

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ARIADNY APOLONIO

LUANA LOCATELLI

**ESTUDO E MODELAGEM DA VARIABILIDADE METEOROLÓGICA NO ESTADO
DO PARANÁ EMPREGANDO DADOS GPS.**

CURITIBA

2021

ARIADNY APOLONIO
LUANA LOCATELLI

**ESTUDO E MODELAGEM DA VARIABILIDADE METEOROLÓGICA NO ESTADO
DO PARANÁ EMPREGANDO DADOS GPS.**

Projeto final apresentado como requisito à
obtenção de grau em Engenharia
Cartográfica e de Agrimensura, Setor de
Ciências da Terra, Universidade Federal
do Paraná.

Orientador: Prof. MSc.Christian Gonzalo
Pilapanta Amagua

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a Claudia Pereira
Krueger

CURITIBA

2021

“Pelo carinho, afeto, companheirismo, paciência e cuidado que nossos companheiros nos deram durante toda esta trajetória, dedicamos este projeto a eles. Com muito amor e gratidão.”

AGRADECIMENTOS

Por trás deste trabalho de conclusão de curso está o apoio de muita gente e sem o qual nada disto teria sido possível.

Em primeiro lugar, a Deus, que fez com que nossos objetivos fossem alcançados, durante todos os anos de estudos.

Em segundo agradecemos ao nosso querido orientador, professor e amigo MSc Christian Gonzalo Pilapanta Amagua, que desde o início nos incentivou e principalmente nos auxiliou, nos ouviu e tornou esse projeto viável. A nossa co-orientadora, professora Dr^a Cláudia Pereira Krueger, que ao longo da nossa trajetória acadêmica sempre esteve aberta a nos ouvir e aconselhar com sua forma sincera e direta. Professores, vocês são fonte de inspirações.

Somos muito gratas aos nossos pais, por nos apoiarem sempre durante toda a nossa vida, por apesar das dificuldades sempre nos fortaleceram e nos ensinarem a serem mulheres fortes, honestas e batalhadoras. Agradecemos aos nossos irmãos, pela amizade e atenção dedicadas quando precisamos. E aos nossos sobrinhos Arthur e Antony que nos trouxeram muitas alegrias e um amor sem tamanho.

Agradecemos aos nossos companheiros, Marcos e Rafael, que sempre nos apoiaram e incentivaram a lutar pelos nossos sonhos e objetivos. Agradecemos a companhia, a paciência, o amor e a ajuda ao longo desta jornada seja com um ouvido para escutar, um puxão de orelha pra se empenhar. Vocês são homens extraordinários.

Ao pessoal do Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH) com quem tivemos contato, e que de alguma forma nos ajudaram a desenvolver pesquisas, ou simplesmente as horas de conversa, os cafés e os bolinhos para nos distrair e aliviar a pressão durante o período de provas da faculdade.

Aos amigos, que sempre estiveram ao nosso lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que se dedicamos à este trabalho.

À instituição de ensino Universidade Federal do Paraná, essencial no nosso processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendemos ao longo dos anos do curso.

“Se eu matar alguém, ela é a pessoa que eu ligo para me ajudar a arrastar o corpo pela sala. Ela é a minha pessoa” (Grey's Anatomy).

RESUMO

O vapor d'água atmosférico (PWV, abreviação em inglês de *Precipitable Water Vapor*) é uma variável com alta dinâmica no espaço e tempo, e por isso monitorá-lo continuamente é uma tarefa difícil e de alto custo. As aplicações das técnicas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) são estudadas por diversas instituições científicas e empresariais, que adaptam o uso do rastreamento por satélite para seus devidos fins. Desde 1992, uma das aplicações dos levantamentos GNSS é o estudo da atmosfera neutra, que nada mais é que o estudo dos gases que compõem a camada troposférica, em especial o vapor d'água. O presente trabalho visa apresentar um estudo e modelagem da variabilidade climática no estado do Paraná empregando dados GPS. Este estudo tem o intuito de explorar dados de cinco estações GPS no período de 2017 a 2021 a fim de compará-las com dados meteorológicos de precipitação para fazer uma análise da estiagem no estado do Paraná. As estimativas do PWV foram obtidas com processamento dos dados GPS. Análises de correlação de dados e métodos de estatística como a média, máximo, mínimo e correlação de Pearson foram aplicados a fim de investigar a dependência espacial do PWV na região e a viabilidade de empregar tais dados em estudos climáticos e meteorológicos. Foram avaliados os resultados obtidos entre as séries de vapor d'água geradas por todas as estações GPS pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e as séries de precipitação geradas a partir de dados das estações do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Essa análise foi feita de forma gráfica e numérica. Ao fim, verificou-se que o PWV-GPS das estações utilizadas possuem correspondência com dados meteorológicos de precipitação, indicando a ocorrência da estiagem nos últimos anos. Portanto, a metodologia foi adequada para os objetivos propostos apesar de sua correlação entre estas duas variáveis serem consideradas fracas.

Palavras-chave: GPS; PPP; Modelagem troposférica; PWV; climatologia

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 – COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS GPS | 21 |
| FIGURA 2 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO GNSS | 22 |
| FIGURA 3 – PRECISÃO DEPENDENTE DA LINHA DE BASE PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE POSICIONAMENTO | 25 |
| FIGURA 4 – CAMADAS DA ATMOSFERA TERRESTRE. | 28 |
| FIGURA 5 – ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO | 29 |
| FIGURA 6 – LINHA DO TEMPO DAS FUNÇÕES DE MAPEAMENTO, EM DESTAQUE AS FUNÇÕES QUE USAM PNT | 32 |
| FIGURA 7 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES | 42 |
| FIGURA 8 – DISTÂNCIA ENTRE ESTAÇÕES GPS E METEOROLÓGICAS | 42 |
| FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DO ESQUEMA GERAL DO TRABALHO | 45 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| GRÁFICO 01 – PRECIPITAÇÃO MÉDIA DIÁRIA UFPR. | 49 |
| GRÁFICO 02 – VAPOR D' ÁGUA DIÁRIA UFPR. | 50 |
| GRÁFICO 03 – PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL UFPR | 51 |
| GRÁFICO 04 – VAPOR D' ÁGUA MENSAL UFPR. | 52 |
| GRÁFICO 05 – PRECIPITAÇÃO MÉDIA TRIMESTRAL UFPR | 53 |
| GRÁFICO 06 – VAPOR D' ÁGUA TRIMESTRAL UFPR | 54 |
| GRÁFICO 07 – PRECIPITAÇÃO MÉDIA SEMESTRAL UFPR | 55 |
| GRÁFICO 08 – VAPOR D' ÁGUA SEMESTRAL UFPR | 55 |
| GRÁFICO 09 – PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL UFPR | 56 |
| GRÁFICO 10 – VAPOR D' ÁGUA ANUAL UFPR | 56 |
| GRÁFICO 11 – DADOS ESTATÍSTICO UFPR - PRECIPITAÇÃO | 58 |
| GRÁFICO 12 – DADOS ESTATÍSTICO UFPR - VAPOR D'ÁGUA | 58 |
| GRÁFICO 13 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA | 59 |
| GRÁFICO 14 – PRECIPITAÇÃO MENSAL PRMA | 60 |
| GRÁFICO 15 – VAPOR D' ÁGUA MENSAL PRMA | 61 |
| GRÁFICO 16 – DADOS ESTATÍSTICO PRMA - PRECIPITAÇÃO | 62 |
| GRÁFICO 17 – DADOS ESTATÍSTICO PRMA - VAPOR D'ÁGUA | 62 |
| GRÁFICO 18 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA | 63 |
| GRÁFICO 19 – PRECIPITAÇÃO MENSAL PRGU | 65 |
| GRÁFICO 20 – VAPOR D' ÁGUA MENSAL PRGU | 65 |
| GRÁFICO 21 – DADOS ESTATÍSTICO PRGU- PRECIPITAÇÃO | 67 |
| GRÁFICO 22 – DADOS ESTATÍSTICO PRGU- VAPOR D'ÁGUA | 67 |
| GRÁFICO 23 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA | 68 |
| GRÁFICO 24 – PRECIPITAÇÃO MENSAL ITAI | 69 |
| GRÁFICO 25 – VAPOR D' ÁGUA MENSAL ITAI. | 70 |
| GRÁFICO 26 – DADOS ESTATÍSTICO ITAI- PRECIPITAÇÃO | 71 |
| GRÁFICO 27 – DADOS ESTATÍSTICO ITAI- VAPOR D'ÁGUA | 71 |
| GRÁFICO 28 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA | 72 |
| GRÁFICO 29 – PRECIPITAÇÃO MENSAL PRCV | 74 |
| GRÁFICO 30 – VAPOR D' ÁGUA MENSAL PRCV | 74 |

| | |
|---|----|
| GRÁFICO 31 – DADOS ESTATÍSTICO PRCV- PRECIPITAÇÃO | 76 |
| GRÁFICO 32 – DADOS ESTATÍSTICO PRCV- VAPOR D'ÁGUA | 76 |
| GRÁFICO 33 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA | 77 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 01 – FREQUÊNCIA, COMPRIMENTO DE ONDA E PRECISÃO E PRECISÃO DOS CÓDIGOS | 23 |
| TABELA 02 – FREQUÊNCIA, COMPRIMENTO DE ONDA E PRECISÃO E PRECISÃO DAS ONDAS PORTADORAS | 24 |
| TABELA 03 – PRINCIPAIS ERROS NO POSICIONAMENTO GNSS | 27 |
| TABELA 04 – CONSTANTES EMPREGADAS NAS MODELAGENS PWV | 37 |
| TABELA 05 – INTERPRETAÇÃO DE CORRELAÇÃO DE PEARSON | 41 |
| TABELA 06 – RAIOS ENTRE AS ESTAÇÕES DE ESTUDO | 44 |
| TABELA 07 – DADOS ESTATÍSTICOS UFPR - PRECIPITAÇÃO | 57 |
| TABELA 08 – DADOS ESTATÍSTICOS UFPR - VAPOR D'ÁGUA | 57 |
| TABELA 09 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA | 59 |
| TABELA 10 – DADOS ESTATÍSTICOS PRMA - PRECIPITAÇÃO | 61 |
| TABELA 11 – DADOS ESTATÍSTICOS PRMA - VAPOR D'ÁGUA | 63 |
| TABELA 12 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA | 66 |
| TABELA 13 – DADOS ESTATÍSTICOS PRGU - PRECIPITAÇÃO | 66 |
| TABELA 14 – DADOS ESTATÍSTICOS PRGU - VAPOR D'ÁGUA | 66 |
| TABELA 15 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA | 68 |
| TABELA 16 – DADOS ESTATÍSTICOS ITAI - PRECIPITAÇÃO | 70 |
| TABELA 17 – DADOS ESTATÍSTICOS ITAI - VAPOR D'ÁGUA | 70 |
| TABELA 18 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA | 72 |
| TABELA 19 – DADOS ESTATÍSTICOS PRCV - PRECIPITAÇÃO | 75 |
| TABELA 20 – DADOS ESTATÍSTICOS PRCV - VAPOR D'ÁGUA | 75 |
| TABELA 21 – CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA | 77 |

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

| | |
|---------|--|
| ARNSS | – <i>Aeronautical RadioNavigation Services</i> |
| AS | – <i>Selective Availability</i> |
| GNSS | – <i>Global Navigation Satellite System</i> |
| GPS | – <i>Global Positioning System</i> |
| GLONASS | – <i>Global Navigation Satellite System</i> |
| INMET | – Instituto Nacional de Meteorologia |
| IWV | – <i>Integrated Water Vapor</i> |
| L1 | – Onda portadora L1 |
| L2 | – Onda portadora L2 |
| L3 | – Onda portadora L3 |
| PPP | – Posicionamento por Ponto Preciso |
| PPS | – <i>Precise Positioning Service</i> |
| RBMC | – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo |
| RTK | – Posicionamento em tempo real |
| SPS | – <i>Standard Positioning Service</i> |
| TEC | – Conteúdo Total de Elétrons |
| ZHD | – <i>Zenit Hydrostatic Delay</i> |
| ZTD | – <i>Zenith Total Delay</i> |
| ZWD | – <i>Zenit Wet Delay</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

- PD_{CD} – pseudodistância;
- R – distância geométrica formada entre a antena do receptor e a antena do satélite na época de observação t ;
- t – época de observação;
- dtu – erro de sincronismo entre o relógio do receptor e o tempo GPS;
- dta – atraso na propagação do sinal (troposfera e ionosfera) entre a antena do receptor - antena do satélite na atmosfera;
- dt_s – erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS;
- $dtorb$ – erro de órbita do satélite;
- ε – demais erros (ruído do receptor, efeito de multicaminho, variação do centro de fase da antena, etc).
- F_{CR} – frequência da onda portadora;
- N – ambiguidade (corresponde ao número de ciclos inteiros, formado entre o instante de transmissão e da primeira recepção do sinal no receptor).
- λ_i – comprimento de onda do sinal de frequência i , em metros, e
- $\lambda_i = c/f_i$
- N_i – ambiguidade da fase da onda portadora na frequência i (em número de ciclos),
- M_i – é o multicaminho presente nas observáveis de fase, em metros, na frequência i ,
- W – contribuição do chamado efeito phase *wind-up* (em número de ciclos),
- $b_{r,Li}$ – caracteriza a tendência instrumental do receptor nas medidas de fase, em metros, na frequência i ,
- b_{Li}^s – tendência instrumental do satélite nas medidas de fase, em metros, na frequência i , e
- ε_{Li} – representa o erro na medida de fase, em metros.
- N – é o índice de refração do ar;

ds – é a representação de parte infinitesimal da trajetória percorrida pelo sinal;

m_h e m_w – são as funções de mapeamento que relacionam o atraso das componentes hidrostática e úmida;

E – ângulo de elevação do satélite.

D_{ZH} – atraso zenital hidrostático;

P_0 – pressão atmosférica (em hPa) na altitude h_0 (em quilômetros), vinculada a posição da antena; e

φ – latitude do local de rastreamento, podendo ser a mesma obtida pelo equipamento GNSS.

Z_w^{-1} – inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água (hPa^{-1});

k'_3 – constante da refratividade do ar, em $^{\circ}K \cdot hPa^{-1}$;

e' – pressão parcial do vapor d'água, em hPa ;

T – temperatura superficial do local, em $^{\circ}K$;

h – a altitude do local analisado, em metros.

ρ_w – a umidade absoluta em porcentagem;

e – altura da camada troposférica da componente úmida, em metros;

Ψ – relação existente entre o atraso úmido e IWV

R_w – equação específica do vapor d'água em $J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}K^{-1}$

k'_2 e k^3 – constantes de refratividade do ar em $^{\circ}K \cdot hPa^{-1}$

T_m – temperatura média da coluna vertical troposférica em $^{\circ}K$

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1.INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 18 |
| 1.2 OBJETIVOS | 19 |
| 1.2.1 OBJETIVO GERAL | 19 |
| 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 19 |
| 2.REVISÃO DE LITERATURA | 20 |
| 2.1 SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE | 20 |
| 2.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO | 22 |
| 2.1.2 OBSERVÁVEIS BÁSICAS DO GNSS | 23 |
| 2.1.3 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO | 26 |
| 2.1.4 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO | 27 |
| 2.1.5 FONTES DE ERROS | 28 |
| 2.1.6 MODELOS TROPOSFÉRICOS E O ATRASO ZENITAL | 29 |
| 2.2 ATMOSFERA NEUTRA | 31 |
| 2.3 RELEVÂNCIA DO VAPOR D'ÁGUA | 38 |
| 2.4 VARIABILIDADE CLIMÁTICA | 39 |
| 2.5 PRECIPITAÇÃO | 39 |
| 2.6 ESTIAGEM E SECA | 40 |
| 2.7 CORRELAÇÃO DE PEARSON | 41 |
| 3.MATERIAIS E MÉTODOS | 43 |
| 3.1 ÁREA DE ESTUDO | 43 |
| 3.2 INMET | 45 |
| 3.3 RBMC | 45 |
| 3.4 METODOLOGIA | 45 |
| 3.5 SOFTWARE | 48 |
| 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS | 49 |
| 4.1 ESTAÇÃO UFPR | 49 |
| 4.1.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA UFPR | 58 |
| 4.1.2 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA - UFPR | 60 |
| 4.2 ESTAÇÃO PRMA | 60 |
| 4.2.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA PRMA | 62 |
| 4.2.2 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA - PRMA | 64 |
| 4.3 ESTAÇÃO PRGU | 65 |
| 4.3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA PRGU | 67 |
| 4.3.2 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA - PRGU | 69 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4 ESTAÇÃO ITAI | 70 |
| 4.4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA ITAI | 72 |
| 4.4.2 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA - ITAI | 74 |
| 4.5 ESTAÇÃO PRCV | 75 |
| 4.5.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA PRCV | 77 |
| 4.5.2 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA - PRCV | 79 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 81 |
| 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 81 |
| REFERÊNCIAS | 82 |
| ANEXO | 91 |

1 INTRODUÇÃO

O princípio fundamental da navegação por satélite consiste na medida das pseudodistâncias formadas entre um receptor e no mínimo quatro satélites observados no mesmo instante de tempo (SEEBER, 2003). Conhecendo-se as coordenadas dos satélites em um sistema de referência geocêntrico, as coordenadas do receptor podem ser determinadas. São necessárias quatro medidas, devido ao não sincronismo do relógio dos satélites e do receptor. Atualmente, entre as diferentes técnicas existentes na geodésia espacial, a que se pode destacar no sentido das inúmeras aplicações é o posicionamento por satélites, sendo o GPS (*Global Positioning System*) um exemplo disto.

Com o passar dos anos, diferentes métodos de posicionamento GPS foram desenvolvidos. Entre os métodos, o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) tem sido amplamente investigado pela comunidade científica, devido a disponibilização de softwares gratuitos e serviços online que possibilitam esse tipo de processamento, além de ser um método simples e possibilitar a obtenção de precisão centimétrica desde que sejam atendidos alguns pré requisitos como o tempo de convergência. Além disso, é o método mais indicado para estudos geodinâmicos, meteorológicos, entre outros (THEODORO, 2020).

Quando se almeja um posicionamento de alta precisão é necessário minimizar erros que ocorrem no sinal das ondas eletromagnéticas, seja devido a presença de elementos nas camadas atmosféricas da Terra, ou elementos da naturais ou artificiais que causem a dispersão, atraso ou aceleração das ondas eletromagnéticas. Com relação aos efeitos produzidos pela atmosfera no sinal GPS, estes erros podem ser classificados em duas categorias, segundo a camada onde ocorrem, sendo: efeitos ionosféricos e efeitos troposféricos.

A ionosfera é a região da atmosfera situada entre 50 e 1000 quilômetros acima da superfície terrestre, constituída principalmente por elétrons livres, que afetam a propagação das ondas portadoras. O erro devido à ionosfera nas observáveis GPS é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (*Total Electron Content*) presentes na camada ionosférica, que variam no tempo e no espaço, sendo inversamente proporcional ao quadrado da frequência deste sinal. Para minimizar o

efeito de primeira ordem da ionosfera no posicionamento, usa-se a combinação das ondas portadoras L1 e L2, conhecida como combinação livre da ionosfera (*ion-free*).

Já os erros troposféricos, são ocasionados devido aos gases dispersos na troposfera (denominada atmosfera neutra, devido a sua não ionização). Os erros troposféricos são mais complexos de serem modelados.

A troposfera é a primeira camada da atmosfera terrestre, localiza-se na parte inferior da atmosfera. Ela se estende desde a superfície até cerca de 50 quilômetros acima da Terra e nela se concentram aproximadamente 75% da massa atmosférica total (JACOB et. al, 2010), sendo que 78% de sua composição é equivalente a Nitrogênio, 21% equivalente a Oxigênio, 1% de outros gases (Dióxido de carbono, Argônio entre outros) e 1% de vapor d'água. Esse último, apesar de representar apenas 1% da camada, possui alta importância no contexto dos eventos climáticos e que também vão ocorrer, e por este motivo são usados o PNT (Previsão numérica de tempo) e na manutenção do equilíbrio hidrológico, fundamental para a existência de vida no planeta (SIQUEIRA, 2017). O atraso troposférico pode ser dividido em duas componentes, a componente hidrostática (seca) e a componente úmida. A componente hidrostática, conserva uma dispersão quase estável ao longo do tempo e suas variações podem ser representadas em função da pressão, latitude e altitude do local. Com a componente úmida (vapor d'água) o mesmo não acontece, em face da sua alta variação temporal, relacionada aos ciclos hidrológicos e fenômenos de variações climáticas.

Devido a relação entre a porcentagem de vapor d'água e os fenômenos meteorológicos da atmosfera neutra, dimensionar esse elemento é um propósito em comum para várias áreas do conhecimento. Sua estimativa é realizada a partir de levantamentos específicos, cuja integração das técnicas permite previsões numéricas do tempo e o desenvolvimento de modelos meteorológicos (SIQUEIRA, 2017). Dentre as aplicações do uso de dados climáticos cita-se a agricultura, monitoramento de áreas de risco, oceanografia, dentre outros.

Entre várias técnicas de obtenção de vapor d'água atmosférico, como por exemplo a psicrometria que é o estudo relacionado ao ar úmido, o GPS possui grande potencial, devido a praticidade em sua estimativa e a alta resolução temporal possível de ser obtida, equivalente a taxa de observação dos sinais de satélites (SAPUCCI, 2001).

Estudos climáticos visam analisar e diagnosticar eventos da atmosfera assim como definir o clima de uma região, baseando-se, conforme explicam Kousky e Molion

(1985), no comportamento dos chamados "controles climáticos", que nada mais são que variáveis físicas que expressam a característica climática local; estudos anteriores indicam que por meio dos dados de vapor d'água obtido através de observações GPS é possível realizar predições das séries.

No contexto deste trabalho, é investigada a correlação entre valores de PWV estimados por 5 estações GNSS e dados meteorológicos objetivando analisar a correspondência com a estiagem no estado do Paraná.

1.1 JUSTIFICATIVA

Desde julho do ano de 2019 o nível de chuvas no estado do Paraná está abaixo da média. A estiagem severa se prolongou e em maio de 2020 o governo do estado decretou situação de emergência hídrica. O Estado sofre a pior falta de chuva desde o ano de 1997. Em outubro de 2020, cerca de 61% do estado do Paraná estava com uma seca considerada grave, e cerca de 8,6% em seca extrema (que abrange Curitiba e Região Metropolitana). Através do levantamento do Monitor de Secas, coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), essa é a pior condição do Sul do país em 2020. A bacia do Iguaçu apresentou o menor valor de volume dos últimos 90 anos, quando o monitoramento passou a ser feito. Mesma situação foi registrada na bacia do Rio das Cinzas, no norte pioneiro. Já na bacia do Rio Tibagi, na região sul, o volume é o menor em 41 anos.

Em setembro de 2021 apenas dois terços do território do Paraná continuam sob o fenômeno da estiagem. A região Leste está se recuperando, mas precisa de muita chuva para voltar à normalidade. Isto significa que a estiagem está distribuída ao longo do Estado. É necessário ressaltar que a estiagem provoca perdas em diversas áreas, como a agricultura, por exemplo, com a falta de chuva no plantio dos grãos causa uma defasagem no desenvolvimento da planta ocasionando perda do grão. Outra área que sofre com a estiagem é a geração de energia que é afetada de duas formas: na vazão da água, ou seja, a quantidade de água que passa nas turbinas, e na altura da água do rio, que define a potência de energia que a máquina consegue produzir.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a correlação entre o vapor d'água estimado por GPS, a partir de 5 estações de monitoramento contínuo e dados de precipitação do INMET visando a análise do atual evento de estiagem na região no estado do Paraná,

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar a reamostragem dos dados de PWV e de precipitação, convertendo em dados diários, mensais, trimestrais, semestrais, e anuais com o intuito de poder obter uma melhor discriminação dos dados;
- b) Analisar a correspondência entre os valores de PWV e precipitação
- c) Avaliar os resultados obtidos frente ao período de estiagem;

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os conhecimentos teóricos fundamentais necessários para o acompanhamento das diferentes etapas e processos a serem realizados neste trabalho.

2.1 SISTEMAS GLOBAIS DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE

Os sistemas globais de posicionamento por satélites (*GNSS - Global Navigation Satellite System ou Sistema Global de Navegação por Satélite*) é a terminologia empregada nos dias atuais quando são efetuadas observações de mais de uma constelação de satélites. Dentre estes, o sistema mais utilizado é o GPS que é a constelação dos Estados Unidos, operacional desde 1994 e que atualmente possui 31 satélites em órbita. Existem diversas características do sistema GPS, uma delas é a disponibilidade contínua 24 horas em cobertura global de dados. O mesmo pode proporcionar uma exatidão diferencial: subcentimétrica.

O GPS fornece dois tipos de serviço o SPS (*Standard Positioning Service*) e o PPS (*Precise Positioning Service*), descritos em Monico (2000), sendo:

- SPS: oferecido para todos os usuários, sem cobrança de qualquer tipo de taxa. Este serviço foi planejado para oferecer exatidão horizontal e vertical de 100m e 140m, respectivamente, e 340 ns na obtenção de tempo, com nível de confiança de 95% (VETTORAZZI, 2016). Porém, testes demonstraram que seria possível o fornecimento de resultados melhores, isto levou o DoD (*Department of defense*) a implementar a SA (*Selective Availability*). Com o crescente desenvolvimento dos receptores e de técnicas que visavam a contornar esse problema, além do surgimento de novos sistemas de posicionamento, ameaçando a hegemonia do GPS, o DoD decidiu desativar a SA às 04 horas TU do dia 2 de maio de 2000, o que causou uma melhora de 5-10 vezes na exatidão dos resultados;

- PPS: proporciona melhores resultados que o SPS, entretanto é restrito ao uso militar e de usuários autorizados. Este serviço proporciona melhores níveis de exatidão, mas não é do interesse do DoD dos Estados Unidos disponibilizá-lo a todos os usuários do GPS, pois poderia colocar em risco alguns aspectos de segurança.

As aplicações variam para diversas finalidades, sendo algumas delas:

- Agricultura de precisão com GPS tendo o operador a pé ou em quadriciclos, para georreferenciamento de amostras, medições, mapas de fatores das zonas de manejo. GPS embarcado (máquinas e implementos) para monitoramento de colheita (colhedora + sensores + GPS); avaliação da qualidade das operações como pulverização;
- Mapeamentos topográficos para plantas topográficas, perimétricas ou cadastrais; redes de pontos de apoio para levantamentos topográficos (vértices das diversas ordens, densificação); pontos de apoio para restituição fotogramétrica; altimetria, perfis topográficos;
- Locações de obras de engenharia como construções, estradas, barragens, açudes, terraços, talhões, piquetes, pastos, Reservas Legais;
- Georreferenciamento de objetos (feições) para entrada em Sistemas de informação geográfica, inventários na área florestal, ou seja, árvores ou parcelas, florestas plantadas, naturais (manejo sustentado), pontos a serem usados na geração de MDEs (*Digital elevation model*);
- Logística - Rotas mais adequadas - Gerenciamento de frotas.

Na Figura 01 encontram-se as principais características do sistema GPS.

FIGURA 01:CARACTERÍSTICA DO GPS

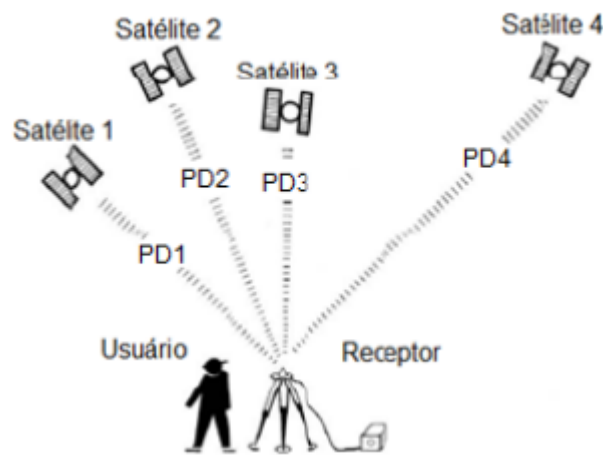
| GPS | |
|-----------------------------|---|
| Number of sat. | 31 |
| Number of nominal satellite | 24 |
| Number of orbital plan | 6 |
| Inclinaison plan | 55° |
| Altitude (km) | 20,180 |
| Orbital period | 11 h 58 m |
| Time scale | GPST UTC(USNO) |
| Coord. system | WGS 84 |
| Ephemerides | Kepler Elements and temporal variations |
| Ephemeris update | every 2 h |
| Message length | 12.5 min |

FONTE: ADAPTADA DE SANTERRE et al (2014)

2.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio fundamental do posicionamento por satélites (Figura 02) consiste na medição das pseudodistâncias entre um usuário (receptor/antena) e, ao menos, quatro satélites acima do horizonte. A partir das coordenadas conhecidas dos satélites, referenciadas a um sistema de referência global, pode-se obter a posição do usuário neste mesmo sistema (SEEBER, 2003). A pseudodistância, ou seja, distância entre a antena/receptor e a antena/satélite é acrescentada de erros, os quais se devem minimizar.

FIGURA 02 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO GNSS



FONTE: ADAPTADA DE SEEBER (2003)

2.1.2 OBSERVÁVEIS BÁSICAS DO GNSS

Em termos de posicionamento, a pseudodistância e fase da onda portadora são as observáveis GNSS mais importantes. Elas permitem determinar a posição, a velocidade e o tempo. A pseudodistância é a medida da distância entre a antena do satélite no instante da transmissão do sinal e a antena do receptor no instante de recepção acrescido de erros (KRUEGER, 2017). É denominada de pseudo devido a uma série de erros específicos ao processo, tais como o não sincronismo dos relógios entre o satélite e o receptor, erro de órbita, refração troposférica e ionosférica, multicaminho, entre outros.

A equação da pseudodistância por meio da medida do código para uma época de observação genérica (t) é dada por:

$$PD_{CD}(t) = R(t) + cdtu(t) + cdta(t) + cdts(t) + cdtorb(t) + \varepsilon \quad (1)$$

Onde:

- PD_{CD} é medida da pseudodistância na época de observação t ;
- R é a distância geométrica entre a antena do receptor e a antena do satélite;
- t é a época de observação;

- dtu é o erro de sincronismo entre o relógio do receptor e o tempo GPS;
- dta - atraso na propagação do sinal (troposfera e ionosfera) entre a antena do receptor e a antena do satélite na atmosfera;
- dts - erro do relógio do satélite em relação ao tempo GPS;
- $dorb$ - erro de órbita do satélite;
- ε - demais erros (ruído do receptor, efeito de multicaminho, variação do centro de fase da antena, etc).

Na Tabela 1 indica-se os principais códigos do GPS, sua frequência, comprimento de onda e precisão. O código P vem modulado nas ondas portadoras L1 e L2 e o código C/A na onda portadora L1.

A equação de observação básica da pseudodistância por meio da medida da fase da portadora para uma época de observação genérica (t) é dada por:

$$PD_{CD}(t) = R(t) + cdtu(t) + cdta(t) + cdts(t) + cdorb(t) c \left(\frac{N}{F_{CR}} \right)(t) + \varepsilon(2)$$

Onde:

- F_{CR} frequência da onda portadora;
- N ambiguidade.

TABELA 1: FREQUÊNCIA, COMPRIMENTO DE ONDA E PRECISÃO E PRECISÃO DOS CÓDIGOS

| Sinal | Frequência (Mhz) | Comprimento de Onda (m) | Precisão (m) |
|-------|------------------|-------------------------|--------------|
| P | 10,23 | 29,31 | 2,931 |
| C/A | 1,023 | 293,1 | 0,293 |

FONTE: MONICO (2016) e KRUEGER (2018)

De modo geral, as medidas de fase possuem precisão de nível milimétrico, enquanto as pseudodistâncias proporcionam resultados de precisão métrica (HOFMANN-WELLENHOF, 2008).

Portanto, para posicionamento de alta acurácia, a observável fundamental é a fase da onda portadora, muito embora as medidas de distâncias também sejam utilizadas. No entanto, a medida da fase é incerta, pois não se sabe o valor da ambiguidade que é o número de ciclos inteiros existentes na distância formada entre o

satélite e o receptor (no instante da primeira recepção do sinal). Na Tabela 2 observam-se as ondas portadoras do GPS, indicando a frequência, comprimento de onda e precisão de cada sinal.

TABELA 2: FREQUÊNCIA, COMPRIMENTO DE ONDA E PRECISÃO E PRECISÃO DAS ONDAS PORTADORAS.

| Sinal | Frequência (Mhz) | Comprimento de Onda (m) | Precisão (mm) |
|-------|------------------|-------------------------|---------------|
| L1 | 1575,42 | 19,03 | 1,905 |
| L2 | 1227,6 | 24,42 | 2,445 |
| L5 | 1176,45 | 25,48 | 0,200 a 3,000 |

FONTE: MONICO (2016) e KRUEGER (2018)

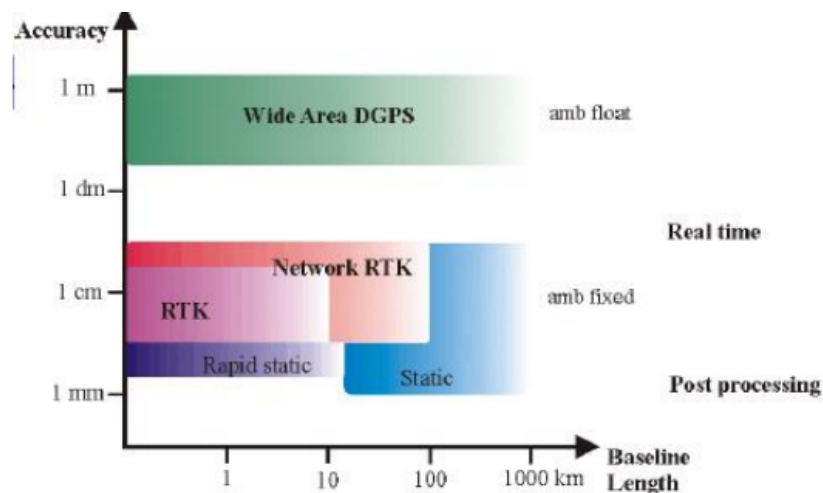
Através de observações das ondas portadoras e códigos combinações lineares podem ser efetuadas, as quais estão implementadas nos programas de processamento. As combinações lineares possibilitam a redução ou eliminação de alguns erros (KRUEGER & PILAPANTA, 2021).

Para eliminar e/ou minimizar os erros presentes nas observações, efetua-se o processo de diferenciação, a qual pode ser efetuada entre estações, satélites e épocas. No caso do emprego da fase da portadora, essas diferenciações podem ser denominadas: simples diferença de fase, quando se diferencia, em geral, as observações de fase de duas estações para o mesmo satélite num instante de tempo t ; dupla diferença de fase, quando se diferencia as observações de fase de duas estações e de dois satélite num mesmo instante de tempo t e tripla diferença de fase, quando se diferencia as observações de fase de duas estações e de dois satélite em dois instantes de tempo (t_1 e t_2). A simples diferença de fase (SDF) elimina apenas um erro presente na equação, no caso citado anteriormente é o erro de sincronismo do relógio do satélite e o tempo GPS. A dupla diferença de fase (DDF) elimina os erros de sincronismo entre o relógio dos satélites e o tempo GPS e os erros de sincronismo entre o relógio dos receptores e o tempo GPS no processo. E a tripla diferença de fase elimina os erros de sincronismo entre o relógio dos satélites e o tempo GPS; os erros de sincronismo entre o relógio dos receptores e o tempo GPS e as ambiguidades, se não houver perda de sinal, no processo.

2.1.3 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

O posicionamento através do GPS diz respeito à determinação da posição de objetos em relação a um referencial e época específica, podendo ser realizado a partir de diferentes técnicas e observáveis, as quais fornecem níveis de precisão que variam desde algumas dezenas de metros até poucos milímetros (Figura 03).

FIGURA 03 – PRECISÃO DEPENDENTE DA LINHA DE BASE PARA DIFERENTES MÉTODOS DE POSICIONAMENTO



FONTE: WILLIGALIS et al (2002)

Desta forma, segundo Krueger (1996) e Monico (2008), os métodos de posicionamento podem ser classificados em:

- Absoluto (Por Ponto) – quando as coordenadas estão associadas diretamente ao geocentro;
- Relativo – o vetor formado entre as estações base e móvel é calculado, possibilitando a determinação das coordenadas desta estação que estão atreladas a um referencial materializado por um ou mais vértices de coordenadas conhecidas; e
- Diferencial – as coordenadas da estação móvel são calculadas com o emprego das correções diferenciais geradas na estação de referência, sendo que estas correções podem ser enviadas por um meio de um sistema de comunicação para a estação móvel, neste caso as

coordenadas são determinadas em tempo real.

Para mais informações sobre os métodos atuais de posicionamento GNSS, pode-se consultar Monico (2008) e Seeber (2003) e Krueger et al (2020).

2.1.4 POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO

Este método pode ser considerado um método absoluto (por ponto), contudo as observáveis enviadas pelos satélites são gravadas e o processamento dos dados coletados (códigos e fase das ondas portadoras) por receptores de uma ou duas frequências é efetuado. Ainda são empregadas correções para os relógios dos satélites e as efemérides precisas, informações produzidas e disponibilizadas pelo IGS (*International GNSS Service*) e por centros associados por meio de programas científicos, no geral, além de outros modelos matemáticos que podem ser utilizados. Passando então a ser denominado de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).

Estes serviços (BKG, IBGE-PPP dentre outros) têm como vantagens: a redução de custos, processamento automatizado, uso automático dos programas do IGS, uso global, economia de tempo e precisão em centímetros utilizando as observações da fase da onda portadora, e resolução das ambiguidades (MAYER & FUHRMANN, 2008). Quando se empregam as pseudodistâncias derivadas do código C/A, a precisão é métrica, pois apenas os erros dos satélites e do receptor são modelados na solução (IBGE, 2014).

No PPP pode-se empregar dados de multi-frequência. No caso do GPS tem-se, além das frequências L1 e L2, a nova frequência L5. Essa frequência é o terceiro tipo de onda portadora. Possui maior potência, maior largura de banda e um design de sinal avançado (GPS, 2019b). Esta onda possui frequência de 1176,45 MHz, e será posicionada dentro do domínio espectral do Serviço de Rádio Navegação da Aeronáutica (*ARNSs - Aeronautical RadioNavigation Services*).

Para dados de dupla frequência, as observáveis fruto da combinação linear de frequências denominada *ion-free* são frequentemente empregadas nos processamentos, principalmente porque os efeitos ionosféricos de primeira ordem são cancelados matematicamente (DE OLIVEIRA JUNIOR, 2017; SHEN, 2002). Através do método tradicional do PPP, são necessários aproximadamente 30 minutos

para que uma solução de posição possa ser alcançada em um nível de acurácia da ordem do decímetro, em um processamento estático (ALVES et al., 2011; WANG, 2014; IBGE, 2017).

2.1.5 FONTES DE ERROS

A precisão do posicionamento utilizando observáveis GPS depende da minimização ou eliminação de erros sistemáticos, ruídos e de interferências que afetam as medidas de pseudodistância. Os erros podem ser classificados em: erros aleatórios, erros grosseiros e erros sistemáticos. Os erros aleatórios não podem ser modelados e são caracterizados por uma propriedade estatística. Os erros grosseiros são fáceis de detectar, através da repetição sobre um mesmo ponto, e normalmente são introduzidos por falha humana ou falhas do equipamento. Os erros sistemáticos podem ser modelados ou minimizados, pois suas causas são conhecidas. Na Tabela 03 são indicados os erros que podem ser classificados em quatro grupos:

TABELA 3: PRINCIPAIS ERROS NO POSICIONAMENTO GNSS

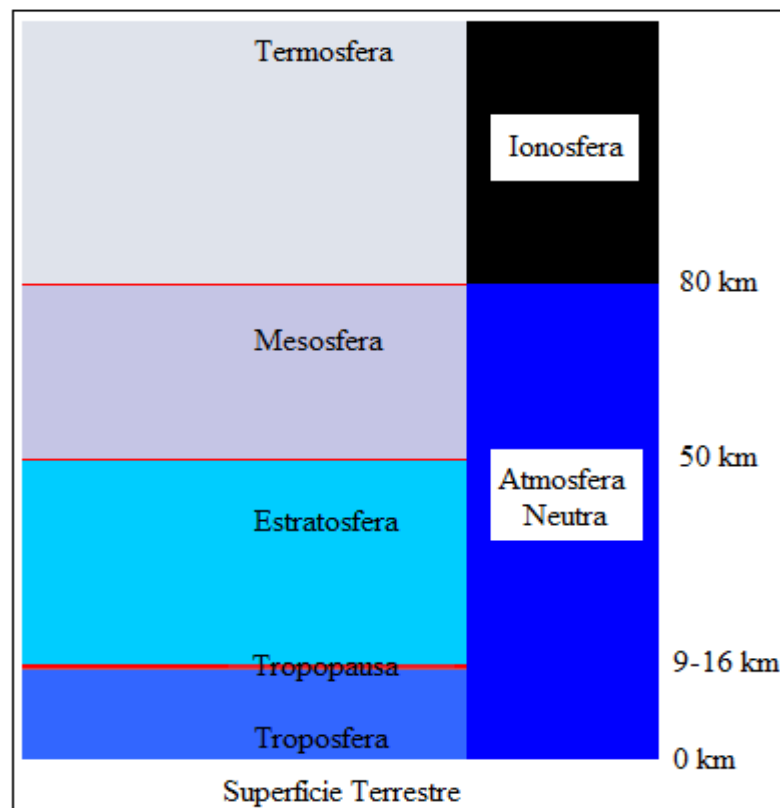
| Fontes | Erros |
|---------------------|--|
| Satélite | Erro da órbita |
| | Erro da relógio |
| | Relatividade |
| | Atraso nas duas portadoras no hardware do satélite |
| Propagação do sinal | Refração troposférica |
| | Refração ionosférica |
| | Perdas de ciclos |
| | Efeito do multicaminho |
| | Rotação da Terra |
| Receptor/ Antena | Erro do relógio |
| | Erro entre os canais |
| | Centro de fase da antena |
| Estação | Erro nas coordenadas |
| | Efeito do multicaminho |
| | Marés terrestres |
| | Movimento do pólo |
| | Carga dos oceanos |
| | Pressão atmosférica |

FONTE: Adaptado WERLICH (2021)

2.1.6 MODELOS TROPOSFÉRICOS E O ATRASO ZENITAL

O funcionamento do GPS leva em consideração a propagação de sinais de rádio ao cruzar a troposfera, partindo da antena do satélite em órbita até o momento da chegada do sinal à antena do usuário. As ondas emitidas sofrem efeitos ao cruzar as camadas atmosféricas, ocasionados pelos diferentes índices de refração ao longo do trajeto. Na figura 04 são apresentadas as divisões em camadas da atmosfera terrestre que compreendem a ionosfera e a atmosfera neutra, com referência de suas respectivas alturas médias em relação à superfície terrestre.

FIGURA 04: Camadas da Atmosfera Terrestre .



FONTE: Adaptada de Langley (1998).

A ionosfera e a troposfera provocam efeitos iguais sobre as ondas eletromagnéticas. Sendo, três efeitos observados (MONICO, 2008):

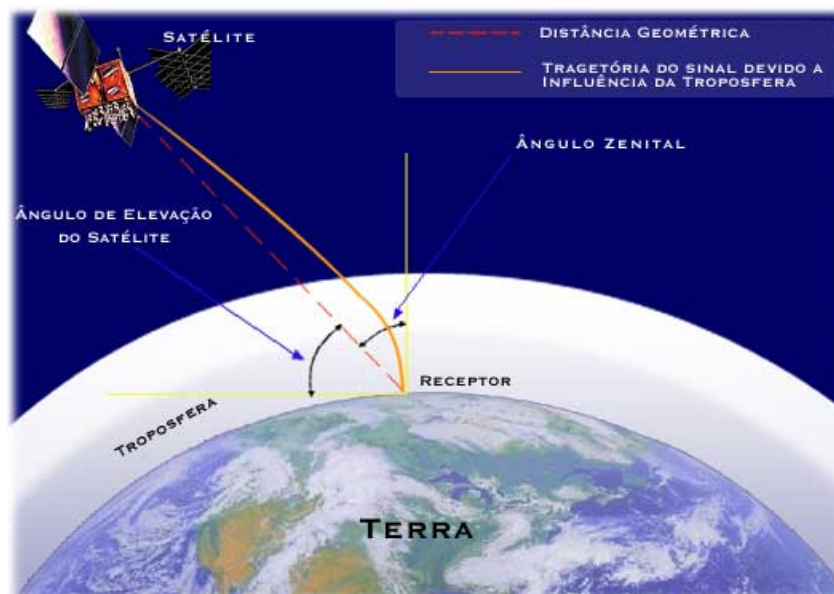
- Atenuação: refere-se à diminuição da potência do sinal da onda eletromagnética, devido ao conteúdo presente nas camadas;

- Cintilação: oscilação na amplitude das ondas, ocasionada por irregularidades e turbulência no índice de refração atmosférico; e
- Refração: efeito decorrente do atraso do sinal enquanto este cruza a atmosfera, ocasionado pela presença de gases e partículas sólidas no caso da troposfera, e conteúdo de elétrons livres presentes na ionosfera.

Quando o sinal GPS se propaga na atmosfera terrestre, além de outros fatores, sofrem influências dos elementos químicos que compõem as camadas da atmosfera gerando um atraso no tempo de propagação, o que ocasiona erros nas coordenadas finais fornecidas pelo sistema utilizado. Esse atraso é denominado atraso troposférico devido ao fato dos gases responsáveis por esse efeito estarem concentrados na troposfera.

Além da diminuição da velocidade de propagação dos sinais de radiofrequência, a variação da concentração dos gases na atmosfera, gera nos sinais de radiofrequência um outro efeito, que apesar de menos intenso, também é responsável pelo Atraso Zenital Troposférico. Trata-se da refração na trajetória do sinal, o que torna essa trajetória efetivamente percorrida diferente da direção geométrica entre o satélite e o receptor. A Figura 05, apresenta a influência dos gases que compõem a atmosfera na propagação dos sinais de radiofrequência.

FIGURA 05 : ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO



FONTE: INPE 2021.

2.2 ATMOSFERA NEUTRA

Das camadas presentes na atmosfera neutra, a troposfera é a que exerce a maior influência nos sinais GPS, causando um atraso nos sinais de radiofrequência que a atravessam, por esse motivo o efeito provocado pelas camadas da atmosfera neutra é denominado atraso troposférico ou refração troposférica, mesmo que a refração seja devida não apenas a essa camada, mas sim a atmosfera neutra como um todo (SAPUCCI, 2001; DE ABREU et al., 2014; ALVES et al., 2015).

A atmosfera é composta por vários gases, apresentando uma concentração de Nitrogênio, Oxigênio, Argônio e Dióxido de Carbono em maior quantidade. Outro componente importante é o vapor d'água, que existe principalmente nas camadas inferiores da atmosfera.

Existem dois grandes atrasos ocasionados pela troposfera. O primeiro, e maior, é gerado pela influência da componente hidrostática, principalmente, pela influência do Nitrogênio e do Oxigênio. O segundo efeito é o ocasionado pela componente úmida, ou seja, pela influência do vapor d'água atmosférico. O atraso ocasionado pela componente úmida é geralmente menor, representando cerca de 10% do atraso troposférico total. Porém, sua variação temporal e espacial é muito maior, chegando a 20% em poucas horas, o que dificulta uma previsão adequada, a partir de medidas da umidade na superfície (SPILKER, 1994).

A relação entre o atraso troposférico e o índice de refração do ar é dado conforme equação (3), precisando integrar a equação em função da variável altura da camada troposférica (h), caso se deseje obter o valor de atraso zenital total (ZTD) (SAPUCCI, 2001).

$$ZTD = 10^6 \int N ds \quad (3)$$

Onde:

- N é o índice de refração do ar;
- ds é a representação de parte infinitesimal da trajetória percorrida pelo sinal;

Pode-se dividir o atraso troposférico em duas partes respectivas o atraso zenital hidrostático (ZHD) e o atraso zenital úmido (ZWD). Supõe-se que a magnitude de cada um destes efeitos é função da espessura da camada atmosférica por onde a onda se propaga, que por sua vez é proporcional ao ângulo de elevação do satélite observado (SIQUEIRA, 2017). Por isso é necessário fazer correções aos valores em função deste ângulo, por meio da inclusão das chamadas de Funções de mapeamento troposférico (equação 4):

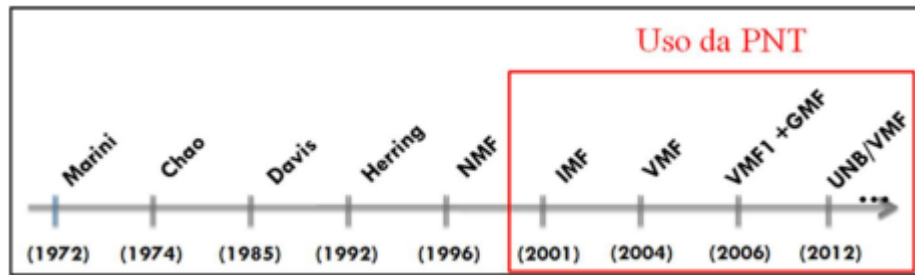
$$ZTD = ZHD * mh(E) + ZWD * mw(E) \quad (4)$$

Onde:

- ZHD representa o atraso zenital da componente hidrostática;
- ZWD representa o atraso zenital da componente úmida;
- mh e mw são as funções de mapeamento que relacionam o atraso das componentes hidrostática e úmida;
- E ângulo de elevação do satélite.

Como visto na equação 04, o ZTD depende do índice de refração ao longo do caminho real percorrido pelo sinal GNSS. Para uma atmosfera que é azimutalmente simétrica em relação à antena receptora, este atraso depende apenas do perfil vertical da atmosfera e do ângulo de elevação da fonte de rádio. A função que descreve a dependência do ângulo de elevação do atraso atmosférico tornou-se conhecida como função de mapeamento (DAVIS et al. 1985; NIELL, 1996). Ela é usada juntamente com algum modelo para obter o valor do ZTD em qualquer ângulo de elevação (E) que o satélite esteja em relação ao receptor (SAPUCCI, 2001; GOUVEIA, 2013; MARQUES et al., 2014). Para ângulos de elevação acima de 5° há diversas funções de mapeamento que produzem resultados satisfatórios (Figura 06). As funções em destaque pelo retângulo vermelho são as que foram modeladas com base em dados de PNT.

FIGURA 06- Linha do tempo das funções de mapeamento, em destaque as funções que usam PNT.



FONTE: GOUVEIA (2019)

A função de Marini (1972) foi a primeira desenvolvida, adequada para os fins geodésicos. Com base nela as demais funções de mapeamento foram desenvolvidas e aprimoradas, a fim de alcançar melhor qualidade na determinação do atraso troposférico (DAVIS, 1985; NIELL, 1996; SANTOS et al., 2012; GOUVEIA, 2019).

2.1.8.1 Função de mapeamento de Marini

A função de mapeamento mais simples foi definida com base na lei da cossecante (“Lei de Snell-Descartes”), a qual considera a Terra sendo plana e a refratividade constante ao longo de uma camada atmosférica. Para ângulos de elevação próximos a 90 graus, essa simples aproximação $1/\text{sen}(E)$ é geralmente suficiente. No entanto, em ângulos de elevação mais baixos (<20 graus) para aplicações que requeiram maior acurácia, essa função não é adequada, uma vez que pode causar erro de cerca de 2cm no valor do atraso (SPILKER, 1996;GOUVEIA, 2019).

A formulação geral básica para as funções de mapeamento equação 05 possuem como parâmetros de entrada o ângulo de observação do sinal do satélite E e os coeficientes a , b e c determinados através de dados atmosféricos (MARINI,1972).

$$mf(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\text{sen}(E) + \frac{a}{\text{sen}(E) + \frac{b}{\text{sen}(E)+c}}} \quad (5)$$

No decorrer dos anos de melhorias dos processamentos na geodésia espacial, muitas funções de mapeamento avançaram, cada função de mapeamento possui

estrutura própria e diferentes coeficientes, estimados por diferentes métodos, envolvendo o uso de dados atmosféricos provenientes de radiossondas ou modelos de reanálise (SIQUEIRA, 2020). Para resultados mais acurados no posicionamento, cada modelo possui uma função de mapeamento para a componente hidrostática e uma para a componente úmida.

Na equação genérica 4, o atraso hidrostático ZHD pode ser obtido a princípio por meio de dados atmosféricos de temperatura, pressão e umidade. Esses dados podem ser alcançados por meio da incorporação de estações meteorológicas aos receptores GNSS ou podem ser estimados a partir de modelos atmosféricos pré-definidos, que consideram as variáveis atmosféricas em função da posição do usuário e época do ano de interesse.

Estes modelos, por exemplo, podem ser o modelo de Hopfield (HOPFIELD, 1969), modelo de Saastamoinen (SAASTAMOINEN, 1973), modelos numéricos de tempo, dentre outros que fazem a previsão de variáveis atmosféricas para uma determinada região e época (NOAA, 2020).

Conhecendo-se as funções de mapeamento para as duas componentes, e o ZHD modelado a partir de dados de temperatura, o ZWD pode ser estimado como variável dentro do processamento GNSS, fazendo com que a convergência do valor ZTD venha a ter o mesmo comportamento.

2.2.3 GNSS-MET

Como os elementos que compõem a atmosfera neutra podem ser agrupados em duas categorias, os atrasos referentes a eles também seguem essa regra. O atraso provocado pelos gases hidrostáticos, chama-se atraso zenital hidrostático (ZHD). A modelagem da componente hidrostática do atraso troposférico, para um determinado local, é realizada com precisão, aplicando-se a (equação 06), cujo desenvolvimento pode ser visto em SAPUCCI (2017).

$$D_{ZH} = (2,27683157 \times 10^{-3}) \frac{P_0}{(1 - 0,0026 \times \cos(2\varphi) - 0,00028h_0)} \quad (6)$$

Onde:

- D_{ZH} é o atraso zenital hidrostático;

- P_0 é a pressão atmosférica (em hPa) na altitude h_0 (em quilômetros), vinculada a posição da antena; e
- φ é a latitude do local de rastreio, podendo ser a mesma obtida pelo equipamento GNSS.

As constantes ($2,27683157 \times 10^{-3}$) é dada em $m \cdot hPa^{-1}$ pois pondera a constante específica dos gases hidrostáticos ($287,0538 J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$) multiplicado pela constante de refratividade do ar ($77,600 ^\circ K \cdot hPa^{-1}$) e dividido pela aceleração da gravidade ($9,784 ms^{-2}$) e o divisor ($1 - 0,0026 \cdot \cos(2\varphi) - 0,00028h_0$) é o termo que resta da constante gravitacional efetiva ($gm = 9,784 * [1 - 0,0026 \cos(2\varphi) - 0,00028h_0]$), que é adimensional.

Através de pesquisas realizadas por SAPUCCI (2001) da propagação de erros nas modelagens GNSS-MET o mesmo concluiu que, para determinação da componente ZHD com precisão ideal, o receptor e o sensor de pressão devem ser posicionados de preferência na mesma altitude, ou com seu desnível conhecido. O autor ainda aponta que diferenças de 0,3 mbar na medida de pressão alcançam cerca de 1 mm de diferença de água precipitável.

A componente úmida do atraso troposférico, chamada de atraso zenital úmido (ZWD), é mais difícil de ser modelada, devido a alta variação espacial e temporal da pressão parcial do vapor d'água atmosférico associado. Tem uma variação média entre 10 a 25 cm e, quando se conhece a altura da coluna de ar analisada, o ZWD pode ser obtido aplicando-se a (equação 7), que a estabelece em função das constantes de refratividade do ar, da temperatura, da compressibilidade do vapor d'água, da temperatura média da coluna troposférica e da pressão parcial do vapor d'água. Nessa equação torna-se necessário empregar a altura da camada úmida a ser analisada.

$$ZWD = 10^{-6} Z_w^{-1} k'_3 \int \frac{e}{T^2} dh \quad (7)$$

Onde:

- Z_w^{-1} como o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água (hPa^{-1});

- k'_3 uma constante da refratividade do ar, em $^{\circ}K \cdot hPa^{-1}$;
- e a pressão parcial do vapor d'água, em hPa ;
- T é a temperatura superficial do local, em $^{\circ}K$;
- h a altitude do local analisado, em metros.

Ao empregar dados GPS, a determinação do atraso úmido torna-se mais praticável, devido a separação das duas componentes do atraso total. Então, a (equação 9) é o termo adotado para o atraso zenital, em função das duas componentes.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (9)$$

Como apresentado na seção 2.2.2, o ZTD pode ser obtido como variável no processamento GNSS. Neste momento o ZTD é um valor já estimado, e o ZHD sendo determinado pela modelagem (4), então se tem que a componente ZWD pode ser obtida através da (equação 10). Desta forma, obtém-se o atraso da componente úmida determinado para aplicações meteorológicas.

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (10)$$

A componente úmida possui uma forte correlação com a quantidade PWV na camada neutrosfera. O IWV (Integrated Water Vapour, acrônimo em inglês para Vapor D'água Integrado) é teoricamente definido como a integral da umidade absoluta ao longo da coluna vertical da atmosfera (equação 11), cuja determinação numérica requer a utilização de radiômetros ou radiossondas, de acordo com SAPUCCI (2005). A correlação apresentada é muito explorada na atualidade para determinação do PWV a partir de observações GNSS.

$$IWV = \int \rho_w dh = ZWD * \Psi \quad (11)$$

Onde:

- ρ_w a umidade absoluta em porcentagem;
- e a altura da camada troposférica da componente úmida, em metros;

- Ψ a relação existente entre o atraso úmido e IWV, dado pela equação 12 abaixo

$$\Psi = \frac{10^{-6}}{R_w [k'_2 + \frac{K^3}{Tm}]} \quad (12)$$

Onde:

- R_w é a equação específica do vapor d'água em $J. kg^{-1}. ^\circ K^{-1}$
- k'_2 e k^3 constantes de refratividade do ar em $^\circ K. hPa^{-1}$
- Tm é a temperatura média da coluna vertical troposférica em $^\circ K$

O PWV, dado em milímetros, é obtido dividindo-se o IWV, dado em kg/m^2 pela densidade da água líquida ρ_a , em $kg. m^{-3}$ sendo esta variável utilizada para alimentar modelos de previsão numérica de tempo. Na tabela 04 são apresentadas as constantes utilizadas nesta seção, com seus respectivos valores e unidades.

$$PWV = \frac{IWV}{\rho_a} \quad (13)$$

SAPUCCI (2005) apresenta modelos de determinação da temperatura média (Tm) da coluna troposférica para o território brasileiro, usando dados de radiossondagens em todas as 5 regiões do país. Estes modelos são funções lineares da temperatura, pressão e umidade, atribuindo para cada uma dessas variáveis coeficientes determinados empiricamente. A equação para a região Sul, por exemplo, é apresentada na sequência (equação 14), dada em função da temperatura superficial Ts em $^\circ K$, pressão superficial (Ps) em hPa e umidade relativa (UR) em porcentagem. Percebe-se que, nesse caso, a temperatura média da coluna troposférica não depende da pressão superficial.

$$Tm = 0,61390. Ts + 0. Ps + 0,020243. UR + 102,815 \quad (14)$$

Os resultados de PWV alcançados por estas técnicas de radiossondagem e radiometria, possuem entre si, valores de raiz do erro médio quadrático das discrepâncias iguais a 1,7 mm. Portanto, sendo estas técnicas as duas melhores atualmente para se obter o vapor d'água, pois conforme SAPUCCI (2005) o valor geralmente admitido para as estimativas PWV-GNSS são de 2 mm. (LIANG et. al, 2015) também cita essa tolerância, adotando-a em seus estudos.

TABELA 4 - CONSTANTES EMPREGADAS NAS MODELAGENS PWV

| Constantes Utilizadas | Valor | Incerteza | Unidade de medida | Fonte |
|--|-------------|--------------|-------------------|----------------------------|
| k_1 | 77,600 | $\pm 0,05$ | K/hPa | Bevis <i>et al.</i> , 1994 |
| k_2 | 70,400 | $\pm 2,2$ | K/hPa | Bevis <i>et al.</i> , 1994 |
| k_3 | 373900 | ± 1200 | K^2/hPa | Bevis <i>et al.</i> , 1994 |
| k'_2 | 22,1 | $\pm 2,2$ | K/hPa | Bevis <i>et al.</i> , 1994 |
| Densidade da água líquida (ρ_a) | 1.000 | ... | kg/m^3 | Resnick & Halliday, 1984 |
| Velocidade da luz no vácuo (c) | 299.792.458 | 0,004 ppm | m/s | Resnick & Halliday, 1984 |
| Massa molar dos gases hidrostáticos (M_h) | 28,9644 | $\pm 0,0014$ | $kg/kmol$ | Davis <i>et al.</i> , 1985 |
| Massa molar da água (M_w) | 18,0152 | ... | $kg/kmol$ | Spilker, 1994 |
| Constante universal dos gases (R) | 8.314,34 | $\pm 0,35$ | $J/kmolK$ | Davis <i>et al.</i> , 1985 |
| Constante específica do vapor d'água (R_w) | 461,5181 | ... | J/kgK | Davis <i>et al.</i> , 1985 |
| Constante específica dos gases hidrostáticos (R_h) | 287,0538 | $\pm 0,0184$ | J/kgK | Davis <i>et al.</i> , 1985 |

FONTE: SAPUCCI (2001)

2.3 RELEVÂNCIA DO VAPOR D'ÁGUA

O vapor d'água é uma variável de grande importância para a manutenção da vida terrestre, como parte do efeito estufa da atmosfera ao absorver a radiação emitida pela superfície terrestre, participa do ciclo hidrológico e absorve parte da radiação solar no infravermelho (CAMPOS, 2018). O vapor d'água participa ativamente nos processos de carregamento de energia, como se pode notar na mudança de fase da água líquida para

o vapor, onde se tem a energia sendo retirada da atmosfera, e na mudança de fase do vapor para líquida, onde a energia é liberada para atmosfera. As variações temporais do PWV estão associadas com concentração de nuvens, processos convectivos e principalmente com a ocorrência dos principais fenômenos atmosféricos. Entre as diversas formas de quantificar o PWV, a técnica que emprega as observações efetuadas pelas redes de receptores GNSS (BEVIS et al. 1992; SAPUCCI et al. 2007) destaca-se por fornecer continuamente valores com alta resolução temporal (taxa de amostragem de 1 minuto) e custos relativamente baixos. Essa técnica fornece uma fonte adicional de medidas da umidade atmosférica que, devido à importância do papel que o vapor d'água desempenha na atmosfera, deve ser explorada pelas ciências atmosféricas (SIQUEIRA, 2020).

2.4 VARIABILIDADE CLIMÁTICA

Variabilidade Climática refere-se ao desvio de estatísticas climáticas durante um dado período de tempo a longo prazo, em relação ao calendário do clima correspondente ao mesmo período, ou seja, oscilações periódicas no clima. (PEREIRA, 2007) Deste modo, descreve como o clima, durante um período de tempo comparativamente curto, varia de médias climáticas a longo prazo.

Embora a variabilidade seja uma componente conhecida da dinâmica climática, seu impacto, mesmo dentro de limites esperados, pode ter reflexos significativos nas mais diversas atividades.

2.5 PRECIPITAÇÃO

Admita-se por precipitação a água proveniente do vapor de água da atmosfera depositada na superfície terrestre sob qualquer forma: chuva, granizo, neblina, neve, orvalho ou geada. Para que se forme a precipitação é necessário que as nuvens sejam inteiramente compostas de gotículas de água líquida e precisam conter gotículas com diâmetros maiores que $20\mu m$.

Os tipos de precipitação são:

- Precipitações ciclônicas ou frontais: compreendem a maior parte do volume de água precipitado em uma bacia. Pode ocorrer por vários dias, apresentando pausas com chuviscos. Longa duração e média/forte intensidade, podendo ser acompanhadas de ventos fortes.
- Precipitações orográficas: muito efetiva em causar precipitação numa mesma área ou região, ano após ano, ou mesmo continuamente durante longos períodos de tempo. São comuns nas regiões montanhosas próximas ao mar. Baixa intensidade e longa duração.
- Precipitações convectivas: podem variar de leve a pesadas, dependendo das condições de umidade e do contraste atmosférico. Tempestades com trovões, que despejam grande volume de água em curto período de tempo e sobre uma área relativamente pequena.

A chuva é quantificada em termos de volume de água por unidade de área considerando-se um determinado período de tempo. A unidade mais utilizada é a de milímetros, que corresponde a espessura da lâmina d'água formada ao distribuir 1 litro d'água sobre 1 m² de superfície. Na grande maioria das estações meteorológicas no Brasil é utilizado o aparelho chamado de pluviômetro.

2.6 ESTIAGEM E SECA

As estiagens e as secas a depender de sua magnitude podem trazer inúmeras consequências que podem desestruturar a vida nas regiões onde ocorrem. As estiagens são consideradas um dos desastres naturais de maior ocorrência e impacto em nosso planeta (GONÇALVES, 2004). Diferente de alguns abalos sísmicos, por exemplo os terremotos ou de períodos chuvosos com grandes inundações, a estiagem é um fenômeno que pode ocorrer durante um tempo muito mais longo e sua extensão pode abranger grandes áreas. A influência das estiagens e secas afetam a distribuição da água alterando o comportamento de forma marcante da agricultura, da produção de energia elétrica e da pecuária, entre outros.(FERREIRA, 2007).

Os termos estiagem e seca apresentam definições diversas, de acordo com a área de conhecimento que as estuda. O termo estiagem pode ser definido como a falta

prolongada de chuvas para uma determinada temporada que pode levar a uma condição de seca. Assim, as estiagens podem ser entendidas como um tipo de seca mais branda, que atingem determinadas áreas. Já a seca é um fenômeno natural que não possui uma definição rigorosa e universal. Pode ser entendida como deficiência em precipitação (chuva) por um extenso período de tempo, resultando em escassez hídrica com repercussões negativas significativas nos ecossistemas e nas atividades socioeconômicas.(EMBRAPA, 2015).

2.7 CORRELAÇÃO DE PEARSON

O coeficiente de correlação de Pearson (r) ou coeficiente de correlação produto-momento ou o r de Pearson mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas.

O coeficiente de correlação de Pearson é definido como:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

Onde:

- x_1, x_2, \dots, x_n os valores de um conjunto de medidas em indivíduos $i = 1, \dots, n$, e y_1, y_2, \dots, y_n as outras medidas correspondentes.

Ele quantifica a força de associação linear entre duas variáveis, e portanto descreve quão bem uma linha reta se ajustaria através de nuvem de pontos.

É um índice adimensional com valores situados entre -1,0 e 1,0, que considera a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. Este coeficiente, normalmente representado pela letra "r", assume apenas valores entre -1 e 1.

- $r = 1$ significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.
- $r = -1$ significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis - Isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui.

- $r = 0$ significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

De acordo com Diggle & Ribeiro (2007) os valores entre -1 e 1 pode ser interpretado como:

TABELA 5: INTERPRETAÇÃO DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.

| Valor de p (+ ou-) | Interpretação |
|----------------------|------------------------|
| 0,00 a 0,19 | Correlação bem fraca |
| 0,20 a 0,39 | Correlação fraca |
| 0,40 a 0,69 | Correlação moderada |
| 0,70 a 0,89 | Correlação forte |
| 0,90 a 1,00 | Correlação muito forte |

FONTE: AS AUTORAS (2021).

3.MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A presente pesquisa, baseia sua análise nos dados de vapor d' água coletados pelas estações GPS de monitoramento contínuo localizadas no estado do Paraná, nos municípios de Curitiba, Maringá, Guarapuava, Cascavel e Foz do Iguaçu. Todas as estações são pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) como se observa no mapa apresentado na figura 07. As estações estão cadastradas no IBGE com os respectivos nomes e localização: UFPR em Curitiba, PRMA em Maringá, PRGU em Guarapuava, PRCV em Cascavel e ITAI em Foz do Iguaçu. Nesta etapa foi retirada a estação PRUR, do município de Umuarama, pois a mesma começou a funcionar em 2018, e para esta pesquisa definiu-se dados GPS de no mínimo 5 anos.

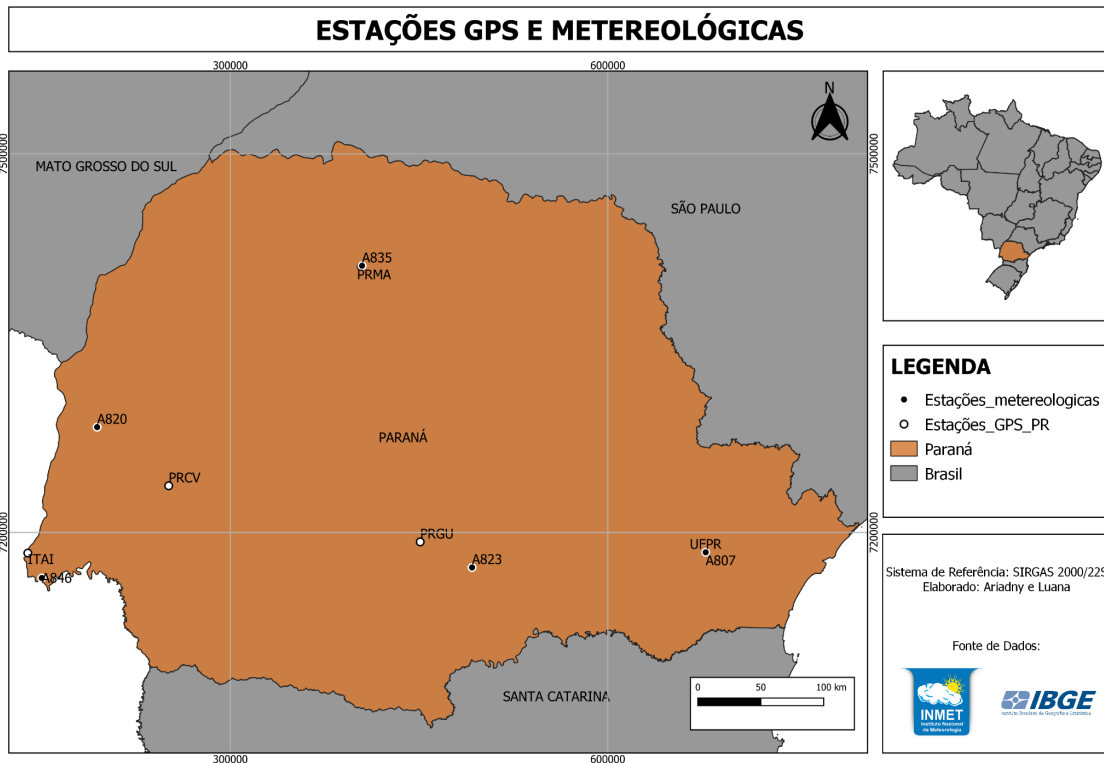
Os dados de precipitação foram coletados no site do INMET, no entanto na figura 08 observa-se que algumas estações meteorológicas não estão localizadas no mesmo lugar que as estações GNSS da RBMC. Como a distância entre a estação GPS e a estação meteorológica não ultrapassou a distância de 100 km, elas foram adotadas para este estudo.

TABELA 6: RAIOS ENTRE AS ESTAÇÕES DE ESTUDO.

| Estação GPS | Estação INMET | Distância entre as estações (km) |
|--------------------|----------------------|---|
| UFPR | A807 | 0,052 |
| PRMA | A835 | 0,798 |
| PRCV | A820 | 77,626 |
| PRGU | A823 | 49,61 |
| ITAI | A846 | 22,016 |

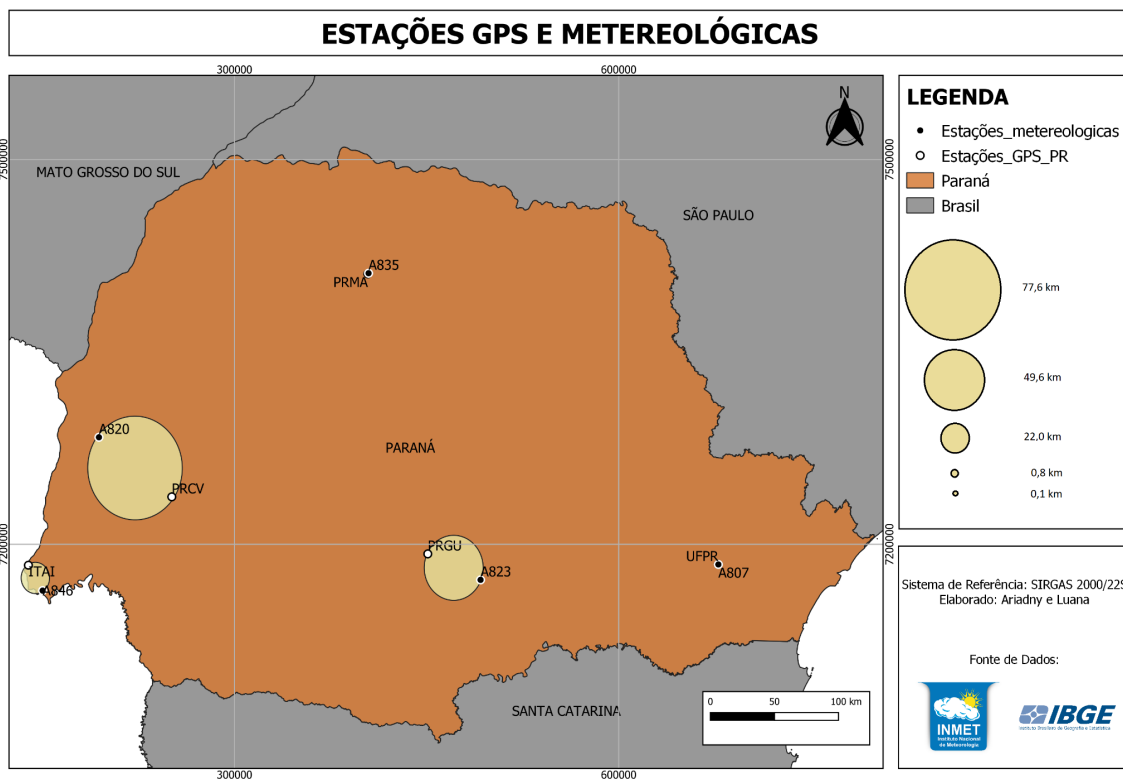
FONTE: AS AUTORAS (2021).

FIGURA 07 : LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES



FONTE: AS AUTORAS (2021).

FIGURA 08 :DISTÂNCIA ENTRE ESTAÇÕES GPS E METEOROLÓGICAS



FONTE: AS AUTORAS (2021).

3.2 INMET

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, é responsável por prover informações meteorológicas à sociedade brasileira. O Sistema de Coleta e Distribuição de Dados Meteorológicos do Instituto (temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, precipitação, entre outras variáveis) é dotado de estações de sondagem de ar superior (radiossonda); estações meteorológicas de superfície, operadas manualmente; e a maior rede de estações automáticas da América do Sul.

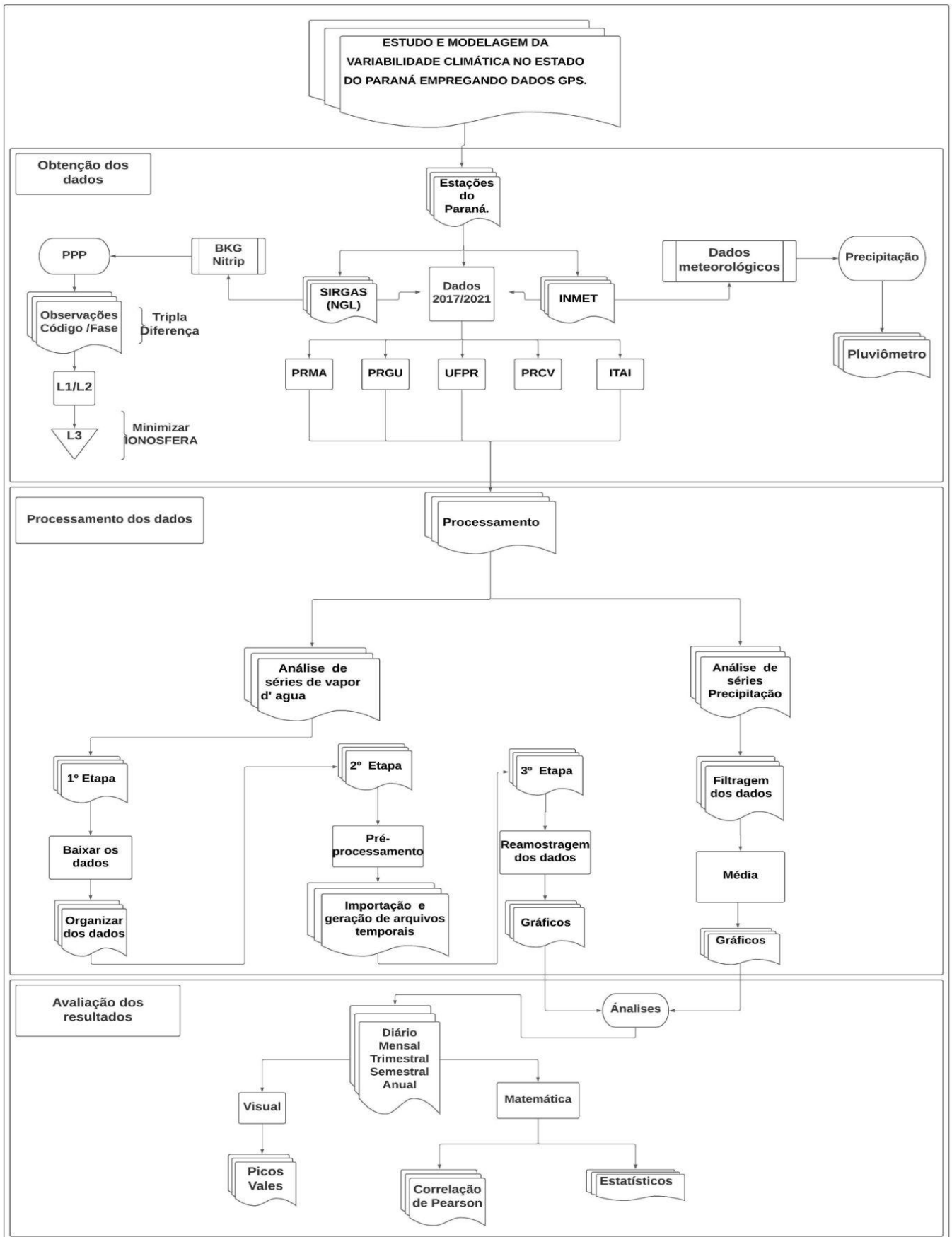
3.3 RBMC

Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS é o conjunto de estações geodésicas, equipadas com receptores GNSS de alto desempenho, que proporcionam, uma vez por dia ou em tempo real, observações para a determinação de coordenadas.

3.4 METODOLOGIA

Esta seção abordará os métodos e software empregados para coleta de dados e processamentos. Os passos descritos foram elaborados de modo a viabilizar o tempo necessário para o estudo. O Fluxograma (Figura 09) apresenta as etapas do estudo deste trabalho, distribuídas em três grupos sendo: obtenção dos dados, processamento dos dados e avaliação dos resultados.

FIGURA 09: FLUXOGRAMA DO ESQUEMA GERAL DO TRABALHO.



FONTE: AS AUTORAS (2021).

Para cada estação foram realizados 5 experimentos, equivalentes à análise diária, mensal, trimestral, semestral e anual.

O grupo de obtenção dos dados consiste em três etapas, a primeira sendo a aquisição dos dados do site oficial da NGL (*Nevada Geodetic Laboratory*). Estes dados, através de uma parceria/convênio com SIRGAS e os diferentes países sul-americanos, começaram a ser processados desde 1996, pelo PPP com intervalos de 15 min, fornecendo arquivos em formato SINEX. Esta técnica de posicionamento requer a utilização da pseudodistância e fase das ondas portadoras L1 e L2, esta combinação permite a redução dos efeitos de primeira ordem da ionosfera. Depois de minimizados os demais erros, o atraso troposférico pode ser estimado a partir das observações GPS. Estas estimativas, além de serem utilizadas para avaliar os modelos que tratam dos efeitos da troposfera, podem ser convertidas em estimativas do vapor d'água. Os dados para as séries de precipitação foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, os dados meteorológicos de precipitação são medidos através de equipamentos denominados de pluviômetros para mais informações acessar o site do INMET.

O segundo grupo consiste no processamento onde a importação dos dados é realizada, sendo dados para a análises de vapor de água e para a análise de séries de precipitação. A primeira é subdividida em três: sendo que a primeira etapa consiste em baixar os dados e organizar os mesmo, na segunda etapa ocorre o pré-processamento, fazendo as importações e geração de arquivos temporais, e na última etapa é realizada a amostragem dos dados através de gráficos de séries temporais. Para a análise de séries de precipitação realizou-se uma filtragem de dados, seguida de cálculos estatísticos (médias, máximos e mínimos) e finalmente na geração de gráficos de séries temporais.

O terceiro grupo subsiste na avaliação dos resultados através dos gráficos das séries, diários, mensais, trimestrais, semestrais e anuais. A análise ocorre em duas classes, a primeira de forma visual onde é avaliado os picos e vales de ambas as séries para os mesmos períodos, e a segunda classe sendo de forma matemática onde divide-se em análise de correlação de Pearson e cálculos estatísticos.

3.5 SOFTWARE

Os software utilizados neste trabalho foram:

- PyCharm: é um ambiente de desenvolvimento integrado usado em programação de computadores, especificamente para a linguagem Python.
- Anaconda é o gerenciador de pacotes, de ambiente e distribuição Python grátis, com uma coleção de mais de 1.500 pacotes de código aberto com suporte gratuito da comunidade .
- Excel: é um editor de planilhas produzido pela Microsoft, possuindo recursos e uma interface intuitiva e capacitadas ferramentas de cálculo e de construção de tabelas
- Qgis: é um software livre com código-fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados.
- Matlab: O MATLAB (do inglês Matrix Laboratory) é um software de computação numérica de análise e visualização de dados. Embora seu nome signifique Laboratório de Matrizes, seus propósitos atualmente são bem mais amplos.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção será apresentada a análise realizada visando a determinação da correlação da variabilidade climática com dados GPS empregadas no presente trabalho. Ainda é abordada nessa seção as análises e resultados da correlação de Pearson, conforme descritos no na seção 3.4.

Seguindo a metodologia descrita na seção 3.0 foram obtidos os gráficos de vapor d'água e gráficos de precipitação para as cinco estações (UFPR, PRMA, PRGU, PRCV e ITAI) seguidos da análise de correlação de Pearson. Os dados foram avaliados entre os anos de 2017 e 2021.

4.1 ESTAÇÃO UFPR

Foram gerados para a estação UFPR os gráficos 01 ao 10. Eles totalizam 5 experimentos sendo: diário, mensal, trimestral, semestral e anual. O eixo horizontal apresenta os anos de estudos, e no eixo vertical tem-se o vapor d' água e a precipitação em milímetros.

Através das séries se nota que os dados do vapor de água e os dados de precipitação tem uma correlação direta. Os picos (vermelho) e vales (roxo) ocorrem na mesma época para os dados de vapor d' água e precipitação. Para demonstrar esse comportamento os 5 experimentos são analisados na sequência:

- Série Diária

O gráfico 01 e 02 foram gerados para as observações diárias para o ano de 2017, para a precipitação mostra que os menores valores se encontram nos dias referentes aos meses de julho e agosto (A) chegando a valores de precipitação próximos a 0,00 mm, já para o valor de vapor d'água os valores encontram-se próximos a 5,00 mm. Os maiores valores destacados encontram-se nos dias referentes aos meses de maio e junho (F) sendo cerca de 5,00 mm para a precipitação e de 38,00 mm para o vapor d'água

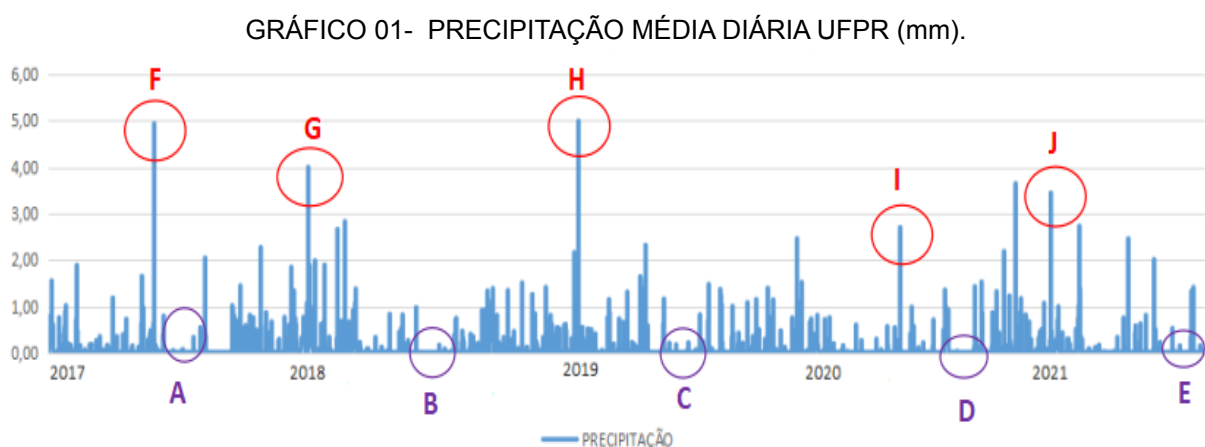
Para o ano de 2018 os menores valores se encontram nos dias referentes aos meses de julho e agosto (B) chegando a valores de precipitação próximos a 0,00 mm e de vapor d'água próximo a 4,00 mm. Os maiores valores encontrados para a precipitação estão nos dias do mês de janeiro (G) com valores próximos a 4,00 mm e de 45,00 mm, para o vapor d'água.

Para o ano de 2019 o comportamento é similar aos anos anteriores, sendo os menores valores encontrados nos dias referentes aos meses de julho (C) e agosto próximos a 0,00 mm tanto para a precipitação quanto para o vapor d'água. E os dias que apresentam maiores valores são no mês de janeiro (H) sendo que para precipitação obteve-se cerca de 5,00 mm e acima de 45,00 mm para o vapor d'água.

Para o ano de 2020, os menores valores de precipitação encontram-se nos dias referentes aos meses de agosto e setembro (D) tendo valores próximos a 0,00 mm e de vapor de água menor que 0,50 mm. O maior valor em destaque está nos dias referentes aos meses de maio e junho (I) tendo valores próximos a 3,00 mm para precipitação, e cerca de 35,00 mm para vapor d'água.

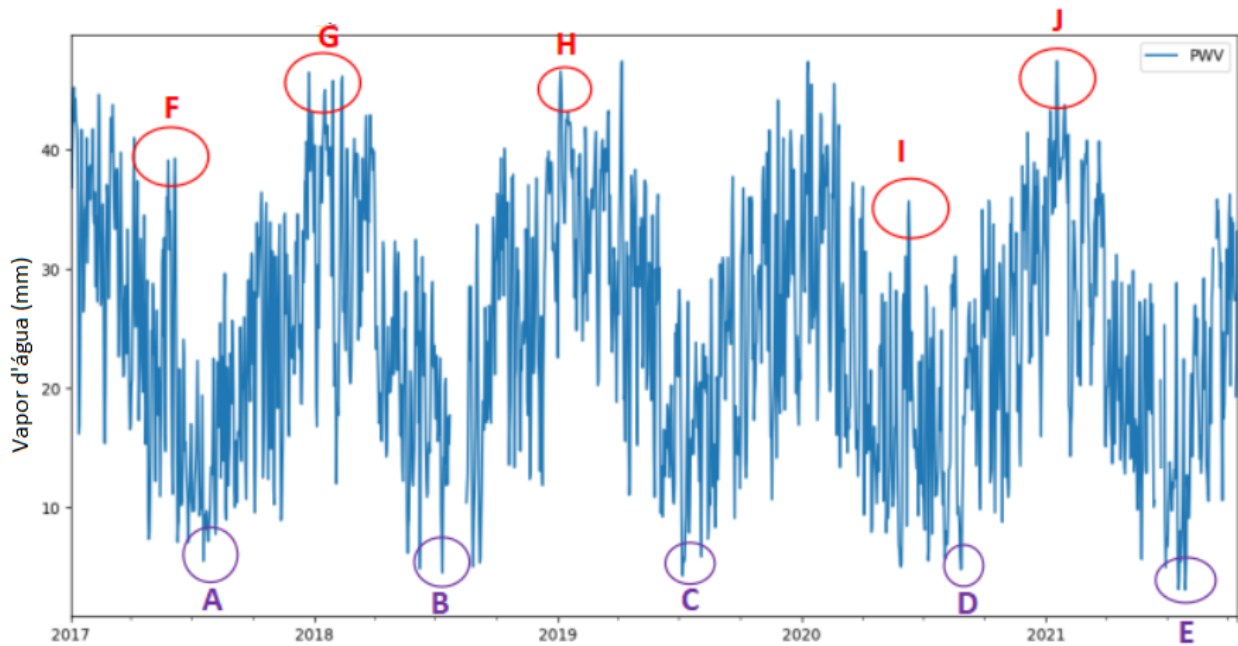
Para o ano de 2021, os menores valores em destaque estão nos dias dos meses de julho e agosto (E) com valores de precipitação e vapor d'água próximos a 0,00 mm. Para os maiores valores destacam-se os dias do mês de janeiro (J) tendo valores de acima de 3,00 mm e de 45,00 mm para precipitação e vapor d'água, respectivamente.

Apesar de ser possível fazer uma análise do gráfico diário, os dias e valores acabam sendo estimados, visto que, visualmente não fica claro o dia em que ocorrem os eventos.



FONTE: AS AUTORAS (2021)

GRÁFICO 02-VAPOR D' ÁGUA DIÁRIA UFPR (mm).



FONTE: AS AUTORAS (2021).

- Série Mensal

Os gráfico 03 e 04 indicam os valores mensais, esse dado é o mais utilizado no meio de estudos meteorológicos é o que apresenta uma visualização de fácil entendimento o que torna prático e eficiente a análise dos dados para saber onde estão os meses que houve maior índice de estiagem, assim como os meses que se tem maiores índices de precipitação e/ou vapor d'água podendo indicar épocas de cheia, por exemplo.

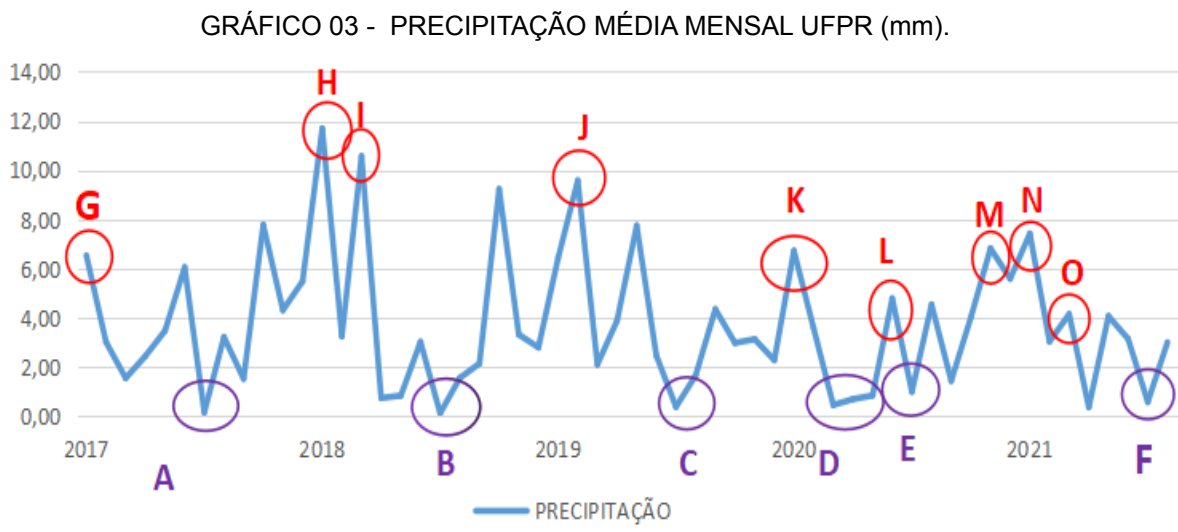
Dando início a análise dos gráficos mensais, para o ano de 2017 o menor valor encontrado para a precipitação está no mês de julho (A) com cerca de 0,10 mm e com cerca de 12,00 mm de vapor d'água para o mesmo período. O maior valor para a precipitação e vapor d'água encontra-se no mês de janeiro (G) com cerca de 07,00 mm e 36,00 mm, respectivamente.

Para o ano de 2018, o menor valor encontrado para a precipitação e para o vapor d'água ocorreu no mês de julho (B) sendo cerca de 0,14 mm e de 16,00 mm, respectivamente. Os maiores valores ocorreram nos meses de janeiro (H) e março (I) sendo para a precipitação cerca de 11,90 mm e de 11,00mm e para o vapor d'água 36,00 mm e 37,00 mm, respectivamente.

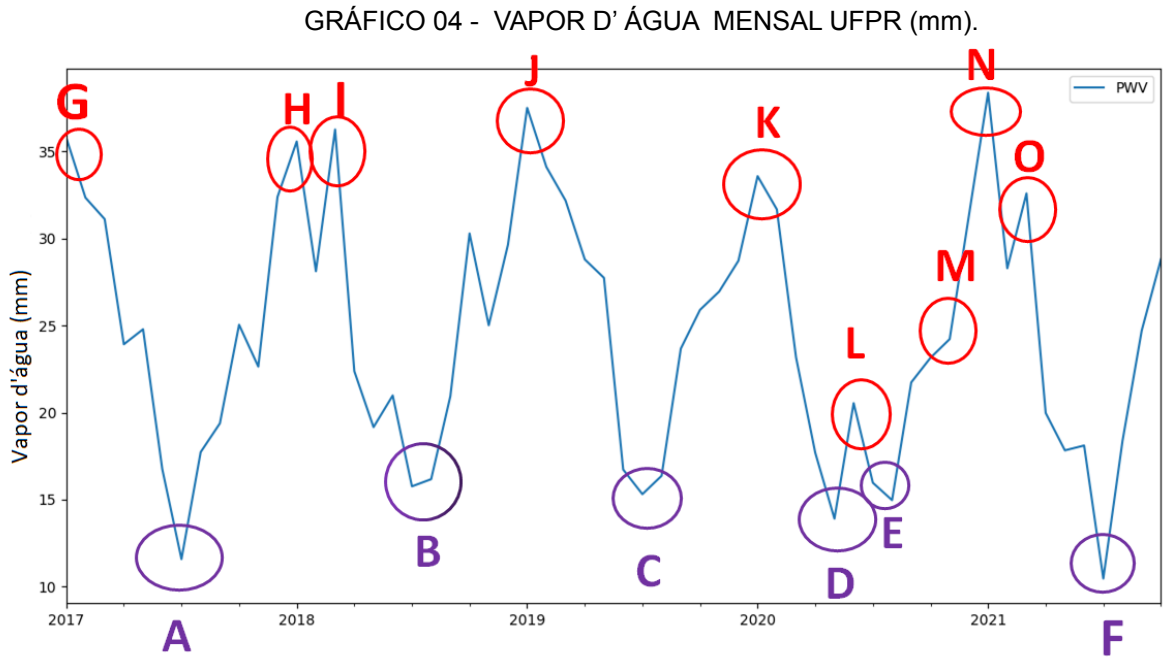
No ano de 2019 o menor valor encontra-se no mês de julho (C), sendo abaixo de 0,50 mm de precipitação e de cerca de 15,00 mm de vapor d'água. O maior valor para a precipitação e para o vapor d'água ocorre no mês de janeiro (J) com cerca de 10,00 mm e de 40,00 mm, respectivamente.

Para o ano de 2020 verifica-se que os menores valores ocorreram nos meses de março, abril e maio (D) e no mês de julho (E) sendo para precipitação valores abaixo de 1,00 mm e para o vapor d'água inferiores a 15,00 mm. Os maiores valores ocorreram nos meses de junho (L) e de novembro (M) sendo cerca de 5,00 mm e 7,00 mm de precipitação e de 21,00 mm e 24,00 mm de vapor d'água.

Por fim para o ano de 2021 tem-se para o mês de julho (F) o menor valor de precipitação, cerca de 0,50 mm e para o vapor d'água, cerca de 11,00 mm. Os maiores valores ocorreram nos meses de janeiro (N) sendo cerca de 7,90 mm e março (O) com cerca 4,00 mm de precipitação, e de vapor d'água sendo cerca de 40,00 mm e 33,00 mm, respectivamente.



FONTE: AS AUTORAS (2021).



FONTE: AS AUTORAS (2021).

- Série trimestral

Com base nos gráficos trimestral e semestral é possível fazer análises voltadas para as estações do ano (primavera, verão, outono e inverno), o que é de suma importância para agricultura, para fins de plantio e colheita. Os meteorologistas costumam observar qual o trimestre mais chuvoso e qual o mais seco. Para ficar de fácil entendimento, os trimestres irão englobar os meses: janeiro, fevereiro e março (1.trimestre); abril, maio e junho (2.trimestre); julho, agosto e setembro (3.trimestre) e outubro, novembro e dezembro (4.trimestre).

Analisando-se os gráficos 05 e 06 percebe-se que para o ano de 2017 o menor valor encontrado para a precipitação está no 3.trimestre (A) com cerca de 2,00 mm e vapor d'água de 18,00 mm. Os maiores valores se encontram no 1.trimestre (F) atingindo valores próximos a 3,00 mm de precipitação e superiores a 35,00 mm de vapor de água.

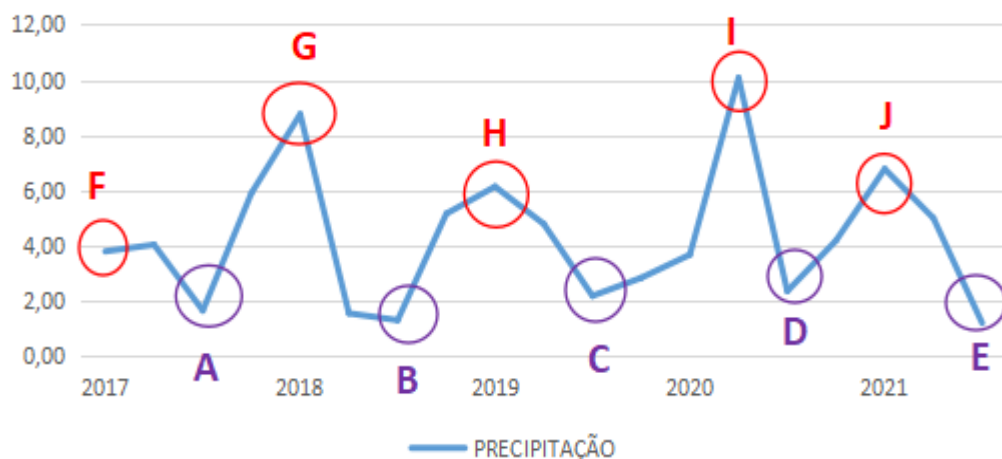
Para o ano de 2018, o menor valor também está no terceiro trimestre (B) com cerca de 1,00 mm de precipitação e de 19,00 mm de vapor d'água. E os maiores valores se encontram no 1.trimestre (G) com cerca de 9,00 mm de precipitação e de 30,00 mm de vapor d'água.

Para o ano de 2019 percebe-se que o menor valor está no 3. trimestre (C) com cerca de 2,00 mm de precipitação e de 20,00 mm de vapor d'água. E o maior valor no 1. trimestre (H) com cerca de 6,00 mm e de 32,00 mm, respectivamente.

Para o ano de 2020, o menor valor é visualizado no 3. trimestre (D) com cerca de 2,00 mm de precipitação e de 16,00 mm de vapor d'água. E o maior valor no 1. trimestre (I) com cerca de 10,00 mm e de 30,00 mm, respectivamente.

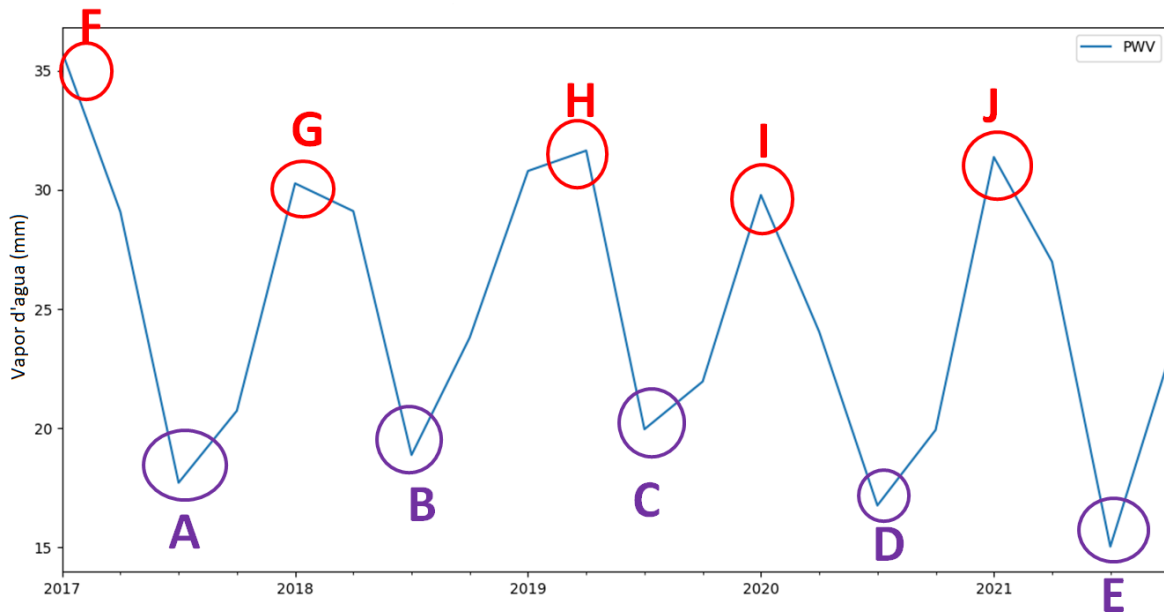
Para o ano de 2021 verifica-se, assim como nos outros anos, que no 3. trimestre (E) com cerca de 1,00 mm de precipitação e de 15,00 mm de vapor d'água é encontrado o menor valor. E o maior valor no primeiro trimestre (J) com cerca de 7,00 mm e de 32,00 mm respectivamente.

GRÁFICO 05 - PRECIPITAÇÃO MÉDIA TRIMESTRAL UFPR (mm).



FONTE: AS AUTORAS (2021).

GRÁFICO 06 - VAPOR D'ÁGUA TRIMESTRAL UFPR (mm).

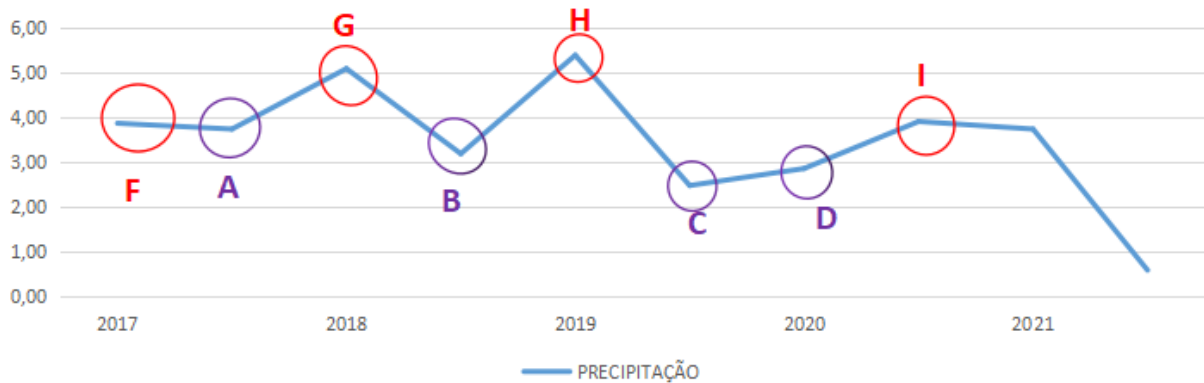


FONTE: AS AUTORAS (2021)

- Série semestral

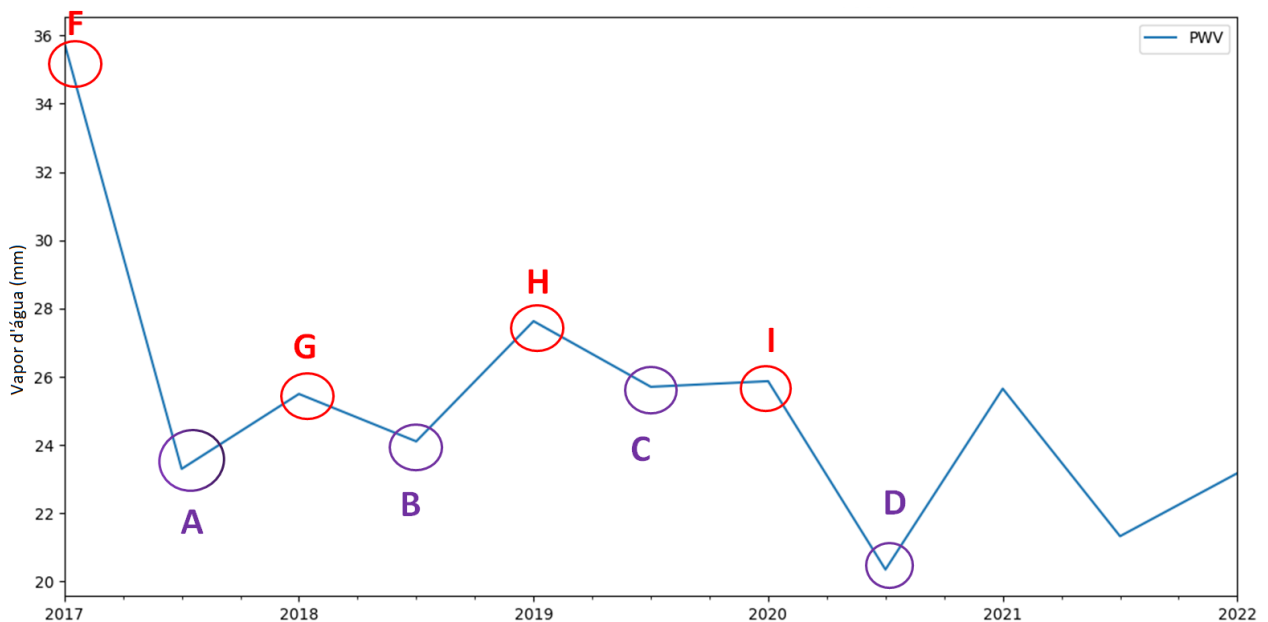
Os dados semestrais são visualizados nos gráficos 07 e 08 para os anos de 2017, 2018 e 2019, sendo que os menores valores estão no 2. semestre com valores para precipitação entre 2,00 mm e 4,00 mm, e para o vapor d'água com cerca de 20,00 mm a 25,00 mm. Já o maior valor encontra-se nos 1. semestres com valores entre 4,00 mm e 6,00 mm para precipitação e 25,00 mm e 35,00 mm para vapor d'água. No ano de 2020 percebe-se que acontece o contrário, os menores valores ocorrem no 1. semestre sendo cerca de 3,00 mm de precipitação e de cerca de 20,00 mm de vapor d'água. Os maiores valores são de 4,00 mm e de 25,00 mm, respectivamente. Para o ano de 2021, tem-se dados de precipitação integral somente para os primeiros 6 meses do ano, já que o INMET para este ano forneceu somente dados até o mês de agosto.

GRÁFICO 07- PRECIPITAÇÃO MÉDIA SEMESTRAL UFPR (mm).



FONTE: AS AUTORAS(2021)

GRÁFICO 08 -VAPOR D' ÁGUA SEMESTRAL UFPR (mm).

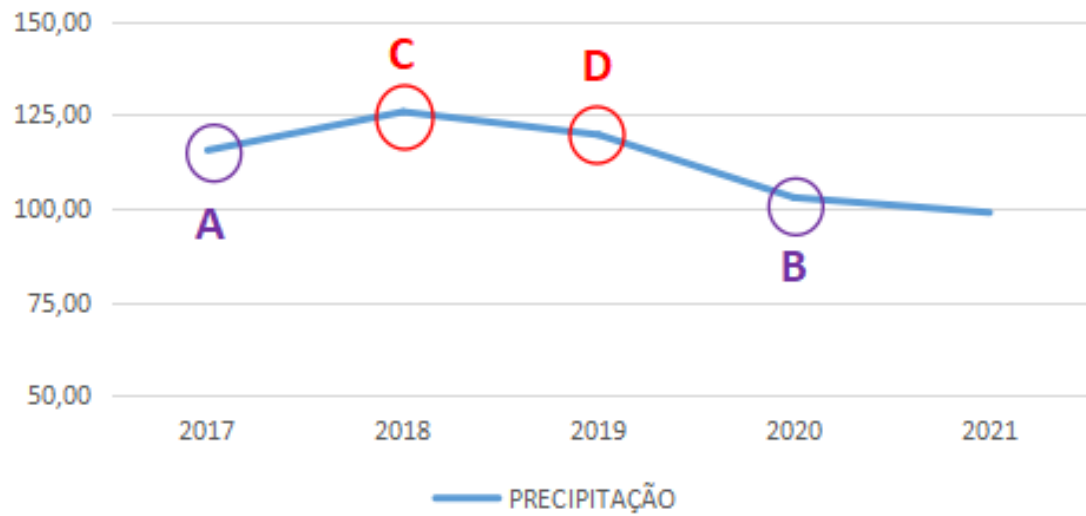


FONTE: AS AUTORAS(2021)

- Série anual

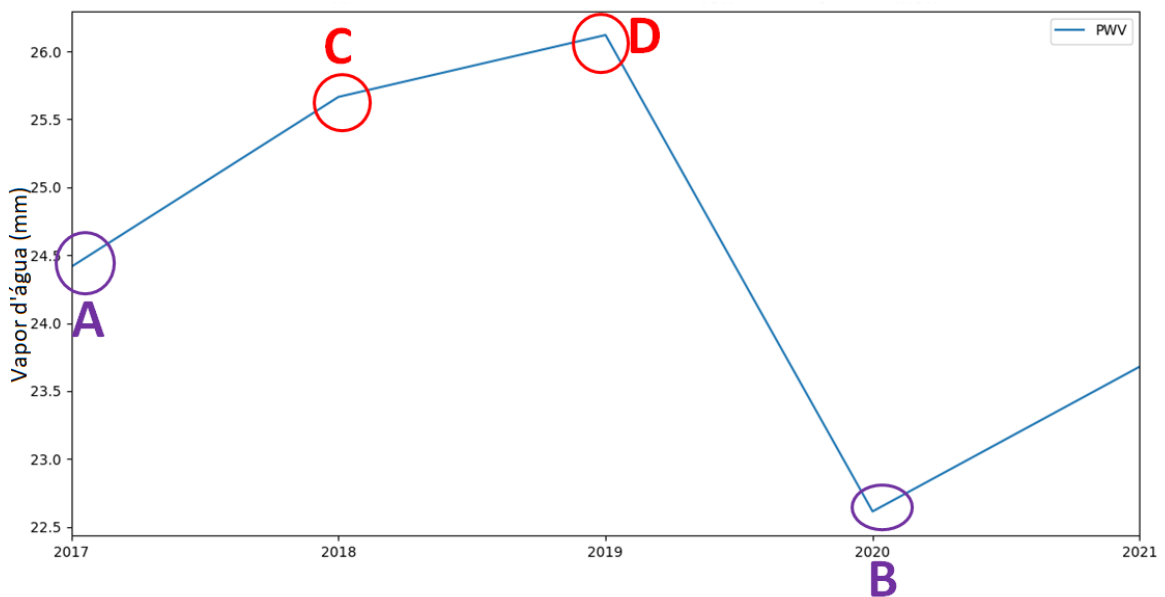
Mediante uma análise dos gráficos 09 e 10 verifica-se que no ano de 2020, Curitiba, local da estação UFPR, sofreu uma grande estiagem tendo sua média anual de precipitação em cerca de 105,00 mm e de 22,7 mm de vapor d'água. Nos anos de 2018 e 2019, os índices de precipitação e vapor d'água foram os maiores, indicando para o ano de 2018 cerca de 125 mm e 25,7 mm, respectivamente; e para o ano de 2019 cerca de 120 mm e 26,2 mm, respectivamente.

GRÁFICO 09 - PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL UFPR (mm).



FONTE: AS AUTORAS(2021)

GRÁFICO 10 - VAPOR D' ÁGUA ANUAL UFPR (mm).



FONTE: AS AUTORAS(2021)

4.1.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA UFPR

Nos Gráficos 11 e 12 e Tabelas 07 e 08, apresentam-se os valores referentes à média, mínimo, máximo para a precipitação e vapor d' água.

TABELA 6 - DADOS ESTATÍSTICOS UFPR - PRECIPITAÇÃO

| UFPR PRECIPITAÇÃO (mm) | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|
| Ano | Média | Minimo | Máximo |
| 2017 | 115,62 | 5,40 | 233,40 |
| 2018 | 125,87 | 4,20 | 362,60 |
| 2019 | 119,74 | 12,20 | 287,40 |
| 2020 | 102,97 | 14,60 | 211,60 |
| 2021 | 98,98 | 11,60 | 230,20 |

FONTE: AS AUTORAS(2021)

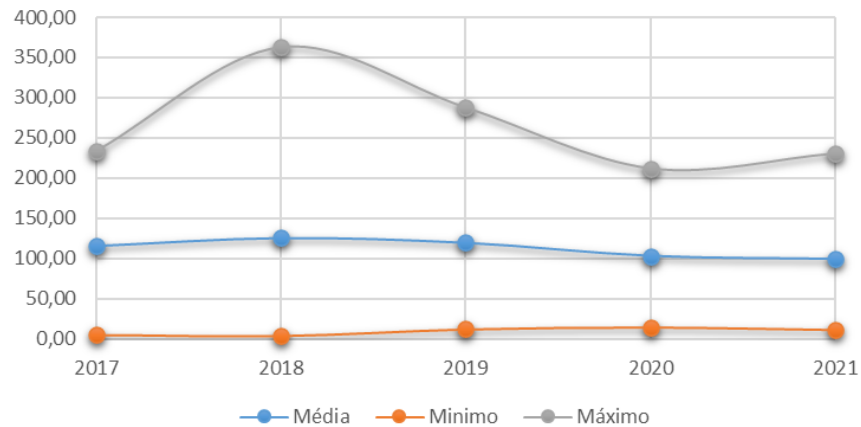
TABELA 7 - DADOS ESTATÍSTICOS UFPR - VAPOR D'ÁGUA

| UFPR - VAPOR D'ÁGUA (mm) | | | |
|--------------------------|-------|--------|--------|
| Ano | Média | Minimo | Máximo |
| 2017 | 25,29 | 11,58 | 35,79 |
| 2018 | 25,02 | 15,76 | 36,25 |
| 2019 | 26,77 | 12,16 | 37,50 |
| 2020 | 22,94 | 13,91 | 33,58 |
| 2021 | 23,00 | 10,47 | 38,37 |

FONTE: AS AUTORAS(2021)

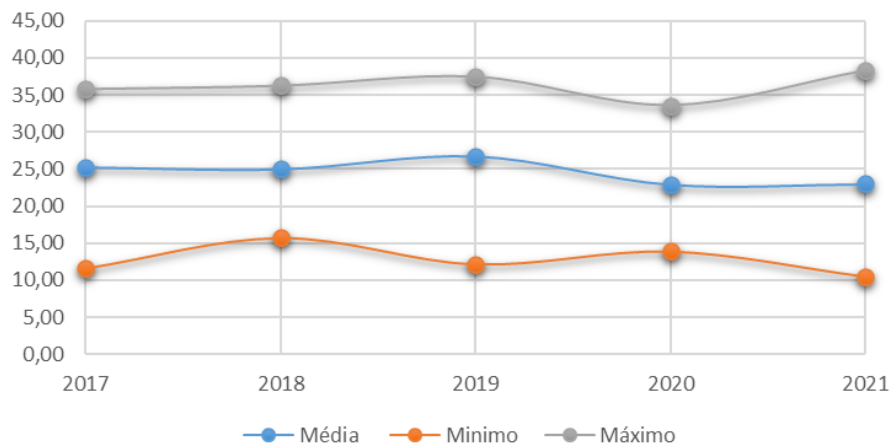
O ano de 2021 apresenta-se como o ano em que se obteve a menor média de precipitação com 98,98 mm, seguido pelo ano de 2020 com 102,97 mm, ano de 2017 com 115,62 mm, ano de 2019 com 119,74 mm e ano de 2018 com 125,87 mm. Porém ressalta-se que o ano de 2021 contém dados apenas até o mês de agosto, enquanto que os outros anos possuem dados dos 12 meses. Levando-se em consideração este fato há uma probabilidade do ano de 2020 ser o ano com a menor média de precipitação. Quando se analisa os valores das médias para os dados de vapor d'água verifica-se que o ano com o menor índice é o ano de 2020 com 22,94 mm, seguindo-se os anos de 2021 com 23,00 mm; 2018 com 25,02 mm; 2017 com 25,29 mm e por fim o ano de 2019 com 26,77 mm. Por meio destes resultados constata-se que os anos de 2020 e de 2021 são os que apresentam menores valores para precipitação e vapor d'água indicando desta forma a estiagem.

GRÁFICO 11 - DADOS ESTATÍSTICOS UFPR - PRECIPITAÇÃO (mm).



FONTE: AS AUTORAS (2021)

GRÁFICO 12 - DADOS ESTATÍSTICOS UFPR - VAPOR D'ÁGUA (mm).



FONTE: AS AUTORAS (2021)

4.1.2 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA - UFPR

O coeficiente de correlação de Pearson é um coeficiente usado na estatística descritiva. Na tabela 08 percebe-se que há uma correlação positiva porém fraca (0,2084) entre a precipitação e o PWV.

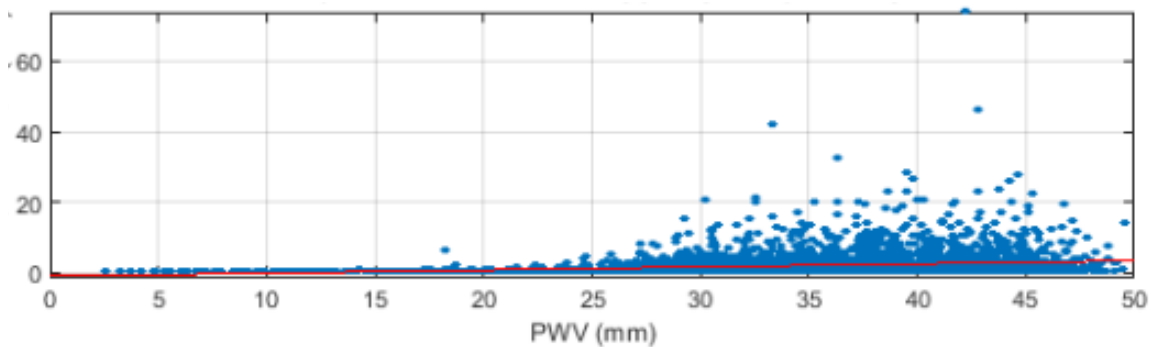
TABELA 08 - CORRELAÇÃO DE PEARSON UFPR

| UFPR | |
|--------------------------|--------|
| Corr, Precipitação - PWV | |
| 1,0000 | 0,2084 |
| 0,2084 | 1,0000 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

No (Gráfico 13) os valores da correlação de Pearson são apresentados. No eixo horizontal tem-se o PWV e no eixo vertical a precipitação. Visualiza-se a nuvem de pontos e percebe-se que a mesma não tem uma distribuição homogênea.

GRÁFICO 13 - CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA UFPR



FONTE: AS AUTORAS (2021)

4.2 ESTAÇÃO PRMA

Nos gráficos 14 e 15 são apresentados os valores de precipitação média mensal e de vapor de água médio mensal para a estação PRMA, respectivamente. Verifica-se uma correlação direta. Picos e vales ocorrem na mesma época; sendo os picos em vermelho e vales em roxo.

No ano de 2017 o mês que se teve o menor valor (vale) de precipitação foi o mês de julho (A) com 0,00 mm, e o valor obtido para o vapor d'água é de cerca de 15,00 mm. Já o maior valor (pico) foi encontrado no mês de janeiro (I) sendo 10,00 mm de precipitação e cerca de 43,00 mm de vapor d'água.

Para o ano de 2018, o menor valor encontrado para a precipitação é próximo a 0,00 mm, ocorrendo no mês de julho (B), e o valor de vapor d'água foi cerca de 15,00

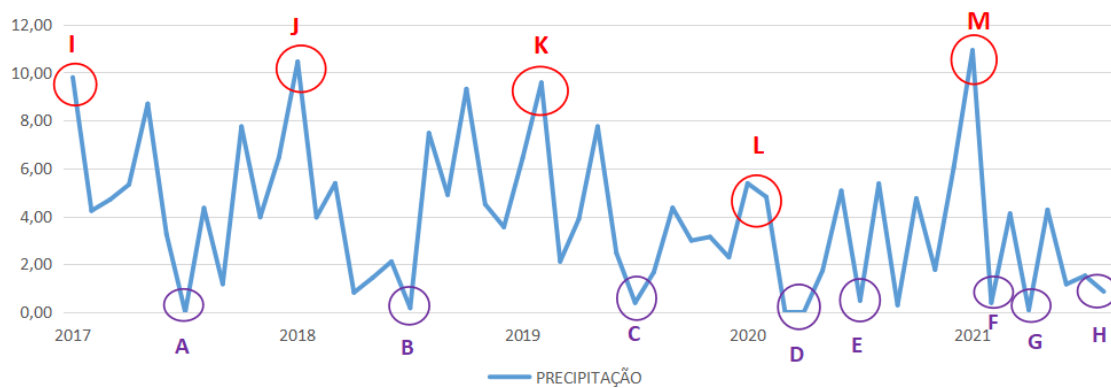
mm. Já o maior valor de precipitação encontra-se no mês de janeiro (J) com cerca de 10,00 mm, e para a mesma época o vapor d'água teve cerca de 44,00 mm.

Para o ano de 2019, o menor valor localizado para a precipitação foi no mês de julho (C) com cerca de 0,50 mm e de cerca de 18,00 mm de vapor d'água. O maior valor de precipitação foi encontrado no mês de fevereiro (K) com cerca de 9,50 mm e de 44,00 mm de vapor d'água.

Para o ano de 2020, o menor valor para a precipitação ocorreu no mês de março e abril (D) sendo de 0,00 mm, e para o vapor d'água cerca de 17,00 mm. Também se destaca o mês de julho (E) com valores inferiores a 0,50 mm de precipitação e de cerca de 19,00 mm de vapor d'água. O maior valor foi localizado no mês de janeiro (L) com cerca de 5,80 mm de precipitação, e de vapor d'água de cerca de 43,00 mm.

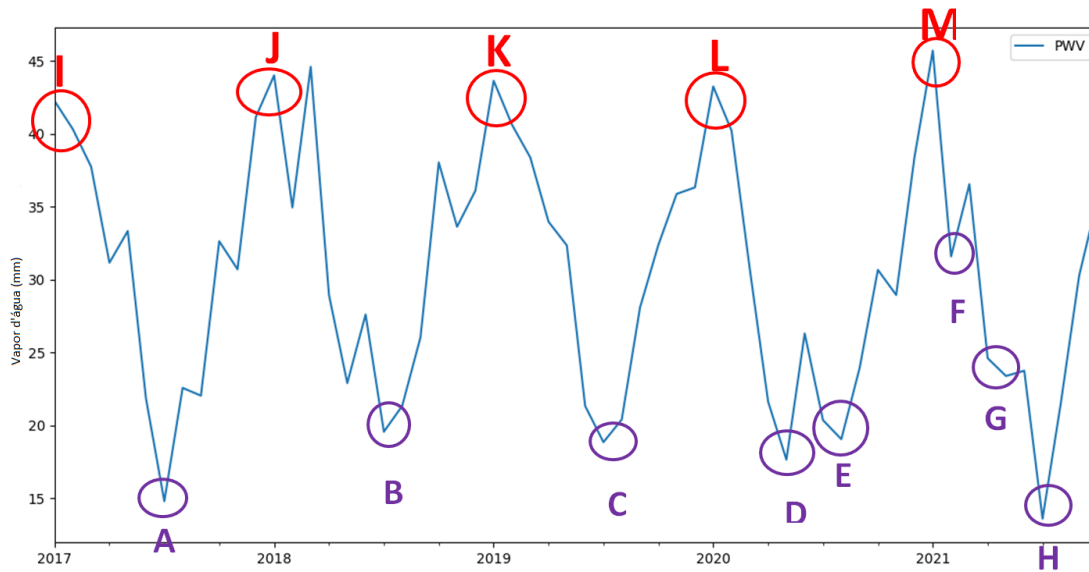
Por fim o ano de 2021, obteve-se os menores valores de precipitação nos meses de fevereiro (F) abril (G) e julho/agosto (H) sendo todos menores de 1,00 mm, os valores de vapor d'água para estes meses foi de cerca de 32,00 mm, 25,00 mm e 8,00 mm, respectivamente. O maior valor de precipitação ocorreu no mês de janeiro (M) com cerca de 11,00 mm e cerca de 45,00 mm de vapor d'água.

GRÁFICO 14 - PRECIPITAÇÃO MENSAL PRMA (mm).



FONTE: AS AUTORAS (2021).

GRÁFICO 15 - VAPOR D' ÁGUA MENSAL PRMA (mm).



FONTE: AUTORAS (2021)

4.2.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA PRMA

Nos Gráficos 16 e 17 e nas Tabelas 09 e 10, apresentam-se os valores referentes à média, mínimo, máximo para a precipitação e vapor d' água.

TABELA 09 - DADOS ESTATÍSTICOS PRMA - PRECIPITAÇÃO

| PRMA PRECIPITAÇÃO (mm) | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|
| Ano | Média | Minimo | Máximo |
| 2017 | 151,65 | 0,00 | 303,80 |
| 2018 | 137,43 | 5,40 | 324,00 |
| 2019 | 119,74 | 12,20 | 287,40 |
| 2020 | 89,15 | 0,00 | 181,60 |
| 2021 | 60,12 | 2,80 | 338,80 |

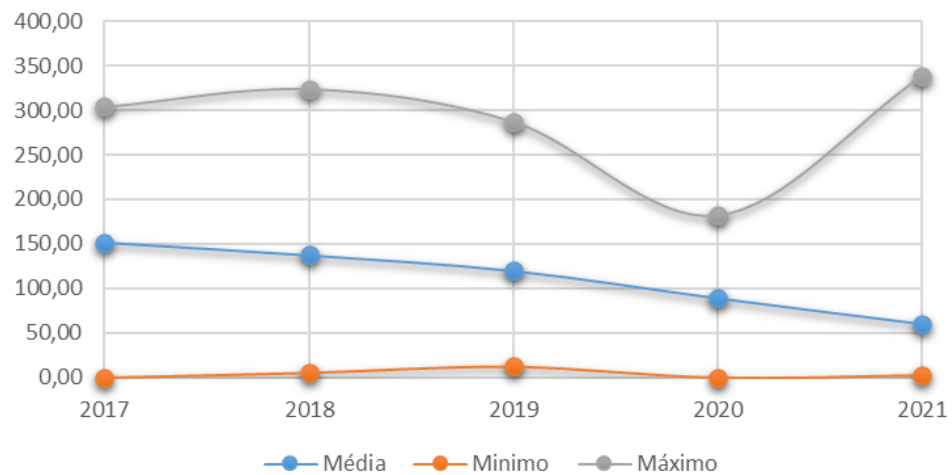
FONTE: AS AUTORAS (2021)

TABELA 10 - DADOS ESTATÍSTICOS PRMA - VAPOR D'ÁGUA

| PRMA - VAPOR D'ÁGUA (mm) | | | |
|--------------------------|-------|--------|--------|
| Ano | Média | Mínimo | Máximo |
| 2017 | 30,88 | 14,80 | 42,27 |
| 2018 | 30,06 | 19,57 | 44,60 |
| 2019 | 32,04 | 18,85 | 43,65 |
| 2020 | 28,43 | 17,65 | 43,26 |
| 2021 | 27,60 | 13,60 | 45,71 |

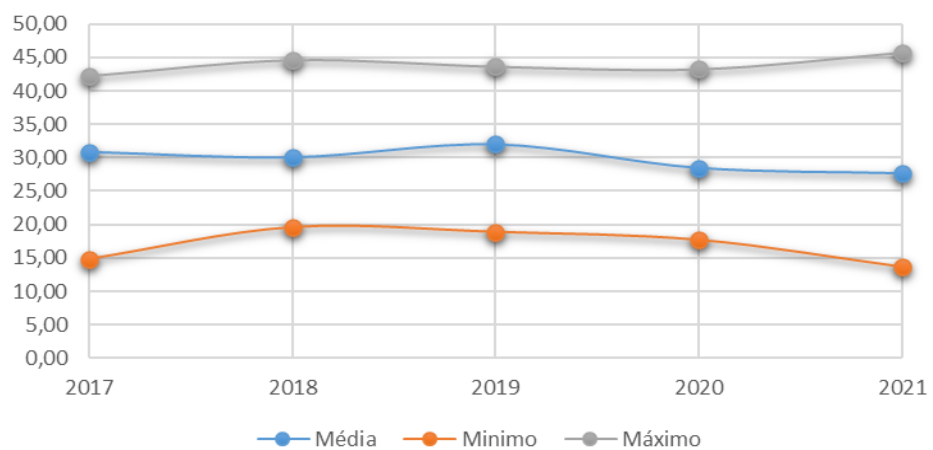
FONTE: AS AUTORAS(2021)

GRÁFICO 16 - DADOS ESTATÍSTICOS PRMA - PRECIPITAÇÃO



FONTE: AS AUTORAS (2021)

GRÁFICO 17 - DADOS ESTATÍSTICOS PRMA - VAPOR D'ÁGUA



FONTE: AS AUTORAS (2021)

Percebe-se que no ano de 2021 ocorreu a menor média de precipitação com 60,12 mm, seguido pelos anos de 2020 com 89,15 mm, 2019 com 119,74 mm, 2018 com 137,43 mm e 2017 com 151,65 mm. Ressalta-se que o ano de 2021 tem dados apenas até o mês de agosto, enquanto os outros anos possuem dados dos 12 meses. Levando-se em consideração este fato há uma probabilidade do ano de 2021 ter valores dessa variável próximos ao ano de 2020. Ao se analisar os valores das médias para os dados de vapor d'água tem-se que o ano com o menor índice é o ano de 2021 com 27,16 mm em sequência tem-se o ano de 2020 com 28,43 mm, 2018 com 30,06 mm, 2017 com 30,88 mm e por fim 2019 com 32,04 mm. Por meio destes resultados pode-se concluir que os anos de 2021 e de 2020 são os anos que apresentam menores valores para precipitação e vapor d'água indicando a estiagem.

4.2.2 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA - PRMA

Mediante a análise do valor obtido para a correlação de Pearson (0,1674) para a estação PRMA entre a precipitação e o PWV constata-se uma correlação positiva porém fraca (Tabela 11).

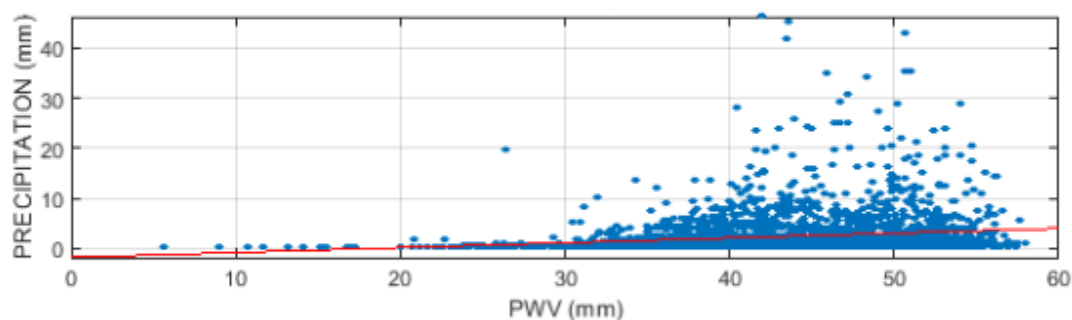
TABELA 11 - CORRELAÇÃO DE PEARSON PRMA

| PRMA | |
|--------------------------|--------|
| Corr, Precipitação - PWV | |
| 1,0000 | 0,1674 |
| 0,1674 | 1,0000 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

Por meio de uma análise visual dos valores indicados no (Gráfico 18) percebe-se que os valores não tem uma distribuição homogênea.

GRÁFICO 18 - CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA PRMA



FONTE: AS AUTORAS (2021)

4.3 ESTAÇÃO PRGU

Como realizado para as estações anteriores, apresenta-se os gráficos 19 e 20 indicando as médias mensais de precipitação e do vapor de água, respectivamente, para a estação PRGU. Verifica-se que há uma correlação direta entre eles. Picos e vales ocorrem na mesma época; sendo os picos em vermelho e vales em roxo.

Percebe-se que no ano de 2017 nos meses de junho e julho houve uma grande estiagem, tendo-se uma precipitação mínima próxima a 0,00 mm (A) e de 12 mm de vapor de água. O maior valor (picos) encontrado para a precipitação, neste ano, são próximos ao mês de maio com valores superiores a 8,00 mm quando se analisa o vapor d'água tem-se que para o mesmo período o valor é de cerca de 34,00 mm.

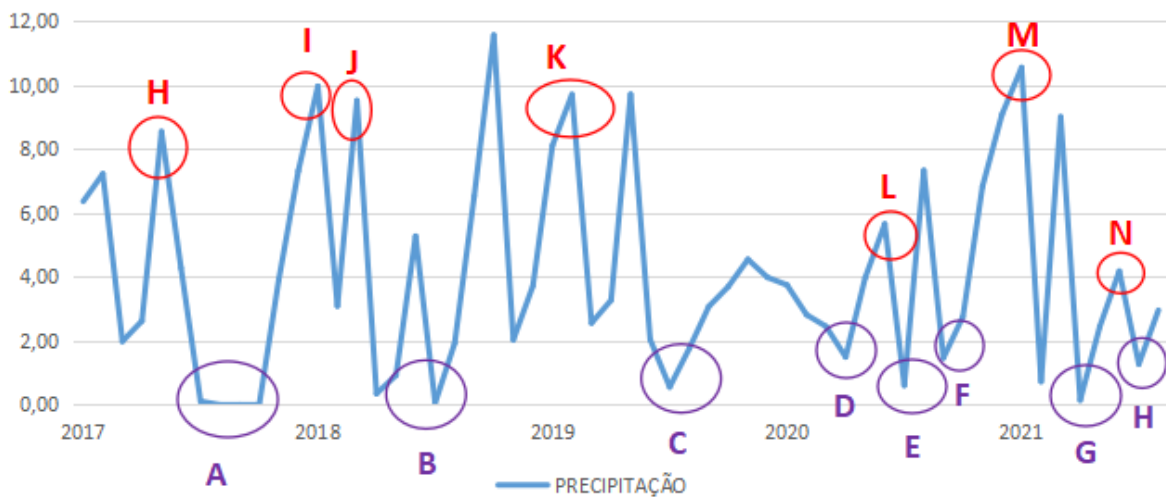
Para os os anos de 2018 e 2019 se obteve valores nos meses junho e julho inferiores a 2,00 mm para a precipitação, quando se analisa o mesmo período para o vapor d'água se verifica valores inferiores a 16,00 mm (B e C). Os maiores valores (picos) encontrados para a precipitação no ano de 2018 (I e J) são cerca de 10,00 mm para o mês de janeiro, e de cerca de 10,00 mm nos meses de abril e maio. Já para os dados de vapor d'água, para os mesmos meses, teve-se valores superiores a 34,00 mm. Já para o ano de 2019 verifica-se um pico (K) significativo próximo aos meses de janeiro e fevereiro para a precipitação com cerca de 10,00 mm e para os mesmos meses o valor de vapor d'água superior a 35,00 mm.

Para o ano de 2020 percebe-se três vales em destaque (D, E e F) na precipitação; sendo o primeiro próximo aos meses de abril e maio, o segundo próximo

aos meses de julho e agosto, terceiro próximo aos meses de setembro e outubro obtendo valores inferiores a 2,00 mm. Ao se observar o gráfico 14 de vapor d'água nota-se que há dois vales (D e E) com valores inferiores a 15,00 mm e outro (F) com valor inferior a 25,00 mm. Os maiores valores (picos) encontrados para a precipitação, neste ano, são próximos ao meses de maio e junho (L) com cerca de 5,80 mm e para o mês de dezembro (M) cerca de 11,00 mm, para os mesmos meses os valores de vapor d'água são de 21,00 mm e de 39,00 mm, respectivamente.

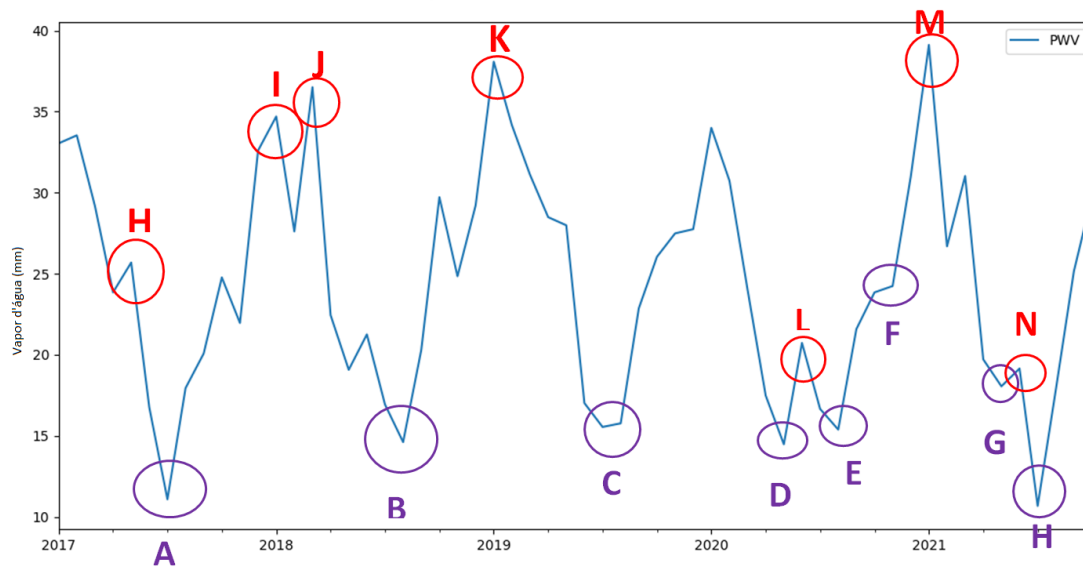
No ano de 2021 verifica-se dois vales na precipitação, sendo o primeiro entre os meses de março e abril (G) com valores próximos a 0,00 mm sendo o menor valor de precipitação encontrado para este ano. O segundo vale (H) se localiza próximo ao mês de julho com valor inferior a 2,00 mm. Os valores de vapor d'água encontram-se inferiores a 20,00 mm para os meses de março e abril e a 12,00 mm para o mês de julho. O maior valor (pico) encontrado para a precipitação, neste ano, estão nos meses de maio e junho (N) com de cerca de 4,00 mm e para o vapor d'água cerca de 19,00 mm.

GRÁFICO 19 - PRECIPITAÇÃO MENSAL PRGU.



FONTE: AS AUTORAS (2021)

GRÁFICO 20 - VAPOR D' ÁGUA MENSAL PRGU.



FONTE: AS AUTORAS (2021)

4.3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA PRGU

Nos Gráficos 21 e 22 e Tabelas 12 e 13, apresenta-se os valores referente a média, mínimo, máximo para a precipitação e vapor d' água referentes a estação PRGU.

TABELA 12 - DADOS ESTATÍSTICOS PRGU - PRECIPITAÇÃO

| PRGU PRECIPITAÇÃO (mm) | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|
| Ano | Média | Minimo | Máximo |
| 2017 | 107,48 | 0,00 | 264,50 |
| 2018 | 139,57 | 1,60 | 346,40 |
| 2019 | 134,74 | 17,20 | 300,60 |
| 2020 | 121,95 | 18,80 | 272,20 |
| 2021 | 80,03 | 4,40 | 326,60 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

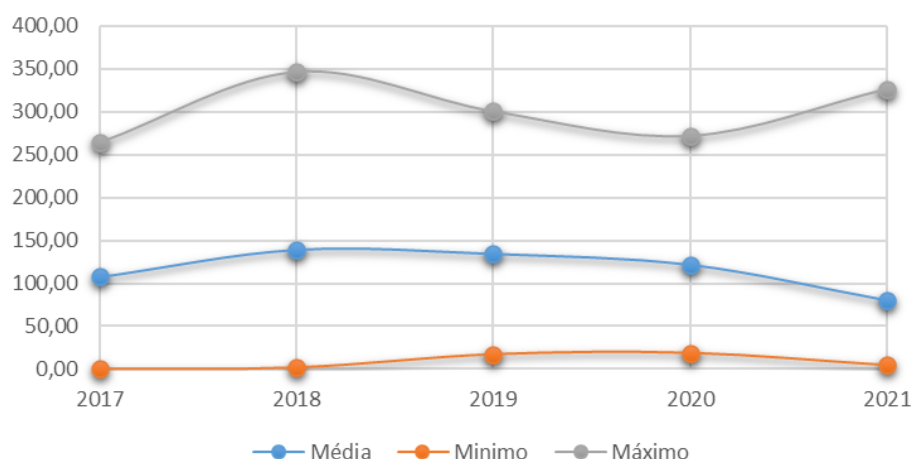
TABELA 13 - DADOS ESTATÍSTICOS PRGU - VAPOR D'ÁGUA

| PRGU - VAPOR D'ÁGUA (mm) | | | |
|--------------------------|-------|--------|--------|
| Ano | Média | Mínimo | Máximo |
| 2017 | 24,22 | 11,08 | 33,54 |
| 2018 | 24,80 | 14,61 | 36,51 |
| 2019 | 26,02 | 15,54 | 38,08 |
| 2020 | 22,84 | 14,47 | 33,98 |
| 2021 | 22,77 | 10,67 | 39,05 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

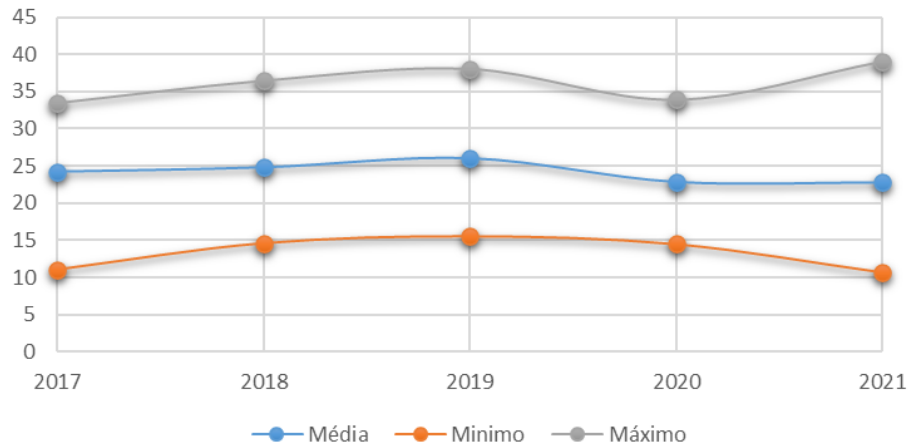
Ao se analisar a precipitação percebe-se que a menor média (80,03 mm) foi obtida para o ano 2021, seguindo-se os anos de 2017 (107,48 mm), 2020 (121,95 mm), 2019 (134,74 mm) e 2018 (139,57 mm). Conforme já comentado nas estações analisadas anteriormente, o ano de 2021 tem dados somente dos oito primeiros meses. Desta forma, há uma probabilidade do ano de 2021 ter valores dessa variável próximos ao ano de 2017. Ao se verificar os valores das médias para os dados de vapor d'água tem-se que o ano com o menor índice é o ano de 2021 com 22,77 mm em sequência tem-se o ano de 2020 com 22,84 mm, 2017 com 24,22 mm, 2018 com 24,80 mm e por fim 2019 com 26,06 mm. Através destes resultados verifica-se que os anos de 2017, 2021 e de 2020 são os anos que apresentam os menores valores para precipitação e vapor d'água indicando a estiagem.

GRÁFICO 21 - DADOS ESTATÍSTICOS PRGU- PRECIPITAÇÃO



FONTE: AS AUTORAS (2021)

GRÁFICO 22 - DADOS ESTATÍSTICOS PRGU- VAPOR D'ÁGUA



FONTE: AS AUTORAS (2021)

4.3.2 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA - PRGU

O coeficiente de correlação de Pearson, na (Tabela 15) apresenta o valor de 0.2039 para correlação da precipitação com PWV , indicando que há uma correlação positiva porém fraca.

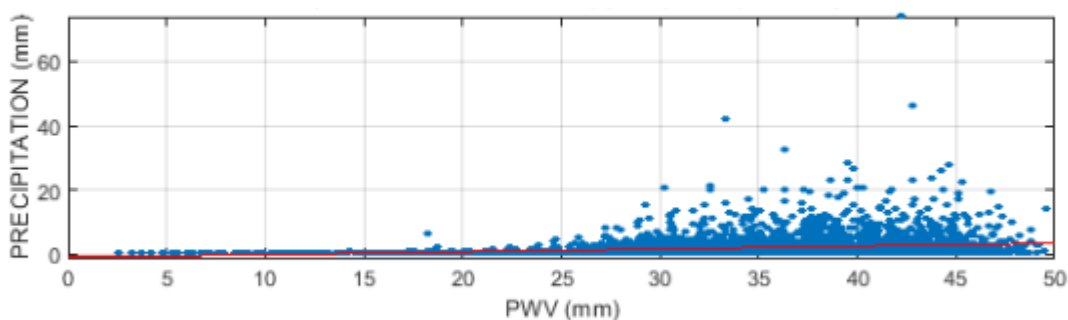
TABELA 14 - CORRELAÇÃO DE PEARSON PRGU

| PRGU | |
|--------------------------|--------|
| Corr, Precipitação - PWV | |
| 1,0000 | 0,2039 |
| 0,2039 | 1,0000 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

No (Gráfico 23) visualiza-se a nuvem de pontos da correlação calculada e mostrando que não há uma distribuição homogênea.

GRÁFICO 23 - CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA PRGU



FONTES: AS AUTORAS (2021)

4.4 ESTAÇÃO ITAI

Foram gerados para a estação ITAI os gráficos 24 e 25. Através das séries obtidas percebe-se que os dados do vapor de água e de precipitação tem uma correlação direta. Picos e vales ocorrem na mesma época; sendo os picos em vermelho e vales em roxo.

Nota-se que no ano de 2017 existe um vale nos meses de maio, junho e julho (A) tendo valores de precipitação próximos a 0,00 mm, enquanto para o vapor d'água tem-se valores em cerca de 16,00 mm para estes meses. Os meses que apresentaram os maiores picos, foram o mês de fevereiro (H) e o mês de outubro (I) tendo valores de precipitação de 07,00 mm e de 16,00 mm, respectivamente. Para o vapor d'água se obteve os valores de 37,00mm para o mês de fevereiro e de 34,00 mm para o mês de outubro.

No ano de 2018, o vale ocorreu no mês de julho (B) com cerca de 0,04 mm de precipitação e de 21,00 mm de vapor d'água. Os meses que apresentaram os maiores picos, foram o mês de janeiro (J) e de outubro (K) tendo 11,00 mm e 14,00 mm, respectivamente, de precipitação média mensal. Os valores de vapor d'água para estes meses foram de 46,00 mm e de 40,00 mm.

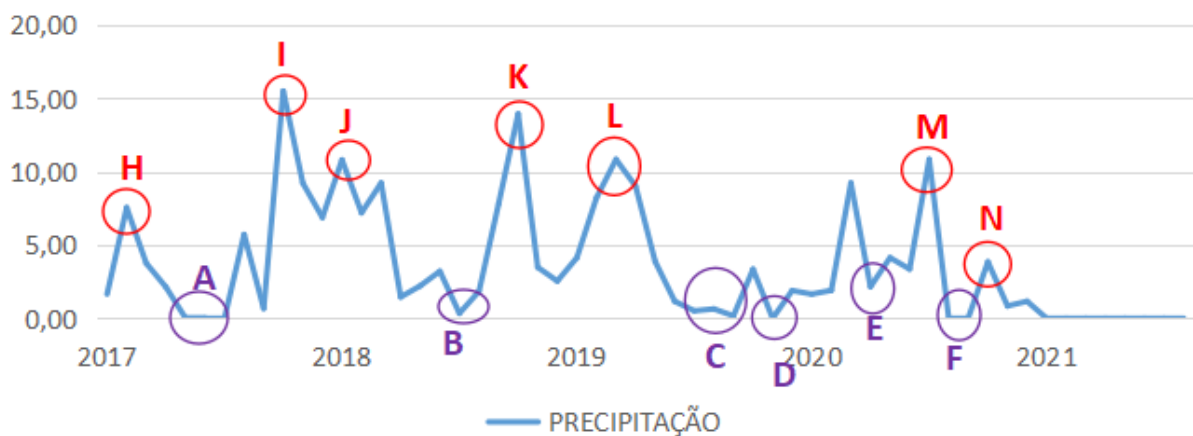
Para o ano de 2019 tem-se os menores valores de precipitação média mensal sendo próximos de 0,00mm para os meses de julho, agosto, setembro (C) e novembro (D). Os valores de vapor d'água, para os meses de julho, agosto e setembro, ficaram entre 20,00mm e 25,00 mm e cerca de 36,00 mm para o mês de novembro. Os maiores

picos para a precipitação são encontrados nos meses de março e abril (L) tendo como valores 12,00 mm, já para o vapor d'água cerca de 38,00 mm.

Os vales no ano de 2020 ocorreram nos meses de abril (E), agosto e setembro (F) com valores 3,00 mm e 0,00 mm para a precipitação média mensal, e de vapor d'água inferior a 22,00 mm para estes meses. Os picos selecionados estão nos meses de julho (M) e outubro (N) tendo valores de precipitação de 12,00 mm e 4,00 mm, respectivamente. E os valores de vapor d'água são cerca de 27,00 mm e 30,00mm.

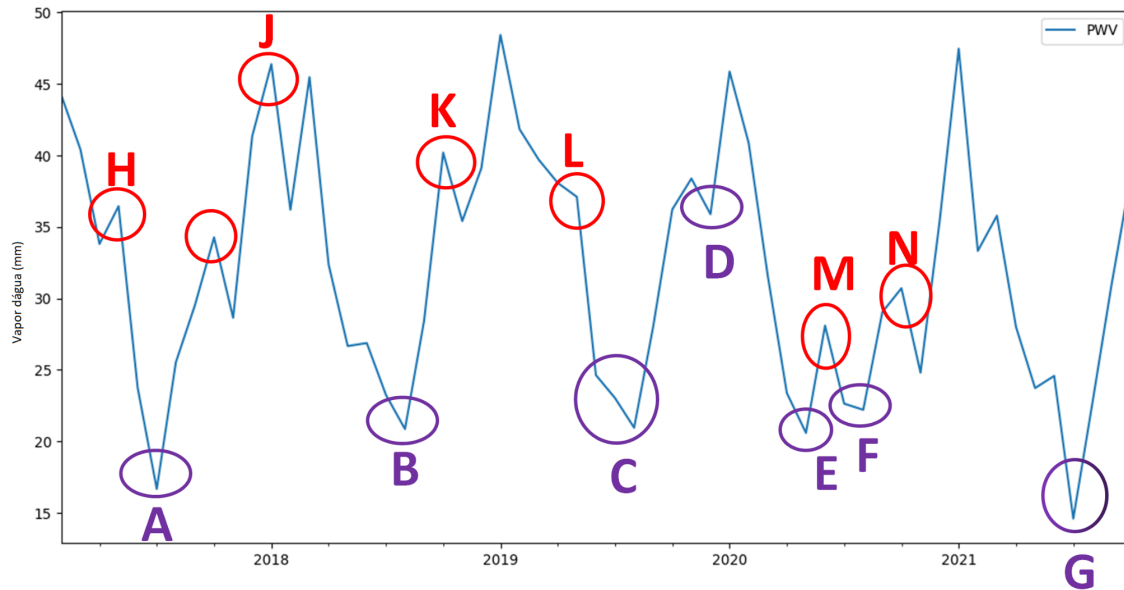
Para o ano de 2021 os dados de precipitação média mensal não foram disponibilizados pelo INMET. Os dados referentes ao vapor d'água indicam que o menor valor encontrado está no mês de julho(G) tendo valor próximo a 15,00 mm.

GRÁFICO 24 - PRECIPITAÇÃO MENSAL ITAI.



FONTE: AS AUTORAS (2021)

GRÁFICO 25 VAPOR D' ÁGUA MENSAL ITAI.



FONTE: AS AUTORAS (2021)

4.4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA ITAI

Nos Gráficos 26 e 27 e Tabelas 16 e 17, apresentam-se os valores referentes à média, mínimo, máximo para a precipitação e vapor d' água.

TABELA 15 - DADOS ESTATÍSTICOS ITAI - PRECIPITAÇÃO

| ITAI PRECIPITAÇÃO (mm) | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|
| Ano | Média | Minimo | Máximo |
| 2017 | 134,10 | 0,00 | 465,00 |
| 2018 | 162,97 | 10,60 | 418,20 |
| 2019 | 111,13 | 0,00 | 336,00 |
| 2020 | 100,15 | 0,00 | 336,00 |
| 2021 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

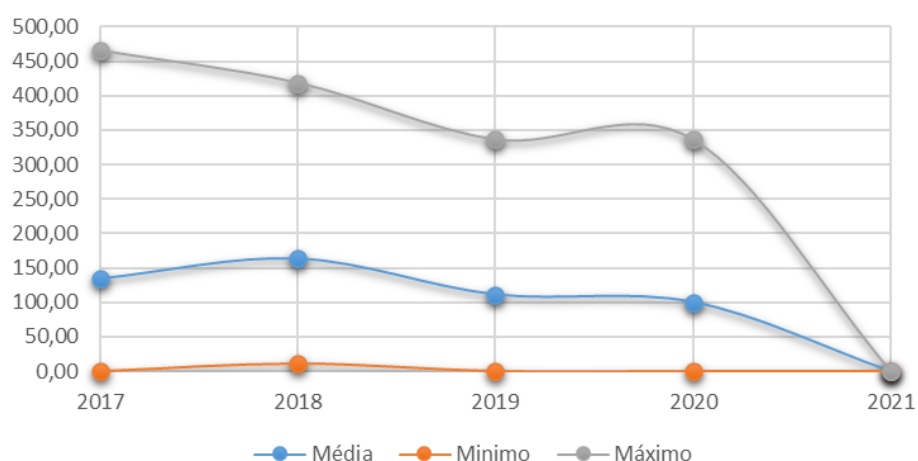
TABELA 16 - DADOS ESTATÍSTICOS ITAI - VAPOR D'ÁGUA

| ITAI - VAPOR D'ÁGUA (mm) | | | |
|--------------------------|-------|--------|--------|
| ANO | Média | Mínimo | Máximo |
| 2017 | 33,58 | 16,67 | 48,35 |
| 2018 | 32,98 | 20,86 | 46,39 |
| 2019 | 34,37 | 20,96 | 48,43 |
| 2020 | 29,52 | 20,60 | 45,87 |
| 2021 | 28,77 | 14,60 | 47,47 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

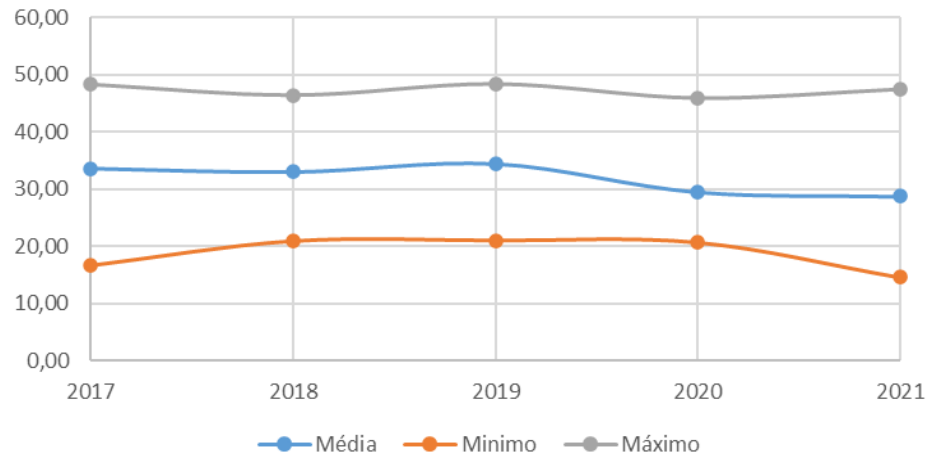
O ano que apresentou a menor média de precipitação foi 2020, com valor igual a 100,15 mm. Posteriormente, obteve-se para o ano de 2019 um valor de 111,13 mm e para os anos 2017 e 2018 os valores foram iguais a 134,10 mm e 162,97 mm, respectivamente. Ressalta-se que no ano de 2021 não havia dados disponibilizados de precipitação. Analisando-se os valores das médias para os dados de vapor d'água tem-se que o ano com o menor índice (28,77 mm) é o ano de 2021 em sequência tem-se o ano de 2020 com 29,52 mm, 2018 com 32,98 mm, 2017 com 33,58 mm e por fim 2019 com 34,37 mm. Através destes verifica-se que o ano de 2020 é o ano que apresentou menores valores para precipitação e vapor d'água indicando a estiagem.

GRÁFICO 26 - DADOS ESTATÍSTICOS ITAI- PRECIPITAÇÃO



FONTE: AS AUTORAS (2021)

GRÁFICO 27 - DADOS ESTATÍSTICOS ITAI- VAPOR D'ÁGUA



FONTE: AS AUTORAS (2021)

4.4.2 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA - ITAI

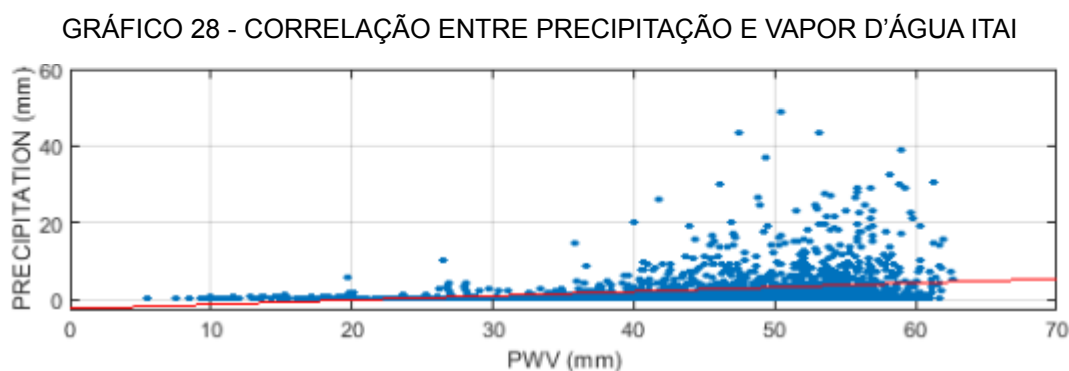
O coeficiente de correlação de Pearson obtido para a estação de ITAI foi de 0.2490 indicando uma correlação positiva porém fraca.

TABELA 17- CORRELAÇÃO DE PEARSON ITAI

| ITAI | |
|--------------------------|--------|
| Corr, Precipitação - PWV | |
| 1,0000 | 0,2490 |
| 0,2490 | 1,0000 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

No (Gráfico 28) apresenta-se a nuvem de pontos que representam os coeficientes de correlação calculados, percebe-se que não há uma distribuição homogênea.



FONTE: AS AUTORAS (2021)

4.5 ESTAÇÃO PRCV

Da mesma forma, que para as demais estações até aqui apresentadas, foram gerados com os dados coletados pela estação PRCV os gráficos de precipitação média mensal e de vapor de água, gráficos 29 e 30, respectivamente. Através destas séries percebe-se que os dados têm uma correlação direta. Picos e vales ocorrem na mesma época; sendo os picos em vermelho e vales em roxo. Nesta estação ocorreu um problema com os dados do vapor d'água ficando "buracos" nos anos de 2018, 2019, 2020 e 2021. Foi identificado o problema nos dados da troposfera, contudo foi efetuada a análise destes dados.

O menor valor para a precipitação média mensal ocorreu no mês de julho (A) com cerca de 0,00 mm e de 13,00 mm de vapor d'água, para o ano de 2017. Enquanto os maiores valores foram verificados no mês de abril (F) tendo valores próximo a 7,00 mm e de 28,00 mm, respectivamente.

Para o ano de 2018, os menores valores são visualizados no mês de julho (B) com cerca de 0,00 mm de precipitação e de 16,00 mm de vapor d'água, enquanto os maiores valores estão no mês de janeiro (G) com cerca de 14,00 mm para a precipitação média mensal e 37,00 mm para o vapor de água.

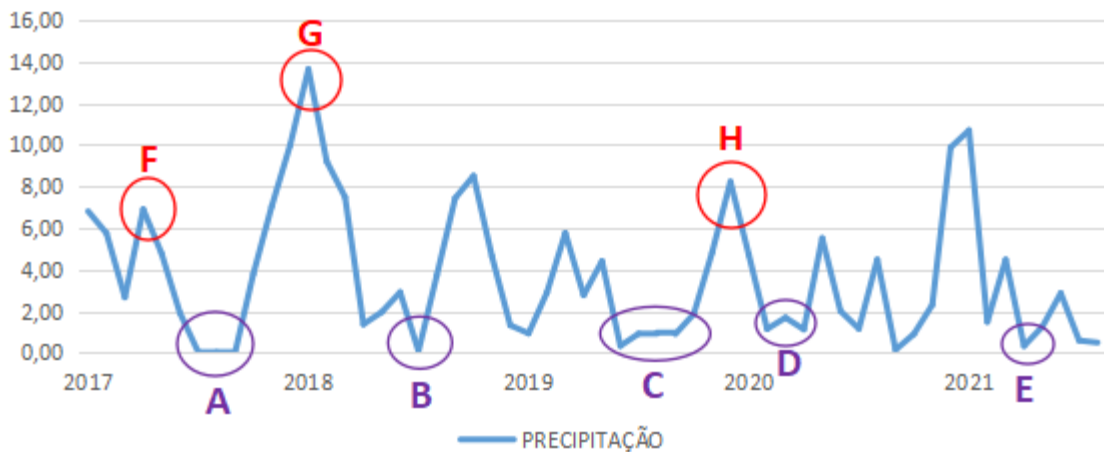
Os menores valores para a precipitação média mensal, para o ano de 2019, encontram-se nos meses de junho, julho e agosto (C) tendo valores inferiores a 1,00 mm para a precipitação e de 16,00 mm para o vapor d'água. Os maiores valores foram verificados nos meses de outubro e novembro (H) com cerca de 8,00 mm de precipitação e de 32,00 de vapor d'água.

Para o ano de 2020, de acordo com os valores obtidos verificou-se que os menores valores ocorreram nos meses de março e abril (D) atingindo valores de precipitação próximos a 1,00 mm e de 13,00 mm de vapor de água. Enquanto os maiores valores estão nos meses de maio junho (I) com cerca de 5,00mm e 21,00 mm, respectivamente.

Como exposto anteriormente, houve falta de dados completos de vapor de água no ano de 2021. Verificou-se que o menor valor foi de

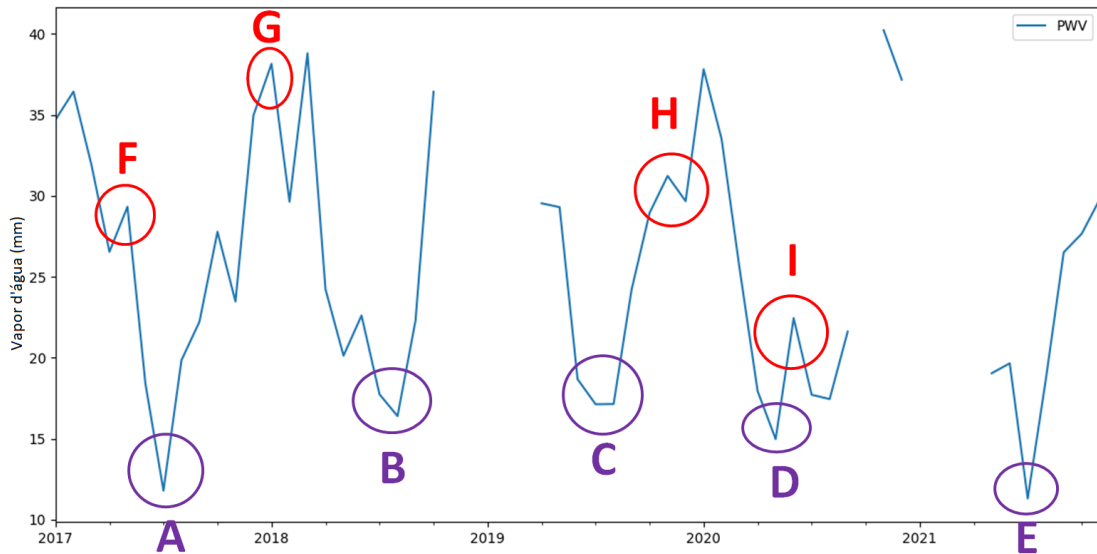
apenas a análise da precipitação média mensal, . O menor valor foi de 11,00 mm para o vapor de água e cerca de 0,05 mm de precipitação.

GRÁFICO 29 - PRECIPITAÇÃO MENSAL PRCV



FONTE: AS AUTORAS (2021)

GRÁFICO 30 - VAPOR D' ÁGUA MENSAL PRCV



FONTE: AS AUTORAS (2021)

4.5.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA PRCV

Nos Gráficos 31 e 32 e Tabelas 19 e 20, apresentam-se os valores referentes à média, mínimo, máximo para a precipitação e vapor d' água para a estação PRCV.

TABELA 18 - DADOS ESTATÍSTICOS PRCV - PRECIPITAÇÃO

| PRCV PRECIPITAÇÃO (mm) | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|
| Ano | Média | Minimo | Máximo |
| 2017 | 125,98 | 0,00 | 299,00 |
| 2018 | 158,67 | 2,60 | 422,60 |
| 2019 | 88,53 | 10,00 | 246,80 |
| 2020 | 88,98 | 4,60 | 296,20 |
| 2021 | 56,95 | 10,00 | 331,60 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

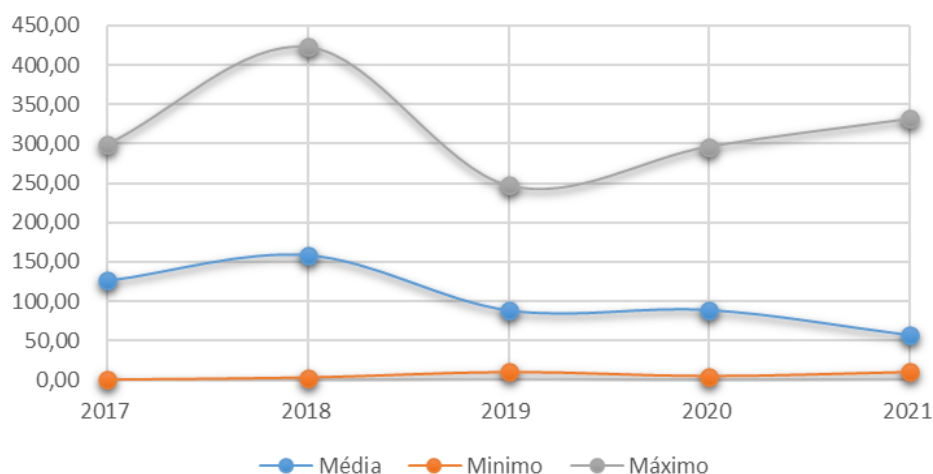
TABELA 19 - DADOS ESTATÍSTICOS PRCV - VAPOR D'ÁGUA

| PRCV - VAPOR D'ÁGUA (mm) | | | |
|--------------------------|-------|--------|--------|
| Ano | Média | Mínimo | Máximo |
| 2017 | 26,45 | 11,79 | 36,43 |
| 2018 | 26,64 | 16,39 | 68,79 |
| 2019 | 25,09 | 17,13 | 31,22 |
| 2020 | 25,21 | 14,97 | 37,81 |
| 2021 | 17,15 | 11,3 | 19,65 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

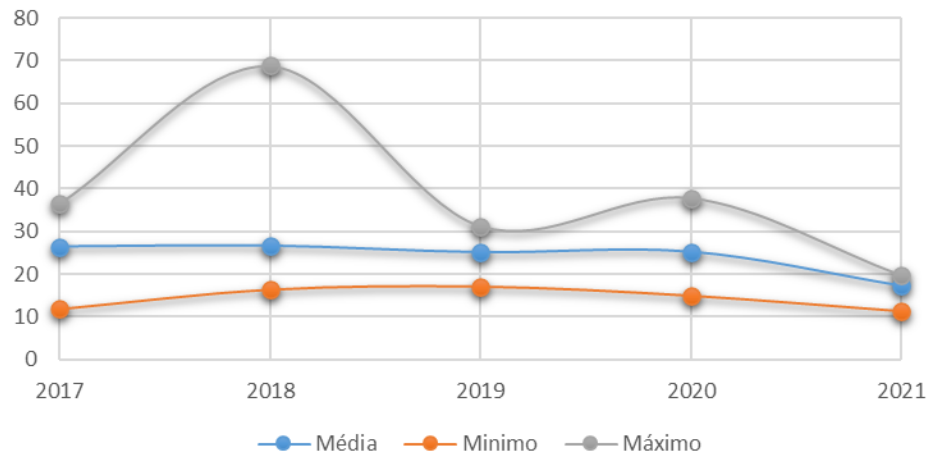
O ano de de 2021 apresentou a menor média de precipitação com 56,95 mm, seguido por 2019 com 88,53 mm, 2020 com 88,98 mm, 2017 com 125,98 mm, e 2018 com 158,6 mm. Como citado anteriormente, 2021 tem dados somente dos oito primeiros meses, provavelmente com o passar desses 4 meses que faltam, os valores de precipitação chegariam próximos aos anos de 2019 e 2020. Quando se analisa os valores das médias para os dados de vapor d'água verifica-se que o ano com o menor índice é o ano de 2021 com 17,15 mm em sequência tem-se o ano de 2019 com 25,09 mm, 2020 com 25,21 mm, 2017 com 26,45 mm e por fim 2018 com 26,64 mm. Por meio dos resultados alcançados verifica-se que os anos de 2021, 2019, 2020 são os que apresentam os menores valores para precipitação e vapor d'água indicando a estiagem.

GRÁFICO 31 - DADOS ESTATÍSTICO PRCV- PRECIPITAÇÃO



FONTE: AS AUTORAS (2021)

GRÁFICO 32 - DADOS ESTATÍSTICO PRGU- VAPOR D'ÁGUA



FONTE: AS AUTORAS (2021)

4.5.2 CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA - PRCV

O coeficiente de correlação de Pearson, na (Tabela 21) calculado indicou uma correlação positiva porém fraca, visto que a correlação entre a precipitação e o PWV foi de 0,2494 (Tabela 20).

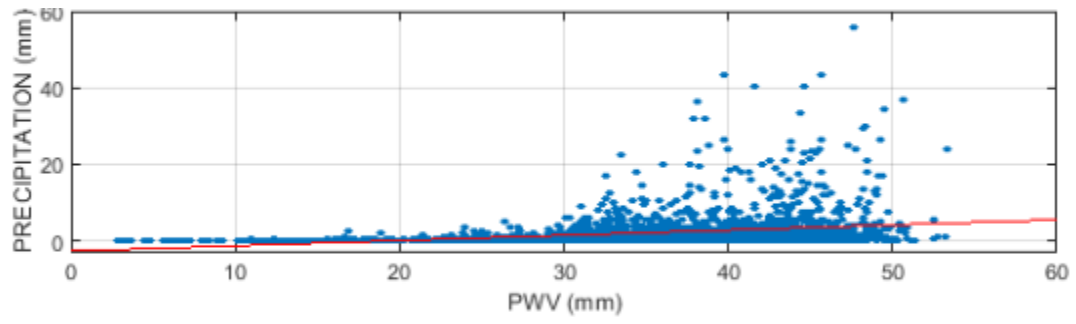
TABELA 20 - CORRELAÇÃO DE PEARSON PRCV

| PRCV | |
|--------------------------|--------|
| Corr, Precipitação - PWV | |
| 1,0000 | 0,2494 |
| 0,2494 | 1,0000 |

FONTE: AS AUTORAS (2021)

No (Gráfico 33) apresenta-se, de uma maneira visualmente a nuvem de pontos, verificando-se uma distribuição homogênea. Dentre as cinco estações analisadas esta estação (PRCV) apresenta uma correlação mais forte.

GRÁFICO 33 - CORRELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E VAPOR D'ÁGUA PRCV



FONTE: AS AUTORAS (2021)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram realizados experimentos empregando dados das estações da RBMC (UFPR, PRMA, PRGU, PRCV e ITAI), com diferentes espaços de tempo. Para a estação UFPR realizou-se 5 experimentos sendo eles diário, mensal, trimestral, semestral e anual, nas demais estações adotou-se apenas o experimento mensal. Nessa pesquisa foi avaliado o impacto da utilização de dados GPS, utilizando o método do PPP para a quantificação de vapor d'água nas cinco estações localizadas no estado do Paraná visando a correlação com dados meteorológicos.

Todos os conjuntos analisados e comparados demonstraram resultados satisfatórios, pois indicam comportamento similares entre a variável de vapor d'água com a precipitação. Nas estações estudadas, verificou-se que nos meses onde ocorreu menor precipitação (Julho-Agosto) os valores de vapor d'água seguiram essa mesma tendência, o que contribuiu com a avaliação das cinco estações estudadas. Como podemos verificar através das análises de resultados em todas as estações, os meses mais chuvosos encontram-se nos primeiros meses do ano, que seriam os meses de janeiro e fevereiro, podendo ter picos em outros meses como maio por exemplo. Quando analisamos o período com maior estiagem ou seja onde encontram-se os vales podemos ver que na grande maioria das estações este ocorre no mês de julho e agosto podendo se estender aos meses de setembro e outubro. Através da análise de correlação para todas as estações verificou-se que há uma distribuição homogênea, sendo positiva, porém indicando que a correlação entre as variáveis é fraca.

Com o desenvolvimento deste trabalho e através dos resultados obtidos podemos ver que o uso do GPS para estimar a variável de vapor d'água é uma aplicação diferente das usuais mas que pode trazer benefícios para o estudo da meteorologia, pois existe uma correlação com a precipitação.

Então as redes GPS já estruturadas e em funcionamento no Paraná podem ser uma integração a mais nas redes de estações meteorológicas já existentes.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das conclusões desenvolvidas ao longo deste projeto, foram sistematizadas algumas recomendações para aqueles que desejarem seguir com pesquisas nesta linha.

Determinar qual a média de vapor d' água para dias que não existe precipitação, a fim de verificar se nessas épocas haverá chuvas ou não. Averiguar se há outros anos em que ocorreram estiagens e analisar o comportamento do vapor d'água neste período. Podendo ainda ser analisada esta situação em outras regiões como o estado de São Paulo que vem sofrendo com períodos de seca e estiagem desde 2014. Por fim, como mencionado que as dinâmicas climáticas são importantes em estudos relacionados à oceanografia e recursos hídricos, uma última recomendação consiste na técnica de estimativa de vapor d'água em dados de equipamentos GNSS acoplados em plataformas aquáticas. Estudar se as diferenças entre as altitudes das estações traz algum prejuízo na determinação do vapor d'água.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS. **Sanepar alerta que estiagem prevaleceu na primeira quinzena de 2021.** Paraná. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=111909>. Acesso em: 1 out. 2021.

AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS. **Primavera começa com dois terços do Parana em estiagem, situação preocupa a Sanepar.** Paraná. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=115391&tit=Primavera-comeca-com-dois-tercos-do-Parana-em-estiagem-situacao-preocupa-a-Sanepar>. Acesso em: 1 out. 2021.

AGUIAR , CLAUDINEI RODRIGUES DE. **Modelo regional da ionosfera (MOD_ION): implementação em tempo real.** Presidente Prudente, 2005 Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/88537/aguiar_cr_me_prud.pdf?sequence=1. Acesso em: 23 out. 2021.

AMAGUA, C. G. P. **Avaliação do impacto do efeito de carga por pressão atmosférica em posicionamento GPS de alta precisão nas regiões do Equador continental e da Amazônia brasileira.** Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

BEVIS, M. et. al. **GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapour using the Global Positioning System.** *Journal of Geophysical Research*, vol. 97. 15 pg. 1992.

FEDERAL AGENCY FOR CARTOGRAPHY AND GEODESY - 2021. **BKG Ntrip Client (BNC).** Disponível em: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/bnc>. Acesso em: 18 nov. 2021.

CARMO, Vera. **Correlação de Pearson.** Disponível em: http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/Correlacao/Correlacao_Pearson_Spearman_Kendall.pdf. Acesso em: 2 dez. 2021.

CARVALHO, Lincoln Diniz. **Análise das técnicas GPS atuais para os posicionamentos estáticos e cinemáticos em bases curtas.** 1999. Tese de mestrado em ciências geodésicas – Universidade Federal do Paraná

CARVALHO, Daniel Fonseca de . **Manejo e Conservação.** Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/daniel/Downloads/Material/Pos-graduacao/Manejo%20e%20conservacao%20do%20solo%20e%20da%20agua/manejo%20e%20conservacao%20-%20parte%202.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2021.

CHIBA, Sueli Hiromi Kay *et al.* **Variabilidade da temperatura máxima, média e mínima para o estado do Parana.** *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, n. XI. 2005. Anais [...]. 2005. Disponível em: <http://geografiapesquisa.ourinhos.unesp.br/Home/Pesquisa/GruposdeEstudo/Clima/Simp osios/103.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2021.

DAVIS, J. L., HERRING, T. A., SHAPIRO I., ROGERS, A. E. & ELGENED, G. **Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length.** *Radio Sci.*, 1985, vol. 20,1593-1607.

DIGGLE, Peter; RIBEIRO, Paulo Justiniano. **Model-based Geostatistics.** Springer, f. 116, 2007. 232 p.

DSA - DIVISÃO DE SATÉLITES E SISTEMAS AMBIENTAIS. **O atraso zenital troposférico na propagação dos sinais de radiofrequencia.** Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/zenital/troposferico.jsp>. Acesso em: 8 out. 2021.

EMBRAPA. **Convivência com a Seca.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-convivencia-com-a-seca/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 1 out. 2021.

FERREIRA, D.F. **Estatística Multivariada.** 675p. Lavras: UFLA, 2011.

GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B. **Geodésia Celeste**. 2. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2003.

GOUVEIA, Tayná A. Ferreira. **Função de mapeamento brasileira da atmosfera neutra e sua aplicação no posicionamento GNSS na América do Sul**. Presidente Prudente -SP, 2019 Tese. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/186250>. Acesso em: 23 out. 2021.

HOFMANN-WELLENHOLF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E.; **GNSS Global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, GALILEO, and more**. Wien: Springer, 2008.

HOPFIELD, H. S. **Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data**. Journal of Geophysical Research, v. 74, 1969.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual do Usuário do Aplicativo Online PPP-IBGE**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: < <https://biblioteca.ibge.gov.br/> >. Acesso em: 20/10/2021.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Saiba os passos para a elaboração da previsão do tempo**. Disponível em: . Acesso em: 2 nov. 2021.

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - **Estudo e monitoramento brasileiro do clima espacial**. Disponível em: <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/iwv-sobre/> Acesso em: 20 out. 2021.

JACOB, D. J. et. al. **The Arctic Research of The Composition of the Troposphere from Aircraft and Satellites (ARCTAS) mission: design, execution, and first results. Atmospheric Chemistry and Physics**, 2010. Disponível em: < <https://www.atmos-chem-phys.net/10/5191/2010/acp-10-5191-2010.pdf>>. Acesso em: 09/11/2021.

KLOBUCHAR, J. **Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. AES-23, n. 3, p. 325-331, 1987. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4104345/>>.

KRUEGER, Cláudia P. **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito Marinho**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1996.

KRUEGER, Cláudia P. **Posicionamento por satélites. Apostila do Curso de Especialização em Geotecnologias** - Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

KRUEGER, Cláudia Pereira ; AMAGUA, Christian G. P. **NAVSTAR-GPS**. Disciplina de Levantamentos Geodésicos II, Curso Engenharia Cartográfica e de Agrimensura. Universidade Federal do Paraná. 2021. 92 p.

KRUEGER, Cláudia Pereira *et al.* Posicionamento GNSS em Tempo Real: Evolução, Aplicações Práticas e Perspectivas para o Futuro. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1359-1379, 2020.

LEANDRO, Rodrigo. **Atmosfera neutra e posicionamento GNSS**. Mundo Geo. 2008. Disponível em: <https://mundogeo.com/2008/10/16/atmosfera-neutra-e-posicionamento-gnss/>. Acesso em: 15 out. 2021.

LIANG, H.; CAO, Y.; WAN, X.; et al. **Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China**. **Geodesy and Geodynamics**, v.6, n. 2, p. 135-142, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1674984715000142>>.

MAYER, M.; FUHRMANN, T. GPS vs. **GNSS data processing on-line**. Curitiba: **PROBRAL** – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná e Geodetic Institut, Karlsruhe Universität, Agosto, 2008.

MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª edição, Editora Unesp, 2008.

NAKAO, Laís T. H. **Análise dos métodos de posicionamento e dos parâmetros definidores da qualidade do levantamento batimétrico realizado no reservatório do Capivari Cachoeira** – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Curitiba, 2015.

NIELL, A. E. **Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths**. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No.B2, Pages 3227-3246, 1996.

NIELL, A. E. **Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models**. Phys. Chem. Earth, v. 26, p.475-480, 2001.

NOAA, **National Oceanic and Atmospheric Administration**. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/numerical-weather-prediction>>. Acesso em: 12/11/2021.

OLIVEIRA, A. F. **Análise Comparativa de Diferentes Modelos Troposféricos para RTK em Rede Usando o Conceito de Estação de Referência Virtual**. 177 pg. Tese (doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Pereira, A.R.; Angelocci, L.R.; Sentelhas, P.C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. Apostila. USP/ESALQ, 2007, 192 p.

PRADO, Alexandre do. **Análise da acurácia e da correlação espacial nas técnicas DGPS e RTK**. 2001. Tese de mestrado em ciências geodésicas – Universidade Federal do Paraná.

QUEIROZ, Marise Aparecida. **Avaliação de tendências em séries de precipitação diária máxima anual na faixa central do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2013 Dissertação (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e

Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1049M.PDF>. Acesso em: 12 nov. 2021.

RIBEIRO, Paulo Justiniano Jr.. **Interpretação do coeficiente de correlação**. 2019. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~paulojus/CE003/ce003/node8.html>. Acesso em: 2 nov. 2021.

RENNÓ, Camilo Daleles. BORMA, Laura De Simone; **Processos Hidrológicos**. 2017. 50 slides. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/~camilo/prochidr/pdf/01precipitacao.pdf>. Acesso em: 4 out. 2021.

ROFATTO, Vinicius F.; MONICO, João F. G. ; SAPUCCI, Luiz Fernando. **Estimativa do vapor d'água integrado utilizando estações GNSS terrestres e estações meteorológicas: aplicações nowcasting**. Anais do III Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente, v. 1, p. 338-343, 25 julho 2012.

SAASTAMOINEN, J. **Contributions to the theory of atmospheric refraction**. *Bulletin géodésique*, v.107, n.1, p.13-34, 1973. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02522083>>.

SALOMONI, Christiane S. S.. **GPS e ionosfera estudo do comportamento do TEC e de sua influência no posicionamento com GPS na região brasileira em períodos de alta e baixa atividade solar**. Porto Alegre, 2008 Dissertação (Programa de Pós-Graduação - Mestrado em Ensino) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/15752/000682070.pdf?sequence=1>. Acesso em: 28 out. 2021.

SANTERRE, R. PAN, L. CHANGSHENG, C. ZHU, JIAN-JUN. **Single Point Positioning using GPS, GLONASS and BeiDou Satellites**. Researchgate, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/268746693_Single_Point_Positioning_using_GPS_GLONASS_and_BeiDou_Satellites Acesso em: 20/11/2021

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas), Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2001.

SAPUCCI, L. F. **Estimativas do IWV utilizando receptores GPS em bases terrestres no Brasil: sinergia entre a geodésia e a meteorologia**. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas), Setor de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2005.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; HERDIES, D. L.; SOUZA, R. A. F. DE. **Assimilação do IWV-GPS no Brasil: otimização das estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, n.3,2007.Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2007000300004&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

SAPUCCI, L. F.; MACHADO, L. A. T.; DE SOUZA, E. M.; CAMPOS, T. B. **Global Positioning System precipitable water vapour (GPS-PWV) jumps before intense rain events: A potential application to nowcasting**. Meteorological Applications, v. 26, n. 1, p. 49-63, 2019. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/met.1735>>.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy. 2a edição**. Walter de Gruyter: Nova Iorque, 2003.

SECRETARIA DA SEGURANÇA PÚBLICA E DEFESA SOCIAL . **Estiagem e seca**. Ceará. Disponível em: http://www.defesacivil.ce.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=803:estiagem-e-seca&catid=14:lista-de-noticias&Itemid=81. Acesso em: 23 out. 2021.

SILVA, N. C. C. da, SANTOS, M. C. dos e OLIVEIRA, L. C. de **Efeito da refração troposférica no posicionamento geodésico com GPS**. Revista Brasileira de Geofísica [online]. 1999, v. 17, n. 2-3 [Acessado 2 Dezembro 2021] , pp. 117-128. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200002>>. Epub 21 Dez 2000. ISSN 0102-261X. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200002>.

SILVA, E. G. de Sousa; MARQUES, Haroldo A. **PPP com integração de dados GPS/GLONASS: fundamentos envolvidos e análise de acurácia.** Boletim de Ciências Geodésicas, Pernambuco, v. 22, n. 2, p. 217-231. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bcg/a/GFmc7gHrkfyLKNGvPZ3F7KF/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 7 out. 2021.

SIQUEIRA, KELVIN WILLIAM DE SOUZA . **Análise da correlação espacial do PWV-GNSS visando a investigação de fenômenos atmosféricos: estudo de caso para a serra do mar paranaense.** Curitiba, 2020 Tese (Curso de Pós- Graduação em Ciências Geodésicas,) - Universidade Federal do Paraná.

SHIMAKURA, Silvia Emiko . **Coefficiente de Pearson.** Laboratório de Estatística e Geoinformação. Curitiba-PR. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE701/node79.html>. Acesso em: 2 nov. 2021.

SHEN, X. (2002). **Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning.** MSc Thesis, Calgary: University of Calgary, 2002.

SPIPKER Jr JJ. **Tropospheric Effects on GPS.** In: PARKINSON BW & SPIPKER Jr JJ (Ed.). Global Positioning System: Theory and Applications. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. p. 517-546.

VETTORAZZI, Carlos Alberto. **GNSS – GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM:** leb 450 : topografia e geoprocessamento ii. São Paulo, 2016. Color. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Topo/leb450/Vettorazzi/LEB450_GNSS_2016.pdf. Acesso em: 01 jan. 2021.

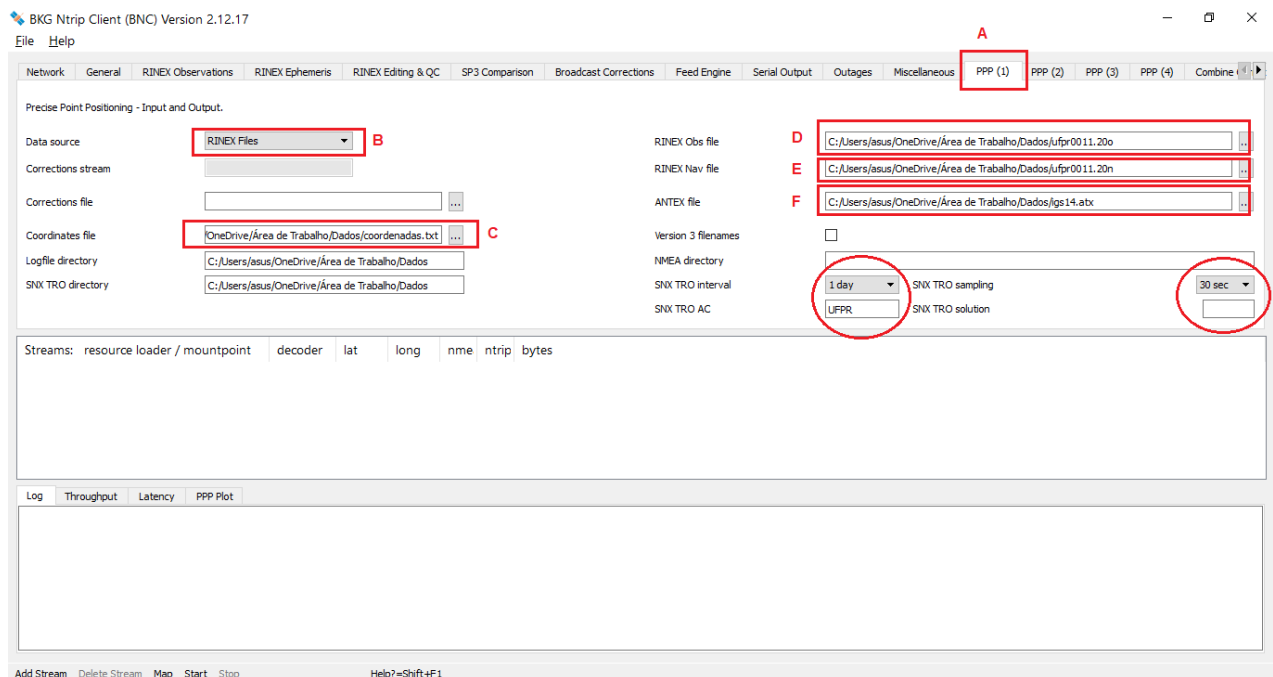
WANG, M. **Ambiguity resolution with precise point positioning.** Calgary: University of Calgary. 2014.

WERLICH, Renata M. C. **Análise da influência dos parâmetros de calibração de antenas de receptores GPS no posicionamento de alta precisão / Renata Magda Cavalcante Werlich.** – Curitiba, 2012. 125 f.: il., tab.

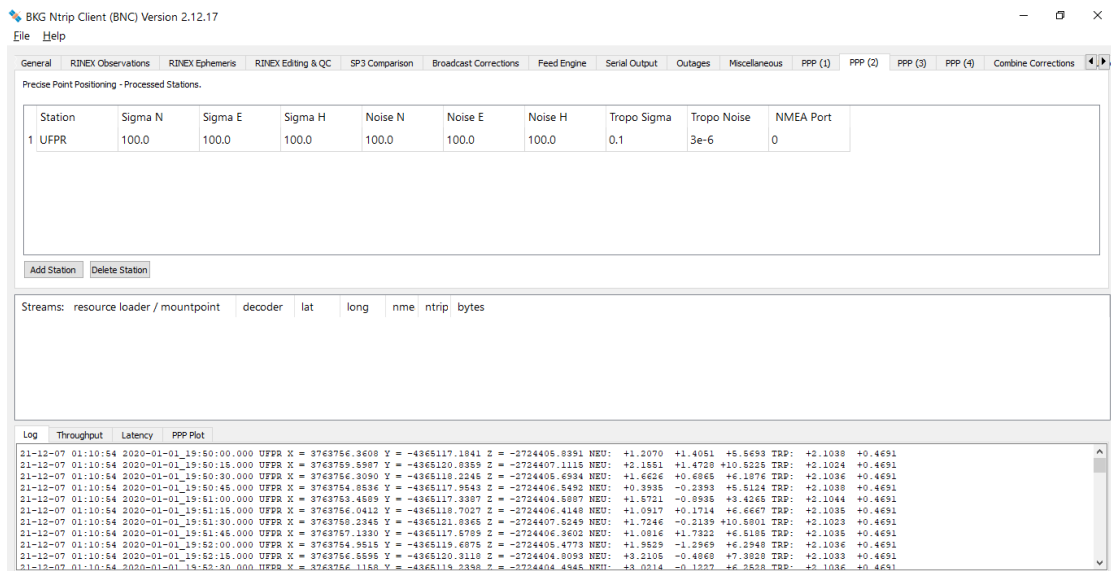
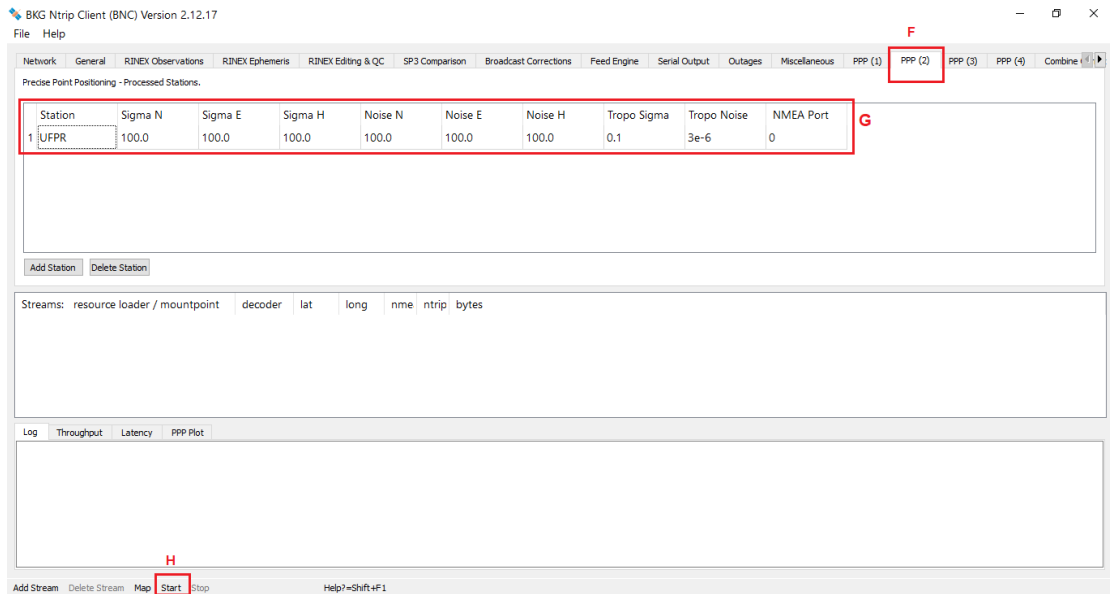
ANEXO

Cálculo do atraso troposférico total através do BKG

Processamento no Software BKG ntrip afim de fazer um Posicionamento de Ponto Preciso (PPP) usando a tripla diferença de fase, para isso os dados de entrada são os arquivos RINEX da estação. O processamento é dado selecionando a aba PPP(1), colocamos a opção de arquivos rinex, com isso selecionado ele ativa algumas opções, aí se coloca as coordenadas da estação (C) onde você seleciona o arquivo que contém as informações da estação, este arquivo é feito com os dados da estação no site do SIRGAS (<https://www.sirgas.org/pt/stations/station-list/>), (D) insere o arquivo de observação (.o), (E) o arquivo de navegação (.n) e (F) o arquivo do centro de fase da antena (.atx). O primeiro círculo indica o intervalo do arquivo e o outro intervalo dos dados. A sequência desses passos está indicada na figura abaixo:



Com esse procedimento feito, seleciona o PPP (2), Adiciona a estação, e pode dar início ao processamento.



Os dados gerados são arquivos .ppp .trop sendo o último que nos traz as informações referentes ao vapor d'água.