatório Técnico.
- GSA. **GNSS Market Report, Issue 6**. 2019. 1-112. Relatório Técnico.
- HÅKANSSON, M. Characterization of GNSS observations from a Nexus 9 Android tablet. **GPS Solutions**, v. 23, p. 21, 2019. DOI. 10.1007/s10291-018-0818-7.
- HEUBERGER, A.; ELST, G.; HANKE, R. **Microelectronic Systems - Circuits, Systems and Applications**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- HUMPHREYS, T. E.; MURRIAN, M.; VAN DIGGELEN, F.; PODSHIVALOV, S.; PESYNA, K. M. On the feasibility of cm-accurate positioning via a smartphone's antenna and GNSS chip. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE/ION POSITION, LOCATION AND NAVIGATION SYMPOSIUM, PLANS, 2016. **Anais...** Savannah: 2016. p.232–242, 2016.
- KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. **Understanding GPS/GNSS Principles and Applications**. ed. 3. Boston: ARTECH HOUSE, 2017.
- KOS, A.; TOMAŽIČ, S.; UMEK, A. Evaluation of Smartphone Inertial Sensor Performance for Cross-Platform Mobile Applications. **Sensors**, v. 16, n. 4, p. 477, 2016. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. DOI. 10.3390/s16040477.
- LACHAPELLE, G.; GRATTON, P. GNSS Precise Point Positioning with Android Smartphones and Comparison with High Performance Receivers. In: 2019 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL, INFORMATION AND DATA PROCESSING (ICSIDP). **Anais...** Chongqing: IEEE, 2019. p. 1–9, 2019.
- LAURICHESSE, D.; BANVILLE, S. **Innovation: Instantaneous centimeter-level multi-frequency precise point positioning - GPS World**. Disponível em: <<http://www.ppp-wizard.net/Articles/Innovation-PPP.pdf>>. Acesso em: 6 mai. 2019.
- LEICK, A.; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D. **GPS SATELLITE SURVEYING**. ed. 4. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2015.

- LI, G.; GENG, J. Characteristics of raw multi-GNSS measurement error from Google Android smart devices. **GPS Solutions**, v. 23, n. 3, p. 1–16, 2019. DOI. 10.1007/s10291-019-0885-4.
- LIU, W.; SHI, X.; ZHU, F.; TAO, X.; WANG, F. Quality analysis of multi-GNSS raw observations and a velocity-aided positioning approach based on smartphones. **Advances in Space Research**, v. 63, n. 8, p. 2358–2377, 2019.
- MALKOS, S. **Google to Provide Raw GNSS Measurements: User Location Takes Center Stage in New Android OS - GPS World**. Disponível em: <<https://www.gpsworld.com/google-to-provide-raw-gnss-measurements/>>. Acesso em: 17 abr. 2019.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. DE O. Correção ionosférica utilizando o modelo de klobuchar e o modelo regional da ionosfera: Avaliação da performance no posicionamento por ponto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 2002, Presidente Prudente - SP. **Anais...** Presidente Prudente - SP, 2002. p.05–60.
- MEIRELLES, F. S. **Uso da TI-Tecnologia de Informação nas Empresas 32a Pesquisa Anual do FGVcia**. FGV EAESP, 2021. p. 1-186. Relatório Técnico.
- MIRALLES, D.; LEVIGNE, N.; AKOS, D. M.; BLANCH, J.; LO, S. Android Raw GNSS Measurements as a New Anti-Spoofing and Anti-Jamming Solution. In: PROCEEDINGS OF THE 31st INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS+ 2018), 2018, Miami. **Anais...** 2018. p.334–344.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS Descrição, fundamentos e aplicações**. ed. 2. Presidente Prudente: Unesp, 2008.
- NETTHONGLANG, C.; THONGTAN, T.; SATIRAPOD, C. GNSS Precise Positioning Determinations Using Smartphones. In: 2019 IEEE ASIA PACIFIC CONFERENCE ON CIRCUITS AND SYSTEMS (APCCAS), 2019, Bangkok. **Anais...** IEEE, 2019. p. 401–404, 2019.
- O'CONNOR, A. C.; GALLAHER, M. P.; CLARK-SUTTON, K.; et al. **Economic Benefits of the Global Positioning System (GPS)**. Gaithersburg: RTI INTERNATIONAL, 2019. Relatório Oficial.
- PAZIEWSKI, J.; SIERADZKI, R.; BARYLA, R. Signal characterization and assessment of code GNSS positioning with low-power consumption smartphones. **GPS Solutions**, v. 23, n. 4, p. 1–12, 2019. Springer. DOI. 10.1007/s10291-019-0892-5.
- PEI, L.; GUINNESS, R.; CHEN, R.; et al. Human Behavior Cognition Using Smartphone Sensors. **Sensors**, v. 13, n. 2, p. 1402–1424, 2013. DOI. 10.3390/s130201402.
- PESYNA, K. M.; HEATH, R. W. J.; HUMPHREYS, T. E. Centimeter Positioning with a Smartphone-Quality GNSS Antenna. In: PROCEEDINGS OF THE 27th INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS+ 2014), 2014, Tampa. **Anais...** p. 1568-1577.
- PESYNA, K. M.; HUMPHREYS, T. E.; HEATH, R. W.; NOVLAN, T. D.; ZHANG, J. C. Exploiting Antenna Motion for Faster Initialization of Centimeter-Accurate GNSS Positioning With Low-Cost Antennas. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 53, n. 4, p. 1597–1613, 2017. DOI. 10.1109/TAES.2017.2665221.
- REALINI, E.; CALDERA, S.; PERTUSINI, L.; SAMPIETRO, D. Precise GNSS Positioning Using Smart Devices. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 17, n. 10, p. 14, 2017. DOI. 10.3390/s17102434.
- ROBUSTELLI, U.; BAIOCCHI, V.; MARCONI, L.; RADICIONI, F.; PUGLIANO, G. Precise Point Positioning with single and dual-frequency multi-GNSS Android smartphones. In: ICL-GNSS 2020 WiP PROCEEDINGS. **Anais...** Tampere: CEUR-WS, 2020.
- SIKIRICA, N.; MALIC, E.; RUMORA, I.; FILJAR, R. Exploitation of google GNSS measurement API

- for risk assessment of GNSS applications. In: 25th TELECOMMUNICATION FORUM (TELFOR 2017), 2017, Belgrade. **Anais...** 2017. p.1–3.
- SPECHT, C.; DABROWSKI, P. S.; PAWELSKI, J.; SPECHT, M.; SZOT, T. Comparative analysis of positioning accuracy of GNSS receivers of Samsung Galaxy smartphones in marine dynamic measurements. **Advances in Space Research**, v. 63, n. 9, p. 3018–3028, 2018. DOI. 10.1016/j.asr.2018.05.019.
- TECHNOLOGY, B. S. **Dual Frequency performance in mass market**. 2018. Disponível em: <https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/expo/miguel_torroja_broadcom.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2019.
- TILAK, S. Real-World Deployments of Participatory Sensing Applications: Current Trends and Future Directions. **ISRN Sensor Networks**, v. 2013, 2013. DOI. 10.1155/2013/583165.
- USMAN, M.; ASGHAR, M. R.; ANSARI, I. S.; GRANELLI, F.; QARAQE, K. A. Technologies and Solutions for Location-Based Services in Smart Cities: Past, Present, and Future. **IEEE Access**, v. 6, p. 22240–22248, 2018. DOI. 10.1109/ACCESS.2018.2826041.
- VANI, B. C.; FORTE, B.; MONICO, J. F. G.; et al. A Novel Approach to Improve GNSS Precise Point Positioning during Strong Ionospheric Scintillation: Theory and Demonstration. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 68, n. 5, p. 4391–4403, 2019. DOI. 10.1109/TVT.2019.2903988.
- WANNINGER, L.; HESSELBARTH, A. GNSS code and carrier phase observations of a Huawei P30 smartphone: quality assessment and centimeter-accurate positioning. **GPS Solutions**, v. 24, n. 2, p. 1–9, 2020. DOI. 10.1007/s10291-020-00978-z.
- YAN, W.; BASTOS, L.; MAGALHÃES, A.; ZHANG, Y.; WANG, A. Assessing Android Smartphone Based GNSS Positioning Accuracy. In: CHINA SATELLITE NAVIGATION CONFERENCE (CSNC) 2020 PROCEEDINGS: VOLUME III. LECTURE NOTES IN ELECTRICAL ENGINEERING, 2020, Singapore. **Anais...** Springer, 2020. p.144–153.
- ZHANG, W.; GAO, Y. **Proposed GNSS Navigation Messages for Improved Performance - GPS World**. Disponível em: <<https://www.gpsworld.com/innovation-faster-higher-stronger/>>. Acesso em: 24 fev. 2019.
- ZHANG, X.; TAO, X.; ZHU, F.; SHI, X.; WANG, F. Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach. **GPS Solutions**, v. 22, n. 3, p. 70, 2018. DOI. 10.1007/s10291-018-0736-8.

2.2 ARTIGO 2 - CIRCLE FITTING FOR IMPROVED GNSS POSITIONING VIA SMARTPHONES FOR ENGINEERING PURPOSES

GOMES, A.; KLEIN, I.; KRUEGER, C. P. Circle fitting for improved GNSS positioning via smartphones for engineering purposes Ajustamento de circunferência como melhora do posicionamento GNSS via smartphones para fins de engenharia. Bulletin of Geodetic Sciences, v. 27, Special Issue XI CBCG ORIGINAL, p. 1-10, 2021. DOI. 10.1590/s1982-21702021000s00021.

Special Issue XI CBCG

ORIGINAL ARTICLE

CIRCLE FITTING FOR IMPROVED GNSS POSITIONING VIA SMARTPHONES FOR ENGINEERING PURPOSES

Ajustamento de circunferência como melhora do posicionamento GNSS via smartphones para fins de engenharia

Allan Gomes¹ - ORCID: 0000-0003-0730-0287

Ivandro Klein^{1,2} - ORCID: 0000-0003-4296-592X

Claudia Pereira Krueger¹ - ORCID: 0000-0002-4839-1317

¹Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba-PR, Brasil.

E-mail: allangmss@gmail.com; cpkrueger64@gmail.com

²Instituto Federal de Santa Catarina, Curso de Agrimensura, Florianópolis-SC, Brasil.

E-mail: ivandroklein@gmail.com

Received in 11th August 2020.

Accepted in 13th April 2021.

Abstract:

With access to the raw data collected by certain Android smartphones, it is possible to perform post-processing of the data. Thus, it is possible to employ certain satellite positioning methods that were previously restricted to geodetic receivers. Thanks to this and other innovations, such as the emergence of smartphones with modern GNSS sensors, a promising scenario is seen when employing these devices in engineering applications. Generally, in certain applications that require high accuracy, centimeter and millimeter order, geodetic receivers are used. However, these devices are expensive when compared to smartphones. In this research, the coordinates of a point were determined via a smartphone with a modern GNSS sensor, whose data were post-processed by the IBGE-PPP service, using the combination GPS+GLONASS and L1 frequency. Thus, using circle adjustment techniques based on least squares, it was possible to obtain horizontal accuracy of approximately 12 cm and 25 cm with a set of about 128-hour and 24-hour sessions respectively. The results obtained in this research suggest that the applied

methodology can be used in certain applications in engineering, such as land surveying of rural properties.

Keywords: Smartphone; GNSS; IBGE-PPP; Adjustment; Least Squares

1. Introduction

Several mobile and wearable electronic devices, such as smartphones, tablets and smartwatches, use position information from Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Technological advances have made some of these objects essential items in the daily life of modern society, which drive an increasing diversification of Location-Based Services (LBS).

Currently, every modern smartphone has an embedded GNSS sensor. According to GSA (2019), among the 1.6 billion GNSS receiver shipments in mass market devices in 2019, 90% were inserted in smartphones and wearables. However, the professional segment represented less than 3% of the total GNSS receivers shipments in the same year, with around 1.5 million units.

Smartphone is a mobile phone with an operating system capable of downloading and running a software application (app) (Ericsson, 2018). According to GSA (2019), in 2020 smartphones will be the most used electronic devices in the world. Under good visibility conditions, positioning via smartphones can result in accuracy better than 10 m (Banville and Diggelen, 2016), between 1 to 2 m (Kaleev and Saburova, 2018), and between 2 to 3 m (Pesyna et al., 2014). However, in adverse conditions, when there are obstructions, the accuracy can be worse than 10 m. This level of accuracy, however, may be sufficient for certain LBS's, such as navigation, vehicle tracking, social networks, deliveries, among others (Banville and Diggelen, 2016).

This research seeks to refine the GNSS solutions obtained with a smartphone by adjusting the coordinates obtained in different positions to estimate a central position. This is a pioneering study regarding the positioning at the centimeter level considering three aspects: GNSS data via a smartphone with a modern GNSS sensor; post-processing of data via the free service most used in Brazil (IBGE-PPP); and methods of adjusting observations based on Least Squares.

This article is structured as follows: Session 2 presents the theoretical fundamentals. Session 3 presents the characteristics related to the data collection campaigns, the equipment, positioning method and data adjustment. Session 4 presents the mathematical models adopted for the analysis of the results shown in Session 5. Final considerations are presented in Session 6.

2. Theoretical fundamentals

In certain engineering applications, it is necessary to use conventional geodetic receivers that, depending on the method and technique adopted, can provide position coordinates at the centimeter level (even millimeter) (LEICK et al., 2015). In the current Brazilian scenario, these applications include the land surveying of rural properties, ground control points for

photogrammetry, monitoring of structures and masses, paving, sanitation, precision agriculture, bathymetric surveys, among others.

On the other hand, when aiming to obtain geodetic coordinates with high accuracy, the user must consider several characteristics in their decision-making, including the cost benefit. In general, these characteristics include factors such as study area, satellite positioning method, execution time, receiver model, and software.

There are several positioning methods that make it possible to obtain highly accurate geodetic coordinates. The Precise Point Positioning (PPP) method is one of the most viable options in terms of cost-benefit. The Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) manages a free online service for processing GNSS data, called IBGE-PPP. In addition, with IBGE-PPP, the user can obtain geodetic coordinates referenced to the Brazil geodetic reference system, the Geocentric Reference System for the Americas (SIRGAS2000) (IBGE, 2017). Another advantage when adopting the PPP method is the possibility of using only one receiver during the survey, making this method independent of the baseline length (LEICK et al., 2015).

Despite their potential, geodetic receivers have high cost and their price can reach hundreds of thousands of dollars in the Brazilian market. Thus, in applications where a higher risk of damage and loss of the receiver is expected, the user may be discouraged from using such equipment.

With the increasing use of GNSS sensors in mobile devices and the expansion of LBS, the global market has been directing several technologies and tools seeking to increase the quality and robustness of the positioning via these electronics. In August 2016, Google made possible for the first time to access raw GNSS data collected by smartphones and tablets compatible with the Android Nougat operating system and greater versions (Malkos, 2016). Among the main information, navigation messages, carrier phase information, Doppler measurements, and information that make up the pseudorange are now available. Later, in 2018 Xiaomi launched the first smartphone with dual frequency GNSS sensor (Technology, 2018).

Due to the restriction on raw GNSS data, several authors consider mobile devices “black boxes”, since only the final solutions are available to app developers (Banville and Diggelen, 2016; Redelkiewicz et al., 2018). Accessing raw GNSS data, more robust multi-GNSS apps (multiple constellations and frequencies) can be developed, such as the Geo++ app, which enables the collection and storage of raw GNSS data in the universal Receiver Independent Exchange Format (RINEX) (Geo++, 2017).

In previous research, several authors sought to analyze the positional quality of tablets and smartphones. Gill et al. (2017) and Zhang et al. (2018), incorporated carrier phase observations in the static positioning solution using the Nexus 9 tablet, with which the authors achieved RMS error less than 37 and 60 cm in the horizontal and vertical direction, respectively. Håkansson (2019) achieved decimeter to meter level accuracy via the same tablet and identified a high sensitivity of accuracy under different multi-path conditions.

Pirazzi et al. (2017) evaluated the performance of a smartphone under different scenarios and obtained decimetric accuracy via the PPP method in static mode. Lu et al. (2018) compared the performance of different smartphone models in open sky scenario, and obtained meter level horizontal RMS error via the Single Point Positioning (SPP) method. On the other hand, Dabove et al. (2020) achieved decimeter level planimetric accuracy via the relative method in static mode, using smartphones Huawei P10 + and Samsung Galaxy S8 +.

After processing the raw data and obtaining the geodetic coordinates, the user can employ technical methods for adjusting observations in order to increase the robustness of their solutions. Among the various adjustment methods, the Gauss-Helmert (GH) and Gauss-Markov (GM) methods are most common (LEICK et al., 2015).

3. Material and Methods

3.1 Experimental setup

The scenario chosen to carry out data collection is free of obstructions, since there are no buildings or trees above the horizon within 50 meters distance. The geodetic mark consists of a rigid concrete pillar of approximately 1.5 m height installed on the roof of a single-story building. It is located next to the Laboratory of Spatial Geodesy and Hydrography (LAGEH), at the Polytechnic Center Campus of the Federal University of Paraná (UFPR) in Curitiba, Paraná, Brazil (Approximate geodetic coordinates: $-25^{\circ} 26' 54.89''$ latitude, $-49^{\circ} 13' 52.26''$ longitude).

There is a forced centering device (a standard screw) on the pillar that makes it possible to position a geodetic antenna on it. In addition, three auxiliary points around the center were considered, at a fixed distance of 20 cm from the central point (on the left of Figure 1). The fixed distance was possible by means of a special support (Figure 1).

The smartphone selected was the Xiaomi Mi 8, whose dual-frequency GNSS sensor (BCM47755) is compatible with multiple GNSS: GPS (L1 and L5), GLONASS (L1), Galileo (E1 and E5) and BeiDou (B1). The second frequency (L5) data was not utilized in this study. Nevertheless, there is no information regarding the exact position of the antenna and its phase center calibration parameters (Skorupa, 2020). Thus, in all data collected, the smartphone was horizontally positioned on the support, as shown on the right of Figure 1. Therefore, due to the dimensions of the smartphone body (74.8 mm X 154.9 mm X 7.6 mm), it is observed that there is a maximum uncertainty equal to 15.5 cm.

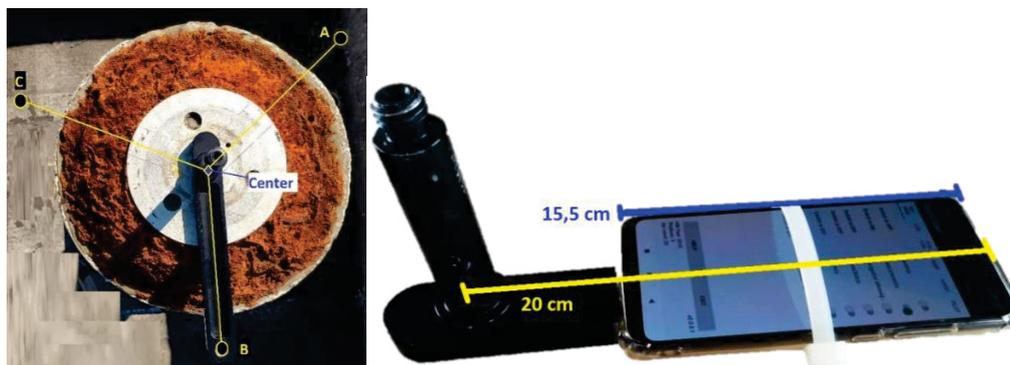


Figure 1: On the left, the figure shows the position of the support on the pillar oriented in relation to the point B. On the right, the figure shows the position of the smartphone to the support and its dimensions.

The reference coordinates of the points were determined by the relative positioning method (LEICK et al., 2015), using the Topcon HiPer SR dual frequency geodetic receiver with built-in

antenna, which provided positional accuracy at the millimeter level. Therefore, in this research, these coordinates will be called “true” or “reference” coordinates. The base station is located at a distance of approximately 25 m, configuring an extremely short baseline. This base station belongs to the Brazilian Network for Continuous Monitoring of the GNSS Systems (RBMC), called RBMC-UFPR (IBGE, n.d.). This station uses a Trimble NetR9 receiver with Zephyr 3 geodetic antenna. The reference coordinates were obtained with data collection of approximately 4 hours.

3.2 Data collection and Post-processing

The Mi 8 smartphone allows access to raw data, thus, the Geo++ Rinx Logger app (version 2.0.1) was used, which converts the collected data and stores it in the universal RINEX format. The app was configured to track all possible frequencies with a data recording interval of 1 s.

Each field campaign had an average duration of approximately 4 hours. However, each campaign was also processed using only the first initial hour. The general characteristics of the campaigns are shown in Table 1.

Table 1: Static data collection campaigns conducted with Mi 8

Campaign	Auxiliary point	Identification	Date (yyyy-mm-dd)	Duration (hh:mm)
1	A	1A	2019-02-04	4:50 and 1:00
2	C	2C	2019-02-04	4:00 and 1:00
3	B	3B	2019-02-05	4:50 and 1:00
4	B	4B	2019-02-05	4:10 and 1:00
5	A	5A	2019-02-06	4:50 and 1:00
6	C	6C	2019-02-06	5:10 and 1:00
7	A	7A	2019-02-07	4:00 and 1:00
8	C	8C	2019-02-07	4:00 and 1:00
9	B	9B	2019-02-12	4:15 and 1:00
10	B	10B	2019-02-12	4:00 and 1:00
11	B	11B	2019-02-12	4:10 and 1:00
12	C	12C	2019-02-13	4:00 and 1:00
13	C	13C	2019-02-13	4:00 and 1:00
14	C	14C	2019-02-13	4:00 and 1:00
15	C	15C	2019-02-13	4:00 and 1:00
16	C	16C	2019-02-14	3:30 and 1:00
17	A	17A	2019-02-14	5:40 and 1:00

The IBGE-PPP uses the CSRS-PPP (GPS Precise Point Positioning) program developed by the Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCan) (IBGE, 2017). All campaigns carried out with Mi 8 were post-processed by the online service IBGE-PPP, with the following characteristics: data recording interval equal to 1 s; GPS and GLONASS constellations; elevation mask equal to 10 degrees (default); final precise ephemeris. Although the Mi 8 has a dual frequency GNSS sensor, the IBGE-PPP service is not compatible with modern frequencies (L5 and E5), and with the Galileo and BeiDou constellations.

The campaigns carried out with the geodetic receiver were post-processed using the commercial software Leica Infinity. To facilitate understanding, the Universal Transverse of Mercator (UTM) system was adopted, whose plane coordinates are expressed in metric units.

4 Circle Adjustment models adopted

To determine the horizontal coordinates (2D) of the central position of the column (forced centering device), the Gauss-Helmert (GH) or mixed model was adopted, demonstrated in detail in Leick et al. (2015).

In the GH model, the observations that make up the observation vector are the UTM coordinates (“east” – E and “north” – N), as demonstrated in equation 1. The unknown parameters are the center coordinates (E_0, N_0) and the distance (radius $-r_0$) between the center of the column and the vertices (A, B and C). The partial derivative expressions can be found in detail in Gemael et al. (2015).

$$(E_i - E_0)^2 + (N_i - N_0)^2 - r_0^2 = 0 \quad (1)$$

To verify the quality of the adjustment, statistical tests were carried out according to the following hypotheses:

$$\text{Null hypothesis: } H_0: \hat{\sigma}^2 \leq \sigma_0^2 \quad \text{against} \quad \text{Alternative hypothesis: } H_1: \hat{\sigma}^2 > \sigma_0^2$$

Where: σ_0^2 and $\hat{\sigma}_0^2$ are the *a-priori* and *a-posteriori* variance factors, respectively.

The basic hypothesis is not rejected, at the level of significance α (5%), if:

$$v^T P v \leq \chi_{n-u, \alpha}^2 \quad (2)$$

Where $v^T P v$ is the weighted sum of the squared residuals, P is the weight matrix and $\chi_{n-u, \alpha}^2$ is the critical value in Chi-square distribution with $n-u$ degrees of freedom and significance level of α .

Two adjustments were performed (Table 2). By analyzing the residuals generated in the first solution, those that were higher than the smallest standard deviation were removed from the new adjustments. The variance input in the circle adjustment was taken from the PPP output, ignoring covariances. The general characteristics adopted in each adjustment are shown in Table 2.

Table 2: General characteristics of the six circle adjustments.

Solutions	Weight	Number of Observations	Number of Equations	Session Duration (hh:mm)	Total survey duration
GH1	$\frac{1}{\sigma^2 E}; \frac{1}{\sigma^2 N}$	34	17	4:00	136h
GH2	$\frac{1}{\sigma^2 E}; \frac{1}{\sigma^2 N}$	32	16	4:00	128h
GH3	$\frac{1}{\sigma^2 E}; \frac{1}{\sigma^2 N}$	34	17	1:00	34h
GH4	$\frac{1}{\sigma^2 E}; \frac{1}{\sigma^2 N}$	28	14	1:00	28h
GH5*	$\frac{1}{\sigma^2 E}; \frac{1}{\sigma^2 N}$	24	12	4:00	96h
GH6*	$\frac{1}{\sigma^2 E}; \frac{1}{\sigma^2 N}$	24	12	1:00	24h

* The same number of campaigns in each point (A=4, B=4 and C=4).

4.1 Discrepancies and Accuracy

Two analysis strategies were adopted. The first consists of making an average of post-processed observations (without circle adjustment). This approach was defined in order to verify the effectiveness of the adopted adjustment technique, that is, to verify if the circle adjusted observations actually generated better results. Thus, two computations were performed: using the average of the observations obtained by the PPP method (via Mi 8), and the adjusted observations.

Thus, the calculation of bias (Δ) with respect to the reference coordinates is given by equation 3:

$$\Delta N = N_R - N \quad \text{and} \quad \Delta E = E_R - E \quad (3)$$

Where: N_R and E_R are the reference coordinates.

The East, North and the horizontal accuracy (2D), were obtained using the bias (Δ) and the standard deviation (σ), obtained from the circle adjustment a posteriori variance-covariance matrix, as follows:

$$\text{Accuracy}_{N,E} = \sqrt{\Delta_{N,E}^2 + \sigma_{N,E}^2}$$

$$2D \text{ Accuracy} = \sqrt{\text{Accuracy } N^2 + \text{Accuracy } E^2} \quad (4)$$

5. Results

5.1 Adjustment results and Accuracy

All adjustments made were accepted in the hypothesis test at a significance level of 5%. The general results of each solution are shown in Table 3.

Table 3: General results of adjustments.

Solutions	East (m)	σ_E (cm)	North (m)	σ_N (cm)
Average	677856.019	55.7	7184200.417	54.2
Weighted Average	677856.126	55.7	7184200.414	54.2
GH1	677855.950	12.3	7184200.308	10.7
GH2	677856.051	8.8	7184200.364	7.1
Average*	677855.949	61.6	7184200.417	108.0
Weighted Average*	677856.012	61.6	7184200.344	108.0
GH3*	677856.071	18.7	7184200.404	12.6
GH4*	677856.044	17.4	7184200.508	11.4
GH5	677855.520	17.4	7184200.552	14.2
GH6*	677856.031	18.9	7184200.365	15.0

* Used the set of campaigns lasting only 1 hour.

As expected, the adjustments that used observations with sets having session duration equal to 1 hour (GH3*, GH4* and GH6*), resulted in the worst precision.

Notably, better precision were obtained when the outliers are eliminated (GH2 and GH4*). Table 4 contains the discrepancies calculated between the reference coordinates of the pillar center, determined by static relative positioning method. The solution "Average" in the table corresponds to the arithmetic average performed in each set of campaigns (without circle adjustment).

Table 4: Discrepancies and the solutions accuracies.

Solutions	Discrepancy East (cm)	Discrepancy North (cm)	Accuracy East (cm)	Accuracy North (cm)	2D Accuracy (cm)
Average	8.1	5.0	56.3	55.9	79.4
Weighted Average	2.6	4.7	55.8	55.9	79.0
GH1	15.0	5.9	19.3	12.2	22.9
GH2	4.9	0.3	10.1	7.1	12.3
Average*	15.1	2.3	63.5	61.7	88.5
Weighted Average*	8.9	2.3	63.3	61.7	87.7
GH3*	2.9	3.7	19.0	13.1	23.1
GH4*	5.6	14.1	18.2	18.1	25.7
GH5	58.0	18.4	60.5	23.3	64.8
GH6*	6.9	0.3	20.1	15.0	25.1

* Used the set of campaigns lasting only 1 hour.

It is observed that there were no significant differences between the Averages and the Weighted Averages. Analyzing the Average and GH1 solution (both with sets of 4 hours), there was an improvement in the accuracy with the circle adjustment of about 66%, 78% and 71% for the East, North and 2D accuracy, respectively. Through the sets of campaigns carried out with 1 hour, the circle adjustment provided gains of about 70%, 79% and 74%, for the East, North and 2D accuracy, respectively.

With the exception of the set with 1 hour, removing the outliers (GH4*) improved results. The gain percentage was approximately 48%, 42% and 46%, for the East, North and 2D accuracy, respectively.

It was expected that the solutions that use the set of campaigns with the longest duration (about 4 hours), would present the best results. This occurred only when the outliers were removed (GH2). However, this did not occur in the GH1 and GH5 solutions, when we carried out the circle adjustment using the same number of campaigns on the three points (A = 4, B = 4 and C = 4).

It is important to note that there was no consideration of the uncertainty associated with the position of the antenna. This uncertainty is at most 15.5 cm, which is superior to the accuracy value obtained by the GH2 solution.

In general, all the results obtained via the circle adjustments are in accordance with the precision established by the literature for the PPP method, albeit using geodetic equipment and shorter total session duration.

6. Conclusion

One of the factors considered most important in this research concerns the potential of the tracked data. The Mi 8 smartphone allowed the collection of data from the four global constellations and with different frequencies. However, the IBGE-PPP service was compatible with the L1 frequency and observations from the GPS and GLONASS constellation. Thus, it should be made clear that the total potential of the measurements made was limited to the processing service adopted. Therefore, further tests should be carried out in the future to include data from the other constellations.

In addition, information related to the position of the GNSS antenna on the smartphone is unknown. Thus, in the future an improvement in results is expected due to the possibility of performing the linear combination (L1 + L5) and the use of the antenna calibration parameters.

Using circle adjustment techniques it is possible to determine the coordinates of the pillar with decimetric accuracy, approximately 12 cm. However, all the accuracy obtained by the adjustments, meets certain engineering applications, such as the land surveying of rural properties (MDA, 2013). Despite this, we emphasize that there were sets of campaigns being used instead of just single campaigns.

Unfortunately, we were unable to achieve 2D centimeter accuracy. However, we noticed that the 2D Error reduces when outliers are removed. In addition, we observed that when adopting the same number of campaigns on the three points (A=4, B=4 and C=4), the 2D accuracy obtained by campaigns with a shorter duration (1 hour), presented better results than those with 4 hours. This is an important indicator and an aspect to be investigated.

In future works, it is suggested to carry out campaigns adopting a radius greater than that adopted in this research (20 cm).

Therefore, in the not too distant future, there may be a decrease in the distance between exclusive applications of conventional geodetic receivers and smartphones, increasing the freedom of choice and competitiveness in the geoscience market.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for their financial support (Process: 40001016002P6).

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Author 1 was responsible for the research design, method proposition, data preparation, analysis and wrote the manuscript. Author 2 contributed to the revision, method proposition and text review. Author 3 contributed to the supervision.

REFERENCES

- Banville, S., Diggelen, F. Van, 2016. Precise positioning using raw GPS measurements from Android smartphones. GPS WORLD.
- Dabove, P., Di Pietra, V., Piras, M., 2020. GNSS positioning using mobile devices with the android operating system. ISPRS Int. J. Geo-Information 9. <https://doi.org/10.3390/ijgi9040220>
- Ericsson, 2018. Ericsson Mobility Report June 2018.
- Gemael, C., Machado, A.M.L., Wandresen, R., 2015. Introdução ao Ajustamento de Observações, 2nd ed. Curitiba.
- Geo++, 2017. Logging of GNSS Raw Data On Android Geo++ [WWW Document]. URL <http://www.geopp.de/logging-of-gnss-raw-data-on-android/> (accessed 10.1.18).
- Gill, M., Bisnath, S., Aggrey, J., Seepersad, G., 2017. Precise Point Positioning (PPP) using Low-Cost and Ultra-Low-Cost GNSS Receivers, in: 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). Portland, pp. 226–236.
- Gogoi, N., Minetto, A., Linty, N., DAVIS, F., 2018. A Controlled-Environment Quality Assessment of Android GNSS Raw Measurements. Electronics 8, 5. <https://doi.org/10.3390/electronics8010005>
- Gomes, A., 2019. Avaliação da qualidade posicional de um sensor GNSS de dupla frequência presente em um smartphone sob diferentes cenários e métodos de posicionamento. Universidade Federal do Paraná.
- GSA, E.G.A., 2019. GNSS Market Report - Issue 6. <https://doi.org/10.2878/031762>
- Håkansson, M., 2019. Characterization of GNSS observations from a Nexus 9 Android tablet. GPS Solut. 23, 21. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0818-7>
- IBGE, 2017. Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP. Rio de Janeiro.
- IBGE, n.d. Brazilian Network for Continuous Monitoring of the GNSS-RBMC Systems - RBMC | IBGE [WWW Document]. URL <https://www.ibge.gov.br/en/geosciences/geodetic-positioning/geodetic-networks/2818-np-brazilian-network-for-continuous-monitoring-of-the-gnss-rbmc-systems/19213-brazilian-network-for-continuous-monitoring-of-the-gnss-systems.html?edicao=19283&t=dados-diar> (accessed 3.4.20).
- Kaleev, D. V., Saburova, V.I., 2018. Techniques and tools for analysis of navigation solution of Android N smartphones, in: Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1368–1372. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317351>
- LEICK, A., RAPOPORT, L., TATARNIKOV, D., 2015. GPS SATELLITE SURVEYING, Fourth. ed, John Wiley & Sons, Inc. American Congress on Surveying & Mapping, New Jersey.
- Lu, Y., Ji, S., Chen, W., Wang, Z., 2018. Assessing the Performance of Raw Measurement from Different Types of Smartphones. Proc. 31st Int. Tech. Meet. Satell. Div. Inst. Navig. (ION GNSS+ 2018) 304–322. <https://doi.org/10.33012/2018.15881>
- Malkos, S., 2016. Google to Provide Raw GNSS Measurements: User Location Takes Center

Stage in New Android OS. GPS World.

- MDA, M.D.D.A., 2013. NORMA TÉCNICA PARA GEORREFERENCIAMENTO DE IMÓVEIS RURAIS: 3ª Edição. Brasília.
- Pesyra, K.M., Heath, R.W., Humphreys, T.E., 2014. Centimeter Positioning with a Smartphone-Quality GNSS Antenna, in: ION GNSS Conference. Tampa, p. 10.
- Pirazzi, G., Mazzoni, A., Biagi, L., Crespi, M., 2017. Preliminary performance analysis with a GPS+Galileo enabled chipset embedded in a smartphone, in: 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2017. Institute of Navigation, Portland, pp. 101–115. <https://doi.org/10.33012/2017.15260>
- Realini, E., Caldera, S., Pertusini, L., Sampietro, D., 2017. Precise GNSS Positioning Using Smart Devices. *Sensors (Basel)*. 17, 14. <https://doi.org/10.3390/s17102434>
- Redelkiewicz, J., Sunkevic, M., Crosta, P., Gallardo, M.N., Bonenberg, L., 2018. Opportunities and use of Android GNSS Raw Measurements. *Coordinates* 31–39.
- Sheta, A., Mohsen, A., Sheta, B., Hassan, M., 2018. Improved Localization For Android Smartphones Based On Integration Of Raw GNSS Measurements and IMU Sensors, in: International Conference on Computer and Applications (ICCA). IEEE, Beirut, Lebanon, p. 6.
- Skorupa, B., 2020. The problem of GNSS positioning with measurements recorded using Android mobile devices. *Bud. i Archit.* 18, 051–062. <https://doi.org/10.35784/bud-arch.738>
- Technology, B.S., 2018. Dual Frequency performance in mass market.
- Zhang, X., Tao, X., Zhu, F., Shi, X., Wang, F., 2018. Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach. *GPS Solut.* <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0736-8>.

2.3 ARTIGO 3 - ANALYSIS OF MULTIPATH EFFECTS AND MITIGATION TECHNIQUES FOR ENHANCED SMARTPHONE GNSS POSITIONING

GOMES, A.; KRUEGER, C. P.; DE OLIVEIRA JÚNIOR, P. S.; GORDO, J. F. R.;
Analysis of Multipath Effects and Mitigation Techniques for Enhanced Smartphone
GNSS Positioning.

Abstract:

Multipath is one of the main effects that deteriorate the quality of the GNSS positioning, however, this phenomenon is especially pronounced in smartphones due to their low-quality GNSS antennas. To address this issue, the Laboratory of Space Geodesy and Hydrography (LAGEH) developed a material called the Multipath Effect Attenuator (AEM), which was used for the first time in smartphone applications. A new prototype called AEM Smart was also created for use in smartphones. The smartphone used in this research was the Xiaomi Mi 8, which has a dual frequency GNSS sensor and allows access to raw GNSS data. The multipath effect was evaluated based on the MP1 and MP5 indices, referring to the L1 and L5 carrier phases, respectively. In order to evaluate the positioning quality, GNSS data processing was performed using the Precise Point Positioning (PPP) method via the Brazilian online service IBGE-PPP. More than 280 hours of GNSS data collected with the Mi 8 to provide important insights into GNSS positioning via smartphones and its relationship with multipath. This contribution show that L5 is quite superior to L1 measurements in terms of multipath effect suppression. Furthermore, this study indicates that attenuators can reduce the multipath effect in L1 by more than 24%. Also, a strong correlation of about 94% was found between the multipath effect on L1 and the 2D and 3D positional accuracies. Finally, through the PPP technique in combination with the Xiaomi Mi 8 and AEM 3, it was possible to obtain a 2D and 3D accuracy of approximately 0.24 and 0.60 m, respectively.

Keywords: Smartphone; GNSS; Multipath; AEM-LAGEH; Accuracy.

1. Introduction

Mobile devices, such as smartphones, are susceptible to the same errors inherent in GNSS (Global Navigation Satellite System) positioning performed with geodetic receivers. Along their trajectory between satellite and receiver, GNSS emitted signals suffer several interferences that can degrade the information obtained by GNSS receivers, compromising their performances. In addition to several GNSS positioning techniques, there are tools and methodologies that can be used to model, minimize or eliminate these errors. Zhao et al. (2013) claim that among the GNSS vulnerabilities, the most significant are electromagnetic interference, multipath and ionospheric disturbances.

Generally, the term multipath is used to describe when the GNSS antenna captures both direct (Line-Of-Sight - LOS) and indirect (Non-Line-Of-Sight - NLOS) signals simultaneously (Fig. 1). In addition to the direct signals, at the same time, there may be reflected and/or diffracted signals that are easily tracked by the GNSS antenna. In general, the pseudorange will be wrong due to the extra path length caused by the reflected or diffracted signal. This problem can cause significant errors (around 100 m)

in code and carrier phase measurements, therefore, it is treated as a harmful interference (DIGGELEN, 2009).

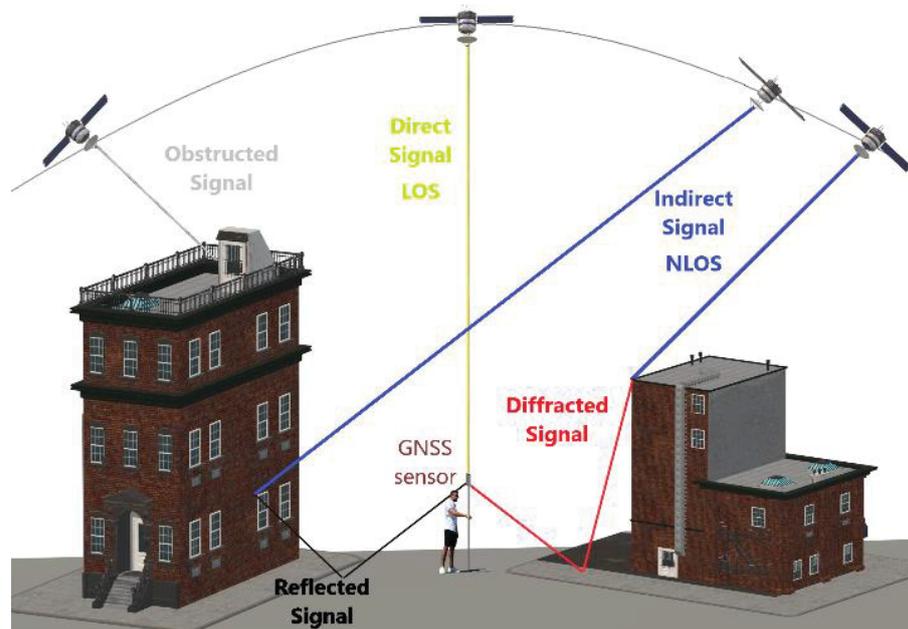


Fig. 1. GNSS multipath characteristic.

The magnitude of the error caused by multipath in any GNSS measurement depends on four factors: 1) the reflecting surface, 2) the geometry of the satellite/antenna, 3) the type of antenna, and 4) the hardware and firmware of the receiver (PETROPOULOS; PRASHANT, 2021). The satellite is constantly moving so, the multipath will in general vary as a function of time (SPILKER JR. et al., 1996). Hence, there is currently no general and accurate mathematical model to correct these errors (WU et al., 2018a).

Usually trees, buildings, walls, vehicles, water mass and surfaces close to GNSS receiver can induce multipath. Thus, each surface has its respective physical property, so the magnitude of the multipath can have different levels. According to Polezel et al. (2004), materials with higher reflection coefficients, such as iron, cause larger multipath errors than materials such as wood.

On mobile devices, the multipath effect is even more pronounced due to the GNSS antenna poor quality, regarding the suppression of multipath related errors (GOGOI et al., 2018; HÅKANSSON, 2019; ZHANG et al., 2019b). According to Geng et al. (2019), raw GNSS observations collected by smartphones are seriously affected by the multipath effect, consequently the final positioning accuracy is also significantly impacted.

Håkansson (2019) carried out investigations using the raw GNSS data collected from the Nexus 9 tablet under different multipath conditions. The author observed errors of about tens of meters in code measurements for without multipath mitigation.

Wen et al. (2020) performed PPP (Precise Point Positioning) with ambiguity resolution using observations from a GNSS antenna coupled to a Xiaomi Mi 8 smartphone. Results obtained by the

authors indicated that it is possible to achieve centimeter level accuracy, additionally this study shows that ambiguity fixed solutions are possible under certain conditions. However, the authors point out that due to the vulnerability of the effects caused by multipath, the smartphone GNSS antenna is a critical obstacle to perform accurate positioning.

Multipath mitigation techniques can be classified as location-dependent, hardware-based, and algorithm-based data processing techniques (PETROPOULOS; PRASHANT, 2021). Nasr-Azadani et al. (2023), conducted a comparative analysis of two algorithms, CMCD and Selection Signal, to assess their performance in detecting multipath effects on smartphones. The research findings demonstrate that the signal selection use of SNR-dependent elevation angles significantly aids in identifying multipath or NLOS observations. On the other hand, there is specific equipment such as the Choke Ring 3D antennas that aim to minimize this error. However, such GNSS antennas usually cost thousands of dollars and used for specific geodetic applications.

In the Brazilian context, the Laboratory of Space Geodesy and Hydrography (LAGEH – Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia), at the Federal University of Paraná (UFPR – Universidade Federal do Paraná), has been developing technological innovations aimed for satellite based positioning. As an example, we can mention the electromagnetic insulator called AEM-LAGEH, which is a portable material that attenuates the electromagnetic signals affected by multipath. The AEM-LAGEH development was based on the technology of Electromagnetic Radiation Absorbing Materials, whose property is to absorb these waves and transform them into heat (VISKI, 2012). Several studies have already been carried out using this material, and prove its effectiveness, above all, in minimizing multipath effects related to the L1 and L2 carrier phase (VISKI, 2012; VISKI; KRUEGER; BLENINGER, 2015).

Currently, the AEM-LAGEH third version (AEM-LAGEH 3) stands out for presenting similar results to a Choke Ring 3D model antenna (LEIAT504). In the experiments carried out by KRUEGER et al. (2012), the AEM-LAGEH 3 provided a 28% minimization of the multipath effect while the Choke Ring 3D antenna reduced the percentage by 34%, for the L1 carrier phase.

For more detailed information about multipath, it is recommended to read other bibliographies, such as: (PETROPOULOS; PRASHANT, 2021; POLEZEL; SOUZA; MONICO, 2004; SOUZA, 2008; SUZUKI; AMANO, 2021; WU et al., 2018b; ZHANG et al., 2019b; ZIMMERMANN et al., 2019).

This contribution presents the results regarding the performance of the AEM-LAGEH 3 in applications using smartphones. Furthermore, as the AEM-LAGEH 3 was designed to be used with conventional GNSS antennas, a new prototype called AEM-LAGEH Smart was developed, intended for smartphones GNSS positioning.

The paper is structured as follows. Section 2 presents some considerations regarding GNSS antenna. The methodology is presented in Section 3, followed by Section 4 with the results. Finally, conclusions are drawn in Section 5.

2. GNSS antenna

In addition to electromagnetic waves emitted by positioning satellites, antennas receive a variety of unwanted waves that are within the reception bandwidth, so it is essential that the antenna has a uniform gain. Gain is a measure of how receptive an antenna is to an electromagnetic wave as a function of: the signal's incident direction (azimuth and elevation angle) on the antenna and its polarization (KAPLAN; HEGARTY, 2017; MORTON et al., 2020).

The GNSS signals are right-hand circularly polarized (RHCP). Nonetheless, specular reflection from a surface at normal incidence results in a left-hand circularly polarized (LHCP) reflected signal. Therefore, GNSS antennas are often designed to have higher gain for RHCP signals (MORTON et al., 2020).

In the research carried out by Ur et al. (2016), as expected, the location accuracy using the RHCP antenna was much better compared to the receiver equipped with the LHCP antenna. Furthermore, according to their research, the results show that the SNR (signal-to-noise ratio) recorded by RHCP antenna is roughly 6 dB higher than that SNR recorded with LHCP antenna.

The antenna's structure used to receive the GNSS signals can affect significantly the positioning quality. Fig. 2 contains an example of an idealized antenna, where the gain in the satellite direction is enhanced and the gain in the multipath direction is attenuated. In addition to the elevation mask (cutoff), the enhancement of the direct signal gain can be obtained from several factors related to the antenna design, such as the spiral elements and the dimension of the horizontal plane of the antenna.

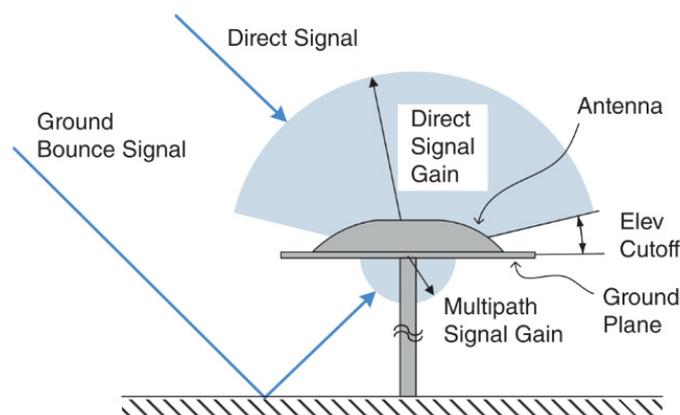


Fig. 2. Idealized GNSS antenna.

Source: Morton et al. (2021).

One of the main problems of GNSS receivers is the high sensitivity, as it tracks, in practice, not only the direct signals, but also the reflected and diffracted signals on n surfaces. However, the existence of GNSS in smartphones depends precisely on this high sensitivity, as the GNSS antennas present in these devices are very small and the signal inside the smartphone is very weak (MORTON et al., 2020). In addition, in certain situations, the sensitivity of the GNSS receiver is also necessary, especially where there are several obstructions, such as in cities with large buildings, for example.

Smartphones are usually equipped with an Planar Inverted-F Antenna (PIFA) (BANVILLE et al., 2019). To minimize the sensor dimension, generally, the smartphone antenna is linearly polarized and has a pattern gain that allows it to track signals from all directions, therefore, smartphones are more susceptible to multipath interference and the reception of indirect signals, resulting in higher code noise and multipath (BANVILLE et al., 2019; MORTON et al., 2020). Also, an indirect signal can be stronger than a direct signal because of the attenuation suffered by direct signals along the axis of the dipole antenna (MORTON et al., 2020).

3. Methodology

3.1 Multipath calculation

To characterize the multipath was used a linear combination of pseudorange and carrier phase measurements (SEEPERSAD; BISNATH, 2015). The pseudorange and noise multipath estimation on L_1 (MP1) is presented in (Eq. 1) and on L_5 (mp5) in (Eq. 2):

$$MP_1 = P_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha-1}\right)L_1 + \left(\frac{2}{\alpha-1} - 1\right)L_5 \quad (1)$$

$$MP_5 = P_5 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right)L_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1} - 1\right)L_5 \quad (2)$$

Where P_1 is the pseudorange measured on L_1 , P_5 is the pseudorange measured on L_5 , and

$$\alpha = \frac{f_1}{f_5} \quad (3)$$

With frequencies $f_1 = L_1$ frequency 1575.42 MHz and $f_5 = L_5$ frequency 1176.45 MHz.

The TEQC software can be used to characterize the magnitude of pseudorange multipath and noise present in the GNSS signals. The values MP1 and MP5 are teqc's computed values of the RMS moving-average values of the "multipath combinations" MP1 and MP5, in meters. MP1 and MP5 are linear combinations of the pseudorange and carrier phase observations, indicating the "L1 pseudorange multipath" for C/A or P code observations, and the "L5 pseudorange multipath" for P-code observations (ESTEY; WIER, 2014).

3.2 Test area and experimental setup

The study area was established on the UFPR 1000 pillar, located on the terrace of the Camil Gemael Astronomy Laboratory (Fig. 3). Therefore, in order to induce the multipath effect, an aluminum plate was positioned close to the base of the pillar column, as shown in Fig. 4. The aluminum plate provides an obstruction of about 31° (elevation angle) and 79° (azimuth) with respect to the reference point.



Fig. 3. Test area with the UFPR 1000 pillar.

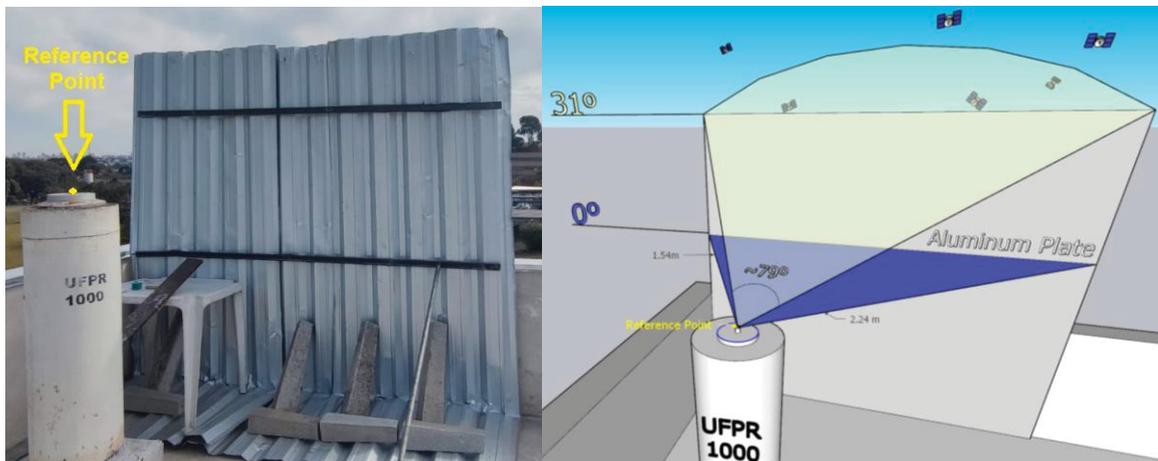


Fig. 4. Aluminum plate next to UFPR 1000 pillar (left) and the obstruction angles provided by the aluminum plate (right).

Two scenarios were idealized: 1) using only the smartphone (Fig. 5) and 2) using the smartphone associated with some equipment. The equipment employed in the second scenario are basically the AEM LAGEH 3 (Fig. 6), a waterproof plastic case for the smartphone (Fig. 7), the AEM LAGEH Smart (Fig. 8 - left), and a Foam (Fig. 8 - right), which is similar to AEM LAGEH Smart but without chemical material.



Fig. 5. Scenario 1: smartphone Xiaomi Mi 8 and the aluminum plate employed to generate multipath effect on GNSS signals.

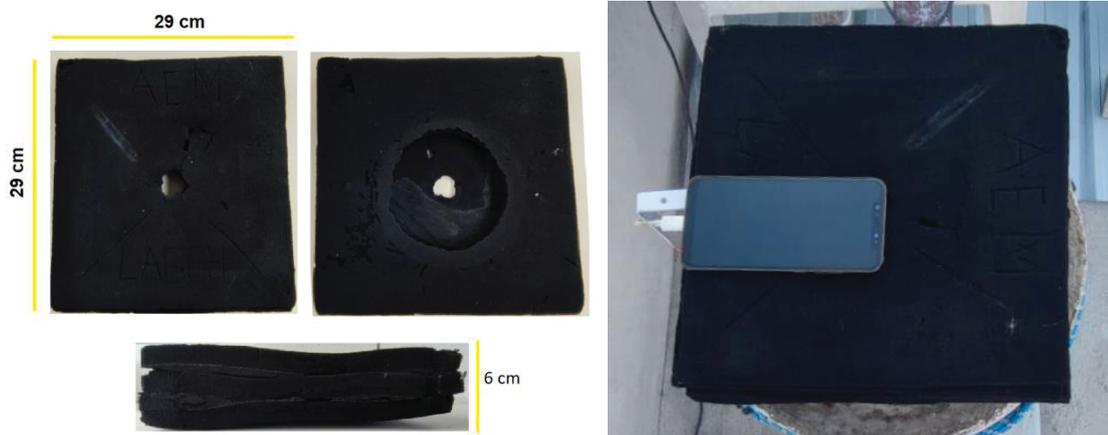


Fig. 6. AEM LAGEH 3 (left) and the smartphone Xiaomi Mi 8 positioned above the material (right).



Fig. 7. Smartphone Mi 8 inside the water proof case.

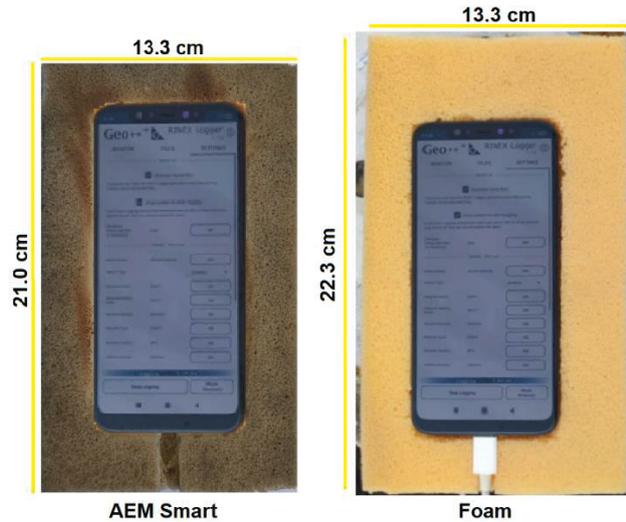


Fig. 8. Xiaomi Mi 8 smartphone above the AEM Smart (Left) and the Foam (right). Both are 2 cm thick.

The Fig. 9 shows the main characteristics of each scenario conducted with the presence of the aluminum plate next to the pillar.

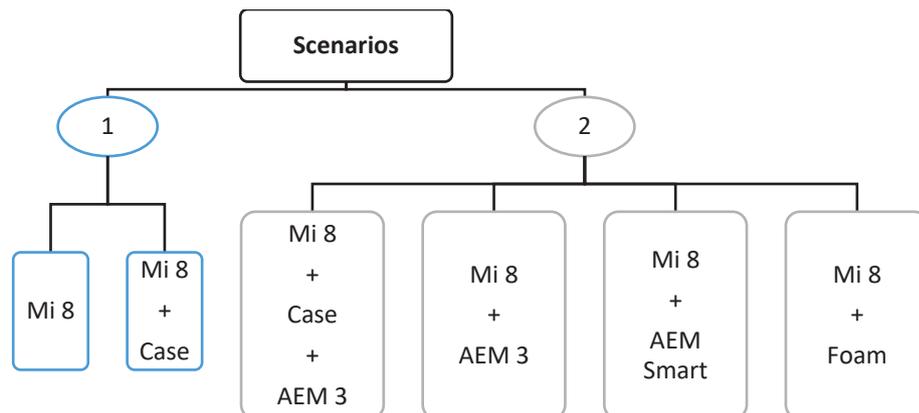


Fig. 9. Characteristics of the scenarios. In scenario 1, only the smartphone and the waterproof case were used, while in scenario 2, the attenuators and foam were used.

3.3 Data collection and post-processing

Data collection was carried out with a free app available on Google Play, called Geo++ Rinex Logger. The app allows accessing to raw GNSS data referring to multi-constellations (e.g. GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou) and multi-frequencies (e.g. L1, L5, E1a, E5a, B1, B2). The recording rate used by the app is equal to 1 Hz and there is no elevation mask option. In addition, the app can automatically store the data in RINEX files with 1 hour duration. There is also the 'keep screen on while logging' function, which was used to prevent the smartphone screen from turning off and causing interruptions during data collection (GEO++, 2017).

The smartphone selected was the Xiaomi Mi 8 (Android version: 10) which can provide the GNSS raw data and contain a dual frequency GNSS sensor, the BCM47755 (TECHNOLOGY, 2018). The sensor is compatible with the same constellations and frequencies as the Geo++ RINEX Logger. During all campaigns, the available function on Android, called “Force Full GNSS measurements”, was also used to prevent interruptions during data collection.

In total, 16 campaigns were conducted with at least 17 hours duration (17 RINEX files), the main characteristics of all, are presented in Table 1. Furthermore, the Topcon Hiper SR geodetic receiver (GPS and GLONASS, L1 and L2) was used in one campaign (campaign15).

Table 1. Campaigns characterization

Campaign	Equipment	Date (dd/mm/yyyy)	First Epoch (hh:mm)	Duration (hh)
1	Mi 8	23/05/2022	20:00	23
2	Mi 8 + AEM 3	24/05/2022	20:00	22
3	Mi 8	26/05/2022	18:00	17
4	Mi 8	13/06/2022	17:00	23
5	Mi 8 + AEM 3	15/06/2022	17:00	20
6	Mi 8 + AEM 3 + Case	16/06/2022	17:00	17
7	Mi 8 + Case	20/06/2022	17:00	19
8	Mi 8	22/06/2022	20:00	17
9	Mi 8 + AEM Smart	23/06/2022	18:00	17
10	Mi 8	29/06/2022	18:00	17
11	Mi 8 + AEM Smart	30/06/2022	18:00	17
12	Mi 8 + AEM Smart	04/07/2022	18:00	17
13	Mi 8	06/07/2022	18:00	17
14	Mi 8 + AEM Smart	07/07/2022	18:00	17
15	Topcon Hiper SR	24/08/2022	20:00	16
16	Mi 8 + Foam	25/08/2022	20:00	17

The post-processing data was carried out using the IBGE-PPP Brazilian online service. The main characteristic of this service are: use the Precise Point Positioning (PPP) technique; free of cost; utilize 10° cutoff; process information from GPS and GLONASS and recognized the L1 and L2 carrier phases (IBGE, 2017). Therefore, although the smartphone used tracked and stored information from the constellations and frequencies mentioned above, only the GPS and GLONASS constellations and the L1 frequency were considered in the processing via IBGE-PPP.

In total, 293 RINEX files were sent for processing in IBGE-PPP, each lasting about 1 hour. The same archives were analyzed in TEQC software to obtain the multipath values (MP1 and MP5).

The mathematical models used in the position quality analysis were established based on Monaco et al. (2009). The pillar UFPR 1000 reference coordinates, North (N_R), East (E_R) and the ellipsoidal height (h_R) (Huinca, 2009), were used to obtain the discrepancies or bias (Δ), as shown in Eq. 4.

$$\Delta N = N - N_R \quad ; \quad \Delta E = E - E_R \quad \text{and} \quad \Delta h = h - h_R \quad (4)$$

Where: N , E and h are the coordinates obtained via IBGE-PPP (2000.4 epoch).

The standard deviation of an isolated observation (σ_i) and the precision of the sample mean average (σ_x) are obtained from Eq. 5 and Eq. 6, respectively.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum(\text{observation} - \text{average})^2}{(\text{number of observations} - 1)}} \quad (5)$$

$$\sigma_x = \frac{\sigma_i}{\sqrt{\text{number of observations}}} \quad (6)$$

The North (N), East (E) and ellipsoidal height (h) accuracies, were calculate using the bias (Δ) and the standard deviation (σ_x) obtained from the coordinates generated by IBGE-PPP, as shown in Eq. 7. The planimetric (2D) and planialtimetric (3D) accuracies (Acc) were calculated via equations 8 and 9, respectively.

$$\text{Acc}_{N,E,h} = \sqrt{\Delta_{N,E,h}^2 + \sigma_{N,E,h}^2} \quad (7)$$

$$2D \text{ Acc} = \sqrt{\text{Acc } N^2 + \text{Acc } E^2} \quad (8)$$

$$3D \text{ Acc} = \sqrt{\text{Acc } N^2 + \text{Acc } E^2 + \text{Acc } h^2} \quad (9)$$

4. Results

4.1 Multipath

As mentioned previously, each RINEX file with 1 hour duration was analyzed in TEQC software. Table 2 shown the multipath values in L1 (MP1) and L5 (MP5), to each RINEX file generated during the Campaign 11 (characteristic: Mi 8 + AEM Smart).

Table 2. Campaign 11 – L1 (MP1) and L5 (MP5) multipath.

RINEX File	Date (dd/mm/yyyy)	First Epoch (hh:mm:ss)	Last Epoch (hh:mm:ss)	MP1 (m)	MP5 (m)
1	30/06/2022	18:00:00	18:59:59	2.36	0.65
2	30/06/2022	19:00:00	19:59:59	2.41	0.66
3	30/06/2022	20:00:00	20:59:59	2.44	0.64
4	30/06/2022	21:00:00	21:59:59	3.02	0.80
5	30/06/2022	22:00:00	22:59:59	3.48	0.76
6	30/06/2022	23:00:00	23:59:59	2.52	0.61
7	01/07/2022	0:00:00	0:59:59	2.52	0.64
8	01/07/2022	1:00:00	1:59:59	2.97	0.50

9	01/07/2022	2:00:00	2:59:59	0.88	0.58
10	01/07/2022	3:00:00	3:59:59	2.98	0.51
11	01/07/2022	4:00:00	4:59:59	2.69	0.50
12	01/07/2022	5:00:00	5:59:59	2.70	0.59
13	01/07/2022	6:00:00	6:59:59	2.50	0.54
14	01/07/2022	7:00:00	7:59:59	2.92	0.74
15	01/07/2022	8:00:00	8:59:59	3.42	0.87
16	01/07/2022	9:00:00	9:59:59	3.22	0.68
17	01/07/2022	10:00:00	10:59:59	2.77	0.57
		Average (\bar{x}) (m)		2.69	0.64
		Standard Deviation (σ) (m)		0.58	0.11

North (N), East (E) and ellipsoidal height (h) accuracies, were calculate using the bias (Δ) and the standard deviation (σx) obtained from the coordinates generated by IBGE-PPP, as shown in Eq. 7. The planimetric (2D) and planialtimetric (3D) accuracies (Acc) were calculated via equations 8 and 9, respectively.

Table 3 contains L1 (MP1) and L5 (MP5) multipath values, as well as statistics such as multipath standard deviation (σ) and average (\bar{x}) for each campaign. These results are also illustrated in Fig. 10.

Table 3. L1 (MP1) and L5 (MP5) multipath average values and the standard deviation in each campaign (C).

C.	Characteristic	Date (dd/mm)	First Epoch (hh:mm)	Duration (hh)	Average (\bar{x}) (m)		Std. Dev. (σ) (m)	
					MP1	MP5	MP1	MP5
1	Mi 8	23/05	20:00	23	3.57	0.62	0.58	0.16
2	Mi 8 + AEM 3	24/05	20:00	22	2.58	0.68	0.17	0.13
3	Mi 8	26/05	18:00	17	3.41	0.58	0.55	0.08
4	Mi 8	13/06	17:00	23	3.92	0.60	0.64	0.19
5	Mi 8 + AEM 3	15/06	17:00	20	2.53	0.67	0.27	0.09
6	Mi 8 + AEM 3 + Case	16/06	17:00	17	2.51	0.64	0.30	0.05
7	Mi 8 + Case	20/06	17:00	19	3.70	0.56	0.56	0.09
8	Mi 8	22/06	20:00	17	3.68	0.57	0.47	0.09
9	Mi 8 + AEM Smart	23/06	18:00	17	2.93	0.63	0.37	0.09
10	Mi 8	29/06	18:00	21	3.43	0.61	0.76	0.10
11	Mi 8 + AEM Smart	30/06	18:00	17	2.69	0.64	0.58	0.11
12	Mi 8 + AEM Smart	04/07	18:00	17	2.71	0.60	0.39	0.10
13	Mi 8	06/07	18:00	17	3.56	0.66	0.55	0.12
14	Mi 8 + AEM Smart	07/07	18:00	17	2.70	0.61	0.27	0.10
15	Topcon Hiper SR	24/08	20:00	16	0.26	-	0.02	-
16	Mi 8 + Foam	25/08	20:00	17	2.85	0.55	0.49	0.11

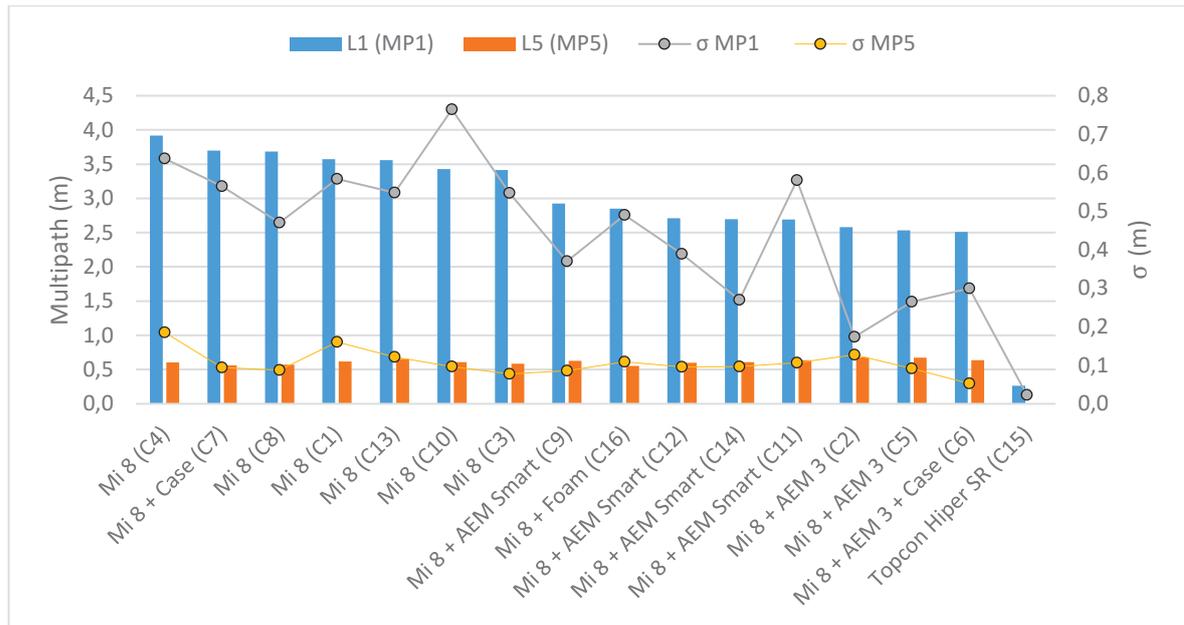


Fig. 10. Multipath and standard deviation (σ) for L1 (MP1) and L5 (MP5) for each campaign.

The most evident results shown in Table 3 and illustrated in Fig. 10 are the differences between MP1 and MP5 multipath indices. Carrier phase L5 presented superior performances for all campaign scenarios, providing the lowest MP values. Furthermore, evaluating the MP consistency using the standard deviations, the highest standard deviation in MP5 was equal to 0.19 m, while the lowest standard deviation value was equal to 0.05 m, very close to the MP1 value related to campaign with the HiPer SR geodesic receiver, which was equal to 0.02 m. This reaffirms the consistency and quality of the L5 signal.

Table 3 and Fig. 10 present individual results for each campaign, however, another analysis was carried out regarding the scenarios characteristics. Table 4 contains the average and standard deviation of values related to L1 (MP1) and at L5 (MP5) multipath for each characteristic. These results are also illustrated in Fig. 11.

Table 4. Average and standard deviation of the results set related to L1 (MP1) and in L5 (MP5) multipath referring to each characteristic.

Characteristic	Campaign(s)	Duration (hh)	Multipath Average (m)		Std. Dev. (σ) (m)	
			MP1	MP5	MP1	MP5
Mi 8	1, 3, 4, 7, 8, 10, 13	137	3,61	0,60	0,59	0,12
Mi 8 + AEM Smart	9, 11, 12, 14	68	2,76	0,62	0,40	0,10
Mi 8 + AEM 3	2, 5, 6	59	2,54	0,66	0,25	0,09
Mi 8 + Foam	16	17	2,85	0,55	0,49	0,11

According to Table 4, the best results were obtained with the combination Mi 8 + AEM 3. Also, this fusion result the lowest MP1 value, around 2.54 m, and provide the best consistency, as its standard deviation was lower than the others, around 0.25 m.

The Mi 8 + Foam combination provided the lowest MP5 value, around 0.55 m. However, analyzing the MP1 value and its standard deviation, it is observed a lower performance than the other combinations with the AEM's. As a final point, it is noted that the highest values in MP1 were obtained in campaigns carried out only with the Mi 8.

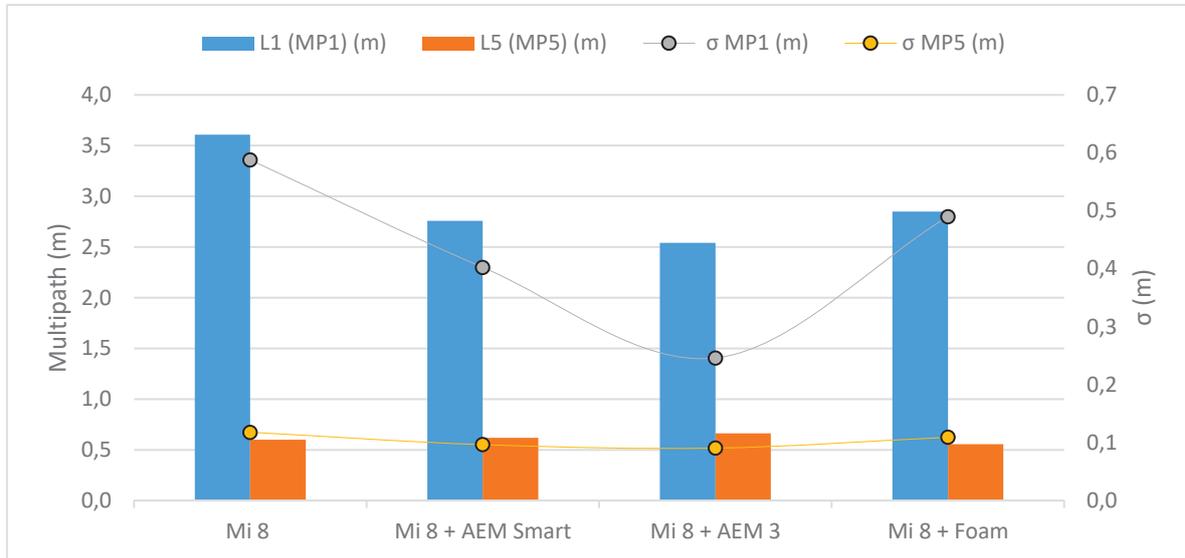


Fig. 11. Average and multipath standard deviation (σ) in L1 (MP1) and L5 (MP5) referring to each characteristic.

Another interesting indication is the reduction of MP1 values obtained only with the smartphone by approximately 24%, 30% and 21% using the AEM Smart, AEM 3 and Foam, respectively.

4.2 Accuracy

Table 5 shown the results acquired after post-processing the Campaign 11 data. It can be observed that the average (\bar{x}) of the standard deviations (σ) obtained from IBGE-PPP solutions, is lower than the standard deviations (σ_x) calculated using the coordinates and discrepancies. Thus, in order to avoid overestimating the results, the highest values of standard deviations (σ_x) were used to calculate the accuracies in all campaigns.

Table 5. Campaign 11 – Standard Deviation (σ) obtained from IBGE-PPP solutions and Discrepancies (Δ) to the reference coordinates.

RINEX File	Std. Dev. via Post Processing (σ) (m)			Discrepancy (Δ) (m)		
	UTM North	UTM East	h	UTM North	UTM East	h
1	0.474	0.347	0.942	1.233	-0.188	-2.710
2	0.361	0.286	0.826	-0.526	0.191	1.470
3	0.274	0.297	1.159	-0.718	0.236	-1.490
4	0.327	0.345	0.856	-0.091	0.104	-2.120
5	0.329	0.340	0.787	-0.232	-0.183	-0.340
6	0.334	0.297	1.023	-0.524	-0.010	-0.540
7	0.449	0.397	0.848	-1.173	0.666	-1.280
8	0.357	0.373	0.837	-0.673	0.790	-0.470

9	0.325	0.332	1.156	-1.028	0.198	-2.330
10	0.448	0.291	1.234	-0.575	0.615	-0.480
11	0.407	0.368	0.786	-0.537	0.965	0.630
12	0.406	0.596	1.243	-0.219	-0.493	0.310
13	0.356	0.409	0.967	0.189	-0.604	-2.050
14	0.325	0.314	0.816	-0.166	0.193	-1.920
15	0.317	0.298	0.833	-0.547	0.112	-2.470
16	0.407	0.349	0.861	-0.097	-0.139	-3.340
17	0.315	0.382	0.899	-0.806	-0.280	-0.380
Average (\bar{x}) (m)	0.365	0.354	0.945	-0.382	0.128	-1.148
Standard Deviation (σ_x) (m)				0.545	0.438	1.312

Table 6 contains the mean Standard Deviation obtained from the set of solutions (set of post-processed RINEX files) and average of the discrepancies between the IBGE-PPP coordinates of each campaign in relation to the reference geodetic coordinates.

Table 6. Average of the standard deviation (σ_x) obtained via IBGE-PPP coordinates solutions and discrepancies (Δ) of each campaign (C). * Post Processing using L1 and L2 frequencies.

C	Characteristic	Duration (hh)	Std. Dev. (σ_x) (m)			Discrepancies (Δ) (m)		
			UTM North	UTM East	h	UTM North	UTM East	h
1	Mi 8	23	1.096	0.687	1.675	1.645	-0.138	-2.180
2	Mi 8 + AEM 3	22	0.413	0.477	0.669	-0.219	-0.099	1.080
3	Mi 8	17	1.046	0.758	2.321	1.611	-0.315	-2.208
4	Mi 8	23	0.873	0.707	1.740	2.060	-0.296	-2.235
5	Mi 8 + AEM 3	20	0.372	0.433	1.043	-0.164	-0.120	0.502
6	Mi 8 + AEM 3 + Case	17	0.407	0.345	1.025	-0.156	-0.245	0.806
7	Mi 8 + Case	19	0.975	0.782	1.924	1.942	-0.337	-2.892
8	Mi 8	17	1.103	0.819	2.029	2.384	-0.505	-3.310
9	Mi 8 + AEM Smart	17	0.550	0.430	0.963	-0.264	0.093	-0.934
10	Mi 8	21	0.929	0.596	1.552	1.217	-0.549	-2.354
11	Mi 8 + AEM Smart	17	0.545	0.438	1.312	-0.382	0.128	-1.148
12	Mi 8 + AEM Smart	17	0.449	0.532	1.240	-0.320	0.215	-0.865
13	Mi 8	17	0.727	0.612	1.557	0.985	-0.686	-2.122
14	Mi 8 + AEM Smart	17	0.564	0.740	1.210	-0.393	0.116	-1.193
15	Topcon Hiper SR*	16	0.035	0.040	0.103	-0.021	-0.007	-0.015
16	Mi 8 + Foam	17	0.433	0.637	1.103	-0.051	0.000	-1.158

The accuracy in each component, North, East, and ellipsoidal height, and the planimetric (2D) and planialtimetric (3D) accuracies of each campaign are presented in Table 7. Fig. 12 contains the same values presented in this table and the average values referring to the multipath effect on the L1 carrier phase (presented in Table 3). Also, the figure does not show the results from the geodetic receiver, because those values are very small compared to the results obtained with the smartphone.

Table 7. Positional accuracy obtained from the set of solutions given in each campaign (C). * Post Processing using L1 and L2 frequencies.

C	Characteristic	Duration (hh)	Accuracy (m)				
			UTM North	UTM East	h	2D	3D
1	Mi 8	23	1.661	0.199	2.207	1.673	2.770
2	Mi 8 + AEM 3	22	0.236	0.142	1.089	0.276	1.123
3	Mi 8	17	1.631	0.365	2.279	1.671	2.826
4	Mi 8	23	2.068	0.331	2.264	2.094	3.084
5	Mi 8 + AEM 3	20	0.184	0.154	0.554	0.240	0.603
6	Mi 8 + AEM 3 + Case	17	0.185	0.259	0.843	0.318	0.901
7	Mi 8 + Case	19	1.955	0.382	2.925	1.992	3.539
8	Mi 8	17	2.399	0.543	3.346	2.460	4.153
9	Mi 8 + AEM Smart	17	0.296	0.140	0.963	0.327	1.017
10	Mi 8	21	1.237	0.567	2.384	1.361	2.745
11	Mi 8 + AEM Smart	17	0.404	0.166	1.191	0.437	1.269
12	Mi 8 + AEM Smart	17	0.338	0.251	0.916	0.421	1.008
13	Mi 8	17	1.001	0.692	2.156	1.217	2.475
14	Mi 8 + AEM Smart	17	0.416	0.214	1.229	0.467	1.315
15	Topcon Hiper SR*	16	0.023	0.012	0.030	0.026	0.039
16	Mi 8 + Foam	17	0.117	0.155	1.188	0.194	1.204

As expected, the best results were obtained from the campaign carried out with the HiPer SR geodesic receiver, where approximately 0.03 m and 0.04 m were obtained for the 2D and 3D accuracies, respectively. It is noteworthy that during the processing of data collected in this campaign, the IBGE-PPP used the two carrier phases L1 and L2, while the campaigns carried out with the Mi 8 were processed using only the L1.

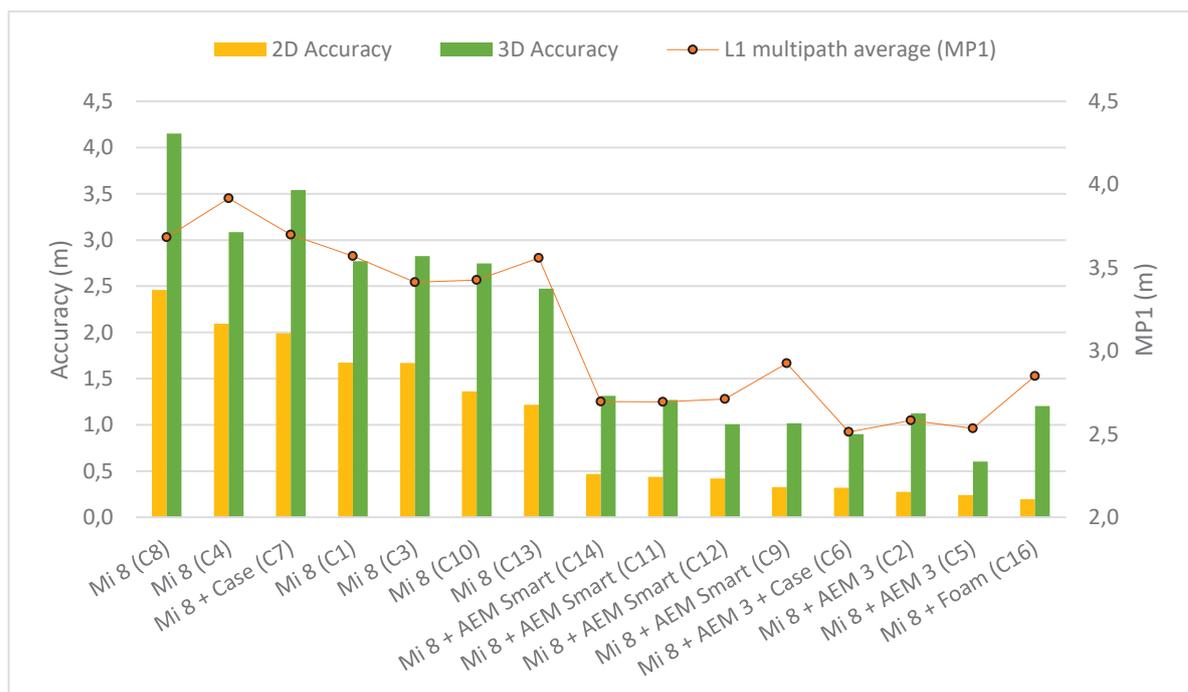


Fig. 12. 2D and 3D accuracies and the corresponding L1 multipath average for each campaign performed with the smartphone.

All campaigns performed with the smartphone associated with the proposed AEM's and foam, resulted in accuracy below 0.50 m and better than 1.4 m for 2D and 3D accuracy, respectively. In addition, it is observed that in these same campaigns the average values of MP1 were lower than 2.94 m. The other campaigns carried out with the Mi 8 resulted in accuracies greater than 1.2 m and 2.4 m for 2D and 3D accuracies, respectively, and MP1 values greater than 3.4 m.

Similar to planimetric accuracies (2D), the best planialtimetric accuracies (3D) were also the result of using attenuators and foam. However, in this case the foam did not result in the best result, unlike what happened in the 2D accuracy. The best result regarding 3D accuracy was obtained in Campaign 5, where the smartphone and the AEM LAGEH 3 were used.

Comparing the results obtained using the case (campaigns C6 and C7), we can see that the case does not significantly interfere with the results. In this way, it can be used in situations where, eventually, there may be precipitation.

Regarding the differences between the AEM's, one can note that AEM 3 showed better 2D accuracy than in all campaigns carried out with AEM Smart.

Observing the spatial distribution of the data presented in Figure 12, it can be observed that there is a tendency of distribution in the data referring to the accuracies and the multipath in L1. Thus, an analysis was performed based on the correlation coefficient.

The correlation coefficient, like the covariation, measures the extent to which two measurement variables "vary together". Using the correlation analysis tool available on the Google Excel platform, each pair of measurement variables was examined to determine whether the two measurement variables (accuracies and multipath) tend to move together. Results considering the campaigns using the smartphone only, show a high correlation of approximately 93.9% and 93.4% between L1 (MP1) multipath and 2D and 3D accuracies, respectively.

5. Conclusions

In this contribution, more than 280 hours of GNSS data collected with the Xiaomi Mi 8 smartphone were analyzed. The results obtained provide important considerations regarding GNSS positioning via smartphone and its relationship with multipath.

In the campaigns carried out with the smartphone only, MP1 values greater than 2.5 meters were obtained, while the highest MP5 value found was equal to 0.68 m (Campaign 2). Also, observing the standard deviations related to multipath in L1 and L5, the superiority of the L5 carrier phase is also evident, since it presents consistent standard deviations, that is, they follow a trend of approximately

0.10 m, even in campaigns with attenuators and with the foam. Although the attenuators and the foam provided better results in MP1, it cannot be said that they significantly interfered in MP5 values.

Regarding the efficiency of the AEM's, it can be said that the AEM 3 presented better results. However, this may be related to the characteristics of the object, such as the dimension (e.g. thickness, width and length), the amount and the region where the chemical product was applied. The AEM Smart has only a small layer of chemical (underside), while the AEM 3 has been completely coated several times. Therefore, new experiments should be carried out to identify the best AEM's design (number of layers, thickness, etc.), the region and amount of chemical material, so it can provide better results.

Another important issue concerns the reduction of MP1 values obtained with the combinations, there was a reduction of approximately 24%, 30% and 21% when AEM Smart, AEM 3 and Foam were used, respectively. Furthermore, a high correlation, around 94%, between MP1 values and 2D and 3D accuracies were detected. Therefore, it is concluded that multipath directly affects the accuracy obtained via the Xiaomi Mi 8 smartphone.

All campaigns that were carried out using only the smartphone resulted in planimetric accuracy (2D) between 1.2 m and 2.5 m. The Mi 8 + AEM Smart combination provided 2D positional accuracy between 0.32 m and 0.47 m, while the Mi 8 + AEM 3 combination provided 2D accuracy between 0.24 m and 0.32 m.

The best result regarding 2D accuracy of the smartphone was conceived by the combination Mi 8 + foam, whose value was approximately 0.19 m. However, this combination did not show the best result for 3D accuracy. Only campaigns 5 and 6 (Mi 8 + AEM 3) provided 3D accuracy better than 1 m.

As expected, the best results, both for MP1 values and for positional accuracy, were obtained with the Topcon HiPer SR geodesic receiver. However, it is worth mentioning that the IBGE-PPP service used both carrier phases (L1 and L2), unlike the data collected via smartphone, which were processed using only the L1 carrier phase. This is an important consideration regarding the accuracy.

In this sense, another significant issue concerns the elevation mask adopted by the IBGE-PPP (10°). Thus, if processing is carried out with an elevation mask (cutoff) equal to 0°, the attenuators and foam may provide more expressive results.

All campaigns were carried out with the smartphone positioned horizontally. However, further investigations will be conducted to identify the best attitude for data collection. Subsequently, the design of the attenuators may be adapted to achieve the best possible performance.

Finally, from the results of this research, it can be concluded that both, attenuators and the foam, corroborated with the mitigation of the multipath effect suffered in the carrier phase L1. Consequently, the positional accuracy obtained via IBGE-PPP was also improved. Considering the average of the 2D and 3D accuracies obtained with Mi 8 alone and Mi 8 + Case configuration (campaigns 1, 3, 4, 8, 10, 13, and 7), and comparing with the average obtained from the other

campaigns, we observe an improvement of over 80% and 65% in the 2D and 3D accuracies, respectively.

In addition, in a future update of the IBGE-PPP service, which recognizes the L5 carrier phase, more promising results can be achieved from positioning via smartphones with dual frequency GNSS sensors. With this new information, researchers can better understand the relationship between multipath and GNSS positioning accuracy, and work towards improving positioning technology for a variety of applications.

6. Acknowledgment

The authors would like to thank the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), for the financial support given to the first author (number 40001016002P6).

7. References

- Banville, S., Lachapelle, G., Ghoddousi-Fard, R., Gratton, P., 2019. Automated Processing of Low-Cost GNSS Receiver Data 3636–3652. <https://doi.org/10.33012/2019.16972>
- Diggelen, F. Van, 2009. A-GPS : assisted GPS, GNSS, and SBAS. Artech House, London.
- Estey, L., Wier, S., 2014. Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products . Boulder.
- Geng, J., Jiang, E., Li, G., Xin, S., Wei, N., 2019. An improved Hatch filter algorithm towards sub-meter positioning using only android raw GNSS measurements without external augmentation corrections. *Remote Sens Basel* 11, 20. <https://doi.org/10.3390/rs11141679>
- Geo++, 2017. Logging of GNSS Raw Data On Android Geo++ [WWW Document]. URL <http://www.geopp.de/logging-of-gnss-raw-data-on-android/> (accessed 10.1.18).
- Gogoi, N., Minetto, A., Linty, N., DAVIS, F., 2018. A Controlled-Environment Quality Assessment of Android GNSS Raw Measurements. *Electronics* 8, 5. <https://doi.org/10.3390/electronics8010005>
- Håkansson, M., 2019. Characterization of GNSS observations from a Nexus 9 Android tablet. *GPS Solut.* 23, 21. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0818-7>
- HUINCA, S.C.M., 2009. Calibração Relativa de Antenas GNSS na BCAL/UFPR. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- IBGE, 2017. Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP. Rio de Janeiro.
- Kaplan, E.D., Hegarty, C.J., 2017. Understanding GPS/GNSS Principles and Applications, *Gnss Technology and Applications Series*.
- Krueger, C.P., Huinca, S.C.M., Leandro, D., Visk, A.R., 2012. A INOVAÇÃO DE PRODUTOS QUE CONTRIBUIRÃO PARA O, in: III Simpósio Brasileiro de Geomática. Presidente Prudente, pp. 218–222.
- Monico, J.F.G., dal Póz, A.P., Galo, M., dos Santos, M.C., de Oliveira, L.C., 2009. Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. *Bol. Ciencias Geod.* 15, 469–483.
- Morton, Y.T.J., Diggelen, F. van, Spilker, J.J.J., Parkinson, B.W., 2020. Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century, *Integrated*. ed, Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. <https://doi.org/10.1002/9781119458555>

- Nasr-Azadani, S., Alizadeh, M.M., Schuh, H., 2023. Detecting Multipath Effects on Smartphone Gns Measurements Using Cmcd and Elevation-Dependent Snr Selection Technique. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 10, 595–602. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-595-2023>
- Petropoulos, G. p. ., Prashant, K.S. (Eds.), 2021. GPS and GNSS Technology in Geosciences, GPS and GNSS Technology in Geosciences. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2018-0-04209-7>
- Polezel, W.G.C., Souza, E.M. De, Monico, J.F.G., 2004. Análise dos fatores que influenciam o Multicaminho, in: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário - COBRAC. Florianópolis, SC, p. 10.
- Seepersad, G., Bisnath, S., 2015. Reduction of PPP convergence period through pseudorange multipath and noise mitigation. *GPS Solut.* 19, 369–379. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0395-3>
- Souza, E.M. de, 2008. Análise de wavelets para detecção e correção do multicaminho no posicionamento relativo GNSS estático e cinemático. Universidade Estadual Paulista - Presidente Prudente.
- Spilker Jr., J.J., Axelrad, P., Parkinson, B.W., Enge, P., 1996. Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I, Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I. <https://doi.org/10.2514/4.866388>
- Suzuki, T., Amano, Y., 2021. NLOS Multipath Classification of GNSS Signal Correlation Output Using Machine Learning. *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 2503 21, 2503. <https://doi.org/10.3390/S21072503>
- Technology, B.S., 2018. Dual Frequency performance in mass market.
- Ur, R., Lighari, R., Berg, M., Kallankari, J., Parssinen, A., Salonen, E.T., 2016. Analysis of the measured RHCP and LHCP GNSS signals in multipath environment; Analysis of the measured RHCP and LHCP GNSS signals in multipath environment. 2016 Int. Conf. Localization GNSS. <https://doi.org/10.1109/ICL-GNSS.2016.7533854>
- Viski, A.R., 2012. ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DO EFEITO MULTICAMINHO NO POSICIONAMENTO GPS DE PLATAFORMAS LAGRANGEANAS E EULERIANAS EM MASSAS DE ÁGUA. Universidade Federal do Paraná.
- Viski, A.R., Krueger, C.P., Bleninger, T., 2015. USO DE ISOLANTE ELETROMAGNETICO NA ATENUAÇÃO DO EFEITO MULTICAMINHO NO POSICIONAMENTO GPS DE PLATAFORMAS EULERIANAS EM MASSAS DE ÁGUA Use of Insulation in Electromagnetic Mitigation in Effect Multipath GPS Positioning Platform Eulerian Masses in Water. *Rev. Bras. Cartogr.* 12.
- Wen, Q., Geng, J., Li, G., Guo, J., 2020. Precise point positioning with ambiguity resolution using an external survey-grade antenna enhanced dual-frequency android GNSS data. *Measurement* 157, 107634. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2020.107634>
- Wu, R., Wang, W., Lu, D., Wang, L., Jia, Q., 2018a. Multipath Interference Suppression. In: Adaptive Interference Mitigation in GNSS. *Navigation: Science and Technology, Navigation: Science and Technology*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5571-3_5
- Wu, R., Wang, W., Lu, D., Wang, L., Jia, Q., 2018b. Multipath interference suppression, in: *Navigation: Science and Technology*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 201–233. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5571-3_5
- Zhang, Z., Li, B., Gao, Y., Shen, Y., 2019. Real-time carrier phase multipath detection based on dual-frequency C/N0 data 23, 7. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0799-6>
- Zhao, X., Zhan, X., Yan, K., 2013. Geo-spatial Information Science GNSS vulnerabilities: simulation, verification, and mitigation platform design GNSS vulnerabilities: simulation, verification, and

mitigation platform design. <https://doi.org/10.1080/10095020.2013.817109>

Zimmermann, F., Schmitz, B., Klingbeil, L., Kuhlmann, H., 2019. GPS multipath analysis using fresnel zones. *Sensors (Switzerland)* 19, 1–25. <https://doi.org/10.3390/s19010025>

3 INDICAÇÕES AOS USUÁRIOS

Esta seção apresenta considerações relacionadas às ferramentas, técnicas e cuidados que devem ser observados pelos usuários que pretendem utilizar *smartphones* para fins de posicionamento.

3.1 COLETA DE DADOS GNSS BRUTOS A PARTIR DE SMARTPHONES

Desde que a Google tornou possível a aquisição de dados brutos diversos aplicativos (*apps*) foram desenvolvidos e disponibilizados em sua plataforma *Google Play*. Entre os principais tem-se o *Geo++ RINEX Logger*, *GnssLogger*, *GPSTest*, *Rinex ON*, *GNSS Compare*, *to Rinex*, etc.

Com o surgimento de atualizações, alguns aplicativos foram otimizados, como o *GnssLogger*, desenvolvido pela Google (versão 3.0.6.1), que possui uma série de funcionalidades, como armazenamento dos dados nos formatos Google e RINEX, obtenção de mensagens de navegação e informações da antena GNSS (PCO e PCV), quando disponível. No entanto, esse aplicativo não armazena os dados automaticamente e o usuário precisa pressionar a função *Stop & Send* para fazê-lo, assim como ocorre em outros aplicativos mencionados anteriormente, exceto pelo *Geo++ RINEX Logger*.

Ao longo dos anos diversos aplicativos de coleta de dados foram testados. Contudo, deve-se destacar a ferramenta disponível no aplicativo *Geo++RINEX Logger* que armazena automaticamente dados RINEX após completar uma hora de coleta.

O superaquecimento do *smartphone* foi um problema recorrente durante essa pesquisa. Além de desabilitar o sensor GNSS automaticamente, esse efeito pode comprometer outras funcionalidades. Em algumas situações, por exemplo, o *smartphone* ficou completamente inoperante, impedindo que fosse possível clicar na opção para armazenar os dados coletados. Por isso a função de armazenamento automático presente no aplicativo *Geo++ RINEX Logger* é tão significativa.

Outro exemplo que pode ocasionar perda da coleta dos dados é o descarregamento da bateria. Quando o sensor GNSS está ativado o consumo de energia aumenta, podendo ocasionar o desligamento do aparelho. Portanto, o usuário deve estar atento às características do aparelho, bem como à necessidade de utilizar baterias externas (*power banks*).

Além disso, conforme mencionado no artigo apresentado na seção 2.1, especificamente sobre o GNSS Assistido, é necessário realizar a inicialização do sensor GNSS presente no *smartphone*. Normalmente, essa inicialização ocorre a partir da conexão com a rede de telefonia ou internet. Durante os experimentos realizados, foi observado que, ao ligar o aparelho sem essas conexões, alguns aplicativos levaram vários minutos para concluir a inicialização. Este fenômeno ocorreu diversas vezes quando utilizado o *app Geo++ RINEX Logger*.

Portanto, alguns minutos ou poucas horas antes do rastreamento propriamente dito, sugere-se que o usuário inicialize os aplicativos conectados à internet ou à rede de telefonia.

3.2 TÉCNICAS E ACESSÓRIOS

O surgimento de *smartphones* que empregam sensores multi-GNSS, como o Xiaomi mi 8, pode contribuir para uma maior qualidade do posicionamento, uma vez que esses sensores permitem que o dispositivo receba diferentes sinais de vários sistemas de posicionamento por satélite.

O pós-processamento de dados, possível mediante o emprego dos dados GNSS brutos, pode melhorar ainda mais a qualidade do posicionamento, pois permite que os dados sejam processados usando algoritmos mais avançados em comparação com aqueles utilizados pelos dispositivos móveis (posicionamento absoluto). Além disso, técnicas de ajustamento de observações também podem corroborar com a obtenção de soluções mais precisas e confiáveis.

Conforme indicado na seção 2.1, os dispositivos móveis com sistema operacional Android 12 e superiores, permitem desativar a função *Duty Cycling*, a partir da função “Forçar medições completas de GNSS”. Portanto, recomenda-se adotar essa técnica para rastrear os dados GNSS continuamente. Vale ressaltar, no entanto, que é padrão dos fabricantes deixarem essa ferramenta desabilitada, visto que ela consome mais energia.

Além disso, materiais atenuadores como o AEM-LAGEH 3 e AEM-LAGEH *Smart* e a espuma, demonstraram ser efetivos na minimização dos efeitos do multicaminho, possibilitando a obtenção de coordenadas geodésicas com maior acurácia.

Segundo exposto no terceiro artigo (seção 2.3), a utilização de uma *case* protetora não interferiu significativamente na qualidade posicional. Logo, pode-se utilizar este acessório para preservar a integridade do aparelho. Contudo, tendo em vista que não há circulação de ar no interior da *case*, ela pode contribuir negativamente com o aquecimento do dispositivo.

Para contornar o problema do superaquecimento o usuário pode recorrer a utilização de resfriadores em forma de *coolers*, por exemplo.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

4.1 CONCLUSÕES

Graças às inovações tecnológicas recentes, como a aquisição dos dados GNSS brutos em *smartphones*, bem como a inserção de sensores multi-GNSS no mercado, tornou-se possível obter coordenadas com acurácia ao nível centimétrico a partir de *smartphones*.

Ao longo da pesquisa, centenas de horas de dados coletados por *smartphone* foram analisados. De acordo com os resultados apresentados, observa-se que os objetivos estabelecidos inicialmente foram atingidos.

No contexto do multicaminho, foi analisada e avaliada a sua influência sob o aspecto do posicionamento. Nota-se que este efeito afeta consideravelmente a qualidade do posicionamento GNSS a partir de *smartphones*, apresentando correlações de, aproximadamente, 93% em relação à acurácia posicional. Portanto, mediante estes e os demais resultados apresentados no artigo 3, considera-se que o objetivo específico de analisar e avaliar a influência do efeito do multicaminho sob diferentes cenários e condições foi atingido.

Foi avaliada a performance dos atenuadores AEM-LAGEH 3 e o AEM-LAGEH *Smart* e a espuma, na minimização dos efeitos provocados pelo multicaminho. Os resultados demonstram que é possível obter soluções mais acuradas empregando-os. Cumprindo, portanto, com os objetivos específicos propostos referente a avaliação da performance dos atenuadores.

Neste contexto, observa-se que a onda portadora L5 apresentou resultados promissores no âmbito da supressão do efeito do multicaminho em relação a onda portadora L1. Conforme apresentado na seção 2.3 (especificamente na Tabela 4 (*Table 4*)), considerando a média dos valores de MP1 e MP5 obtidos em mais de 280 horas de dados, fica evidente o alto desempenho da L5. Essa portadora foi superior a L1 em mais de 83%, 77%, 73% e 80% nas combinações “Mi 8”, “Mi 8 + AEM Smart”, “Mi 8 + AEM 3” e “Mi 8 + Foam”, respectivamente.

Foram anos de estudos, pesquisas e análises realizadas visando obter um direcionamento das potencialidades do emprego do *smartphone* para obtenção de dados com melhor acurácia. Além disso, conforme apresentado, foram levantadas diversas considerações sobre as ferramentas, técnicas e cuidados necessários na

coleta de dados via este dispositivo. Logo, considera-se que o objetivo proposto inicialmente de indicar recomendações sobre a temática para os usuários, foi concluído.

De uma forma geral, as principais contribuições consistem numa expansão do conhecimento sobre o posicionamento GNSS via *smartphones*. As informações contidas nesta pesquisa sugerem que no futuro *smartphones* poderão contornar a necessidade de receptores geodésicos em determinadas aplicações, aumentando a liberdade de escolha e a competitividade no mercado geocientífico.

Por fim, diante de todo o exposto, pode-se afirmar que o objetivo geral estabelecido nesta pesquisa, avaliar e mitigar a influência do efeito do multicaminho na qualidade posicional obtida por smartphones, foi concluído.

4.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros tem-se os itens listados a seguir:

- a) Avaliar a performance do AEM-LAGEH 3 frente a sinais modernos coletados por uma antena geodésica convencional, de modo a verificar se o seu desempenho é similar ao encontrado nesta pesquisa;
- b) Replicar a metodologia utilizando outros modelos de *smartphones* e/ou sensores GNSS presentes nos dispositivos móveis;
- c) Aprimorar o AEM-LAGEH *Smart* inserindo mais produtos químicos e/ou camadas;
- d) Calibrar a antena GNSS de um *smartphone*, visando obter e aplicar os parâmetros de calibração no pós-processamento dos dados.

REFERÊNCIAS

- BANVILLE, Simon; DIGGELEN, Frank Van. Precise positioning using raw GPS measurements from Android smartphones. **GPS WORLD**, [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.gpsworld.com/innovation-precise-positioning-using-raw-gps-measurements-from-android-smartphones/>. Acesso em: 6 dez. 2018.
- BANVILLE, Simon; LACHAPELLE, Gérard; GHODDOUSI-FARD, Reza; GRATTON, Paul. Automated Processing of Low-Cost GNSS Receiver Data. [S. l.], p. 3636–3652, 2019. DOI: 10.33012/2019.16972. Disponível em: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?jp=p&articleID=16972>. Acesso em: 11 out. 2021.
- DIGGELEN, Frank Van. **A-GPS : assisted GPS, GNSS, and SBAS**. London: Artech House, 2009.
- ESTEY, Lou; WIER, Stuart. **Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products**. Boulder. Disponível em: www.unavco.org. Acesso em: 14 dez. 2022.
- GENG, Jianghui; JIANG, Enming; LI, Guangcai; XIN, Shaoming;; WEI, Na. An improved Hatch filter algorithm towards sub-meter positioning using only android raw GNSS measurements without external augmentation corrections. **Remote Sens Basel**, [S. l.], v. 11, n. 14, p. 20, 2019. DOI: 10.3390/rs11141679.
- GEO++. **Logging of GNSS Raw Data On Android Geo++**. 2017. Disponível em: <http://www.geopp.de/logging-of-gnss-raw-data-on-android/>. Acesso em: 1 out. 2018.
- GOGOI, Neil; MINETTO, Alex; LINTY, Nicola; DOVIS, Fabio. A Controlled-Environment Quality Assessment of Android GNSS Raw Measurements. **Electronics**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 5, 2018. DOI: 10.3390/electronics8010005.
- GOMES, Allan; KLEIN, Ivandro; KRUEGER, Claudia Pereira. CIRCLE FITTING FOR IMPROVED GNSS POSITIONING VIA SMARTPHONES FOR ENGINEERING PURPOSES. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S. l.], v. 27, n. spe, p. 2021021, 2021. DOI: 10.1590/s1982-21702021000s00021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bcg/a/FLJjD9tF5HJnGchBTZLdFMb/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 2 ago. 2021.
- GOMES, Allan; KRUEGER, Claudia Pereira. EVALUATION OF THE POSITIONAL QUALITY THROUGH THE POST-PROCESSING OF RAW GNSS DATA FROM A SMARTPHONE VIA DIFFERENT SATELLITE POSITIONING METHODS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S. l.], v. 26, n. 4, p. 1–15, 2020. DOI: 10.1590/s1982-21702020000400020. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/bcg/a/Xnpczjfb8n7dWb7szhzybfg/?lang=en>. Acesso em: 24 set. 2021.
- GONZÁLEZ-CASADO, Guillermo; JUAN, J. Miguel; SANZ, Jaume; SHAO, Yixie. Ionosphere/plasmasphere sounding with ground and space-based GNSS observations. *In*: PROCEEDINGS OF 2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON LOCALIZATION AND GNSS, ICL-GNSS 2016 2016, **Anais [...]**. : Institute of

Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. DOI: 10.1109/ICL-GNSS.2016.7533857.

GSA. **GNSS Market Report - Issue 6**. [s.l: s.n.]. DOI: 10.2878/031762. Disponível em: <http://www.gsa.europa.eu/contact-us>,. Acesso em: 27 abr. 2020.

HÅKANSSON, Martin. Characterization of GNSS observations from a Nexus 9 Android tablet. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 23, p. 21, 2019. DOI: 10.1007/s10291-018-0818-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0818-7>. Acesso em: 3 maio. 2019.

HE, Qimin; SHEN, Zhen; WAN, Moufeng; LI, Longjiang. Precipitable Water Vapor Converted from GNSS-ZTD and ERA5 Datasets for the Monitoring of Tropical Cyclones. **IEEE Access**, [S. l.], v. 8, p. 87275–87290, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991094.

HUINCA, SUELEN CRISTINA MOVIO. **Calibração Relativa de Antenas GNSS na BCAL/UFPR**. 2009. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

HUMPHREYS, Todd E.; MURRIAN, Matthew; VAN DIGGELEN, Frank; PODSHIVALOV, Sergei; PESYNA, Kenneth M. On the feasibility of cm-accurate positioning via a smartphone's antenna and GNSS chip. *In*: PROCEEDINGS OF THE IEEE/ION POSITION, LOCATION AND NAVIGATION SYMPOSIUM, PLANS 2016 2016, **Anais** [...]. : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. p. 232–242. DOI: 10.1109/PLANS.2016.7479707.

IBGE. **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP**. Rio de Janeiro. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf. Acesso em: 13 out. 2018.

KAPLAN, Elliott D.; HEGARTY, Christopher J. **Understanding GPS/GNSS Principles and Applications**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/9100468>.

KONG, Yulong; CHAI, Hongzhou; PAN, Zongpeng; WANG, Rui; LIU, Chunhe. The Analysis of GPS/BDS Ionosphere-Weak Combination SPP Result. *In*: CHINA SATELLITE NAVIGATION CONFERENCE (CSNC) 2018 PROCEEDINGS, LECTURE NOTES IN ELECTRICAL ENGINEERING 499 2018, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] p. 107–116. DOI: 10.1007/978-981-13-0029-5_10.

KRUEGER, Claudia Pereira; HUINCA, Suelen Cristina Movio; LEANDRO, Diuliana; VISK, Anderson Renato. A INOVAÇÃO DE PRODUTOS QUE CONTRIBUIRÃO PARA O POSICIONAMENTO POR SATÉLITES COM ALTA PRECISÃO. *In*: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA 2012, Presidente Prudente. **Anais** [...]. Presidente Prudente p. 218–222.

MALKOS, Steve. Google to Provide Raw GNSS Measurements: User Location Takes Center Stage in New Android OS. **GPS World**, [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.gpsworld.com/google-to-provide-raw-gnss-measurements/>. Acesso em: 17 jun. 2019.

MATSUOKA, Marcelo Tomio; CAMARGO, Paulo De Oliveira; BATISTA, Inez Staciarini. ANÁLISE DA IONOSFERA USANDO DADOS DE ALTA ATIVIDADE SOLAR E COMPARAÇÃO COM DADOS DE DIGISSONDAS. **Revista Brasileira de Geofísica**, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 565–582, 2009. Disponível em: www.scielo.br/rbg. Acesso em: 8 ago. 2020.

MONICO, João Francisco Galera; DAL PÓZ, Aluir Porfírio; GALO, Maurício; DOS SANTOS, Marcelo Carvalho; DE OLIVEIRA, Leonardo Castro. Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodesicas**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 469–483, 2009.

MORTON, Y. T. Jade; DIGGELEN, Frank Van; SPILKER, James J. Jr; PARKINSON, Bradford W. **Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century**. Integrated ed. [s.l.] : John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2020. DOI: 10.1002/9781119458555.

PETROPOULOS, George p. ...; PRASHANT, K. Srivastav. (ORG.). **GPS and GNSS Technology in Geosciences**. [s.l.] : Elsevier, 2021. DOI: 10.1016/c2018-0-04209-7.

POLEZEL, Wesley Gildo Canducci; SOUZA, Eniuce Menezes De; MONICO, João Francisco Galera. Análise dos fatores que influenciam o Multicaminho. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO - COBRAC 2004, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. Florianópolis, SC p. 10.

PRIVAT, A.; PASCAUD, M.; LAURICHESSE, D. Innovative Smartphone Applications for Precise Point Positioning. *In*: SPACEOPS 2018, Marseille. **Anais** [...]. Marseille p. 6. DOI: 10.2514/6.2018-2324. Disponível em: <https://developer.android.com/guide/topics/sensors/gnss>. Acesso em: 22 maio. 2019.

REALINI, Eugenio; CALDERA, Stefano; PERTUSINI, Lisa; SAMPIETRO, Daniele. Precise GNSS Positioning Using Smart Devices. **Sensors (Basel, Switzerland)**, [S. l.], v. 17, n. 10, p. 14, 2017. DOI: 10.3390/s17102434. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29064417>. Acesso em: 27 set. 2018.

ROBUSTELLI, Umberto; BAIOCCHI, Valerio; PUGLIANO, Giovanni. Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis. **Electronics**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 91, 2019. DOI: 10.3390/electronics8010091.

SALEEM, Tahir; USMAN, Mohammad; ELAHI, Atif; GUL, Noor. Simulation and Performance Evaluations of the New GPS L5 and L1 Signals. **Wireless Communications and Mobile Computing**, [S. l.], v. 2017, p. 1–4, 2017. DOI: 10.1155/2017/7492703. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2017/7492703/>. Acesso em: 1 out. 2018.

SEEPERSAD, Garrett; BISNATH, Sunil. Reduction of PPP convergence period through pseudorange multipath and noise mitigation. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 369–379, 2015. DOI: 10.1007/s10291-014-0395-3. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-014-0395-3>.

SHETA, Ahmed; MOHSEN, Ahmed; SHETA, Bassem; HASSAN, Mohamed. Improved Localization For Android Smartphones Based On Integration Of Raw

GNSS Measurements and IMU Sensors. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND APPLICATIONS (ICCA) 2018, Beirut, Lebanon. **Anais [...]**. Beirut, Lebanon: IEEE, 2018. p. 6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8460352>.

SOUZA, Eniuce Menezes De. **Análise de wavelets para detecção e correção do multicaminho no posicionamento relativo GNSS estático e cinemático**. 2008. Universidade Estadual Paulista - Presidente Prudente, [S. l.], 2008.

SPIPKER JR., James J.; AXELRAD, Penina; PARKINSON, Bradford W.; ENGE, Per. **Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I**. [s.l: s.n.]. v. 2 DOI: 10.2514/4.866388.

SUZUKI, Taro; AMANO, Yoshiharu. NLOS Multipath Classification of GNSS Signal Correlation Output Using Machine Learning. **Sensors 2021, Vol. 21, Page 2503**, [S. l.], v. 21, n. 7, p. 2503, 2021. DOI: 10.3390/S21072503. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/7/2503/htm>. Acesso em: 16 nov. 2021.

TECHNOLOGY, Broadcom Standard. **Dual Frequency performance in mass market**. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/expo/miguel_torroja_broadcom.pdf. Acesso em: 9 jan. 2019.

UR, Rameez; LIGHARI, Rahman; BERG, Markus; KALLANKARI, Jani; PARSSINEN, Aarno; SALONEN, Erkki T. Analysis of the measured RHCP and LHCP GNSS signals in multipath environment; Analysis of the measured RHCP and LHCP GNSS signals in multipath environment. **2016 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)**, [S. l.], 2016. DOI: 10.1109/ICL-GNSS.2016.7533854.

VISKI, Anderson Renato. **Análise da atenuação do efeito multicaminho no posicionamento gps de plataformas lagrangeanas e eulerianas em massas de água**. 2012. Universidade Federal do Paraná, [S. l.], 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/41291/R - D - ANDERSON RENATO VISKI.pdf?sequence=2>.

VISKI, Anderson Renato; KRUEGER, Claudia Pereira; BLENINGER, Tobias. USO DE ISOLANTE ELETROMAGNETICO NA ATENUAÇÃO DO EFEITO MULTICAMINHO NO POSICIONAMENTO GPS DE PLATAFORMAS EULERIANAS EM MASSAS DE ÁGUA Use of Insulation in Electromagnetic Mitigation in Effect Multipath GPS Positioning Platform Eulerian Masses in Water. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], p. 12, 2015.

WALTER, F.; OLIVEIRA, A. B. V. Brazilian contributions to the study of the ionosphere: Electron Content. *In*: 2009 SBMO/IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC) 2009, **Anais [...]**. : IEEE, 2009. p. 1–5. DOI: 10.1109/IMOC.2009.5427641. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5427641/>. Acesso em: 13 out. 2020.

WAN, Wei; CHEN, Xiuwan; ZHAO, Limin; ZHANG, Jundong; XIAO, Han. Near-surface soil moisture content measurement by GNSS reflectometry: An estimation model using calibrated GNSS signals. *In*: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND

REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS) 2012, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.] p. 7523–7526. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351891.

WEN, Qiang; GENG, Jianghui; LI, Guangcai; GUO, Jiang. Precise point positioning with ambiguity resolution using an external survey-grade antenna enhanced dual-frequency android GNSS data. **Measurement**, [S. l.], v. 157, p. 107634, 2020. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2020.107634.

WU, Renbiao; WANG, Wenyi; LU, Dan; WANG, Lu; JIA, Qiongqiong. **Multipath Interference Suppression. In: Adaptive Interference Mitigation in GNSS. Navigation: Science and Technology**. Singapore: Springer, 2018. a. DOI: 10.1007/978-981-10-5571-3_5.

WU, Renbiao; WANG, Wenyi; LU, Dan; WANG, Lu; JIA, Qiongqiong. Multipath interference suppression. *In: Navigation: Science and Technology*. [s.l.] : Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2018. b. p. 201–233. DOI: 10.1007/978-981-10-5571-3_5.

WU, Xuerui; XIA, Junming; JIN, Shuanggen; BAI, Weihua; DONG, Zhounan. IS Soil Salinity Detectable by GNSS-R/IR? *In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS) 2019, Anais [...]*. : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. p. 6227–6230. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898902.

ZHANG, Hongxing; YUAN, Yunbin; LI, Wei; ZHANG, Baocheng. A real-time precipitable water vapor monitoring system using the national GNSS network of China: Method and preliminary results. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 1587–1598, 2019. a. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2906950.

ZHANG, Xiaohong; TAO, Xianlu; ZHU, Feng; SHI, Xiang; WANG, Fuhong. Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 22, n. 3, p. 70, 2018. DOI: 10.1007/s10291-018-0736-8. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10291-018-0736-8>.

ZHANG, Zhetao; LI, Bofeng; GAO, Yang; SHEN, Yunzhong. Real-time carrier phase multipath detection based on dual-frequency C/N0 data. [S. l.], v. 23, p. 7, 2019. b. DOI: 10.1007/s10291-018-0799-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0799-6>. Acesso em: 20 out. 2021.

ZHAO, Xin; ZHAN, Xingqun; YAN, Kai. GNSS vulnerabilities: simulation, verification, and mitigation platform design. **Geo-spatial Information Science**, [S. l.], 2013. DOI: 10.1080/10095020.2013.817109. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tgsi20>. Acesso em: 6 jul. 2020.

ZIMMERMANN, Florian; SCHMITZ, Berit; KLINGBEIL, Lasse; KUHLMANN, Heiner. GPS multipath analysis using fresnel zones. **Sensors (Switzerland)**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 1–25, 2019. DOI: 10.3390/s19010025.