

**Análise do vapor de água precipitável em
Moçambique
usando observações GNSS**

Versão Final Após Defesa

Armando Luchato Vicente

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Sistemas de Informação Geográfica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Rui Manuel da Silva Fernandes

Co-orientadores: Prof. Doutor Pedro Almeida

Doutor Machiel Bos

Covilhã, Abril de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus amados:

Do passado:

Sra. Cristina Zingar Chiveva, minha mãe (in memoriam) e Sr. Vicente Luchato, meu pai (in memoriam) pois fizeram valer em vida, nas vidas de seus filhos,

o pensamento de Fernando Pessoa, que dizia:

“O Caminho faz - se Caminhando.”

Do presente e futuro:

Rosita Escludes Luchato, minha esposa, que me incentivou no momento difícil e compreendeu a minha ausência, faz valer em minha vida o pensamento de Victor Hugo, que dizia:

“A maior felicidade é a certeza se sermos amados apesar de sermos como somos.”

AGRADECIMENTOS

Uma dissertação é uma longa viagem, que reúne contributos de várias pessoas, indispensáveis para encontrar o melhor rumo em cada momento da caminhada.

Endereço os meus agradecimentos ao orientador desta dissertação, Prof. Dr. Rui Manuel da Silva Fernandes, e aos coorientadores Prof. Dr. Pedro Almeida e ao Dr. Machiel Bos, pela orientação exemplar pautada por um elevado e rigoroso nível científico, uma visão crítica e oportuna, pela paciência, sabedoria e determinação com que mostraram para cada um dos seus orientandos.

Aos meus filhos Cristina Luchato, Ivan Luchato, Esténio Luchato e a Augusta Luchato pelo amor e orgulho que me dão de ser pai.

Ao Projecto SUGGEST-AFRICA da Universidade da Beira Interior, através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, pela concessão da Bolsa de Estudos.

Aos parceiros do Projecto SUGGEST-AFRICA em Moçambique: o INAM, a CENACARTA e a Universidade Eduardo Mondlane, por ter me indicado para esta bolsa.

Ao Prof. Dr. Alberto Mavume e ao Engenheiro António Ferrão pela disponibilidade em prover suporte quando solicitados.

Aos professores da Faculdade de Engenharia, em especial os do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura dos quais, para não ser injusto, não citarei nenhum nome, pelos conhecimentos e competências que me transmitiram ao longo do curso, que culminaram na elaboração desta dissertação.

Aos colegas do curso, Andreia, Bala, Pollyana, Sandro e Isildo, muito obrigado pela convivência e disponibilidade em ajudar quando fosse necessário.

Aos meus familiares sou muito grato a todos pelo incentivo recebido ao longo destes anos.

O meu sentido e profundo agradecimento estende-se a todas as pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação.

Resumo

As observações GNSS (Global Navigation Satellite System) são considerados atualmente como umas tecnologias poderosas para a monitorização do vapor de água na atmosfera, a qual é uma variável de bastante interesse para as ciências meteorológicas. Os equipamentos GNSS proporcionam uma boa relação de custo-benefício quando comparados com os demais instrumentos meteorológicos tradicionais.

O sistema GNSS tem vantagens assinaláveis que fez que o mesmo fosse estabelecido como uma técnica de observação standard para a estimativa de Vapor de Água Precipitável (PWV) na atmosfera, utilizando o Atraso Zenital Troposférico (ZTD) que é a variável diretamente estimada utilizando as observações GNSS. Uma melhor compreensão do vapor de água na atmosfera, pode mitigar os impactos dos riscos naturais através da prevenção que é mais eficaz quando possuímos maior capacidade de prever fenómenos atmosféricos extremos que contribuem no risco de rupturas económica em grandes escalas nacionais e internacionais.

Esta dissertação tem como objectivo calcular e analisar a variabilidade do ZTD/PWV na implementação de um produto automatizado usando dados GNSS+Temperatura+Pressão para Moçambique. As estimativas ZTD são calculadas usando a estratégia PPP (Precise Point Positioning) que permite estimar os parâmetros de cada estação separadamente, e que se adequa com a situação em Moçambique por este ainda não possuir uma rede densa de estações GNSS.

Palavras-chave

Global Navigation Satellite System; Atraso Zenital Troposférico; Vapor de Água Precipitável.

Abstract

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) observations are currently considered a powerful technology for monitoring water vapor in the atmosphere, which is a variable of great interest for the meteorological sciences. GNSS equipment provides a good cost-benefit ratio when compared to other traditional meteorological instruments.

The GNSS system has large advantages that established it as a standard observation technique for estimating Precipitable Water Vapor (PWV), using the Zenith Tropospheric Delay (ZTD) which is the variable directly estimated using the GNSS observations. A better understanding of the water vapor in the atmosphere improves mitigation of natural hazards, reducing the risk of economic disruptions on large scales at national and international levels.

This dissertation aims to calculate and analyze the variability of the ZTD/PWV in the implementation of an automated product using GNSS+Temperature+Pressure data for Mozambique. The ZTD estimates are calculated using the PPP (Precise Point Positioning) strategy, which allows estimating each station separately, and which fits with the situation in Mozambique as it does not yet have a dense network of GNSS

Keywords

Global Navigation Satellite System; Zenith Total Delay; Precipitable Water Vapor.

Conteúdo

1.	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objectivos da Pesquisa	3
1.3.1	Objectivo Geral	3
1.3.2	Objectivo Específicos	3
1.4	Principal Contributo	4
1.5	Estrutura da dissertação	5
2.	O Sistema GNSS	7
2.1.	Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG)	7
2.2.	Visão Geral de Sistema GNSS	8
2.3.	Características do sinal GPS	8
2.4.	Segmentos Básicos de Sistema GPS	10
2.4.1.	Segmento espacial	10
2.4.2.	Segmento de Controle	10
2.4.3	Segmento de Usuário	11
2.5.	Características do Sinal GNSS	12
2.6.	Vapor de Água Atmosférico	12
2.7.	GNSS Meteorológico e Estimativas de Vapor de Água	13
2.7.1.	Camada Ionosférica	10
2.7.2.	Camada Troposférica	10
2.8.	Atraso Zenital Troposférico - (ZTD)	15
3.	Estado da Arte GNSS	18
3.1.	Posicionamento GNSS	18
3.1.1.	Métodos de Posicionamento	18
3.2.	Erros de Posicionamento GNSS	20
3.3.	Processamento GNSS	21
3.4.	Softwares de Processamento de Dados GNSS	21
3.4.1.	Software GIPSYX	22
3.4.2.	Softwares GAMIT e Bernese©	23
3.5.	Orbitas de Satélite	24
3.6.	Temperatura e Pressão	24

3.7. Modelos Globais	25
3.7.1. Descrição do Modelo ECMWF	25
3.7.2. Modelo ERA5	25
3.7.3. Modelo Global de Pressão e Temperatura	25
3.8. Modelos Regionais	26
3.9. Estado da Arte do Sistema GNSS em Moçambique	27
4. Metodologia	33
4.1. Localização Geográfica da Área de Estudo	33
4.2. Caracterização do clima de Moçambique	34
4.3. Materiais e softwares	35
4.4. Dados e Métodos	35
4.4.1. Dados	35
4.4.2. Métodos.....	37
5. Resultados e Discussão	39
5.1. Análise do ZTD em relação a ocorrência de um Ciclone	39
5.1.1. Análise da Temperatura à passagem do ciclone Chalane	42
5.2. Análise do ZTD registado nas estações GNSS por região geográfica	42
5.2.1. Variabilidade do ZTD nas Estações da região Sul.....	42
5.2.2. Variabilidade do ZTD nas Estações da região Centro	43
5.2.3. Variabilidade do ZTD nas Estações da região Norte	44
5.3. Desvio das médias em relação a média da série de cada região	47
6. Conclusões e Perspetivas de desenvolvimentos Futuros	49
6.1 Conclusões	49
6.2 Perspetivas de trabalhos Futuros	50

Lista de Figuras

Figura 1. 1 – sobreviventes no teto de uma casa em área completamente alargada.....	2
Figura 2. 1 – Frequências e respetivos comprimentos de ondas do sinal GPS	9
Figura 2. 2– Estação central de control (MCS) e estações de monitorização (MS) do GPS ...	11
Figura 2. 3 – Constelação do sistema GPS	11
Figura 2. 4 – Camadas da Atmosfera em função da variação de temperatura com a altitude.	14
Figura 3. 1 – representação de posicionamento relativo	19
Figura 3. 2 – Estações GNSS da Rede Geodésica de Moçambique inseridos na plataforma TeroNet	27
Figura 3. 3 – Estação GNSS de Inhambane (INHB).....	28
Figura 3. 4 – Componente Técnica da estação GNSS de MPTB instalada na CENACARTA. .	29
Figura 3. 5 – Esquema da arquitetura Técnica implementada em algumas estações GNSS em Moçambique	29
Figura 3. 6 – Rede de estações do Sistema Global de Navegação por Satélite de Moçambique	31
Figura 4 1 – Localização da área de estudo	33
Figura 4 2 – Esquema concebido para aquisição e análise de dados	36
Figura 5. 1 – Variabilidade do ZTD à passagem do ciclone Chalane.....	40
Figura 5. 2 – Variabilidade da Temperatura à passagem do ciclone Chalane.....	41
Figura 5. 3 – A variabilidade do ZTD nas estações GNSS na região Sul no período 2007 a 2011	43
Figura 5. 4 – Representa a variabilidade do ZTD nas estações GNSS na região Centro no período 2011 a 2021	44
Figura 5. 5– Representa a variabilidade do ZTD nas estações GNSS na região Norte no período de 2006 a 2021	45
Figura 5. 6 – Representa a média do ZTD na série temporal analisada em cada estação.....	46
Figura 5. 7 – Desvio da média de cada estação em relação a média da série	47

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 – Resumo das principais características do sistema GNSS	12
Tabela 3. 1– Alguns softwares de processamento de dados GNSS PPP disponíveis	22
Tabela 3. 2– principais modelos Regionais/Locais disponíveis.....	26
Tabela 3. 3 – Códigos das estações GNSS em Moçambique, suas coordenadas geográficas e a sua localização regional	30
Tabela 5. 1 – Correspondência entre dias do ano e dias do mês	39
Tabela 5. 2 – Resumo de Processamento de ficheiros efetuado em cada estação GNSS	42
Tabela 5. 3 – quadro resumo de valores (mínimo, máximo) e médias de ZTD por cada estação GNSS na área de estudo	46

Lista de Acrónimos

AFREF	Sistema Continental de Referência Geodésica para Africa
AKDN	Aga Khan Develop Network
ALADIN	Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational
APPS	Automatic Precise Positioning Service
AROME	Application of Research to Operations at Mesoscale
CENACARTA	Centro Nacional da Cartografia e Teledeteção
CGUL	Centro da Geodesia da Universidade de Lisboa
CHMO	Chimoio
ECMWF	European Centre for Medium Range Forecast
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia
GAMIT	GPS Analysis at MIT
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPT	Global Pressure and Temperature
GPT2w	Global Pressure and Temperature 2 wet
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia
IGS	International GNSS Service
INHAB	Inhambane
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LCNG	Lichinga
LIDAR	Light Detection And Ranging
MCS	Master Control Station
MPTB	Maputo
MICOA	Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental
MS	Master Station
NACL	Nacala
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PMBA	Pemba
PNT	Previsão Numérica do Tempo
PWV	Vapor de Água Precipitável
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso

QLMN	Quelimane
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
SEGAL	Space Earth Geodetic Analysis Laboratory
SIG	Sistemas de informação Geográfica
SOFL	Sofala
SUGGEST- AFRICA	SUpporting GEOsciences To Develop Africa
UBI	Universidade da Beira Interior
UEM	Universidade Eduardo Mondlane
UTC	Coordinated Universal Time
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VMF	Vienna Mapping Function
XXAI	Xai-Xai
ZHD	Atraso Zenital Hidrostático
ZTD	Atraso Zenital Troposférico
ZWD	Atraso Zenital Húmida
WGS	World Geodetic System

Capítulo 1

1. Introdução

Neste capítulo é descrita a motivação do presente trabalho e também são incluídos os objetivos principais e outros mais específicos. Contém também as principais contribuições que esta dissertação pode oferecer, e por fim, descreve-se a sua estrutura.

1.1. Contextualização

O vapor de água atmosférico apresenta elevada variabilidade temporal e espacial e afeta a evolução dos fenômenos meteorológicos em várias escalas, ao contrário das demais variáveis atmosféricas. Na escala global, esta característica tem influência ao nível dos processos climatológicos de média e longa duração, enquanto nas escalas locais ou de mesoescala tem um efeito mais direto sobre processos meteorológicos locais (Miranda et al., 2013).

A previsão imediata de eventos meteorológicos e climáticos, sempre constituiu grande preocupação da humanidade por milênios. A humanidade sempre reconheceu a importância de compreender melhor o tempo e o clima monitorando os seus principais parâmetros para a emissão de alertas prévios (Sá et al., 2014). Por isso, conhecer e monitorizar a distribuição do vapor de água atmosférico e a sua evolução temporal, é fundamental para a melhoria da precisão dos modelos meteorológicos e pesquisas climáticas.

O vapor de água precipitável (PWV) é definido como a quantidade de água numa coluna do ar. Embora as medições realizadas pelas radiossondas forneçam estimativas de PWV com boa precisão, têm a desvantagem de ser uma técnica onerosa, o que faz restringir o número de lançamentos e o número de estações onde são lançadas, ou ainda sensibilidade a nuvens e variações de temperatura(no caso de radiômetros), por isso, muitas vezes inadequadas para a detecção da variação temporal e espacial do vapor de água, que ocorre em escalas muito mais finas do que a variabilidade da temperatura ou ventos (Ortiz de Galisteo et al., 2011).

Assim, medições através de receptores GNSS (Global Navigation Satellite System) aparecem neste momento como uma das tecnologias espaciais mais modernas e poderosas para o monitoramento das variáveis atmosféricas de interesse das ciências meteorológicas, como por exemplo o vapor de água existente na atmosfera (De Haan, 2006). A capacidade do sistema GNSS em detectar eventos atmosféricos extremos, as chuvas severas, ciclones ou tempestades, a partir das estimativas de PWV tem se mostrado promissora. A sua gênese é baseada na grande sensibilidade destes, em relação ao teor de água na atmosfera, com uma precisão idêntica ao de sensores meteorológicos mais tradicionais (Bevis et al., 1992; Tregoning et al., 1998).

O sistema GNSS com uma vantagem comparativa, com os sistemas tradicionais de observação, devido ao seu baixo custo de operacionalização e a alta cobertura espacial e temporal. A técnica GNSS, está profundamente ligada à medição da intensidade e velocidade da deformação observada na crosta terrestre, ou à verificação e produção de dados de referência altimétrica como estimativas de distâncias na alocação de pontos no terreno. O percurso dos seus sinais eletromagnéticos, pela troposfera e a sensibilidade das medições à presença do vapor de água, permite a estimativa do seu conteúdo com alta resolução temporal e espacial (Bevis et al., 1992), podendo ajudar na previsão da precipitação (Vedel et al., 2004).

A melhor estimativa da componente PWV, mitiga o impacto de perigos naturais, reduzindo o risco de perdas de vidas, infraestruturas e o risco de perturbação económica na escala local e global. A Figura 1.1 abaixo, demonstra os efeitos devastadores e sobreviventes no tecto de uma casa em área completamente alagada que aguardam pela equipa de salvamento, aquando da passagem do ciclone Idai em março 2019 na cidade da Beira em Moçambique.



Figura 1. 1 – sobreviventes no teto de uma casa em área completamente alagada.

Fonte: ([Washingtonpost.Com/World/Photos-Cyclone-Idai-Lays-Waste-Parts-Mozambique-Zimbabwe-Malawi/](https://www.washingtonpost.com/world/photos-cyclone-idai-lays-waste-parts-mozambique-zimbabwe-malawi/2019/03/25/), 2019).

1.2. Motivação

Um dos principais temas tratados atualmente tanto em eventos científicos, quanto em revistas internacionais, relacionados com a estimativa de Atraso Zenital Troposférico (ZTD) do sinal GNSS e o Vapor de Água Precipitável (PWV) numa dada região, faz referência aos sistemas GNSS, como uma das técnicas de observação mais poderosas ou standard para a sua previsão (Cioce et al., 2011); (Sá et al., 2014); (Sapucci et al., 2003); (Benevides et al., 2013).

Estes tem proporcionado uma boa relação de custo-benefício, comparado com os de mais instrumentos meteorológicos tradicionais.

A localização de Moçambique, faz deste um país bastante exposto a eventos meteorológicos extremos, tais como ciclones e tempestades tropicais e muitas vezes acompanhados de chuvas torrenciais que resultam em inundações, possuindo uma costa que forma a fronteira ocidental com uma das mais ativas bacias oceânicas de formação dos ciclones tropicais altamente destrutivas, pois, todos os anos a bacia do sudoeste do oceano Índico, produz sozinha cerca de 10% de todos ciclones do mundo (MICOA, 2005), tornando o país que mais sofre por esses eventos meteorológicos na África Austral.

Estudos usando observações GNSS, são de uma extrema importância em Moçambique, para monitorar a variabilidade espacial e temporal do vapor de água na atmosfera, sabido que a variabilidade deste conteúdo em escalas mais finas, tem resultado em eventos meteorológicos extremos.

1.3. Objectivos da Pesquisa

1.3.1. Objectivo Geral

A presente dissertação tem como objetivo investigar as variações de curto e longo prazo do Vapor de Água Precipitável (PWV) em Moçambique derivado das observações GNSS.

1.3.2. Objectivo Específicos:

- Analisar os dados de estações GNSS existentes em Moçambique para obtenção de Atraso Zenital Total Troposférico (ZTD);
- Analisar as séries temporais diárias e sub-diárias do Atraso Zenital Troposférico (ZTD) em Moçambique;
- Determinar o Vapor de Água Precipitável (PWV) a partir do ZTD e dos parâmetros meteorológicos como a pressão e temperatura e,
- Analisar as variações diárias e sub-diárias do Vapor de Água Precipitável em Moçambique;

1.4. Principal Contributo

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projecto SUGGEST-AFRICA, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e AKDN (Aga Khan Develop Network) em coordenação com a Universidade da Beira Interior (UBI), através do grupo de Geodesia Espacial (Space Earth Geodetic Analysis Laboratory-SEGAL) como transferência de conhecimento para implementação de um produto de PWV em meteorologia GNSS, para Moçambique, Angola e Nigéria.

Até onde se sabe, em termos de Moçambique, o presente trabalho é pioneiro nesta área da meteorologia GNSS, vai servir como uma fonte de consulta em meteorologia GNSS, pretende-se através de palestras incentivar pesquisas nesta área que possibilita estimar o Atraso Zenital Troposférico (ZTD), parâmetro utilizado como ponto de partida na determinação do vapor de água atmosférico (PWV) para estudos climáticos e meteorológicos.

Também pretende-se com este trabalho, despertar as autoridades de áreas da geodesia, climatologia e meteorológica a ter interesse por sistemas GNSS e a criarem parcerias para a formação de mais técnicos nesta área do saber, o que poderá culminar com a instalação de uma densa rede de estações GNSS no país, por estes serem menos onerosos e de alta cobertura temporal e espacial comparados com as estações meteorológicas tradicionais, em consequência disso, reduziria a existência de áreas como distritos desprovida de estações meteorológicas, que são de extrema importância no monitoramento em tempo real do vapor de água atmosférico que é tido como combustível para ocorrência de fenómenos meteorológicos extremos.

Como também, com uma densa rede de estações GNSS irá possibilitar a obtenção de dados para estimativas de posição de maior precisão para diversas aplicações, permitindo a partilha em tempo real, destes dados de interesse comum com a região da Africa Austral e o mundo.

1.5. Estrutura da dissertação

Esta dissertação, para além do capítulo da introdução aqui apresentada, é composta de 5 outros capítulos, nomeadamente:

No capítulo 2 - Sistemas GNSS e vapor de Água, é realizada uma descrição teórica procurando trazer os conceitos fundamentais relacionados com o sistema GNSS, incluindo o GNSS meteorológico e as técnicas de cálculo do atraso zenital troposférico (ZTD) usado em sistemas GNSS;

No capítulo 3 - Estado da Arte, faz-se análise dos diferentes tipos de órbitas GNSS, os diferentes softwares disponíveis para estes, explicação sobre os diferentes produtos de órbitas e relógios de satélites, análises de diferentes modelos para a obtenção da temperatura e pressão e modelos Globais e Regionais para a estimativa do PWV;

No capítulo 4 - Metodologia, consta a descrição do trabalho desenvolvido na configuração, implementação e processamento de dados GNSS para a estimativa de ZTD troposférico, cálculo de PWV e das séries temporais de estações permanentes GNSS Moçambicanas selecionadas;

No capítulo 5 – Análise e discussão de Resultados, terá como objetivo a análise do ZTD registado nas estações GNSS existentes na área de estudo e converter o ZTD em correlação com a temperatura e pressão para obter a variação do PWV e suas implicações para o clima; irá explorar análises como variação anual, variação sazonal, variação durante um evento meteorológico extremo (ciclone) e a produção de mapas de distribuição espacial de ZTD/PWV sobre Moçambique

No capítulo 6 – Conclusões e Perspetivas de desenvolvimentos Futuros, são apresentadas as principais conclusões desta dissertação, bem como algumas orientações para trabalhos futuros empregando a pesquisa desenvolvida neste trabalho.

Capítulo 2

Os Sistemas GNSS

Neste capítulo realizamos uma descrição teórica, procurando trazer os conceitos fundamentais relacionado com o sistema GNSS, as características do sinal GNSS, incluindo o GNSS meteorológico. Abordamos também o atraso zenital troposférico como uma das técnicas de cálculo na estimativa do vapor de água precipitável usando sistemas GNSS.

2.1. Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Na atualidade o que se projeta, se planeia e decide-se aos vários níveis, faz-se com recursos a dados concretos e de qualidade, com intervalos de incertezas razoavelmente estabelecidos. Os sistemas de informação Geográfica (SIG) desempenham papel relevante no apoio à tomada de decisão, tornando-se numa das tecnologias com maior projecção na gestão e geração de informações espaciais.

A distribuição espacial de um fenómeno pode dizer-se muito sobre o mesmo, desde padrões de distribuição até tendências de ocorrência, por isso, é importante não só ter conhecimento de um certo evento que ocorreu, mas também conhecer onde ele ocorreu (Longley et al., 2011).

Em sistemas de informação Geográficas, o primordial é o dado espacial ou de referência ao espaço geográfico, todas as informações estão georreferenciadas, isto é, estão em camadas e em um lugar no espaço. A representação da informação espacial em SIG é feita em dois modelos de dados, que são: o modelo raster e o modelo vectorial, a percepção de representação destes dois modelos pode ser por ponto, linhas ou polígonos.

Com o avanço tecnológico através da aplicação de diversas ferramentas informáticas, usadas na engenharia de sistemas de informação Geográfica, que permitem a aquisição de informação geoespacial, com base numa constelação de satélites artificiais em órbita da Terra verificado nas técnicas de Deteção Remota e Altimetria por Satélite (GPS), em 1992 uma nova maneira de estimar o vapor de água atmosférica foi descoberta (Bevis et al., 1992). Os sistemas GNSS, têm se evidenciado como sistemas capazes de dar respostas à problemas de análise espacial.

2.2. Visão Geral de Sistema GNSS

A sigla GNSS (Global Navigation Satellite System), é a designação que se dá a qualquer sistema de base espacial usando uma constelação de satélites, receptores e estações de controlo capaz de estabelecer um serviço global (disponível em qualquer ponto da superfície terrestre). Possibilitam a obtenção de coordenadas em um curto intervalo de tempo e podem operar em qualquer condição climática.

É cada vez mais aplicados em vários campos que necessitam de estimativas de posicionamento e navegação, o princípio básico destes, reside na medida da distância entre a antena do receptor e no mínimo quatros satélites. Estes sistemas incluem GPS, GLONASS, Galileo, Beidou e outros sistemas regionais. Os sistemas de navegação global por satélite tiveram início por volta de 1958, com métodos básicos para observações de satélites, visando o cálculo e análise de orbitas de satélites, conhecendo nos últimos anos novos campos de aplicação e com significativas melhorias na precisão bem como na resolução temporal e espacial (Seeber, 2003).

O Global Positioning System (GPS), o sistema desenvolvido pelos Estados Unidos, o Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya (GLONASS), sistema desenvolvido pela Federação Russa e Beidou (China) são os sistemas completas e operacionais de momento. O europeu Galileo está ainda em desenvolvimento, mas já está operacional. Segundo Vallejo et al., (2014), estes sistemas podem ser combinados, o que resulta no aumento do número de satélites visíveis e uma geometria por estes constituída mais favorável, possibilitando à obtenção de estimativas de posições mais precisas e exata. São sistemas que revolucionaram a indústria de levantamento topográfico e mapeamento. Este sistema envolve satélites, infraestrutura de estação de referência terrestre e equipamentos do usuário.

Segundo (Rizos et al., 2005), eles podem estimar as posições e a velocidade de forma contínua e precisa em todo o mundo. O Global Positioning System (GPS) é o mais conhecido e amplamente utilizado, por isso será neste alicerce que se assentará esta dissertação.

2.3. Características do sinal GPS

De princípio cada satélite GPS transmitia os seus sinais continuamente em duas ondas eletromagnéticas, portadoras L_1 e L_2 . Elas são geradas a partir da derivação de uma frequência de oscilação fundamental, $f_0 = 10,23$ MHz, em que $f_{L1} = 154 \times f_0$ e $f_{L2} = 120 \times f_0$ respetivamente. Dessa forma, as frequências (L) e os comprimentos de onda (λ) de L_1 e L_2 são, respetivamente: $L_1 = 1575,42$ MHz, $\lambda_1 \cong 19,04$ cm e o $L_2 = 1227,60$ MHz, $\lambda_2 \cong 24,45$ cm. Essas duas frequências são geradas simultaneamente, permitindo aos usuários, corrigir grande parte dos efeitos em razão da refração ionosférica situar-se no espectro de radiação ocupado pelas micro-ondas (Monico, 2008).

As portadoras L_1 e L_2 transmitem dois códigos, sendo o código P-Code (Precise Code or Protected), reservado apenas para o uso dos militares norte-americanos e usuários autorizadas, é modulado nas portadoras L_1 e L_2 (Seeber, 2003). Já o código C/A (Coarse Acquisition), antes modulado na portadora L_1 na frequência 1.023MHz é código de uso civil. Com projetos de modernização, passou a ser modulado também em segunda portadora L_2 de acesso civil, denominado de L_2C são menos suscetíveis a interferência e a multicaminho comparado com o código C/A.

Além disso, uma terceira portadora L_5 foi desenvolvida, cuja frequência fundamental deve ser multiplicada por 115 MHz e como resultado surgiu o $L_5C = 1176,45$ MHz, $\lambda_5 \cong 25,48$ cm.

O novo código tem a vantagem de oferecer aos usuários civis observações de qualidade, redução dos efeitos da ionosfera e melhoria na solução das ambiguidades.

Atualmente, 19 satélites transmitem sinais em L_2C e 12 com portadora L_5 . Está em desenvolvimento a geração (GPS III) e contempla um quarto sinal civil em L_1 (L_1C) (GPS, 2019) lançado em dezembro de 2018, e em fase de teste. A Figura 2.1 representa um sumario de vários sinais GPS.

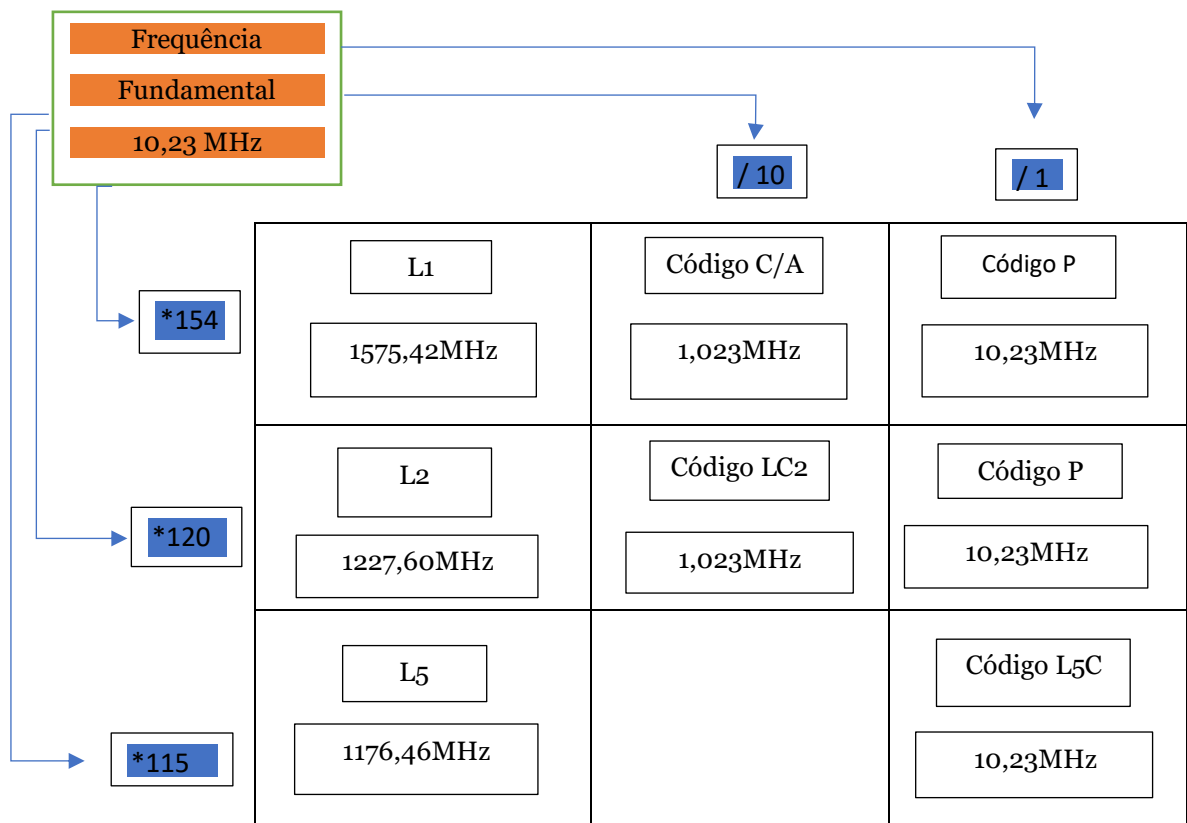


Figura 2. 1 – Frequências e respectivos comprimentos de ondas do sinal GPS. Fonte: Adaptado de (Monico, 2008).

2.4. Segmentos Básicos de Sistemas GPS

Foi convencionado para melhor administração do sistema GPS, uma divisão em três segmentos básicos os quais são identificados por:

- Segmento espacial, formado pelos satélites;
- Segmento de controle, formado pelas estações em superfície terrestre que monitoram o desempenho e o funcionamento do sistema;
- Segmento do Usuário, formados pelos usuários do sistema (os receptores)

2.4.1. Segmento espacial

A função do segmento espacial é gerar e transmitir os sinais usados no posicionamento GPS (códigos, portadoras e mensagem de navegação).

O segmento espacial é composto por uma constelação de 24 satélites (designado geralmente por SV, de Space Vehicles), orbitando a uma altitude aproximada de 20.200 km, distribuídos em seis planos orbitais distintos e espaçados uniformemente ao redor da Terra, contendo quatro satélites em cada plano, tais planos estão distanciados entre si a 60° de longitude e inclinação de 55° em relação ao plano do Equador terrestre, cada satélite tem um período de revolução de 12 horas siderais (e.g., 11 horas e 58 minutos). Este período implica na repetição da constelação quatro minutos mais cedo diariamente em relação ao tempo solar, em um mesmo local (<https://www.gps.gov/> 2021)

2.4.2. Segmento de Controle

Segmento de controle: Consiste em uma rede global de instalações terrestres que rastreiam permanentemente os satélites GPS, monitoram suas transmissões, realizam análises, corrigem o tempo dos relógios, das órbitas e as demais informações e enviam comandos e dados para a constelação (Monico, 2008) .

O segmento de controle é responsável pela operação do Sistema GPS, sua principal função é atualizar a mensagem de navegação transmitida pelos satélites.

Este segmento é constituído por cinco estações terrestres de monitoramento ou rastreios de satélites, estrategicamente espalhadas pelo mundo, distribuída da seguinte forma (Parkinson et al., 1996): Ascencion Island, Colorado Springs, Diego Garcia no Oceano Indico, Kwajalein no pacífico ocidental e Hawaii, vê Figura 2.2, que rastreiam continuamente todos os satélites visíveis pelo campo da antena das estações.

Os dados rastreados pelas Monitoring Stations (MS) são transmitidos para a Master Control Station (MCS) em Colorado Springs, nos Estados Unidos para serem processados com o objetivo de calcular os dados relativos às orbitas (efemérides) e a correção dos relógios dos satélites para atualizar a mensagem de navegação. A nova mensagem de navegação é transmitida para os

satélites pelas Ground Antenas (GA), quando os satélites passam no seu campo de visada e devido à posição geográfica das GA a mensagem de cada satélite é atualizada pelo menos três vezes ao dia (<https://www.gps.gov/2021>).

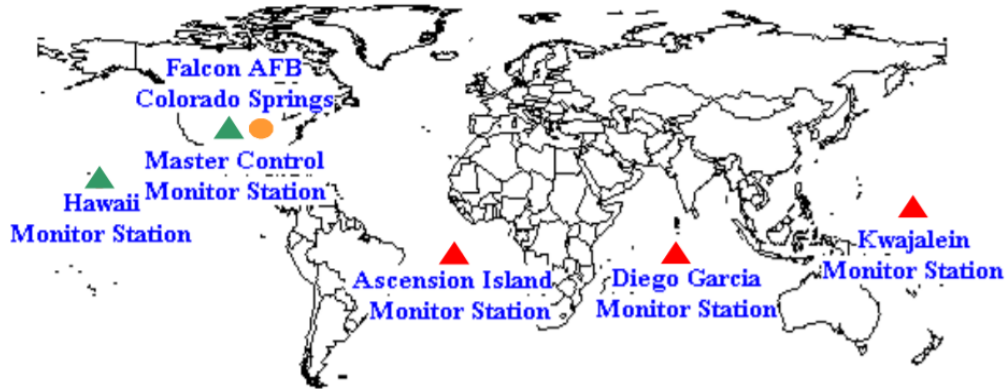


Figura 2. 2– Estação central de control (MCS) e estações monitoras (MS) do GPS. Fonte: (Dana, 1997).

2.4.3 Segmento de Usuário

Segmento do Usuário está diretamente relacionada aos equipamentos/receptores (GPS) usados para o posicionamento dos pontos sobre a superfície terrestre, e que devem ser apropriados ao propósito a que se destinam (Seeber, 2003).

Os recetores GPS, recebem, decodificam e processam os sinais emitidos pelos satélites a partir dos quais se faz o cálculo da posição, velocidade e tempo do utilizador. O tipo de receptor depende das finalidades do observador (usuário), qualquer que seja o receptor deve permitir a recepção e o processamento de sinais provenientes de pelo menos quatro satélites simultânea ou sequencialmente. Três satélites são suficientes para estimar a posição, mas só que o usuário tem que ter um relógio com grande precisão (relógio atômico).

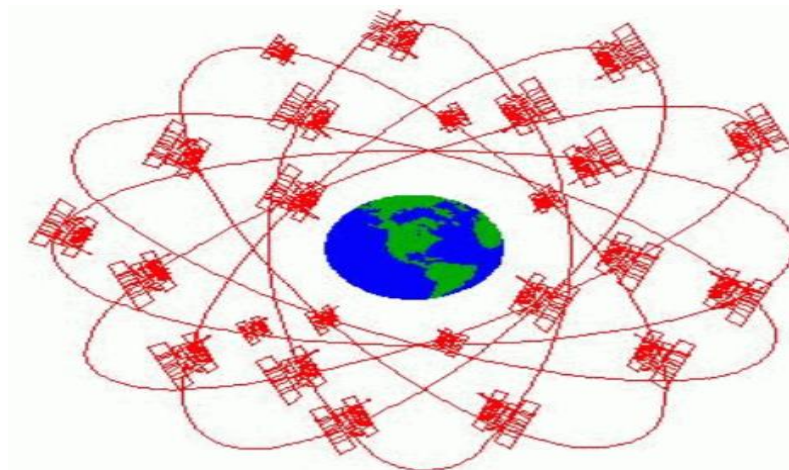


Figura 2. 3 – Constelação do sistema GPS. Fonte: (Dana, 1997).

2.5. Características do Sinal GNSS

As descrições mais pormenorizadas das características dos sistemas GNSS, são ilustradas na tabela 2.2 abaixo.

Tabela 2. 1 – Resumo das principais características do sistema GNSS

	GPS	GLONASS	Galileo	BDS/Compass
Desenvolvido por	EUA	Rússia	União Europeia	China
Constelação nominal	32	24	30	35
Planos orbitais	6	3	3	3
Inclinação (°)	55	64,8	56	55
Altitude (Km)	20,200	19,100	23,222	21,500
Período orbital	11h 58min	11h 15min	14h 04min	12h 53min
Frequências (Km)	L1:1575,42 L2:1227,60 L5:1176,45	L1:1597-1617 L2:1240-1260 L3:1202,025	E1:1575,42 E5a:1176,45 E5b:1207,14 E5:1191,795	B1:1561,098 B2:1207,14 B3:1268,52
Efemérides	Elementos Keplerianos	Posição, Velocidade, tempo	Elementos Keplerianos	Elementos Keplerianos

Fonte: Adaptado de Langley, Teunissen e Montenbruck (2017) cit por (Setti Júnior et al., 2020).

2.6. Vapor de Água Atmosférico

O vapor de água atmosférico desempenha um papel relevante para a manutenção da vida na terra. A sua concentração é muito variável no tempo e no espaço, pois a sua quantidade depende muito das condições climáticas locais, principalmente da disponibilidade da água. Assim nos trópicos húmidos pode constituir quase 4% do volume da baixa atmosfera, enquanto sobre os desertos sua participação tem valores que tende para zero.

O vapor de água também desempenha o papel de um agente termorregulador da atmosfera ao absorver a radiação solar infravermelha, impedindo assim, que as camadas de ar junto ao solo arrefeçam em demasia à noite, como ocorre nas regiões desérticas.

Desempenha um outro papel crucial nos processos atmosféricos, pois sem vapor de água não há nuvens ou chuvas. Devido às diferenças de pressão e temperatura, o ar é forçado a subir, o vapor de água nele presente se condensa ao encontrar temperaturas mais baixas, formando as nuvens e transferindo calor para a atmosfera superior.

Dessa forma, ele alimenta as chuvas e tempestades, assim como outros fenômenos atmosféricos, cujas previsões são de extrema importância para a segurança da vida humana, compreender a sua distribuição na atmosfera é importante para a ciência do clima e da previsão numérica do tempo.

A busca pela técnica mais fiável para estimar e monitorar o vapor de água numa dada região, cientistas foram criando e experimentando várias técnicas como (radiossondas, radiômetros de micro-ondas, espectrômetros, LIDAR e GNSS, esta última é a técnica usada nesta dissertação).

2.7. GNSS Meteorológico e Estimativas de Vapor de Água

A Meteorologia GNSS tem vindo a afirmar-se nos últimos anos como alternativa válida para a medição da distribuição vertical do vapor de água (Van Baelen et al., 2005).

A meteorologia GNSS tem fornecido medições precisas de vapor de água atmosférico com alta frequência em todas as condições meteorológicas, e de uma forma relativamente barata. Segundo (Adams et al., 2011), para se obter a melhor qualidade de observações, há a necessidade de que sensores meteorológicos sejam instalados nas proximidades das antenas GNSS.

A série de aplicações de dados de GNSS meteorológicos tem sido abrangente: para assimilação de dados nos modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) (Seth & Stanley, 2001) em estudos de casos meteorológicos, em analisar transporte de vapor de água, e até mesmo da estabilidade atmosférica (De Haan, 2006).

O sistema de navegação americano GPS é o maior responsável por esta contribuição dando um novo potencial nos sistemas de observações da atmosfera para as agências meteorológicas e pesquisadores em todo o mundo.

O sinal GNSS sofre diversos tipos de influência no trajeto entre os satélites e as estações ao se propagar através do meio atmosférico, que são referenciados na literatura como Atraso no sinal. A magnitude desses efeitos depende do ângulo de elevação do receptor de satélite e o ambiente atmosférico (Guerova, 2003).

Na verdade, o atraso dos sinais se dá basicamente em duas camadas da atmosfera, devido a refração ionosférica e a troposférica.

A atmosfera terrestre pode ser dividida em camadas, e cada camada com características e efeitos nos sinais GNSS bem distintos.

Para esta dissertação iremos concentrar-se em duas camadas que é a ionosférica e a troposférica por ser nessas camadas onde se concentram a maioria dos gases que causam atraso no sinal GNSS. A Figura 2.4 mostra as diferentes camadas que compõem atmosfera.

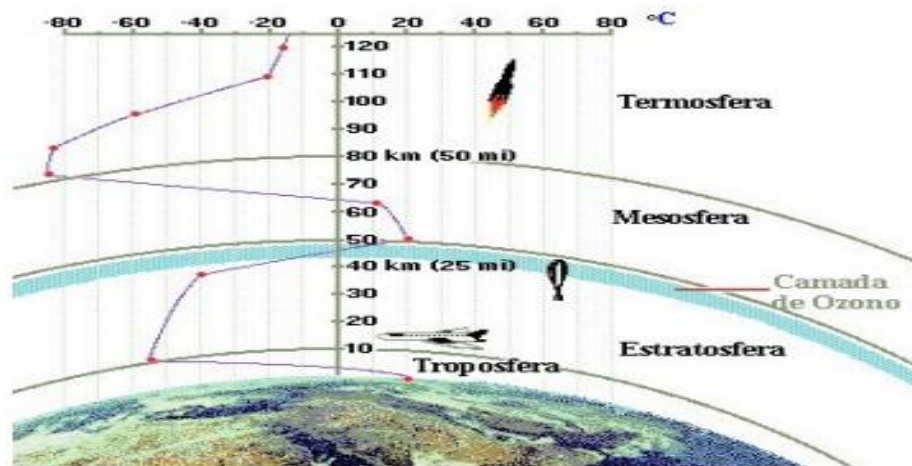


Figura 2. 4 – Camadas da Atmosfera em função da variação de temperatura com a altitude.

Fonte: Adaptado (<https://www.iag.usp.br/Siae98/Atmosfera/Estrutura.htm>, 2021).

2.7.1. Camada Ionosférica

A ionosfera estende-se da região que compreende entre 50 até 1000 km acima da superfície terrestre. A ionosfera se comporta como um meio dispersivo para a faixa de frequência GNSS, o efeito ionosférico é uma fonte de erro nas observações GNSS a ter em conta (Xu, 2007), a quantidade do atraso ionosférico ou avanço do sinal pode variar desde poucos metros a mais de vinte metros.

É possível modelar os efeitos da ionosfera apesar da complexa interação física entre o campo geomagnético e a atividade solar.

Segundo Seeber (2003), O efeito ionosférico depende do valor da frequência, isto é, nas frequências mais altas o efeito ionosférico é menor.

2.7.2. Camada Troposférica

A troposfera estende-se da superfície terrestre até aproximadamente 10 km. O efeito troposférico no atraso do sinal GNSS pode variar de poucos metros, até valores aproximadamente de 30 metros, dependendo da densidade atmosférica e do ângulo de elevação do satélite (Monico, 2008).

A troposfera, comporta-se como um meio não dispersivo para frequências abaixo de 30GHz, não depende da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar.

O estudo da influência da atmosfera, na propagação dos sinais e as formas da mitigação do seu efeito, teve início desde a determinação das distâncias a partir da utilização das ondas eletromagnética.

Segundo Sapucci (2001), a partir daí, vários efeitos causados pela troposfera sobre os sinais GNSS tornaram-se observáveis como por exemplo: a atenuação troposférica, cintilação troposférica (variações na quantidade de elétrons livres na atmosfera que afeta o sinal GNSS) e atraso troposférico.

A influência dos gases presentes na troposfera, causa mudanças na direção e diminuição na velocidade das ondas eletromagnéticas que por ela se propagam. Esse efeito faz com que, o caminho efetivamente percorrido seja diferente da distância geométrica entre o satélite e o receptor.

Para facilitar a modelagem das variações do atraso troposférico, são empregues as funções de mapeamento (Davis et al., 1985; Niell, 1996), as variações desse atraso em uma direção qualquer podem ser tratadas na direção zenital, considerando apenas a concentração dos gases na coluna vertical atmosférica.

A VMF (Vienna Mapping Function) é uma função de mapeamento considerada a mais precisa e disponível, que foi desenvolvida baseada em modelos de previsão numérica de tempo (PNT) do ECMWF (European Centre for Medium Range Forecast). Existe uma função melhorada o VMF3 (Böhm et al., 2020).

2.8. Atraso Zenital Troposférico - (ZTD)

Um dos produtos resultante do processamento de dados GNSS é o ZTD que é o atraso que um sinal se sujeita quando atravessa a atmosfera diretamente acima da estação, no zénite. Normalmente, todos os atrasos são convertidos em atrasos na direção zenital (ZTD) atraso troposférico ou atraso zenital troposférico (ZTD - Zenital Tropospheric Delay), depende apenas das características termodinâmicas da atmosfera. O ZTD pode ser obtido como variável no processamento GNSS.

As variações na refratividade (atraso) atmosférica são consideradas em função da temperatura (T), densidade do ar (ρ) e da pressão parcial do vapor d'água (e), com valores variando em função da altitude (h). Assim, tem-se o atraso troposférico na direção zenital (Spilker, 1994):

$$ZTD = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} K_1 R_d \rho dh + 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} \left(K_2 \frac{e}{T} ZW^{-1} + K_3 \frac{e}{T^2} ZW^{-1} \right) dh \quad (1)$$

Onde:

R_d - é a constante específica dos gases para o ar seco , $R_d = 287,0538 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

e - é a pressão parcial do vapor da água,

T - é a temperatura variando em função da altitude (h),

Z_w^{-1} – é o inverso da constante de compressibilidade do vapor de água,

$K_1 = 77,60 \text{ K hPa}^{-1}$, $K_2 = 22,10 \text{ K hPa}^{-1}$ e $K_3 = 373900 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ são constantes da refratividade atmosférica.

O cálculo do PWV é feito com base no atraso desde que o sinal é enviado pelo satélite até a sua chegada ao receptor (ZTD).

Este atraso pode ser dividida em duas componentes: A componente húmida (ZWD) ou atraso zenital húmida influenciada pelo vapor de água apresenta grande variação num curto espaço de tempo e seu valor geralmente é estimado durante o processamento dos dados GNSS e a componente seca ou hidrostática (ZHD) ou também designado por atraso zenital hidrostático, formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera, como oxigênio, nitrogênio possui uma baixa variação durante várias horas (Bevis et al., 1992).

A soma dos valores do ZHD e ZWD resulta no valor do ZTD equação 2 (Sapucci et al., 2003).

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (2)$$

O ZHD depende apenas da densidade do ar atmosférico, seus valores podem ser determinados a partir de medidas de pressão atmosférica realizadas na superfície (P_0) latitude (φ) e a altitude do local (h_0), como é expressa pela Equação 3 (Davis et al., 1985)

$$ZHD = 0.002277 \frac{P_0}{1 - 0.0026 * \cos 2\varphi - 0.00028 * h_0} \quad (3)$$

Onde:

P_0 (hpa) – A pressão à superfície

h_0 (km) – Altitude acima do nível do mar

φ – Latitude do local

O ZWD é causado pelo vapor de água na atmosfera.

Geralmente, modelos empíricos e parâmetros meteorológicos nas estações GNSS são usados para obter o ZHD e, em seguida, o ZHD é deduzido do ZTD para obter o ZWD (Wu et al., 2021).

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (4)$$

Desta maneira tem-se o atraso da componente húmida, determinada para aplicações meteorológicas.

A componente húmida possui uma correlação muito estreita com a quantidade PWV na camada neutrosfera.

Capítulo 3

Estado da Arte GNSS

Neste capítulo, trazemos uma visão geral dos diversos métodos de posicionamento, Softwares necessários para calcular o PWV usando o sistema GNSS, bem como fazer uma descrição de modelos globais para obter a estimativa do vapor de água usados na Europa, por fim abordamos o estado da arte GNSS em Moçambique.

3.1. Posicionamento GNSS

3.1.1. Métodos de Posicionamento

O posicionamento por GNSS determina as coordenadas precisas de um objeto em relação a um referencial determinado. Diversos métodos de posicionamento foram desenvolvidos para fornecerem níveis de precisão que variam desde algumas dezenas de metros até poucos milímetros. Este tem sido um dos grandes objetivos dos pesquisadores desde o surgimento do GPS. Dependendo do método usado pode-se classificar o posicionamento de diversas formas, se as coordenadas são determinadas em relação ao referencial geocêntrico tem-se o posicionamento absoluto ou por ponto, caso as coordenadas sejam estimadas com relação a um outro vértice de posição conhecida, tem-se o posicionamento relativo ou posicionamento Diferencial (Seeber, 2003).

Segundo Dammalage e Samarakoon (2010), cit. por (Galhardo, 2018), quanto aos tipos recetores GPS usados nos diferentes modos de posicionamento podem classificar em três categorias:

- Alta precisão: Código (C/A), fase (L1/L2), dupla frequência e precisão menor que 1 cm. Custo elevado;
- Média precisão: Código (C/A), fase(L1), simples frequência e precisão de 1 a 10 m. Custo médio;
- Baixa precisão: código (C/A), precisão horizontal de 5 a 15 m. Custo baixo.

Nesta investigação só vai ser usado alta precisão.

3.1.1.1. Posicionamento Relativo

O posicionamento Relativo, consiste em utilizar um ponto de coordenadas conhecidas para determinar o ponto de interesse. Este método necessita, no mínimo, dois recetores GNSS rastreando o mesmo satélite. Em geral, utiliza-se neste método as duplas diferenças (DD) como observáveis fundamentais, adotando como as observáveis a pseudodistância e fase da onda da portadora, (Monico, 2008).

A pseudodistância é obtida através da medição do código, o código é um número digital e que os 0 e 1 são dados com a frequência da onda portadora (Seeber, 2003). Quando se realizam diferenças entre observáveis coletadas simultaneamente, tem como finalidade, reduzir alguns tipos de erros. Este método possui características idênticas ao do posicionamento Diferencial, com diferença de que o posicionamento Diferencial as coordenadas calculadas são determinadas em tempo real, no relativo necessita-se de um programa de pós-processamento.

O posicionamento Relativo pode se dividir em vários métodos para corresponder a necessidade de cada usuário, pode se citar: o posicionamento estático, o estático rápido, o semi-cinemático e o cinemático. Uma das vantagens do método é a eliminação do erro do relógio dos recetores e dos satélites, ao serem formadas as duplas diferenças das observações efetuadas, simultaneamente, por dois recetores GPS, Figura 3.1.

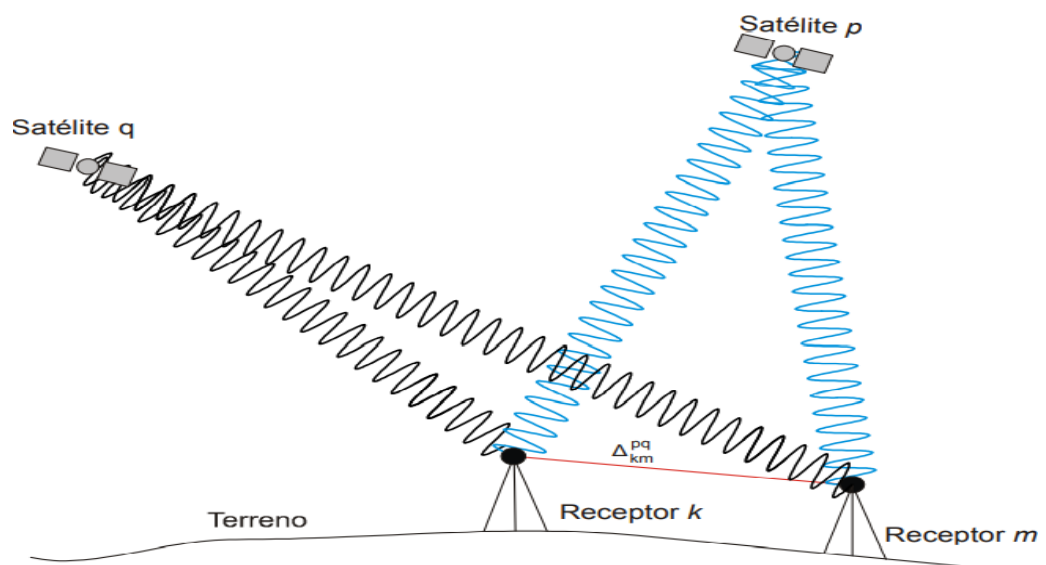


Figura 3. 1 – representação de posicionamento relativo Fonte: (Da Cunha, 2010).

3.1.1.2. Posicionamento Absoluto

O Posicionamento Absoluto, funciona baseado na medição da distância de um conjunto de observações de pelo menos quatro sinais de satélites obtidos por uma única antena recetora. É necessário que se conheça as posições e erros dos relógios dos satélites GNSS, que podem ser obtidos a partir das mensagens de navegação ou das efemérides precisas. Devido a baixa precisão, da ordem de metros, deste método de posicionamento, foi desenvolvida uma variante denominada método de posicionamento por Ponto Preciso-PPP, atualmente em destaque por proporcionar posicionamento em tempo real (ou próximo do tempo real) com precisão ao nível de centímetros ou decímetros, (Monico, 2008).

As informações obtidas por este método, são usadas para resolver parâmetros de estações em qualquer local globo terrestre sem a necessidade de formar dados diferenciados a partir de estações de referências.

O método baseia-se na utilização de orbitas precisas e relógios dos a satélites estimados com referências em observações de uma rede global de estações de confiança e alta qualidade, tomando como exemplo, a rede do IGS.

Segundo (Alves et al., 2011) o método tornou-se possível com o desenvolvimento de uma infraestrutura global, organizada e de qualidade, disponível ao usuário, possuindo estações de monitoramento contínuo distribuídas no mundo e vários centros de análises, o IGS tem fornecido, sem custo, produtos como órbitas pós-processadas e correções para os relógios dos satélites, bem como modelo global para erros provenientes da ionosfera (IONEX) e modelo para correção residual da troposfera, com rapidez e precisão. Essa técnica GPS apresenta algumas vantagens significativas sobre as demais, como o baixo custo computacional e a não correlação entre as estações de uma rede, eliminando a propagação de erros grosseiros na estação base. volta à conformação original, para a qual o sistema foi concebido, com a utilização de apenas um recetor.

Devido a esses fatores, essa técnica pode ser utilizada para a determinação precisa do atraso troposférico, desde que tenha a disposição um pacote computacional que possibilite essa aplicação (Sapucci, 2001).

Em Moçambique a distância entres as estações GNSS são maiores de 100 km, que dificulta a utilização do Posicionamento Relativo (necessita uma rede global/regional de estações). Portanto, o uso de PPP para calcular a posição e o ZTD é o mais adequado.

3.2. Erros de Posicionamento GNSS

Os sinais transmitidos pelo sistema GNNS, no seu percurso de satélite ao recetor, são suscetíveis a erros, as fontes de erros podem ser divididas em quatro categorias (Monico, 2008):

- Dependentes do satélite
- ✓ Erros orbitais e erros dos relógios dos satélites
- Dependentes do meio de propagação
- ✓ Troposfera e Ionosfera
- Dependentes do receptor/antena
- ✓ Resolução do receptor, erros no relógio (osciladores de cristais de quartzo de baixa precisão), multicaminho (sinal refletido em superfícies próximas e variações do centro da fase (dependendo da elevação dos satélites).
- Estação
- ✓ Sinais refletidos, Marés terrestres, cargas das Marés oceânicas e Pressão atmosférica.

3.3. Processamento GNSS

Nos dias atuais, com a facilidade da internet, a comunidade de usuários tem aumentado, já que alguns desses softwares já há algum tempo estão sendo disponibilizados na forma de serviços online, que requerem apenas o envio dos arquivos de observações GPS pelo usuário por meio de uma interface web.

Destacam-se atualmente os serviços de online gratuitos, cujos procedimentos de uso de cada um deles pode ser consultado nos endereços que seguem:

- APPS (Automatic Precise Positioning Service) – Serviço mantido pelo JPL (Jet Propulsion Laboratory), cujo software de processamento é o GIPSY-OASIS ou GIPSYX. Mais informações e acesso ao serviço disponível em (<https://pppx.gdgps.net/submitx>, 2022);
- NRCAN-PPP – desenvolvido pelo Geodetic Survey Division (GSD) e mantido pelo NRCAN. disponível em (<https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/geodetic-reference-systems/18766>, 2021.);
- GAPS (GPS Analysis Positioning Software) – O serviço disponível em (<http://gaps.gge.unb.ca>, 2021);
- AUSPOS – disponível em (<http://www.ga.gov.au/geodesy/sgc/wwwgps>, 2021).

Dos serviços online disponíveis atualmente, nota-se que a maioria emprega o método PPP, um método que vem se tornando uma ferramenta para processamento de dados GNSS muito útil, já que requer pouco esforço computacional e apresenta bons resultados.

3.4. Softwares de Processamento de Dados GNSS

A partir de medidas GNSS, é possível estimar ZTD a cada 30 minutos ou menos, através do uso de um software adequado. Existem vários sistemas de Software de alta precisão disponíveis para o processamento GNSS de rede pré-estabelecidas, para determinação dos parâmetros atmosféricos referente à troposfera dos quais pode-se citar: ver na Tabela 3.1, abaixo.

Tabela 3. 1– Alguns softwares de processamento de dados GNSS PPP disponíveis.

Software GipsyX	
Provedor	JPL (Jet Propulsion Laboratory - Instituto de Tecnologia da Califórnia), EUA. Fonte: (https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/ , 2021.)
Software BERNESE GNSS V. 5.2	
Provedor	Instituto Astronômico da Universidade de Berna (AIUB), Suíça. Fonte:(http://www.bernese.unibe.ch , 2021)
Software GAMIT	
Provedor	Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Estados Unidos Fonte:(http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/ , 2022)
Software GPSTk	
Provedor	Laboratórios de Pesquisa Aplicada da Universidade do Texas em Austin. Fonte: (http://www.gpsk.org , 2021)
Software RTKLIB	
Provedor	Ciência e Tecnologia Marinha da Universidade de Tóquio. Fonte: http://www.rtklib.com , 2021)

Fonte: Adaptado do (<https://www.unavco.org/software/data-processing/Postprocessing.Html>, 2021).

Os softwares GIPSYX, BERNESE e GAMIT são os principais softwares científicos mais divulgado e usados. Ambos representam o estado da arte em processamento GNSS. Podem ser obtidos por instituições de pesquisa por meio de uma concessão gratuita de uso outros não.

3.4.1. Software GIPSYX

GIPSYX é um conjunto de programas/softwares de pós processamento desenvolvidos a nível acadêmico no JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), pertencente ao Instituto de Tecnologia da Califórnia, que permitem analisar a modelagem de efeitos relacionados aos sinais, particularmente de sinais GPS/GNSS, estimando assim, resultados precisos do atraso zenital troposférico e os erros de orbitais e relógio são de poucos cm (Zumberge et al., 1997).

Teve a sua gênese em dois sistemas independentes, um para a determinação da órbita e outro designado por VLBI (Very Long Baseline Interferometry) para fins geodésicos, a combinação destes dois sistemas e adicionado a estes mais um programa com Filtro de Kalman, desenhado para a estimava de parâmetros e em paralelo desenvolveu se um programa com módulos comuns, designado OASIS, para análise de covariância para orbitas e missões espaciais.

Segundo Sapucci (2001), o software GIPY-OASIS utiliza o método de posicionamento PPP, algumas das suas características destacam-se (GIPSY):

- Filtro sofisticado e suave com modelagem flexível a processo de ruído;
- Único receptor de resolução ambígua usando órbita JPL e produtos clock para GPS;
- Modelos complexos de força para sondas terrestres;
- Modelos complexos de efeitos geométricos.

Aplicando as lições aprendidas de seus predecessores, GIPSY-OASIS e Real Time GIPSY (RTG), o GipsyX/RTGx foi redesenhado desde o início para oferecer maior precisão, exatidão, usabilidade e flexibilidade operacional.

3.4.2. Softwares GAMIT e Bernese

Os softwares, como GAMIT (Herring et al., 2009) ou o Bernese (Bern, 2016), podem também ser usados para estimar os atrasos troposféricos zenitais.

GAMIT é um software científico e de uso gratuito para fins de processamento de dados GNSS, desenvolvido pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), são utilizados para produzir estimativas e uma matriz de covariância e parâmetros orbitais e de orientação terrestre, e atrasos atmosféricos.

Permite o processamento simultâneo de um conjunto de estações, o que o torna não adequado para processamento de rede com poucas estações ou cuja distribuição geográfica seja regional, este software utiliza o posicionamento relativo.

Bernese é um software comercial, desenvolvido pelo Instituto Astronómico da Universidade da Berna (AIUB) Suíça, caracterizada por constantes atualizações na busca de melhorias na acurácia dos resultados obtidos, devido a diferentes contribuições de todos aqueles que nele interagem.

As principais observáveis processadas é a dupla diferença da fase da onda portadora, que é processada por método relativo. Os outros observáveis, as fundamentais e como as derivadas de combinação lineares diversas, também podem ser utilizados, além de outros métodos de posicionamento, como o PPP.

3.5. Orbitas de Satélite

As órbitas de satélites (posições dos satélites no tempo) constituem um dos componentes mais importantes para cada processamento de dados GNSS. As orbitas fornecidas por várias agências como o Jet Propulsion Laboratory (JPL) da NASA, Center for Orbit Determination in Europe (CODE), National Geodetic Survey (NGS), entre outras, são processadas pelo International GNS Service (IGS) para gerar órbitas ultra-rápidas preditas quatro vezes por dia, com a melhor qualidade possível.

O IGS coleta, arquiva e distribui observações GNSS com precisão suficiente para satisfazer os requisitos necessários à utilização destes dados, rondando a precisão das orbitas fornecidas os 3-5 centímetros.

Os arquivos orbitas são disponibilizados em três tipos:

- Final - Esses são os arquivos de órbita mais precisos. Eles têm uma precisão de 2,5 cm e são disponíveis com um atraso de 12 a 14 dias;
- Rápida - As órbitas rápidas ocupam o segundo lugar em termos de precisão. Eles têm uma precisão de 3,5cm e estão disponíveis muito antes das Finais, com atraso de 17 horas a 1 dia apenas; e
- Ultra - Rápida - As órbitas Ultrarrápidas são disponibilizadas quatro vezes ao dia, às 3:00; 9:00; 15:00 e às 21:00 UTC (Coordinated Universal Time) com precisão de aproximadamente 3cm.

3.6. Temperatura e Pressão

A qualidade dos valores de PWV dependem da qualidade dos valores da temperatura média (T_m) e da pressão atmosférica (P_o), são variáveis meteorológicas necessárias para estimar o vapor de água precipitável (PWV). O parâmetro T_m actua como factor chave de conversão do atraso húmido (ZWD) para o PWV em sistemas GNSS.

A solução ideal, são estações GNSS equipadas com sensores de alta precisão de temperatura e pressão, para que os valores usados na conversão sejam os mais precisos possíveis.

No entanto, por motivos de custo elevados de sensores de temperatura e pressão muitas estações GNSS não tem incorporados estes sensores.

Caso não estejam inclusos esses instrumentos torna-se necessário usar os valores de pressão atmosférica medido com auxílio dos barómetros e os valores da temperatura média obtidos a partir de perfis de radiossondas ou instrumentos instalados nas estações meteorológicas de referência, ou mesmo a partir de modelos globais existentes.

3.7. Modelos Globais

Os modelos atmosféricos globais analisam a evolução da atmosfera em todo o planeta (escala mundial), possuem uma resolução da ordem de 200km, são os que oferecem previsões de forma a prever o estado futuro da atmosfera sobre uma determinada zona, podemos citar: o modelo ECMWF que é conhecido como o melhor modelo disponível para a simulação numérica.

3.7.1. Descrição do Modelo ECMWF

O ECMWF (<https://www.ecmwf.int/>, 2021), é um centro de referência e o seu modelo numérico de previsão do tempo, a nível global é modelo ECMWF, o modelo é baseado em conjuntos de equações básicas de dois tipos: as de diagnóstico, que descrevem a relação entre a pressão estática, a densidade, a temperatura e a altura e as de prognóstico, que descrevem a evolução no tempo dos componentes do vento horizontal, pressão a superfície, temperatura e conteúdo de vapor de água de uma parcela de ar. O modelo é um dos melhores para a gama dos 3-10 dias, nas previsões para todo o globo.

3.7.2. Modelo ERA5

Dentre vários modelos mantido pelo ECMWF consta o ERA5. É um modelo de reanálise que possui uma grelha de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (27×27 Km) que resulta de um esforço mundial para combinar dados de modelação, as melhores estimativas das condições meteorológicas, com dados de observação in situ e de detecção remota (Nunes et al., 2020).

O modelo fornece estimativas horarias de um grande número de variáveis climáticas atmosféricas, terrestres e oceânicas. Dentre muitos variáveis podemos citar a temperatura a 2m de altura, pressão na superfície e coluna de vapor de água, com uma cobertura global completa e coerente.

3.7.3. Modelo Global de Pressão e Temperatura

Dentre os modelos globais mais atuais disponíveis para qualquer região e época pode-se citar: os modelos Globais de Pressão e Temperatura (GPT – Global Pressure and Temperature) (Boehm et al., 2007); GPT2 (Lagler et al., 2013); GPT2w (GPT wet) (Böhm et al., 2014); GPT3 (Landskron & Böhm, 2018).

O modelo empírico GPT ((Global Pressure and Temperature), foi desenvolvido na Universidade de Viena, fornece valores de pressão e temperatura nas proximidades da superfície terrestre, que são utilizados para calcular as estimativas à priori da componente hidrostática do atraso troposférico.

Na determinação deste modelo foram utilizados dados de médias mensais de perfis de pressão e temperatura, bem como de altitudes ortométricas, de uma grade global de 15° x 15° de três anos (setembro de 1999 a agosto de 2002) do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Tais dados foram reduzidos ao nível médio do mar e tiveram suas médias e amplitudes anuais calculadas com deslocamento de fase fixada em 28 de janeiro. As quatro grades resultantes foram expandidas em uma série de funções harmônicas esféricas de grau e ordem nove. Os parâmetros de entrada do GPT são as coordenadas geodésicas tridimensionais da estação e a data juliana modificada (Boehm et al., 2007).

3.8. Modelos Regionais

Os modelos atmosféricos regionais, concentram-se em grandes áreas, como por exemplo, continentes.

Estes modelos apresentam uma resolução espacial de 2 km até cerca de 50 km e têm como objetivo analisar e identificar com detalhe, o comportamento da atmosfera sobre uma região específica.

Existem vários modelos regionais, a tabela da figura 3.2 abaixo ilustra os principais modelos regionais mais utilizados e disponíveis.

Tabela 3. 2– principais modelos Regionais/Locais disponíveis

Designação	Desenvolvido por:
ALADIN – Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational	Météo-France
AROME – Application of Research to Operations at Mesoscale	Météo - France em colaboração com a universidades e do consórcio Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International
ARPS - Advanced Regional Prediction System	University of Oklahoma
MM5 - Fifth Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model MM5	PSU/NCAR
WRF - Weather Research and Forecasting Model	NCEP
GEM-LAM – Global Environmental Multiscale Limited Area Model	MSC

3.9. Estado da Arte do Sistema GNSS em Moçambique

Numa altura em que a humanidade é desafiada com ocorrências frequentes de fenómenos meteorológicos extremos ocasionadas pelas mudanças climáticas, no entanto uma infraestrutura de observação por GNSS e estudos feitos sobre o PWV ainda são poucos no continente africano, comparado com outras partes do mundo tomando como exemplo a Europa.

O país possui atualmente 11 estações GNSS, integrados na rede MozNet e que não são suficientes para cobrir de maneira uniforme toda a extensão do território moçambicano.

A Figura 3.2 abaixo representa as estações GNSS da Rede Geodésica de Moçambique, o acesso é através da plataforma TeroNet, cujo o endereço é: <https://TeroNet.rede-moznet.net>.

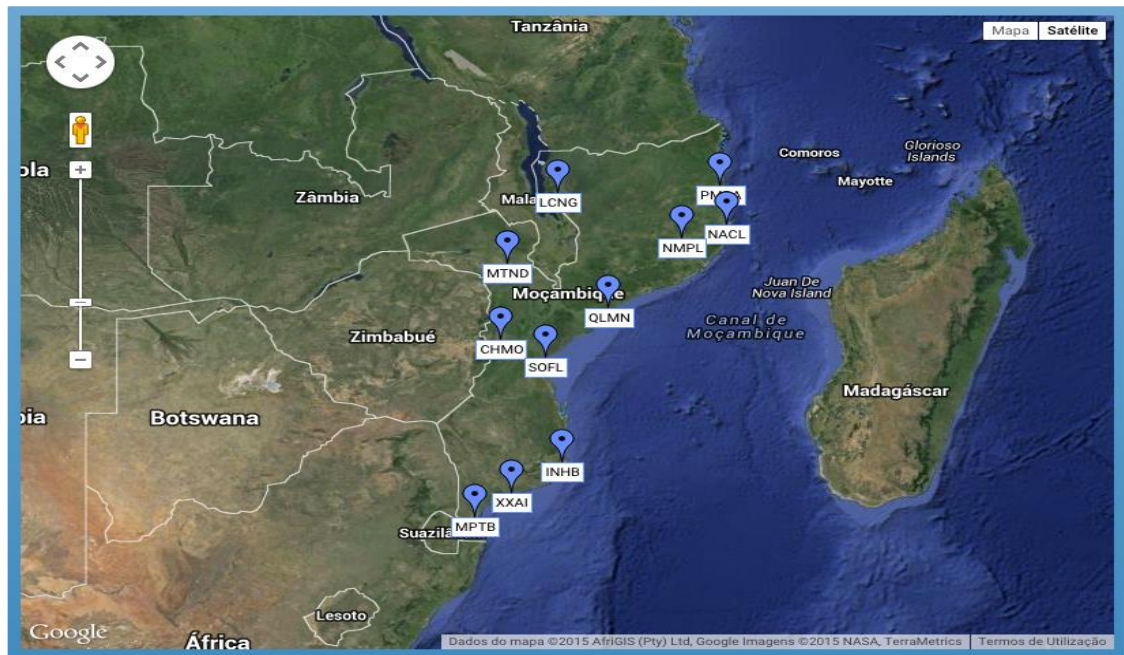


Figura 3. 2 – Estações GNSS da Rede Geodésica de Moçambique inseridos na plataforma TeroNet.

Fonte: (<https://TeroNet.rede-moznet.net/>, 2021).

Portanto, das estações ilustradas no mapa acima, sete destas pertencem a CENACARTA, e as restantes quatro estações são partilhadas entre a CENACARTA e seus parceiros como: o SEGAL, Mota-Engil, INAHINA (Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação) e a DG-Geologia.

No projecto SUGGEST-AFRICA em parceria com a Universidade da Beira Interior (UBI), o Centro Nacional de Cartografia e Teledeteção (CENACARTA), Instituto Nacional de Meteorologia (INAM) e a Universidade Eduardo Mondlane-Faculdade de Ciências (UEM-FC), está a adequar-se os recetores das estações permanentes GNSS da rede Geodésica de Moçambique já existente, para fins também meteorológicos, com instalação de sensores digitais tais como: pluviómetro, anemómetro e sensores combinados que permitem medir (a temperatura do ar, humidade relativa e pressão atmosférica) o que irá permitir o monitoramento do vapor de água atmosférico,

ajudando Moçambique a embarcar na meteorologia GNSS, através do Instituto Nacional da Meteorologia (INAM) entidade responsável por monitorar, processar, armazenar e emitir dados meteorológicos e climatológicos no país.

As estações permanentes GNSS da rede Geodésica de Moçambique (MOZNET), que beneficiaram numa primeira fase de instalação de sensores meteorológicos digitais no mês de Março de 2021 são: de Maputo, Inhambane, Beira, Quelimane e Nacala.

A Figura 3.3 mostra a estação GNSS de Inhambane que benefício de instalação de sensores meteorológicos digitais. Do lado esquerdo temos dois Sensores (pluviómetro e anemómetro) e do lado direito temos Sensor combinado, para medir a temperatura do ar, humidade relativa da atmosfera e pressão atmosférica.



Figura 3. 3 – Estação GNSS de Inhambane (INHB).

A Figura 3.4 mostra o interior da caixa técnica onde foi colocado o sistema GNSS e todo o sistema de apoio providenciado pelo SEGAL, nomeadamente para manutenção dos dados localmente e para transmissão destes para os servidores centrais do CENACARTA.



Figura 3. 4 – Componente Técnico da estação GNSS de MPTB instalada na CENACARTA.

A Figura 3.5 abaixo, representa a arquitetura da componente técnica da estação GNSS de MPTB instalada no edifício central da CENACARTA em Maputo, a mesma arquitetura é similar em algumas estações GNSS instaladas ao nível do país.

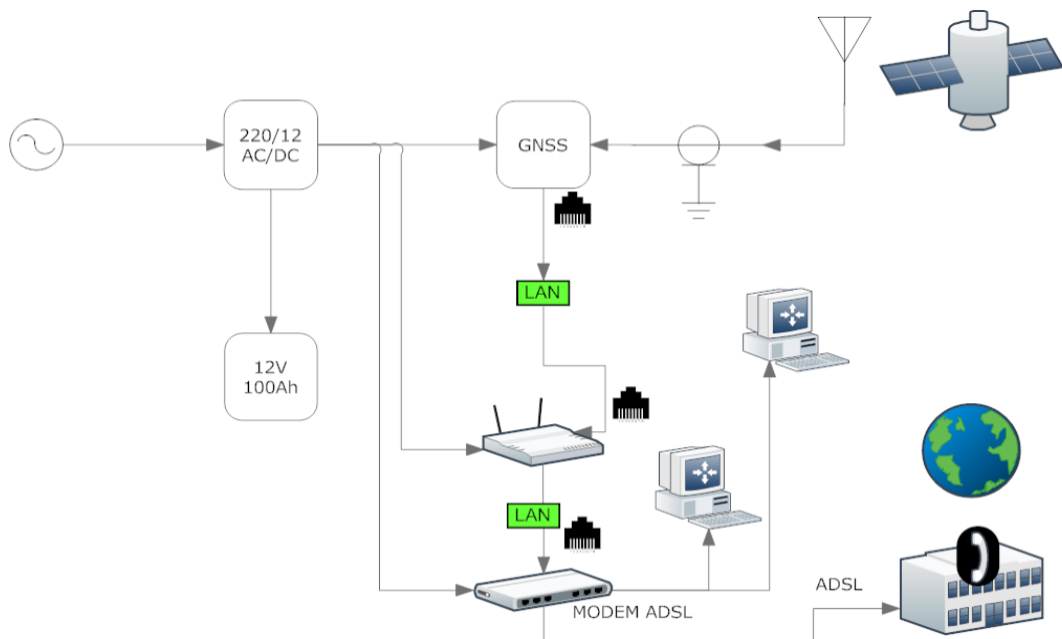


Figura 3. 5 – Esquema da arquitetura Técnica implementada em algumas estações GNSS em Moçambique.

Fonte: CENACARTA.

Tabela 3. 3 – Códigos das estações GNSS em Moçambique, suas coordenadas geográficas e a sua localização regional.

Região	Nome da Estação GNSS	Latitude (S)	Longitude (E)	Altitude em metros
Região Norte	Estação de Nampula Acrónimo da Estação NMPL	-15,1228 ⁰	39,2579 ⁰	417,9
	Estação de Nacala Acrónimo da Estação NACL	-15,5469 ⁰	40,6748 ⁰	16,04
	Estação de Pemba Acrónimo da Estação PMBA	-12,9644 ⁰	40,4838 ⁰	-6,01
	Estação de Lichinga Acrónimo da Estação LCNG	-13,3013 ⁰	35,2436 ⁰	1360,46
Região Centro	Estação de Sofala Acrónimo da Estação SOFL	-19,8346 ⁰	34,8356 ⁰	22,31
	Estação de Chimoio Acrónimo da Estação CHMO	-19,1427 ⁰	33,4198 ⁰	678,92
	Estação de Tete (Matundo) Acrónimo da Estação TETE (MTND)	-16,1396	33,6086	148,05
	Estação de Quelimane Acrónimo da Estação QLMN	-17,8828 ⁰	36,8870 ⁰	15,55
Região Sul	Estação de Maputo Acrónimo da Estação MPTB	-25,9662 ⁰	32,5677 ⁰	44,44
	Estação de Xai-Xai Acrónimo da Estação XXAI	-25,0382 ⁰	33,7415 ⁰	50,22
	Estação de Inhambane Acrónimo da Estação INHB	-23,8711 ⁰	35,3832 ⁰	24,07

Fonte: Adaptado do Autor, a partir dos dados de (<https://TeroNet.rede-moznet.net/>, 2021).

A distribuição das estações GNSS nas três zonas do país, é ilustrada no mapa da Figura 3.6 abaixo, as cores distinguem uma região da outra, a cor amarela representa a região Sul, a cor azul representa a região Centro e a região Norte é representada pela cor cinzeta clara.

No âmbito do projecto SUGGEST-AFRICA como anteriormente foi referido, cinco estações sinalizadas por triângulo vermelho foram as que beneficiaram de sensores meteorológico, e duas estações como a de Xai-Xai e Chimoio, são estações GNSS que também estão equipados de sensores meteorológico, mais são de pertença do Instituto Nacional de Meteorologia (INAM).

A rede geodesica de estações GNSS em Moçambique ainda não é densa o suficiente para aplicação de monitoramento de parametros atmosfericos em todo o territorio nacional.

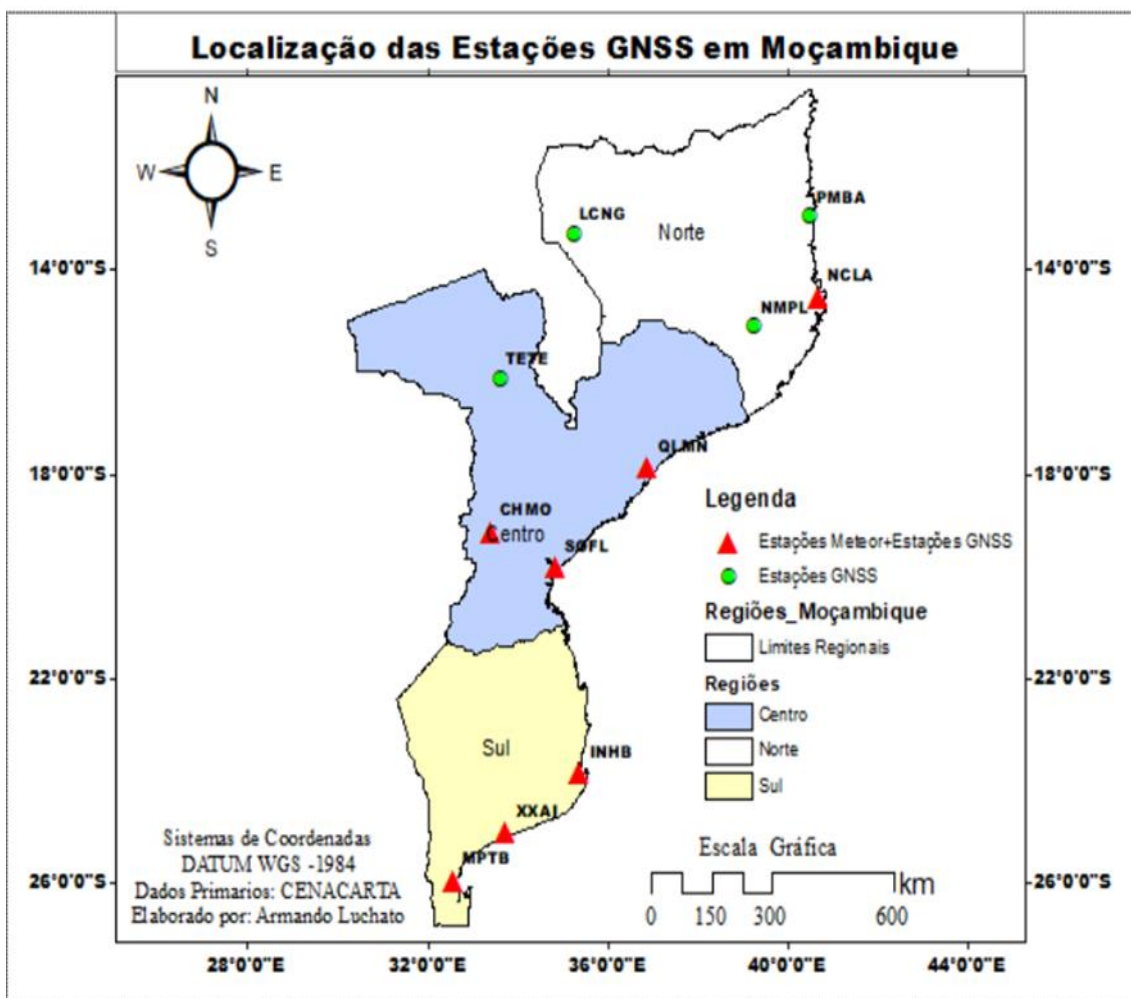


Figura 3. 6 – Rede de estações do Sistema Global de Navegação por Satélite de Moçambique.

Capítulo 4

4. Metodologia

Neste capítulo abordamos os procedimentos metodológicos, a proveniência de dados usados nesta dissertação, a localização geográfica da área de estudo, bem como a sua variabilidade climática, materiais e softwares.

4.1. Localização Geográfica da Área de Estudo

Moçambique está situado na costa Sul-oriental do continente africano, concretamente na África Austral. É limitado a leste pelo oceano Índico, a norte pela Tanzânia, a noroeste pelo Malawi e Zâmbia. A oeste faz fronteira com o Zimbabwe, África do Sul e Swazilândia, e a Sul com a África do Sul (Fig. 4.1). Em termos de coordenadas geográficas, Moçambique situa-se no Hemisfério Sul entre os paralelos com latitudes $10^{\circ} 27'$ e $26^{\circ} 52'$ Sul e entre os meridianos com longitudes $30^{\circ} 12'$ e $40^{\circ} 51'$ Este.

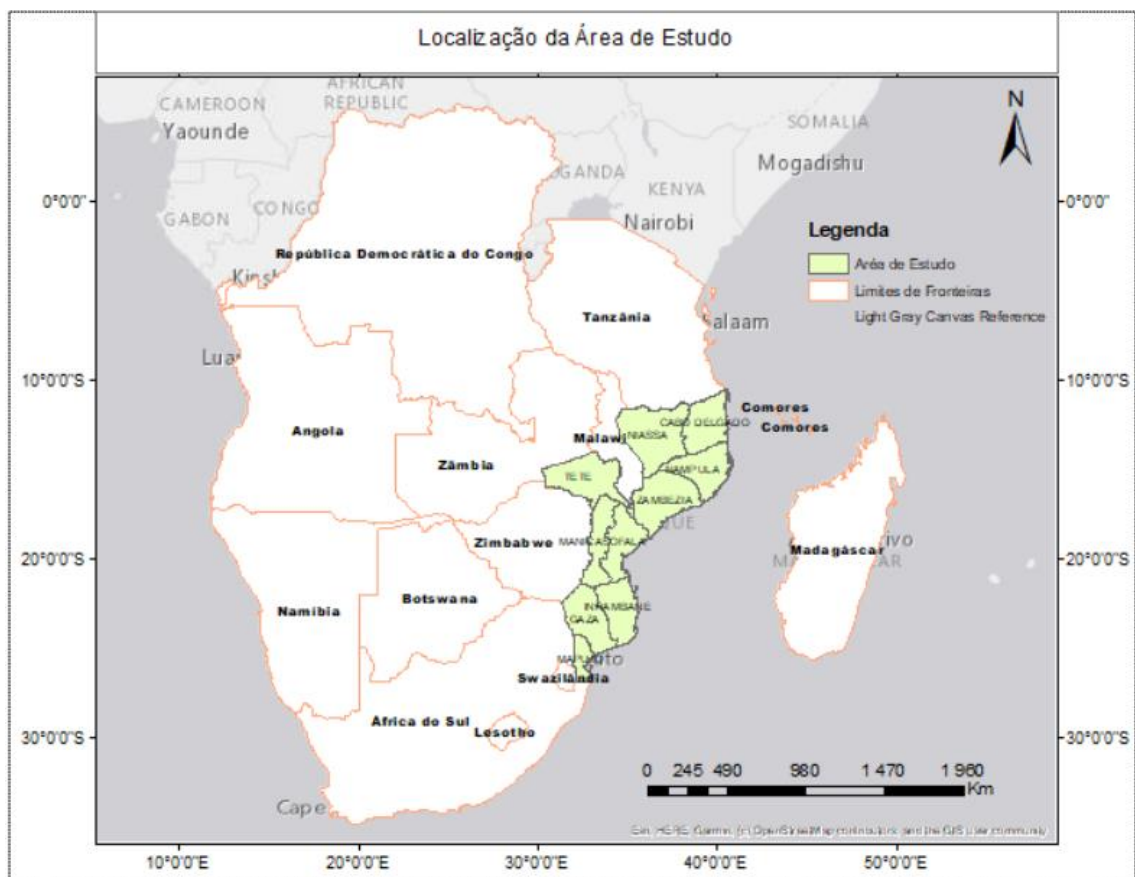


Figura 4.1 – Localização da área de estudo

O território enquadra-se no fuso horário 2 (dois), o que lhe confere duas horas de avanço em relação ao Tempo Médio Universal, assim como uma parte dos países da Europa Setentrional e Oriental (Muchangos, 1999).

A superfície continental de Moçambique é de aproximadamente 800.000 km². Uma área que corresponde a cerca de 2,6% da superfície do continente africano que é de aproximadamente 30 milhões de km².

4.2. Caracterização do clima de Moçambique

O clima do país, de um modo geral, é predominantemente tropical húmido, caracterizado por duas estações bem distintas: Uma estação seca e fria (ou de inverno), de Maio a Setembro e outra quente e húmida (ou de verão), tem início em Outubro e termina em Abril. Os tipos de clima em Moçambique são determinados pela localização da zona de baixas pressões equatoriais, das células anticiclónicas tropicais e das frentes polares do Antártico (MICOA, 2007).

Os ciclones tropicais trazem precipitação intensa, ventos fortes e elevação do nível do mar (sobre elevação marítima). A probabilidade de ocorrência de ciclones na costa moçambicana é de, pelo menos, dois por ano segundo as estatísticas (Muchangos, 1999).

A precipitação é mais abundante no Centro e Norte do país com valores variando entre 800 e 1200 mm por ano. O Sul do país é geralmente seco mais no interior do que na costa, onde a precipitação anual atinge cerca de 800 mm e diminui até cerca de 300 mm no Distrito de Pafuri em Gaza.

As temperaturas médias do ar, em geral, variam entre 25°C e 27°C no verão e 20°C e 23°C no inverno, a temperatura média anual é sempre superior a 20°C, excepto nas montanhas, onde ocorrem temperaturas inferiores a 16°C, condicionadas pela altitude de cada região. Em geral, os valores da temperatura apresentam uma tendência crescente em relação às menores latitudes (Hoguane, 2007).

As temperaturas mais elevadas registam-se entre os meses de Dezembro e Fevereiro, podendo as máximas atingir 38°C e até mesmo 49°C, os meses mais frios são Junho e Julho. A influência oceânica contribui para uma certa uniformização do clima de toda a zona litoral, onde a temperatura é da ordem de 24°C e a pluviosidade varia entre 800 e 1.400 milímetros por ano. As regiões mais afastadas do litoral apresentam climas secos e semi-árido (Muchangos, 1999).

4.3. Materiais e softwares

Dentre vários softwares que existem, para o processamento de dados observados dos satélites GNSS para calcular os valores de ZTD (Zenital Tropospheric Delay) ou Atraso Zenital Troposférico, foi utilizado APPS (Automatic Precise Positioning Service) serviço online mantido pela JPL-NASA, cujo software de processamento é GIPSY

A escolha e utilização deste software, nesta dissertação, baseou-se no facto de este permitir o processamento de uma estação de cada vez, o que adequa com a área de estudo, por ainda estar na fase piloto de uso do sistema GNSS.

Para análise de dados e construção de gráficos com vista a atingir os objetivos específicos pré-estabelecidos foi usado o programa Microsoft Excel.

Os mapas foram concebidos, recorrendo ao Sistemas de Informação Geográficas (SIG) ArcGIS 10.7.1.

4.4. Dados e Métodos

4.4.1. Dados

O uso de dados GNSS, por si só, não é uma técnica para estimar o vapor de água precipitável (PWV) numa dada região, mas é uma ferramenta auxiliar bastante útil para alimentar os modelos meteorológicos de previsão de tempo.

Para a concretização dos objetivos, foram usados dados diários dos sinais GNSS obtidos através da rede TeroNet (Plataforma de Gerenciamento de Dados GNSS), rede mantida por SEGAL é composta atualmente por 11 estações ativas operando de forma continua.

As estações tem a sua conexão direta à internet de forma que os dados coletados sejam enviados diretamente a um computador central, o qual é responsável pelo gerenciamento e armazenamento dos mesmos, bem como convertê-los para o formato RINEX.

Figura 4.2 representa o roteiro concebido para aquisição e análise de dados *utilizado nesta dissertação*.

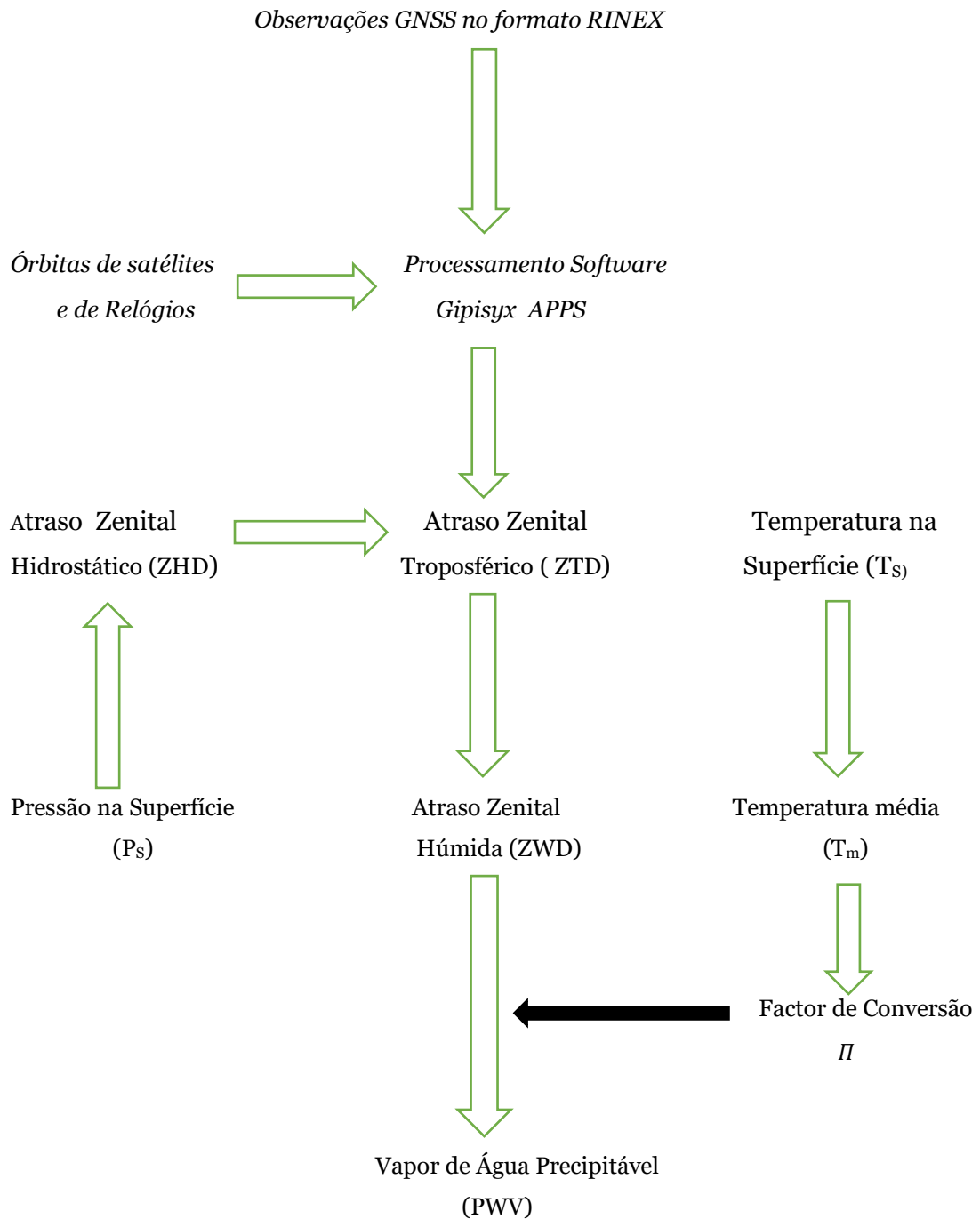


Figura 4 2 – Esquema concebido para aquisição e análise de dados

Adaptado por: Autor (2021).

4.4.2. Métodos

- a)** Para analisar os dados diários de estações GNSS para obtenção do Atraso Zenital total troposférico (ZTD) foi calculado através da relação da Equação 1. Vê secção 2.9.
- b)** Para determinar o vapor de água precipitável (PWV) a partir dos parâmetros meteorológicos como a pressão e a temperatura seria usada a relação da equação (4), a partir da determinação do Atraso Zenital Hidrostático (ZHD) e das estimativas do ZTD, obteve-se o Atraso Zenital húmida (ZWD) que seria convertido em PWV usando uma constante de proporcionalidade (Π) (Bevis et al., 1992). O que não foi efetuado porque os dados da temperatura e da pressão a usar tinha que ser das estações GNSS do país que beneficiaram da instalação de sensores meteorológicos no âmbito do Projecto SUGGES-AFRICA que ainda não tinham dados disponíveis.

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (5)$$

Π é dado por:

$$\Pi = \frac{10^6}{R_w \left[k_2' + \frac{K_3}{T_m} \right]} \quad (6)$$

Sendo que, ($R_w = 461, 5181 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) é a constante específica para o vapor de água, T_m é a temperatura média do perfil troposférico ponderado pela concentração do vapor de água (Davis et al., 1985). Os constantes K_2' e K_3 foram discutidos na secção 2.9.

- c)** Para Criar e analisar as séries temporais do ZTD foram usadas séries diárias e sub-diárias dos anos de 2006 a 2021 de valores obtidas nas 11 estações meteorológicas GNSS instalados no país.

- d)** Para analisar o desvio médio de ZTD em cada estação, foi usada a fórmula do Desvio da equação (7).

$$D_m = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \quad (7)$$

Onde: X_i é média de ZTD de cada estação e
 \bar{X} é a média da série.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Neste capítulo são analisados e discutidos resultados da variabilidade do ZTD registados nas estações GNSS na área de estudo.

5.1. Análise do ZTD em relação a ocorrência de um Ciclone.

Nesta secção analisamos a variabilidade do ZTD registado na estação GNSS de Sofala aquando da passagem do ciclone Chalane na província de Sofala concretamente na cidade da Beira.

Os ciclones afetam todas regiões do país, sobretudo nas zonas próximas da costa produzindo grandes quantidades de precipitação. A estação ciclónica em Moçambique estende-se do mês de Novembro até Abril (MICOA, 2005).

No dia 364 de 2020, ou por outra, no dia 30 de Dezembro de 2020, a cidade da Beira mais uma vez foi assolada por ciclone, que foi atribuído o nome de Chalane. Para fazer-se uma análise mais precisa do comportamento do ZTD na ocorrência deste ciclone, escolheram-se os dias 28, 29, 30 e 31 de Dezembro de 2020 e o dia 01 de Janeiro de 2021, sendo 28 e 29 dois dias antes da ocorrência, 30 dia da ocorrência e dias 31 e 01 dois dias após a ocorrência do ciclone

A escolha da cidade da Beira para análise do ZTD no dia da ocorrência de ciclone, justifica-se pelo facto desta cidade ciclicamente ser afetada por eventos meteorológico extremo (ciclones), acompanhadas com muita pluviosidade, como a título ilustrativo, verificamos a ocorrência de ciclones: IDAI no dia 15 de Março de 2019; Chalane no dia 30 de Dezembro de 2020 e Eloise no dia 22 de janeiro 2021.

Tabela 5. 1 – Correspondência entre dias do ano e dias do mês

Mês	Dia do mês	Ano	Dia do Ano
Dezembro	28	2020	362
Dezembro	29	2020	363
Dezembro	30	2020	364
Dezembro	31	2020	365
Janeiro	01	2021	366

A Figura 5.1, ilustra as características da variabilidade do ZTD durante a passagem do ciclone Chalane na Cidade da Beira. Observa-se que dois dias antes da ocorrência do fenómeno, dias 28 e 29 o atraso zenital troposférico apresenta menor variação, saindo do valor aproximado de 2600

mm de ZTD registrados no dia 28 para 2554,9 mm às 00hs do dia 29. Continuou com as mesmas características de variabilidade até as últimas horas do dia 29 com valor do ZTD de aproximadamente de 2521mm.

No dia 30, dia da ocorrência do fenômeno em análise, o atraso Zenital Troposférico começou a aumentar de uma forma contínua de hora em hora durante todo o dia 30, saindo dos aproximadamente 2521mm registrados nas últimas horas do dia 29, registrando o valor mais elevado (pico) de aproximadamente 2703,7 mm nas primeiras horas do dia 31, após atingir o pico o valor de ZTD começou a registrar uma diminuição tendência essa que continuou até o dia 01 de janeiro que é o segundo dia após a ocorrência do fenômeno. Pelos valores de ZTD registrados no dia 30 que foi o dia da ocorrência do evento meteorológico extremos, leva-nos a concluir que nesse dia havia elevada concentração do vapor de água na atmosfera, uma vez que o que causa o atraso no sinal GNSS são os gases que existem na atmosfera e um desses é o vapor de água que se concentra na troposfera onde ocorre a maioria dos fenômenos meteorológicos.

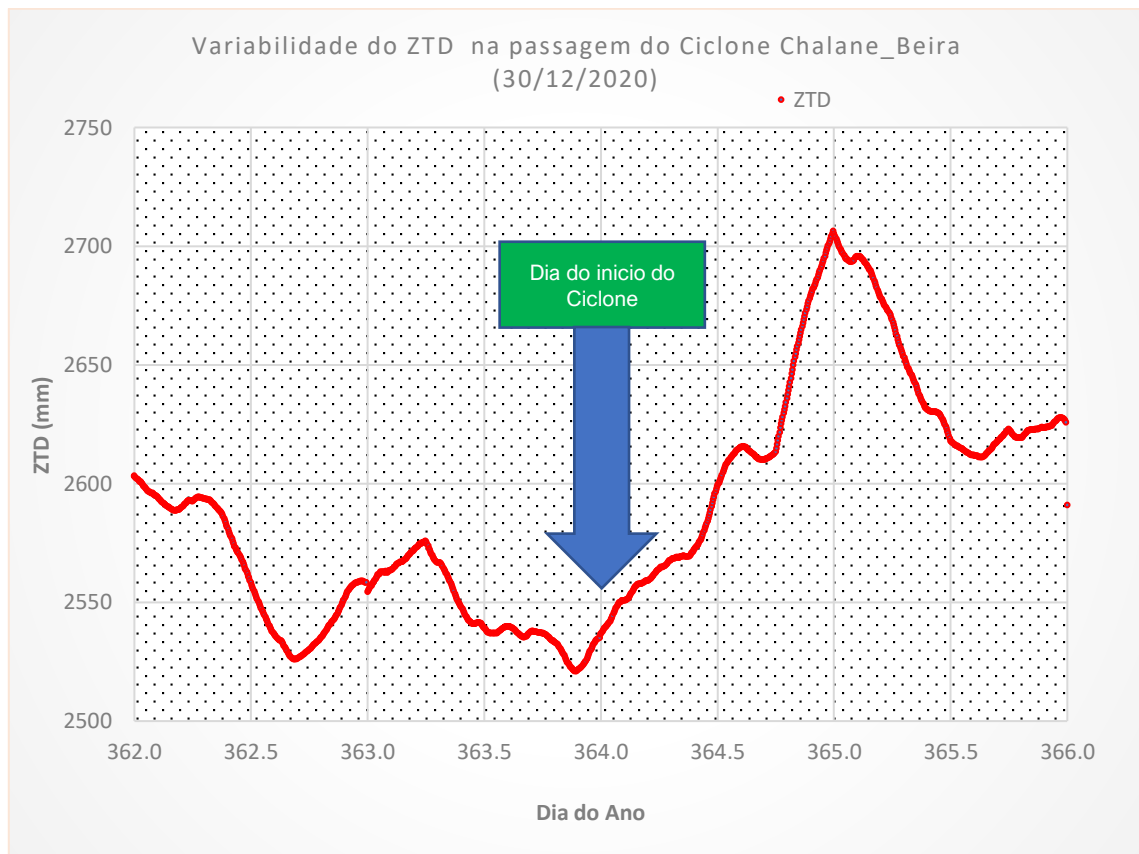


Figura 5. 1 – Variabilidade do ZTD com aproximar, durante e após a passagem do ciclone Chalane.

5.1.1. Análise da Temperatura à passagem do ciclone Chalane

A Figura 5.2, faz análise da temperatura durante a passagem do ciclone Chalane na cidade da Beira. Os ciclones tropicais que ocorrem em Moçambique evoluem sobre as águas do oceano Índico devido a elevadas temperaturas das suas águas, o aumento ou diminuição da temperatura pode indicar a quantidade da presença do vapor de água no ar atmosférico.

Para o dia 29 dia do pronuncio pelos valores do ZTD do aproximar de uma instabilidade atmosférica, a temperatura das 04hs até as 11 horas teve a tendência de aumentar saindo dos 28 °C para 32 °C, instantes depois teve uma diminuição continua registando um valor de 26 °C às 07 horas do dia 30, onde instantes depois continuo a aumentar atingindo valor de 31 °C às 12horas.

Às 13 horas iniciou a tendência de diminuir atingindo o pico às 15 horas com registo de 21 °C, no intervalo de uma hora voltamos a registar o aumento para 31 °C verificado às 16 horas, a partir dai até o dia 01 de janeiro de 2021 registava-se uma diminuição sucessiva com algumas oscilações.

Verifica-se que onde atingimos os valores máximos do ZTD a temperatura baixou para o mínimo, sabido que os ciclones são sempre acompanhados de pluviosidade pode se presumir que neste instante possa ter havido a queda de chuva, tivemos o registo de 25mm no dia 30 e 5 mm no dia 31 (<https://meteostat.net/en/place/8XT2TJ?T=2020-12-28/2021-01-01, 2022>).

De referir que análise da pressão atmosférica em relação ao evento ciclónico Chalane não foi analisada por inexistência de dados.



Figura 5. 2 – Variabilidade da Temperatura com aproximar, durante e após a passagem do ciclone Chalane.

Fonte: (<https://meteostat.net/en/place/8XT2TJ?T=2020-12-28/2021-01-01, 2022>)

5.2. Análise do ZTD registado nas estações GNSS por região geográfica

Nesta subsecção faz-se análise do Atraso Zenital Troposférico (ZTD) nas estações GNSS existentes nas três regiões da área de estudo, nomeadamente na região Sul, na região Centro e na região Norte. A análise em cada região visa gerar uma solução mais fiável, comparada com análise única de todos os valores de ZTD registados nas estações GNSS do país.

É notória a variabilidade sazonal significativa dos valores de ZTD, em todas as independentemente da sua localização geográfica na área de estudo, sabido que os valores de ZTD podem ser influenciados por vários fatores, como o relevo da superfície, a pressão e a umidade atmosférica.

A Tabela 5.2 descreve as datas da operacionalização, os ficheiros totais, os ficheiros processados por cada estação GNSS existente na área de estudo.

Tabela 5. 2 – Resumo de Processamento de ficheiros efetuado em cada estação GNSS .

Local	Ínicio Processamento	Final Processamento	No. de Anos	Total de Ficheiros diários recebidos	Ficheiros Processados	Percentagem (%) de Ficheiros Processados relativo ao No. de Anos em que a estação está á funcionar
CHMO	29/07/2013	21/04/2015	1,7	138	137	21,7
INHB	20/04/2007	07/07/2021	13,7	2252	2124	40,9
LCNG	23/07/2013	04/03/2021	7,6	745	745	26,8
MPTB	20/05/2011	27/11/2021	10,5	2477	2467	64,2
NACL	24/07/2015	27/11/2021	6,3	754	743	32,1
NMPL	12/04/2006	06/02/2020	13,8	1566	1433	28,4
PMBA	06/11/2007	10/02/2020	12,8	2230	2102	46,9
QLMN	27/07/2013	09/10/2020	7,2	2001	1962	74,6
SOFL	21/08/2012	23/10/2021	9,3	2150	2138	63,8
TETE	01/09/2011	30/03/2015	3,6	1143	1142	87,4
XXAI	19/07/2015	27/11/2021	5,7	1033	936	40,3

5.2.1. Variabilidade do ZTD nas Estações da região Sul

Nesta região foram usadas séries temporais de 2007 a 2021, o que totalizou aproximadamente 14 anos Figura 5.3. Os detalhes sobre o total de ficheiros disponíveis e percentagem de ficheiros processados para cada estação da região sul podem ser consultados na Tabela 5.2 onde se resume a totalidade das estações.

As amplitudes do sinal de atraso troposférico nas três estações desta região, são aproximadamente iguais, também se verifica algum aumento da amplitude em relação as amplitudes comuns na estação GNSS de Inhambane e Maputo, que ocorreu na época húmida do ano.

Verifica-se que, na estação de Inhambane há muito Outliers na época húmida (verão), esta tendência pode ser por influência da brisa marítima que é acentuada no verão e atendendo que, a mesma estação esta localizada próxima a costa (baía de Inhambane).

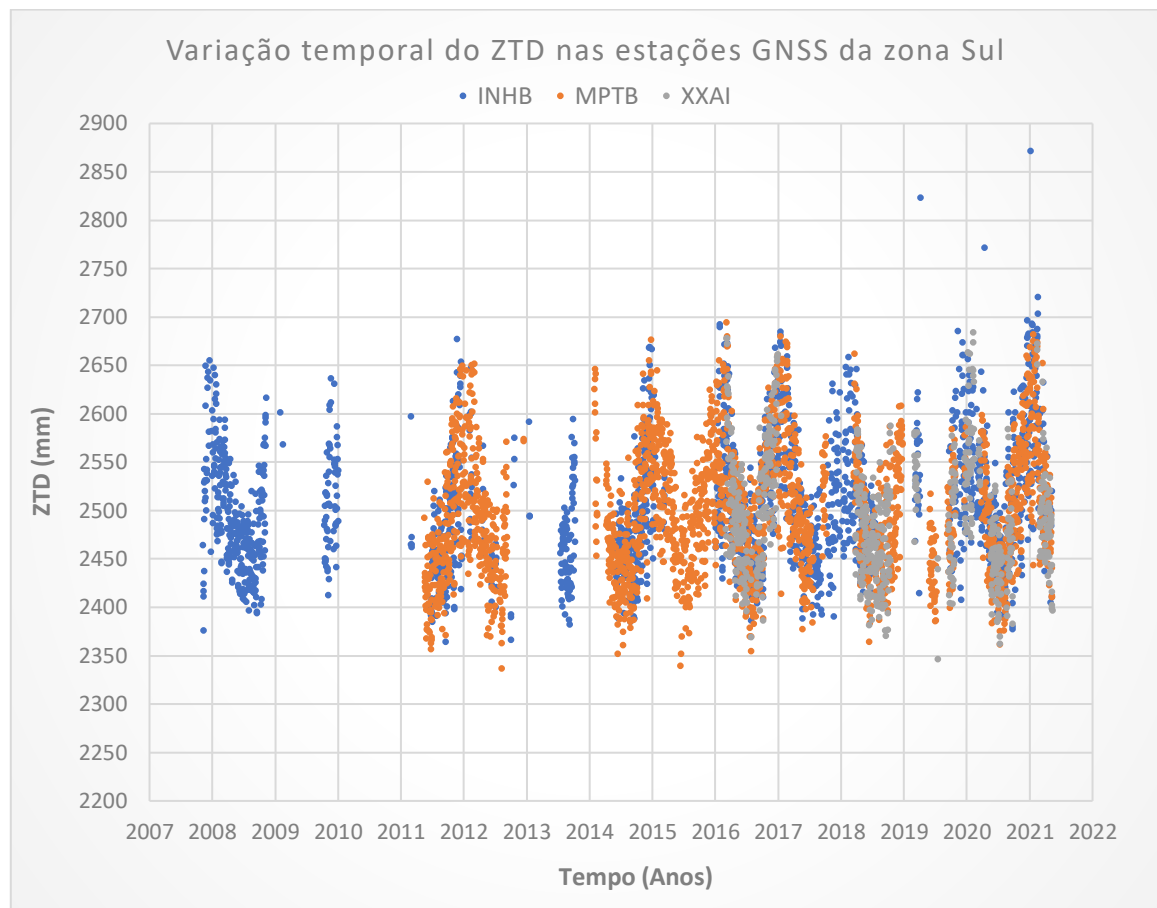


Figura 5. 3 – A variabilidade do ZTD nas estações GNSS na região Sul no período 2007 a 2011.

5.2.2. Variabilidade do ZTD nas Estações da região Centro

Nesta região foram usadas séries temporais de 2011 a 2021, o que totalizou aproximadamente 10 anos, vê Figura 5.4.

Os detalhes sobre o total de ficheiros disponíveis e percentagem de ficheiros processados para cada estação da região centro podem ser consultados na Tabela 5.2 onde se resume a totalidade das estações. Na região centro do país, a menor amplitude do atraso Zenital troposférico é verificada na estação de Chimoio, nesta estação o valor máximo de ZTD é de 2456, 4mm que se pode explicar pela altitude da estação (678,92 m).

As estações de Quelimane e Sofala foram as que registaram maior amplitudes do valor de atraso zenital troposférico nesta região, as amplitudes referidas foram registadas na época húmida que varia de Outubro a Abril, com valores de ZTD de 2721 mm e 27534 mm respectivamente, com ligeira ascendência para as amplitudes de ZTD registados na estação da Sofala. Na estação de Tete, a época sazonal pouco influencia na variabilidade de ZTD, regista-se amplitudes próximas de uma estação a outra (verão e inverno), pode se dizer, que se verifica poucas oscilações de valores de temperatura que influenciam na componente húmida (ZWD) do ZTD.

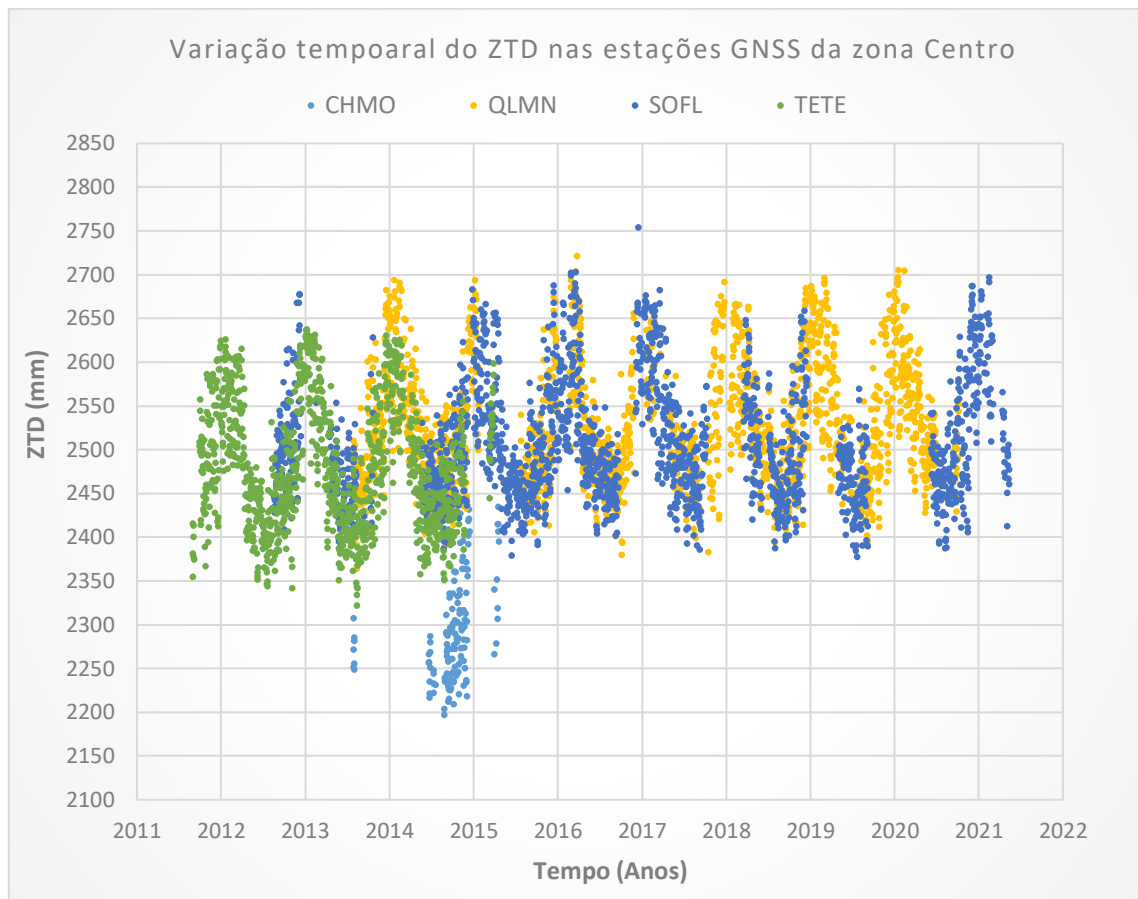


Figura 5. 4 – Representa a variabilidade do ZTD nas estações GNSS na região Centro no período 2011 a 2021.

5.2.3. Variabilidade do ZTD nas Estações da região Norte

Nesta região foram usadas séries temporais de 2006 a 2021, o que totalizou aproximadamente 14 anos figura 5.5. Os detalhes sobre o total de ficheiros disponíveis e percentagem de ficheiros processados para cada estação da região norte podem ser consultados na Tabela 5.2 onde se resume a totalidade das estações

É notória a grande variabilidade do ZTD nesta região do país, comparada com as duas restantes regiões. A estação de Lichinga apresenta menor amplitude de ZTD de toda a região, o valor de ZTD mais alto atingido nesta estação foi de 2233,9 mm, a menor amplitude de ZTD nesta estação

que é menor ao nível da região, pode ser explicado pela altitude da estação (1360,46 m), acima da estação existe menos atmosfera (gases) que resulta na diminuição do atraso do sinal GNSS.

A estação de Pemba apresenta amplitudes de ZTD mais elevadas de todas as estações localizadas nesta região, foi registado o valor de 2860 mm de ZTD, a estação de Pemba tem altitude de (-6m) e a correlação existente entre altitude e o sinal GNSS pode ser a causa desta estação possuir maior amplitude em relação as outras estações da região. Nas baixas altitudes há maior concentração do componente vapor de água e esta componente influência no atraso do sinal GNSS.

A estação de Nampula apresenta características de variabilidade similares da estação de TETE, isto é, pouca variabilidade do ZTD, nas duas épocas do ano (verão e inverno).

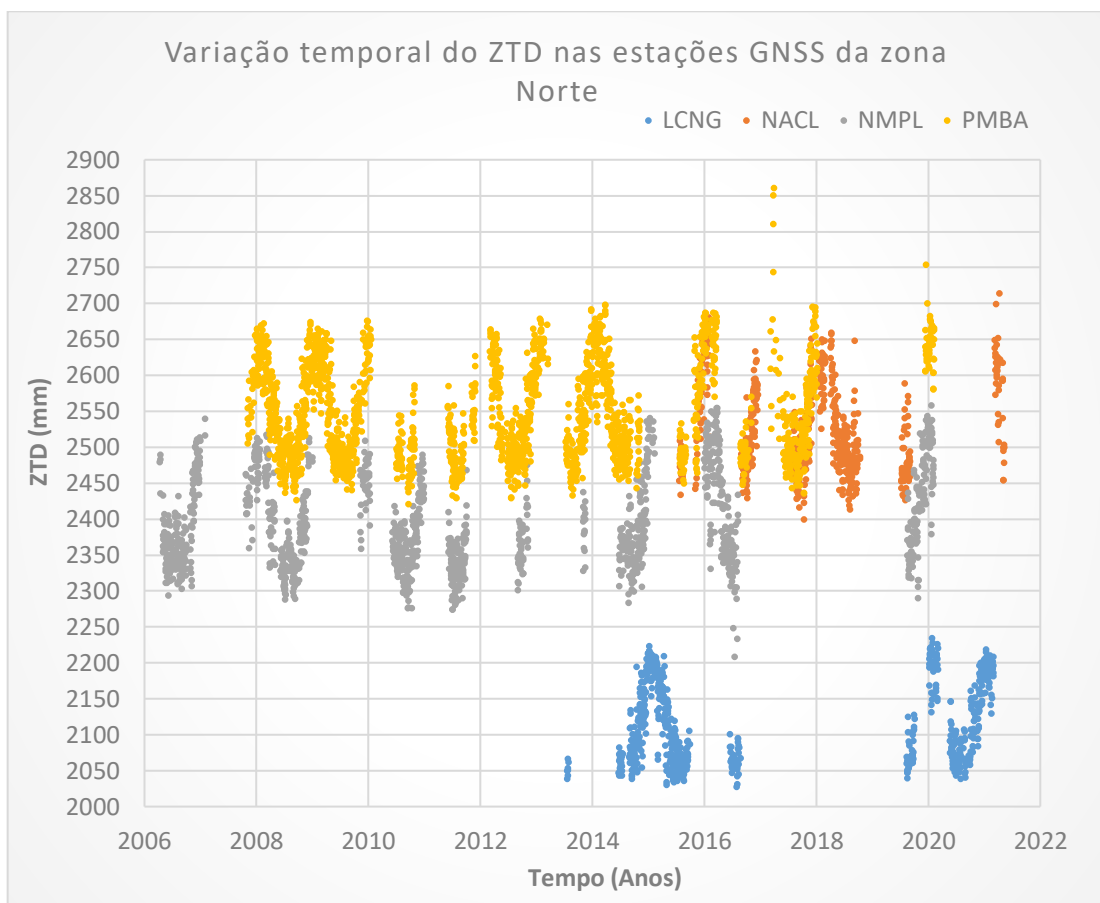


Figura 5. 5– Representa a variabilidade do ZTD nas estações GNSS na região Norte no período de 2006 a 2021.

Tabela 5. 3 – quadro resumo de valores (mínimo, máximo) e médias de ZTD por cada estação GNSS na área de estudo

Local	Região	ZTD mínimo (mm)	ZTD máximo (mm)	Média Temporal do ZTD (mm)
CHMO	Centro	2196,3	2456,4	2293,6
INHB	Sul	2160,1	2871,1	2502,7
LCNG	Norte	2027,5	2233,9	2117,3
MPTB	Sul	2336,5	2694,1	2498,0
NACL	Norte	2299,3	2713,9	2524,3
NMPL	Norte	2208,2	2558,3	2391,8
PMBA	Norte	2420,3	2860,3	2547,1
QLMN	Centro	2363,7	2720,9	2527,7
SOFL	Centro	2377,3	2753,6	2503,7
TETE	Centro	2321,3	2637	2479,6
XXAI	Sul	2346	2683,8	2491,7

A Figuras 5.6, constitui a representação em mapas dos resultados dos valores médios do ZTD em cada estação GNSS existente Moçambique. Os valores médios referidos correspondem à série temporal analisado em cada estação.

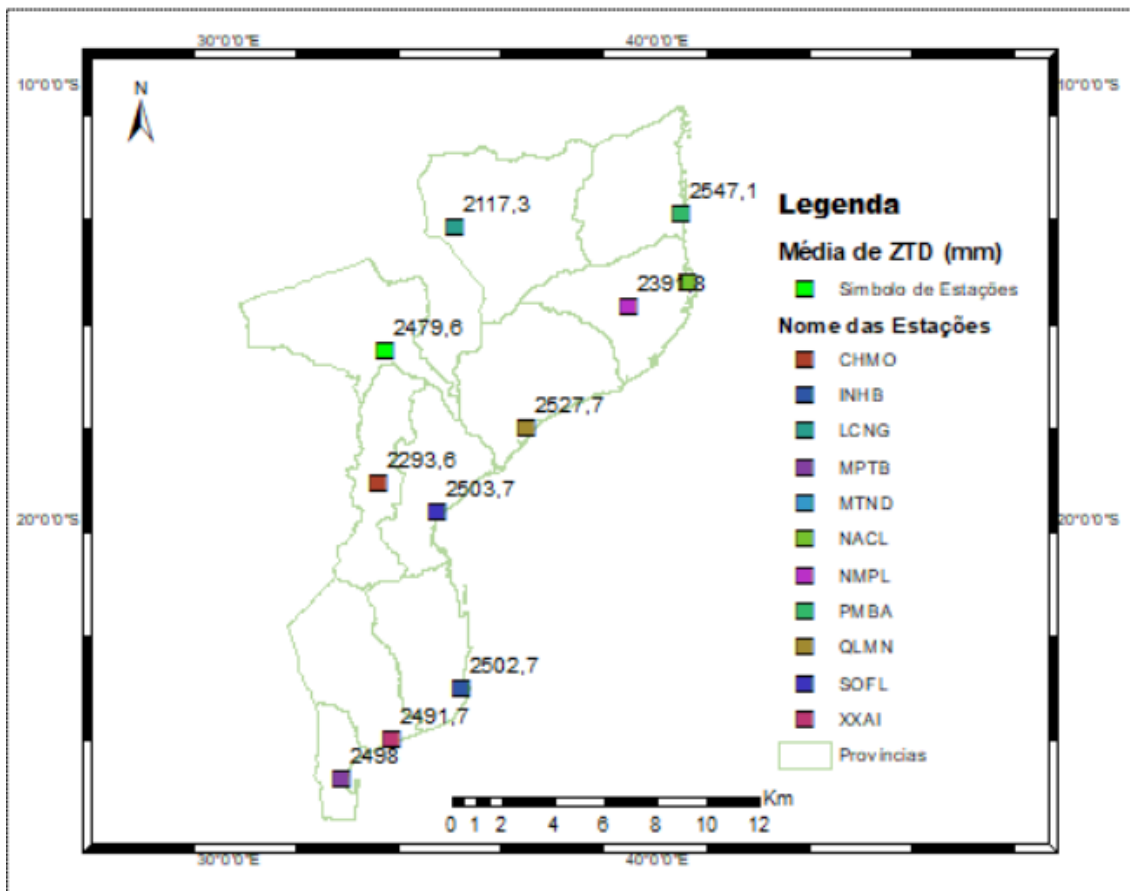


Figura 5. 6 – Representa a média do ZTD na série temporal analisada em cada estação.

Podemos verificar que, as estações na área de estudo com a altitudes próximas de uma estação da outra independentemente da sua localização possui valores de médias de ZTD também próximas como são o caso das estações de QLMN e NACL também SOFL e INHB, as estações com maiores altitudes como a estação de LCNG e CHMO apresentam médias de valores de ZTD menores da serie analisada. A diferença das médias de uma estação para outra é impulsionada pela localização e altitude de cada estação.

5.3. Desvio das médias em relação a média da série de cada região.

A Figura 5.7 abaixo faz-se análise do desvio da média de cada estação em relação a média da série de cada região, essa análise visa aferir o quanto a média de cada estação numa região se aproxima ou se afasta da média da região.

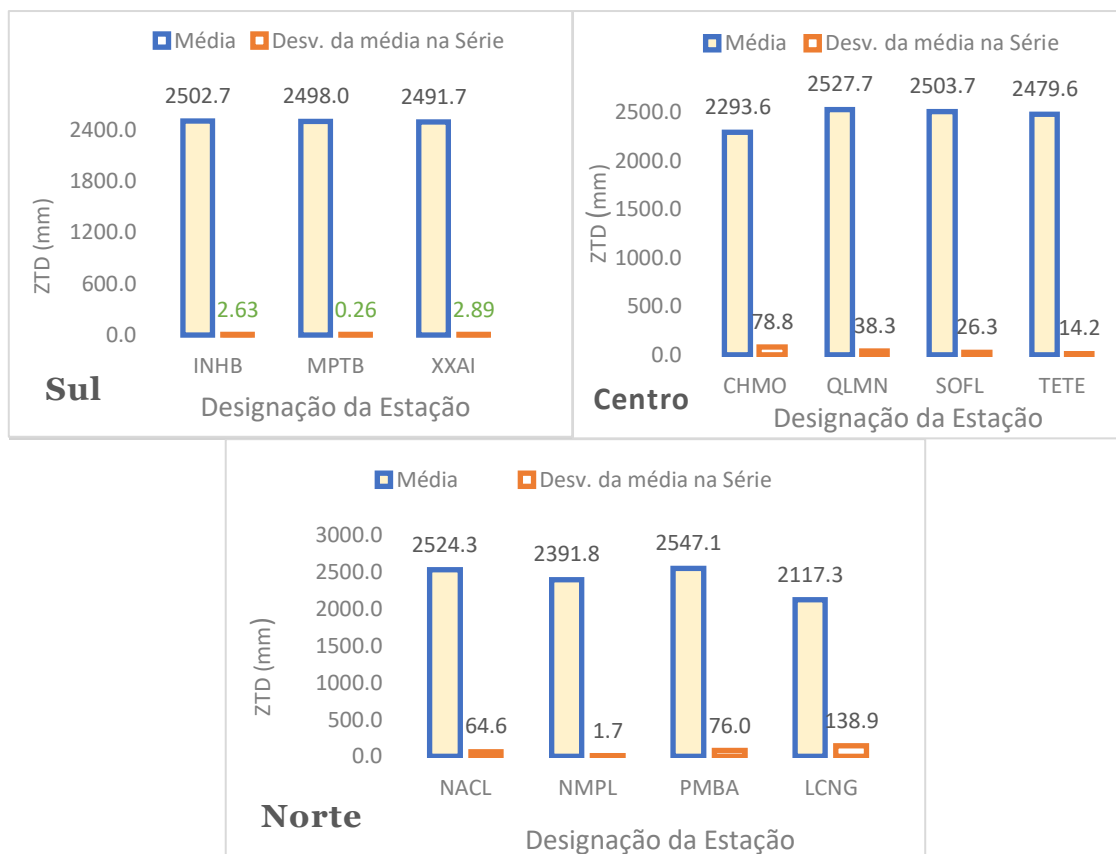


Figura 5. 7 – Desvio da média de cada estação em relação a média da série.

É notório o desvio das médias de cada estação em maior ou menor valores de ZTD, em relação a média da região em que cada estação GNSS se localiza na área geográfica de estudo. Nas três regiões, as estações da região Sul apresenta menor desvio das suas médias em relação a media da região do ZTD, isto significa que, o Atraso Zenital Troposféricos nesta região sofreu menores alterações ao longo do período analisado.

O maior desvio da média em relação as médias das séries são verificados nas estações da região Norte, a estação de Lichinga contribui com maior desvio, um dos factores pode ser sua altitude.

Considerações

Os resultados do ZTD aqui discutidos, mostram que o sistema GNSS pode ser usado na previsão meteorológica apesar de existirem falsos positivos e que análises mais refinadas podem ser necessários.

A análise de longas séries temporais de ZTD também são essenciais para aferir as alterações climáticas e para além de custo e benefício que os sistemas GNSS possuem comparados com as estações meteorológicas tradicionais.

Capítulo 6

Conclusões e Perspetivas de desenvolvimentos Futuros

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se tirar algumas conclusões e fazer algumas recomendações para trabalhos futuros.

6.1. Conclusões

- Verifica-se que nos dias da ausência de ocorrência de um evento meteorológico extremo (ciclone), o ZTD apresentou menores valores na sua variabilidade.
- Verifica-se que no dia da ocorrência do evento meteorológico extremo houve um aumento contínuo dos valores do ZTD de hora em hora durante todo o dia e foi registado o pico de 2703,7mm na primeira hora do dia 31.
- As estações GNSS ao nível de todo o país, apresentam valores de ZTD com variação significativa que está diretamente correlacionada com as estações do ano, que é a chuvosa (pico alto) que dura de Novembro a Abril e a estação seca que se estende de Maio a Setembro e nesta observa-se (valores mais baixos).
- Verifica-se que, em estações localizadas nas regiões com as altitudes predominantemente mais elevadas do país, como são o caso das estações GNSS de Chimoio (678,92 m) e a estação GNSS de Lichinga (1360,46 m) apresentam valores mais baixos de ZTD.
- O Atraso Zenital Troposférico nas estações GNSS que estão localizadas em províncias costeiras da região Sul e Centro, como são os casos das estações de Inhambane (INHB), Maputo (MPTB), Quelimane (QLMN), e Sofala (SOFL), apresentam valores de ZTD próximos de uma estação da outra. Há dois factores que podem estar a concorrer para esse efeito, a humidade relativa nas zonas costeiras e possuem valores de altitude muito baixas.
- Há menor variabilidade do Atraso Zenital Troposférico comparando o desvio das médias nas três regiões do país, as estações da região Sul apresentam menor variabilidade do ZTD na série temporal analisada, a maior variabilidade do

Atraso Zenital Troposférico verifica-se na região norte impulsionada pela maior variabilidade do factor altitude da região.

- A estação de TETE, localizada na província onde se registam as temperaturas mais elevadas do país, as características da variabilidade do ZTD na mesma assemelha-se com as características das estações localizadas nas províncias costeiras do país.

6.2. Perspetivas de trabalhos Futuros

No trabalho realizado, ficou evidente com análise dos dados de ZTD no dia da ocorrência do ciclone Chalane as potencialidades do sistema GNSS em ajudar avaliar eventos meteorológicos severos.

A implantação de estações GNSS+Pressão+Temperatura em Moçambique, por si só não faz o país migrar para o uso de dados GNSS na previsão meteorologia. Deve haver outros investimentos adicionais, nomeadamente a criação de um laboratório de ciências espaciais no país equipado com computadores, Software de processamento tal como o GipsyX e técnicos qualificado. Estas condições vão permitir aquisição e processamento de observações GNSS para aplicações técnicas e científicas, e a avaliação da utilização de dados dos modelos globais para a reanálise de dados de eventos meteorológicos que sejam de interesse da comunidade científica do país.

Referências Bibliográficas

- Adams, D. K., Fernandes, R. M. S., Kursinski, E. R., Maia, J. M., Sapucci, L. F., Machado, L. A. T., Vitorello, I., Monico, J. F. G., Holub, K. L., Gutman, S. I., Filizola, N., & Bennett, R. A. (2011). A dense GNSS meteorological network for observing deep convection in the Amazon. *Atmospheric Science Letters*, 12(2), 207–212. <https://doi.org/10.1002/asl.312>
- Alves, C. M. D., Monico, J. F. G., Romão, V. M. C., Pós-graduação, P. De, & Cartográficas, C. (2011). *Análise da Acurácia no PPP a partir da Solução de Ambiguidades GPS em Curtos Períodos de Ocupação Analysis of PPP Accuracy from GPS Ambiguity Resolution with Short Periods of Occupation*. 589–600.
- Benevides, P., Catalão, J., & Miranda, P. (2013). *ANALYSIS OF THE RELATION BETWEEN GPS TROPOSPHERIC DELAY AND INTENSE PRECIPITATION. May 2015*.
- Bern. (2016). Bernese GNSS Software Version 5.2. In *World* (Vol. 3, Issue February 2016). <https://doi.org/10.7892/boris.72297>
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research*, 97(D14), 787–801. <https://doi.org/10.1029/92jdo1517>
- Boehm, J., Heinkelmann, R., & Schuh, H. (2007). Short note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81(10), 679–683. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0135-3>
- Böhm, J., Boisits, J., & Landskron, D. (2020). VMF30: the Vienna Mapping Functions for optical frequencies. *Journal of Geodesy*, 94(6), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01385-5>
- Böhm, J., Möller, G., Schindelegger, M., Pain, G., & Weber, R. (2014). Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w). *GPS Solutions*, 19(3), 433–441. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0403-7>
- Cioce, V., Hoyer, M., & Wildermann, E. (2011). *TROPOSFÉRICO A TRAVÉS DE OBSERVACIONES GPS : PRIMEROS ENSAYOS EN VENEZUELA*.
- Da Cunha, C. M. V. (2010). *SISTEMAS DE MONITORIZAÇÃO DE DESLOCAMENTOS EM OBRAS DE ARTE*. Universidade de Porto.
- Dana, P. H. (1997). Global Positioning System (GPS) Time Dissemination for Real-Time Applications. *Real-Time Systems*, 12(1), 9–40. <https://doi.org/10.1023/A:1007906014916>
- Davis, J. L., Herrinch, T. A., Shapiro, I., Rogers, A., & Elgened, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length.

- RadioS Cienc*, 20(6), 1593–1607.
- De Haan, S. (2006). World Meteorological Organization Instruments And Observing Methods Report No . 92 National / Regional Operational Procedures of GPS Water Vapor Networks and Agreed International Procedures. *Processing*, 92.
- Galhardo, P. H. S. (2018). *Análise do posicionamento GNSS cinemático em ambiente urbano com uso da técnica RTK via Ntrip*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Guerova, G. (2003). *Application of GPS derived water vapour for Numerical Weather Prediction in Switzerland* [Bern].
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Application+of+GPS+derived+water+vapour+for+Numerical+Weather+Prediction+in+Switzerland+Guergana+Guerova#0>
- Herring, T. A., King, R. W., McClusky, S. C., & Sciences, P. (2009). Introduction to GAMIT / GLOBK. *Analysis*, 3 June 2009, 150.
- Hoguane, A. M. (2007). Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique - Diagnosis of Mozambique Costal Zone Antonio. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 7(1), 69–82.
<http://gaps.gge.unb.ca/>. (n.d.). Retrieved June 8, 2021, from home
<http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>. (2022).
<http://www.bernese.unibe.ch>. (n.d.). Retrieved June 12, 2021, from Bernese GNSS Software
<http://www.ga.gov.au/geodesy/sgc/wwwgps>. (n.d.). Retrieved June 10, 2021, from Geodetic Techniques
<http://www.gpsstk.org>. (n.d.). Retrieved June 12, 2021, from GitLab
<http://www.rtklib.com/>. (n.d.). Retrieved June 8, 2021, from An Open Source Program Package for GNSS Positioning
<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>. (n.d.). Retrieved June 8, 2021, from GipsyX
<https://meteostat.net/en/place/8XT2TJ?t=2020-12-28/2021-01-01>. (2022).
<https://pppx.gdgps.net/submitx>. (2022).
<https://teronet.rede-moznet.net/>. (n.d.). Retrieved May 15, 2021, from GNSS Data Management Platform
<https://www.ecmwf.int/>. (n.d.). Retrieved June 15, 2021, from ECMWF
<https://www.gps.gov/>. (n.d.). Retrieved June 13, 2021, from The Global Positioning System
<https://www.iag.usp.br/siae98/atmosfera/estrutura.htm>. (n.d.). Retrieved May 11, 2021, from A Meteorologia

- <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/geodetic-reference-systems/18766>. (n.d.). Retrieved June 12, 2021, from Government of Canada
- <https://www.unavco.org/software/data-processing/postprocessing/postprocessing.html>. (n.d.). Retrieved June 15, 2021, from GPS/GNSS Post-Processing Tools
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., & Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research Letters*, *40*(6), 1069–1073. <https://doi.org/10.1002/grl.50288>
- Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, *92*(4), 349–360. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>
- Longley, P. A., Goodchild, M. ., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2011). *Sistemas e Ciências da Informação Geográfica* (3rd ed.). Bookman.
- MICOA. (2005). *Avaliação da Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas e Estratégicas de Adaptação*. 5.
- MICOA. (2007). *MINISTÉRIO PARA COORDENAÇÃO DA ACÇÃO AMBIENTAL (MICOA) DIRECÇÃO NACIONAL DE GESTÃO AMBIENTAL. Programa de Acção Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas*. 85. <http://www.sia.cv/index.php/documentacao-mainmenu/category/2-planos-e-estrategias?download=98:programa-de-accao-nacional-de-adaptacao-as-mudancas-climaticas&start=20>
- Miranda, P. M. A., Alves, J. M. R., & Serra, N. (2013). Climate change and upwelling: Response of Iberian upwelling to atmospheric forcing in a regional climate scenario. *Climate Dynamics*, *40*(11–12), 2813–2824. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1442-9>
- Monico, J. F. G. (2008). Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações. In *UNESP- São Paulo*. Editora UNESP São Paulo.
- Muchangos, A. dos. (1999). *Paisagens e Regiões Naturais 1999* 5.
- Niell, A. E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, *101*(2), 3227–3246. <https://doi.org/10.1029/95jb03048>
- Nunes, P., Nobre, A., Teles, J., & Almeida, S. (2020). *CARTAS DE ROTEAMENTO COM BASE NO ERA-5*. 2020.
- Ortiz de Galisteo, J. P., Cachorro, V., Toledano, C., Torres, B., Laulainen, N., Bennouna, Y., & de Frutos, A. (2011). Diurnal cycle of precipitable water vapor over Spain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *137*(657), 948–958. <https://doi.org/10.1002/qj.811>
- Parkinson, B. ., Spilker Jr, J. ., Axearad, P., & Enge, P. (1996). *Global Positioning System: Theory*

and Applications (Vol. 53, Issue 9). ISBN 1-56347-106-X

- Rizos, C., Higgins, M., & Hewitson, S. (2005). New GNSS Developments and Their Impact on Survey Service Providers and Surveyors School of Surveying & Spatial Information Systems. *The National Biennial Conference of the Spatial Sciences Institute, September*.
- Sá, A., Bento, F., Fernandes, R., & Crocker, P. (2014). Tomografia para a determinação da distribuição espacial do Vapor de Água através de observações GNSS Tomographic determination of the spatial Distribution of Water Vapor using GNSS observations. In *Évora* (Issue 1).
- Sapucci, L. F. (2001). Estimativa do Vapor de Água Atmosférico e Avaliação da Modelagem do Atraso Zenital Troposférico utilizando GPS. In *Universidade Estadual Paulista*. Dissertação (Mestrado).
- Sapucci, L. F., Espinoza, E. S., Augusto, L., & Machado, T. (n.d.). *PREDIÇÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO NA AMÉRICA DO SUL PARA POSICIONAMENTO GNSS EM TEMPO REAL*. 0–13.
- Sapucci, L. F., Monico, J. F. G., & Da SILVA, A. F. (2003). Monitoramento do Vapor de Água Atmosférico com GPS : Primeiras Experiências no Brasil. In *IV fórum de Ciências de FCT* (Issues 15-18 Maio 2003).
- Seeber, G. (2003). Satellite geodesy. In *Australian Surveyor* (Vol. 22, Issue 7). <https://doi.org/10.1080/00050326.1969.10440171>
- Seth, I. G., & Stanley, G. B. (2001). The Role of Ground-Based GPS Meteorological Observations in Numerical Weather Prediction. *GPS Solutions*, 4(4), 16–24. <https://doi.org/10.1007/PL00012860>
- Setti Júnior, P. de T., Silva, C. M. da, Oliveira Júnior, P. S. de, Alves, D. B. M., & Monico, J. F. G. (2020). Posicionamento multi-GNSS. *Revista Brasileira de Cartografia*, 72(January), 1200–1224. <https://doi.org/10.14393/rbcv72nespecial50anos-56580>
- Spilker, J. J. J. (1994). *Tropospheric Effects on GPS* (1st ed.). Astronautics, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Tregoning, P., Boers, R., O'Brien, D., & Hendy, M. (1998). Accuracy of absolute Precipitable Water vapor estimates from GPS observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D22), 28701–28710. <https://doi.org/10.1029/98JD02516>
- Vallejo, R., Sanguino, J., & Rodrigues, A. (2014). Posicionamento com GNSS em cenários de multi-constelação. *Instituto de Lisboa*, 1–15.
- Van Baelen, J., Aubagnac, J. P., & Dabas, A. (2005). Comparison of near-real time estimates of integrated water vapor derived with GPS, radiosondes, and microwave radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(2), 201–210. <https://doi.org/10.1175/JTECH->

- Vedel, H., Huang, X. Y., Haase, J., Ge, M., & Calais, E. (2004). Impact of GPS Zenith Tropospheric Delay data on precipitation forecasts in Mediterranean France and Spain. *Geophysical Research Letters*, *31*(2), 10–13. <https://doi.org/10.1029/2003GL017715>
- [washingtonpost.com/world/2019/03/18/photos-cyclone-idai-lays-waste-parts-mozambique-zimbabwe-malawi/](https://www.washingtonpost.com/world/2019/03/18/photos-cyclone-idai-lays-waste-parts-mozambique-zimbabwe-malawi/). (n.d.). Retrieved June 10, 2021, from Cyclone Idai lays waste to parts of Mozambique, Zimbabwe, Malawi
- Wu, M., Jin, S., Li, Z., Cao, Y., Ping, F., & Tang, X. (2021). High-precision GNSS PWV and its variation characteristics in china based on individual station meteorological data. *Remote Sensing*, *13*(7). <https://doi.org/10.3390/rs13071296>
- Xu, G. (2007). *GPS: Theory, Algorithms and Applications* (2ed. Berlin). Publisher Springer.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *102*(B3), 5005–5017. <https://doi.org/10.1029/96jb03860>

ANEXOS

Variabilidade da Temperatura à passagem do ciclone Chalane

Detalhes

Tempo		Clima			Precipitação		Vento		Ar		
Encontro	H		Temp.	Sol.	.H	Neve		Média	Rajada	Pres.	Zumbir.
28-12-2020	00	N/A	27 °C	—	—	—	☀	5,4 km/h	—	1008 hPa	84 %
28-12-2020	01	N/A	26 °C	—	—	—	☀	5,4 km/h	—	1008 hPa	89 %
28-12-2020	02	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
28-12-2020	03	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
28-12-2020	04	N/A	26 °C	—	—	—	☀	5,4 km/h	—	1008 hPa	89 %
28-12-2020	05	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
28-12-2020	06	N/A	26 °C	—	—	—	☀	7,6 km/h	—	1009 hPa	94 %
28-12-2020	07	N/A	28 °C	—	—	—	☀	9,4 km/h	—	1010 hPa	84 %
28-12-2020	08	N/A	28,5 °C	—	—	—	☀	5,4 km/h	—	1010 hPa	82 %
28-12-2020	09	N/A	31 °C	—	—	—	N/A	5,4 km/h	—	1010 hPa	71 %
28-12-2020	10	N/A	32 °C	—	—	—	☀	11,2 km/h	—	1010 hPa	67 %
28-12-2020	11	N/A	31,6 °C	—	—	—	☀	13 km/h	—	1010 hPa	67 %
28-12-2020	12	N/A	25 °C	—	—	—	☀	9,4 km/h	—	1019 hPa	57 %
28-12-2020	13	N/A	32 °C	—	—	—	☀	20,5 km/h	—	1009 hPa	67 %
28-12-2020	14	N/A	32 °C	—	—	—	☀	20,5 km/h	—	1008,4 hPa	67 %
28-12-2020	15	N/A	32 °C	—	—	—	☀	24,1 km/h	—	1007 hPa	67 %
28-12-2020	16	N/A	31 °C	—	—	—	☀	22,3 km/h	—	1007 hPa	71 %
28-12-2020	17	N/A	30,7 °C	—	—	—	☀	20,5 km/h	—	1007,6 hPa	68 %
28-12-2020	18	N/A	29 °C	—	—	—	☀	18,4 km/h	—	1008 hPa	75 %
28-12-2020	19	N/A	29 °C	—	—	—	☀	18,4 km/h	—	1008 hPa	79 %
28-12-2020	20	N/A	28,7 °C	—	—	—	☀	16,6 km/h	—	1008,9 hPa	80 %
28-12-2020	21	N/A	29 °C	—	—	—	☀	16,6 km/h	—	1009 hPa	79 %
28-12-2020	22	N/A	29 °C	—	—	—	☀	22,3 km/h	—	1010 hPa	79 %
28-12-2020	23	N/A	28,7 °C	—	—	—	☀	22,3 km/h	—	1009,9 hPa	75 %
29-12-2020	00	N/A	29 °C	—	—	—	☀	20,5 km/h	—	1009 hPa	75 %

29-12-2020	01	N/A	29 °C	—	—	—	⊙	14,8 km/h	—	1008 hPa	75 %
29-12-2020	02	N/A	28,5 °C	—	—	—	⊙	16,6 km/h	—	1008,6 hPa	76 %
29-12-2020	03	N/A	28 °C	—	—	—	⊙	11,2 km/h	—	1008 hPa	79 %
29-12-2020	04	N/A	28 °C	—	—	—	⊙	13 km/h	—	1008 hPa	79 %
29-12-2020	05	N/A	27,8 °C	—	—	—	⊙	9,4 km/h	—	1008,8 hPa	78 %
29-12-2020	06	N/A	29 °C	—	—	—	⊙	7,6 km/h	—	1009 hPa	75 %
29-12-2020	07	N/A	28 °C	—	—	—	☉	13 km/h	—	1009 hPa	79 %
29-12-2020	08	N/A	28,2 °C	—	—	—	☉	18,4 km/h	—	1009,6 hPa	82 %
29-12-2020	09	N/A	30 °C	—	—	—	☉	13 km/h	—	1009 hPa	75 %
29-12-2020	10	N/A	30 °C	—	—	—	☉	16,6 km/h	—	1009 hPa	75 %
29-12-2020	11	N/A	33,2 °C	—	—	—	☉	5,4 km/h	—	1008 hPa	51 %
29-12-2020	12	N/A	32 °C	—	—	—	⊙	20,5 km/h	—	1008 hPa	67 %
29-12-2020	13	N/A	31 °C	—	—	—	⊙	22,3 km/h	—	1008 hPa	66 %
29-12-2020	14	N/A	32 °C	—	—	—	⊙	18,4 km/h	—	1007 hPa	63 %

29-12-2020	15	N/A	31 °C	—	—	—	⊙	18,4 km/h	—	1006 hPa	66 %
29-12-2020	16	N/A	31 °C	—	—	—	⊙	18,4 km/h	—	1006 hPa	66 %
29-12-2020	17	N/A	31 °C	—	—	—	⊙	24,1 km/h	—	1005 hPa	71 %
29-12-2020	18	N/A	30 °C	—	—	—	⊙	20,5 km/h	—	1005 hPa	75 %
29-12-2020	19	N/A	30 °C	—	—	—	⊙	22,3 km/h	—	1005 hPa	75 %
29-12-2020	20	N/A	29,4 °C	—	—	—	⊙	20,5 km/h	—	1005,1 hPa	78 %
29-12-2020	21	N/A	29 °C	—	—	—	⊙	25,9 km/h	—	1006 hPa	84 %
29-12-2020	22	N/A	30 °C	—	—	—	⊙	33,5 km/h	—	1006 hPa	75 %
29-12-2020	23	☁	29,1 °C	—	—	—	⊙	33,5 km/h	—	1005,7 hPa	79 %
30-12-2020	00	☁	26 °C	—	—	—	⊙	35,3 km/h	—	1004 hPa	94 %
30-12-2020	01	☁	28 °C	—	—	—	⊙	37,1 km/h	—	1003 hPa	89 %
30-12-2020	02	N/A	27,7 °C	—	—	—	⊙	44,3 km/h	—	1001,6 hPa	86 %
30-12-2020	03	☁	28 °C	—	—	—	⊙	55,4 km/h	—	999 hPa	84 %
30-12-2020	04	N/A	27 °C	—	—	—	⊙	59,4 km/h	—	998 hPa	89 %

30-12-2020	05	☁	26 °C	—	—	—	☉	70,2 km/h	—	998 hPa	94 %
30-12-2020	06	☁	26 °C	—	—	—	☉	66,6 km/h	—	999 hPa	94 %
30-12-2020	07	N/A	26 °C	—	—	—	☉	66,6 km/h	—	1000 hPa	89 %
30-12-2020	08	☁	26,6 °C	—	—	—	☉	70,2 km/h	—	1002,3 hPa	83 %
30-12-2020	09	N/A	27 °C	—	—	—	☉	59,4 km/h	—	1003 hPa	79 %
30-12-2020	10	N/A	28 °C	—	—	—	☉	48,2 km/h	—	1005 hPa	74 %
30-12-2020	11	N/A	29,5 °C	—	—	—	☉	38,9 km/h	—	1006,1 hPa	68 %
30-12-2020	12	N/A	31 °C	—	—	—	☉	29,5 km/h	—	1006 hPa	63 %
30-12-2020	13	N/A	30 °C	—	—	—	☉	29,5 km/h	—	1006 hPa	70 %
30-12-2020	14	N/A	30,7 °C	—	—	—	☉	29,5 km/h	—	1006 hPa	67 %
30-12-2020	15	☁	21 °C	—	—	—	☉	5,4 km/h	—	1017 hPa	83 %
30-12-2020	16	N/A	31 °C	—	—	—	☉	35,3 km/h	—	1005 hPa	71 %
30-12-2020	17	N/A	29,5 °C	—	—	—	☉	31,3 km/h	—	1005,4 hPa	78 %
30-12-2020	18	N/A	29 °C	—	—	—	☉	25,9 km/h	—	1006 hPa	79 %
30-12-2020	19	N/A	29 °C	—	—	—	☉	25,9 km/h	—	1007 hPa	84 %
30-12-2020	20	N/A	28,6 °C	—	—	—	☉	31,7 km/h	—	1007,4 hPa	83 %
30-12-2020	21	N/A	29 °C	—	—	—	☉	27,7 km/h	—	1007 hPa	84 %
30-12-2020	22	N/A	29 °C	—	—	—	☉	27,7 km/h	—	1007 hPa	84 %
30-12-2020	23	N/A	28,2 °C	—	—	—	☉	18,4 km/h	—	1008,3 hPa	89 %
31-12-2020	00	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
31-12-2020	01	N/A	27 °C	—	—	—	☉	5,4 km/h	—	1008 hPa	94 %
31-12-2020	02	N/A	27,3 °C	—	—	—	☉	3,6 km/h	—	1008,6 hPa	92 %
31-12-2020	03	N/A	28 °C	—	—	—	☉	7,6 km/h	—	1008 hPa	89 %
31-12-2020	04	N/A	28 °C	—	—	—	☉	9,4 km/h	—	1008 hPa	94 %
31-12-2020	05	N/A	28 °C	—	—	—	☉	13 km/h	—	1009,3 hPa	90 %
31-12-2020	06	☁	27 °C	—	—	—	☉	20,5 km/h	—	1010 hPa	89 %
31-12-2020	07	N/A	29 °C	—	—	—	☉	18,4 km/h	—	1010 hPa	89 %
31-12-2020	08	N/A	26,2 °C	—	—	—	☉	16,6 km/h	—	1010,5 hPa	88 %

31-12-2020	09	N/A	28 °C	—	—	—	⊖	7,6 km/h	—	1011 hPa	79 %
31-12-2020	10	N/A	28 °C	—	—	—	⊖	5,4 km/h	—	1010 hPa	94 %
31-12-2020	11	N/A	30 °C	—	—	—	⊖	14,8 km/h	—	1009,7 hPa	79 %
31-12-2020	12	N/A	27 °C	—	—	—	⊖	31,7 km/h	—	1009 hPa	89 %
31-12-2020	13	N/A	26 °C	—	—	—	⊖	16,6 km/h	—	1009 hPa	94 %
31-12-2020	14	N/A	28,5 °C	—	—	—	⊖	20,5 km/h	—	1008,5 hPa	81 %
31-12-2020	15	N/A	29 °C	—	—	—	⊖	20,5 km/h	—	1007 hPa	84 %
31-12-2020	16	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
31-12-2020	17	N/A	30 °C	—	—	—	⊖	20,5 km/h	—	1007 hPa	79 %
31-12-2020	18	N/A	29 °C	—	—	—	⊖	24,1 km/h	—	1008 hPa	89 %
31-12-2020	19	N/A	28 °C	—	—	—	⊖	16,6 km/h	—	1008 hPa	89 %
31-12-2020	20	N/A	28,2 °C	—	—	—	⊖	13 km/h	—	1009,3 hPa	89 %
31-12-2020	21	N/A	28 °C	—	—	—	⊖	14,8 km/h	—	1010 hPa	89 %
31-12-2020	22	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
31-12-2020	23	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
01-01-2021	00	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
01-01-2021	01	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
01-01-2021	02	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
01-01-2021	03	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
01-01-2021	04	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
01-01-2021	05	N/A	27 °C	—	—	—	⊖	7,6 km/h	—	1009 hPa	94 %
01-01-2021	06	N/A	27 °C	—	—	—	⊖	5,4 km/h	—	1009 hPa	94 %
01-01-2021	07	N/A	27 °C	—	—	—	⊖	5,4 km/h	—	1010 hPa	94 %
01-01-2021	08	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
01-01-2021	09	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
01-01-2021	10	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
01-01-2021	11	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—
01-01-2021	12	N/A	—	—	—	—	N/A	—	—	—	—