



Universidade de Brasília

Instituto de Física (IF-UnB)

Brasília-DF

**Utilização da análise de Ondas (*Wavelets*) no
Estudo de Precipitação no DF.**

**Trabalho de Conclusão do Curso de Física -
Bacharelado, 2/2022**

Henrique Minari Zanetti, 17/0012301

Orientadora: Profa. Dra. Erondina Azevedo de Lima

Conteúdo

Conteúdo	1
Lista de Figuras	1
1 Introdução	3
2 Fundamentação Teórica	6
2.1 Sobre o clima e a precipitação	6
3 Materiais e Métodos	8
3.1 Área de Estudo	8
3.2 Dados e tratamento	8
3.3 Análise dos dados – Ondaletas	9
3.4 Uso do computador e programação	11
4 Resultados e Discussão	12
4.1 Analisando o WPS	16
4.2 Analisando o GWS	16
4.3 Analisando a série temporal de Precipitação e de PRP	17
4.4 Relacionando informações	18
4.5 Definindo a Sazonalidade	18
4.6 Discussão	19
5 Conclusão	20
A Anexo I	23

Lista de Figuras

1	Série temporal mensal do volume de precipitação para Brasília, DF, de 09/1961 até 08/2022	13
2	Gráfico com a série temporal de PRP (abaixo); Espectro de Potência de Ondaletas (WPS) (acima, à esquerda), com as regiões circuladas as significativas com 95% de confiança e; Espectro Global de Ondaletas (GWS) (acima, à direita), com a linha pontilhada a linha de significância 95%. $\alpha = 0.15$	14
3	Gráfico com as médias e desvios-padrão mensais de precipitação de toda a série temporal	15

4	Gráfico com as médias (acima) e desvios-padrão (abaixo) mensais de precipitação no primeiro período e no segundo período	15
5	Fluxograma que contém os passos que o programa de computador tomou para realizar a Transformada de Ondaletas.	23

Resumo

Eventos climáticos extremos têm ocorrido ao longo dos anos em diversos locais do mundo, com alguns casos chegando a causar danos extensos à população, como as Chuvas de Monções no Paquistão. Esse não é o caso só para alguns lugares, porque no Brasil, assim como em Brasília, também ocorreram eventos extremos de precipitação que entraram para a história ao trazer prejuízos diversos. A precipitação é um fenômeno caracterizado pela deposição de água da atmosfera na superfície terrestre, seja em forma sólida, condensação ou líquida (a forma líquida é a chuva). Estudar o ciclo dos extremos pode ajudar a prever quando extremos de precipitação vão acontecer de novo e, assim, prevenir novos desastres. Dessa forma, este estudo tem o objetivo de empregar a Transformada de Ondaletas para determinar a sazonalidade, os ciclos dominantes da série e o comportamento dos extremos para a precipitação em Brasília. Foi usada rotina em *Python*[®] para ajudar a aplicar os passos, e foi usada a autocorrelação da série para determinar os níveis de significância de 95%, ao comparar com um *rednoise* de Markov. A sazonalidade encontrada concorda com a literatura, e os ciclos dominantes foram definidos, mas alguns deles não estavam relacionados a eventos extremos, o que sugere novas pesquisas a respeito de tendências e correlação com causas para averiguar. Mais ainda, este trabalho demonstra a aplicabilidade e a potencialidade dessa análise para o caso presente.

1 Introdução

Ao longo dos últimos anos, vivenciaram-se vários eventos climáticos extremos, em especial aqueles relacionados à precipitação. Não é difícil encontrar notícias a respeito de eventos com elevada taxa de estragos proporcionados pela chuva e por ventos, como os casos do Katrina nos EUA (HURRICANE Katrina, History, 2022), do Furacão no Haiti (FURACÃO Matthew, G1, 2016) e, mais recentemente, dos estragos causados em 2022 pelas Chuvas de Monções no Sul Asiático, em especial no Paquistão (Paquistão, Veja, 2022). Houve máximos de precipitação além do esperado em todas essas situações, e elas são apenas alguns dos exemplos de ocorrências semelhantes e recentes ao redor do mundo.

Da mesma forma que eventos desse tipo têm ocorrido globalmente, também é possível percebê-los pelo Brasil, com alguns dos casos mais recentes sendo os ocorridos em 2022 em duas regiões brasileiras: em Petrópolis, no RJ, em fevereiro (CHUVAS em Petrópolis, CNN Brasil, 2022) e; no Grande Recife, em Pernambuco, no final de maio e em junho (GRANDE Recife, G1, 2022).

E, como não é diferente, têm acontecido eventos com chuvas intensas, ventos fortes e estragos também no Distrito Federal. Houve não só casos em que a força

do vento derrubou árvores, entortou placas e arrancou telhados, como também casos de alagamentos recordes (como uma ocasião de alagamento na Universidade de Brasília, UnB, quando vários computadores ficaram boiando na água que enchia os corredores do subsolo da universidade, em 2011) (TEMPOS de refundação, UnB Agência, 2011).

Tendo em vista esses acontecimentos, em geral percebe-se que a precipitação não foi a causa exclusiva dos estagos, pois haviam outras em questão. Por exemplo: o crescimento desordenado das cidades; a impermeabilização do solo e a retirada de sua camada vegetal, desprotegendo-o e; um despreparo em geral das populações atingidas para prevenir e lidar com tais eventos. Assim, mais do que eventos associados à precipitação, eles são, também, reflexo da **relação** entre as comunidades humanas e a precipitação.

Dessa forma, um melhor entendimento dos comportamentos extremos do clima, de suas frequências e, também, de suas causas pode levar a uma diminuição na incidência e na extensão dos danos advindos desses eventos. Não porque evita os fenômenos naturais, mas sim porque aumenta o preparo para eles, sendo possível tomar medidas para mitigar as consequências preventivamente e melhorar a resposta durante as ocorrências.

Nesse ponto, Silva (2017) chama medidas preventivas como essas de medidas “não-estruturais” e diz que, apesar de terem um prazo de tempo médio a longo para surtir efeito, custam bem menos relativo a reparos estruturais, são de fácil implementação e permitem uma compreensão mais efetiva dos riscos envolvidos. Ainda de acordo com a autora, populações socioeconomicamente vulneráveis seriam especialmente beneficiadas não só pelo fator baixo custo, mas principalmente por aumentar a quantidade de vidas salvas em eventos climáticos intensos.

Essa ideia é complementada por um dos últimos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em especial, o sumário para os formuladores de políticas (IPCC, 2018). Nele, os autores relatam não só que os grupos mais vulneráveis se beneficiariam de um melhor preparo ante os eventos climáticos extremos, como também dizem que a prática de ações que reduzam a vulnerabilidade das pessoas é uma via de mão dupla com a melhora de vida para essas populações:

As opções de adaptação que reduzem a vulnerabilidade dos sistemas humanos e naturais têm muitas sinergias com o desenvolvimento sustentável, se bem gerenciadas, tais como garantir a segurança alimentar e hídrica, reduzir os riscos de desastres, melhorar as condições de saúde, manter os serviços ecossistêmicos e reduzir a pobreza e a desigualdade (alta confiança).

Ademais, dentro do mesmo documento, o IPCC faz um alerta não só para o

aumento da temperatura média global, mas também para mais casos extremos de precipitação advindos desse mesmo aumento.

A princípio, essa previsão de comportamento é uma *média* pelo mundo, mas é igualmente necessário saber qual é a tendência não só nesses eventos globais, mas também nos eventos locais. Assim, tem-se três perguntas a serem respondidas:

1. Qual(is) ferramenta(s) pode(m) ser utilizada(s) para estudar os comportamentos do clima, em especial da precipitação?;
2. Quais os ciclos dos extremos de precipitação? Essa pergunta tem dois aspectos, o **aspecto global** e o **aspecto local**;
3. A intensidade dos extremos tem se modificado? Essa pergunta também tem os dois aspectos da questão anterior.
4. Como caracterizar a sazonalidade de um local, em termos de precipitação?

Para ajudar a responder a essas perguntas e comparar as respostas com as previsões do IPCC e resultados da literatura, a Física pode dar uma luz na análise, pelo menos em alguns aspectos, do histórico da precipitação no globo ou em uma microrregião. Isso porque ela é marcada por uma visão de mundo atrelada à pragmaticidade, à modelização de fenômenos, a previsões de sistemas, bem como ao tratamento dos dados e dos erros. Assim, esse ramo do conhecimento é capaz de fornecer alguns métodos e ferramentas de análise de séries temporais como a análise de Fourier e a análise de *wavelets* (ou ondaletas), derivada daquela.

Dessa forma, este estudo tem o objetivo de analisar a série temporal de precipitação na microrregião de Brasília-DF, no Brasil, a fim de: definir a sazonalidade do local; identificar ciclos e a intensidade dos eventos extremos de chuva na microrregião e; averiguar se a análise por meio das ondaletas é uma boa escolha para o caso presente.

Para tanto, este documento se encontra dividido nas seguintes seções: Fundamentação Teórica, onde se discutirá um pouco do que diz a literatura pesquisada a respeito das mudanças climáticas e a precipitação; Materiais e Métodos, onde se falará sobre como os dados foram obtidos, bem como quais serão os métodos de análise desses dados; Resultados e Discussão, onde serão mostrados os resultados da análise de Ondaletas, além de serem discutidas as possíveis implicações deles e; Conclusão, onde será feita uma recapitulação dos objetivos do trabalho, e as respostas obtidas com ele.

Por fim, é preciso dizer que, apesar de este trabalho focar em um aspecto dos extremos pluviométricos (os **máximos** pluviiais), de igual importância é o outro aspecto, como salientado por ROCHA et al. (2019), em que se fez o estudo dos

mínimos prolongados de precipitação. Futuros estudos sobre esse aspecto podem trazer um panorama mais completo do estudo da microrregião.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Sobre o clima e a precipitação

Ao longo do século XX, a preocupação com a temática ambiental começou a ganhar força, com destaque para a Conferência de Estocolmo em 1972, que reuniu pesquisadores e representantes de diversos países para discutir os problemas ambientais, sendo o primeiro encontro das Nações Unidas a debater esse tema em nível internacional (Boudes, 1972).

Atualmente, um dos assuntos que se tem debatido internacionalmente a esse respeito é a preocupação com o clima e também com as mudanças climáticas. No entanto, há muitos tópicos de discussão, desde o questionamento da existência das mudanças climáticas, passando à pergunta de qual o grau de impacto antrópico nessas mudanças, até a quais planos tomar sobre como agir para evitar que as mudanças se intensifiquem e causem danos irreversíveis ao planeta. Além do relatório do IPCC (IPCC, 2018), alguns documentários também abordam essa diversidade de tópicos, como o *David Attenborough: Life on our Planet* ¹ e *Cosmos: A Spacetime Odyssey* (mais especificamente o episódio *The World Set Free*) ².

De acordo com o referido documento do IPCC, uma das possíveis consequências das mudanças climáticas é a alteração no regime pluviométrico de diversas regiões do globo. Machado (2017, p. 33, Princípios de Climatologia e Hidrologia) e Feitosa et al. (2008, p. 55) definem a **precipitação** (em zonas tropicais, é também chamada de “pluviosidade” ou “chuva”) como a deposição de água da atmosfera na superfície terrestre, que pode ser a queda de água em estado líquido (chuva), sólido (neve ou granizo), ou a condensação da água da atmosfera na superfície da Terra (orvalho). Também a descrevem como uma variável não contínua no espaço e no tempo, diferente da temperatura, de forma que pode haver uma descontinuidade nos dados.

Ainda de acordo com Feitosa et al. (2008), a precipitação é parte fundamental do ciclo da água, ou **ciclo hidrológico**. Isso pode ser dito porque ela proporciona diversos benefícios relacionados à vazão dos rios e o reabastecimento dos aquíferos, como, entre outros: a manutenção do volume médio dos corpos d’água; o aumento da disponibilidade de água no solo para a vegetação (tanto a nativa quanto a da

¹Disponível em plataformas de *streaming*.

²Disponível em plataformas de *streaming* mas, infelizmente, não está disponível por enquanto no Brasil, apenas sua continuação, *Cosmos: Possible Worlds*.

agropecuária) e; a reposição das águas dos lençóis freáticos. Não só isso, mas também há um aumento no conforto térmico, porque a água mantém a temperatura da superfície mais amena devido à sua grande capacidade térmica. Isso é apenas um exemplo que mostra que o tema climático, assim como outros assuntos, é um que é preciso tangenciar (ou até se aprofundar em) diversas áreas do saber para ser tratado integralmente.

No entanto, o excesso pode ser danoso e, com a pluviosidade, não é diferente. Um problema que pode surgir quando a intensidade pluviométrica se torna muito forte, por exemplo, é que, devido à quantidade de água em um dito instante ser maior do que aquela que o solo consegue absorver, esse excesso de água empoça (ou alaga), em superfícies planas, ou torna-se uma corredeira (ou enxurrada), em desníveis.

Essas situações dependem tanto da rapidez com que a água acumula quanto do volume total que choveu. Diga-se que houve uma enxurrada que, então, desce o relevo, adquirindo energia cinética. Se essa for alta o suficiente, pode retirar (parte da) camada vegetal e as camadas mais superiores do solo, causando, ainda, outros dois problemas:

- O solo sem mata fica desprotegido, de forma que deslizamentos de terra acabam por se tornar mais frequentes (já que as raízes ajudam a firmar o solo);
- Empobrecimento do solo e/ou lixiviação, além de assoreamento dos rios, devido às camadas de solo carregadas pela água.

Santos et al. (2017) contam que alagamentos e enxurradas tornam-se mais frequentes principalmente em ambientes urbanos, devido à impermeabilização maior do solo decorrente do excesso de concreto e asfalto, que também aumentam a velocidade de escoamento da água. Em adição, também podem ocorrer obstruções dos sistemas de drenagem devido ao lixo, pedras e outros detritos carregados pela água, o que pode explicar porque os sistemas de microdrenagem acabam sendo sobrecarregado e não dando conta do volume de água, mesmo com testes de drenagem para verificar a sua eficiência.

Torna-se, mais uma vez, evidente a importância e a urgência de se estudar os ritmos de precipitação e suas intensidades, ainda mais em ambientes com regime intermitente de chuva ou urbanos, para reduzir ou eliminar os efeitos de extremos pluviométricos. Sendo assim, a próxima seção abordará os dados e metodologias usados no trabalho de estudar a microrregião de Brasília.

3 Materiais e Métodos

3.1 Área de Estudo

Este estudo utilizou os dados da série temporal mensal de precipitação medidos na Estação Convencional Brasília, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMet) e cujo número de catálogo é 83377. A estação está localizada no Distrito Federal, na região Centro-Oeste do Brasil, mais precisamente na parte central de Brasília, capital do Brasil, cujas coordenadas são $-15,789722^\circ$ S, $-47,925833^\circ$ W, 1161,42 m.

A região nas proximidades da estação é descampada, com vegetação predominantemente rasteira de gramíneas. No entanto, distando cerca de 20 metros da estação encontra-se uma região arborizada, uma das poucas localidades em Brasília com Cerrado nativo original. Com relação à área circundante ao terreno do InMet, há diversos prédios limitados a três andares, e uma avenida que contorna o instituto. Assim, é possível dizer que a estação tem um espaço aberto ao seu redor e com vegetação nas proximidades, ficando, também, próxima a um centro de densidade populacional média em Brasília.

3.2 Dados e tratamento

O período dos dados adotado abarcou desde o primeiro dia de uso da estação, no dia 11/09/1961, até o dia 22/08/2022, com os dados obtidos mensalmente. Apesar de 61 anos não ser um período muito grande, já é o suficiente para poder caracterizar o microclima da região em dois períodos: o primeiro, de aproximadamente 30 anos, e o segundo, também de aproximadamente 30 anos, a fim de comparar os dois.

Os períodos foram divididos como tendo pelo menos 30 anos porque esse é o intervalo mínimo necessário para se determinar as normais meteorológicas, como se vê no documento técnico da Organização Meteorológica Mundial, ou WMO (WMO, 1989).

Esse documento define as normais climatológicas padrão como:

Valores médios de dados climatológicos calculados para períodos consecutivos de 30 anos, como se segue: de 1^o de janeiro de 1901 até 31 de dezembro de 1930, de 1^o de janeiro de 1931 até 31 de dezembro de 1960, etc (tradução livre).

Os dados estão disponíveis diretamente no site do INMet. Foram obtidos em formato `.csv`, lidos pelo programa de rotinas em *Python*[®] e sofreram o mínimo de ajustes necessários, de forma que, por exemplo, as falhas não foram preenchidas: foram substituídas por zero. Apesar de a existência de falhas poder inviabilizar o cálculo de médias e normais (WMO, 1989), para este estudo acreditou-se que

fazer os cálculos mesmo assim seria a melhor alternativa tendo em vista a relativa escassez de dados. No entanto, também seria possível substituir as falhas pelas normais climatológicas (ou até a média total) de precipitação. No entanto, não é possível afirmar qual a melhor abordagem, sendo necessário um estudo posterior nesse assunto.

Assim como indicado por Torrence & Compo (1998), o tratamento estatístico foi feito por meio da comparação do espectro da série temporal com o espectro teórico de um ruído de fundo, mais especificamente o vermelho (no caso do presente estudo, uma cadeia de Markov), porque os eventos climáticos e geológicos podem ser frequentemente modelados como variações desses ruídos. Isso foi feito a fim de determinar os níveis de significância e os intervalos de confiança.

Uma cadeia de Markov de ordem n é, em termos bem simples, uma em que o que acontece em um presente estado depende do estado dos n termos anteriores. Mais informações sobre essa modelação podem ser encontradas em Torrence & Compo (1998).

Também foi usado o índice PRP de anomalia de precipitação mensal para tratar os dados de série temporal. Esse índice é calculado como se segue:

$$PRP_{ij} = \frac{X_{ij} - \overline{X}_i}{\sigma_i},$$

em que PRP_{ij} é a anomalia normalizada calculada para o mês i do ano j ($i = 0, 1, \dots, 11$ e $j = 1961, 1962, \dots, 2022$. Vale lembrar que como o primeiro mês da série temporal era setembro, optou-se por colocar o mês 0 como setembro, e seguir assim até o mês 11, agosto); X_{ij} é o valor mensal de precipitação obtido para o mês i do ano j ; \overline{X}_i é a normal climatológica da média de precipitação de 30 anos calculada para o mês i (como nos dados houve dois períodos de 30 anos, foram calculadas duas normais) e; σ_i é a normal climatológica do desvio-padrão da precipitação de 30 anos calculada para o mês i .

Vale ressaltar que, no caso do presente estudo, o cálculo das normais climatológicas foi feito usando os primeiros 30 anos de dados, para o primeiro período, e os últimos 31 anos para o segundo período. De acordo com da Silva (2017), a utilização desse índice é justificada em diversos autores.

A variável “precipitação” foi escolhida porque acredita-se que o seu regime possa ser influenciado pelo aquecimento global, de forma a objetivar a observação desse efeito nos picos da série.

3.3 Análise dos dados – Ondaletas

Antes de Torrence & Compo (1998) publicarem seu artigo, havia uma ressalva quanto à utilização da análise de ondaletas. Dentre os motivos, estavam o fato de

ela ser uma boa forma qualitativa de fazer gráficos bonitos, mas sem significado estatístico ou físico. Assim, seu artigo veio fornecer uma outra visão dessa análise, além de métodos para aumentar a significância dos resultados. Esses métodos vão desde comparar o Espectro de Potência das Ondaletas (WPS em inglês) e o Espectro Global das Ondaletas (em inglês, GWP) da série de chuvas com os respectivos espectros teóricos para o ruído de fundo, podendo ser o branco ou vermelho, dentre outros sinais. Com base nessas comparações, estabelecer as linhas de significância e seus intervalos, bem como uma correta normalização (a do presente estudo já foi descrita na seção do tratamento dos dados).

Em termos gerais, a Análise de Ondaletas consiste na decomposição de uma série temporal em diversas janelas de tempo e frequência, a fim de analisar os comportamentos dominantes do sinal **ao longo do tempo**.

Essa é uma diferença importante entre essa análise e a de Fourier, por exemplo, que é muito consolidada no ramo da análise de sinais, porque a de Fourier só é capaz de representar o comportamento das frequências dominantes de sinais em determinados instantes de tempo, não ao longo de todo o período.

No entanto, a estratégia da Transformada de Fourier de decompor a função em um espectro determinado pelas funções de base é bem parecida com a da Transformada de Ondaletas: escolhe-se uma função (geralmente $e^{i\omega t}$ ou $\cos(\omega t)$ para a TF, e uma **função ondaleta**, ou ondaleta mãe, para a TO). Ela determinará como o sinal será decomposto e suas frequências extraídas, por meio de translações e mudanças de escala da função original (cada uma dessas mudanças na ondaleta mãe caracteriza uma nova **ondaleta filha**). Assim, consegue-se determinar qual(is) o(s) sinal(is) mais dominante(s).

A Transformada de Ondaletas geralmente tem dois espectros importantes a se analisar: O primeiro espectro é chamado de **Espectro Global de Ondaleta** (GWP), enquanto que o segundo é chamado de **Espectro de Potência de Ondaletas** (WPS). O espectro **global**, como o nome já diz, dá uma noção de quais frequências foram as mais significativas ao longo de **toda** a série temporal. Já o Espectro de Potência das Ondaletas é mais local, e a energia das ondaletas pode ser (e muito provavelmente será) diferente a cada ano, de forma que as frequências mais dominantes ao começo podem ser totalmente diferentes das dominantes ao final da série.

Com esses dois espectros e a série temporal normalizada, é possível ter uma noção tanto local quanto global dos períodos de tempo em que mais eventos fortes se concentram, tornando possível delinear possíveis candidatos a agentes externos que influenciam o sinal resultante de frequências e, com isso, permite utilizar uma análise mais aprofundada a respeito, procurando uma correlação entre esses agentes e a série temporal através de uma Transformada Cruzada de Ondaletas (TCO), analisando

o grau de correlação com a série para cada um dos candidatos. Essa análise é um ponto chave para o caminho das medidas preventivas não-estruturais mencionadas por, porque permite entender melhor como os eventos extremos estão relacionados aos ciclos naturais já conhecidos e para se tomar providências quanto ao futuro.

Por fim, vale ressaltar que foi escolhida a ondaleta de Morlet como Ondaleta Mãe, representada abaixo (não-normalizada):

$$\psi(\eta) = e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2},$$

onde $\eta = t/s$, com t o tempo, s a escala da ondaleta, i a unidade imaginária e ω_0 uma frequência não dimensional.

Há um detalhe que passa despercebido por alguns artigos e trabalhos que é o cálculo do parâmetro de autocorrelação do ruído vermelho, provindo da autocorrelação da série temporal. Esse parâmetro, α , vem do seguinte cálculo:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \sqrt{\alpha_2}}{2}$$

em que α_1 e α_2 são os termos de autocorrelação lag-1 e lag-2 (parâmetros das cadeias de Markov de ordem 1 e ordem 2) da série, respectivamente. Note que para cada série ele precisa ser calculado, visto que não há garantias de que será o mesmo valor para séries diferentes.

Também é preciso salientar que, como o período de dados obtido foi mensal, não é possível ter informação de escalas intramensais, apenas das intermensais (de maior frequência), interanuais e, também, interdecadais (de menor frequência).

Um outro ponto importante de se lembrar é que a escala s que aparece da análise das ondaletas não é necessariamente o período de tempo, porque essa relação depende da ondaleta mãe escolhida. Na ondaleta de Morlet, $t \approx s$; para uma derivada de Gaussiana, $t \approx 4s$; e por aí vai. Daí, mais uma comodidade da ondaleta de Morlet: o gráfico da escala é quase idêntico ao do tempo (note, no entanto, que do ponto de vista de energia, espectro e normalizações, não há uma vantagem muito significativa entre os diferentes tipos de ondaletas mãe, e elas dão resultados parecidos).

Para mais informações a respeito dessa análise, consultar Torrence & Compo, 1998.

3.4 Uso do computador e programação

O trabalho foi realizado com o auxílio do *software* de computador *Python*[®], por meio da interface da *Google*[®] *Colab*, que se assemelha a uma instância de *Jupyter Notebook*[®], com os pacotes e bibliotecas mais tradicionais para trabalhos com dados: o *NumPy*, o *matplotlib* e o *pandas*, além de um menos conhecido, o

`proplot`, em adição a dois *scripts* utilizados para facilitar a implementação dos passos da Transformada de Ondasletas.

Um desses *scripts* foi desenvolvido pela pesquisadora russa Dra. Evgeniya Predybaylo, com base no artigo de Torrence & Compo (1998), e modificado pelo diretor da Meteororte[®], Willy Hagi, em seu repositório do GitHub para haver compatibilidade com o Python 3³.

O outro *script* foi encontrado no *site StackOverflow*, e serve para calcular a autocorrelação de séries temporais, muito útil para calcular os índices lag-1 e lag-2, para obter o valor de α do ruído vermelho⁴.

Os valores das grandezas escolhidos foram: $dj = dt$, $dt = 1/12$ anos, $s_0 = 2.dt$, $J = 8/dj$. Já o valor de α encontrado foi de 0.15, bem diferente do artigo de Torrence & Compo (1998), cujo valor da mesma grandeza foi de 0.72.

Ressalta-se aqui que o fluxograma do código utilizado para a análise encontra-se disponível ao final deste trabalho, como anexo (Anexo I).

4 Resultados e Discussão

Com todas essas ferramentas aplicadas aos dados obtidos pelo InMet, foram gerados gráficos da TO, da série temporal de precipitação, bem como da série temporal do índice PRP, e dos valores médios e de desvio-padrão de Brasília em todo o tempo, e em cada período analisado, a fim de determinar o comportamento da precipitação na microrregião de Brasília-DF.

³Disponível através do link <<https://raw.githubusercontent.com/willyhagi/climate-data-science/master/Python-Scripts/waveletFunctions.py>>

⁴Disponível em <<https://stackoverflow.com/questions/643699/how-can-i-use-numpy-correlate-to-do-autocorrelation>>

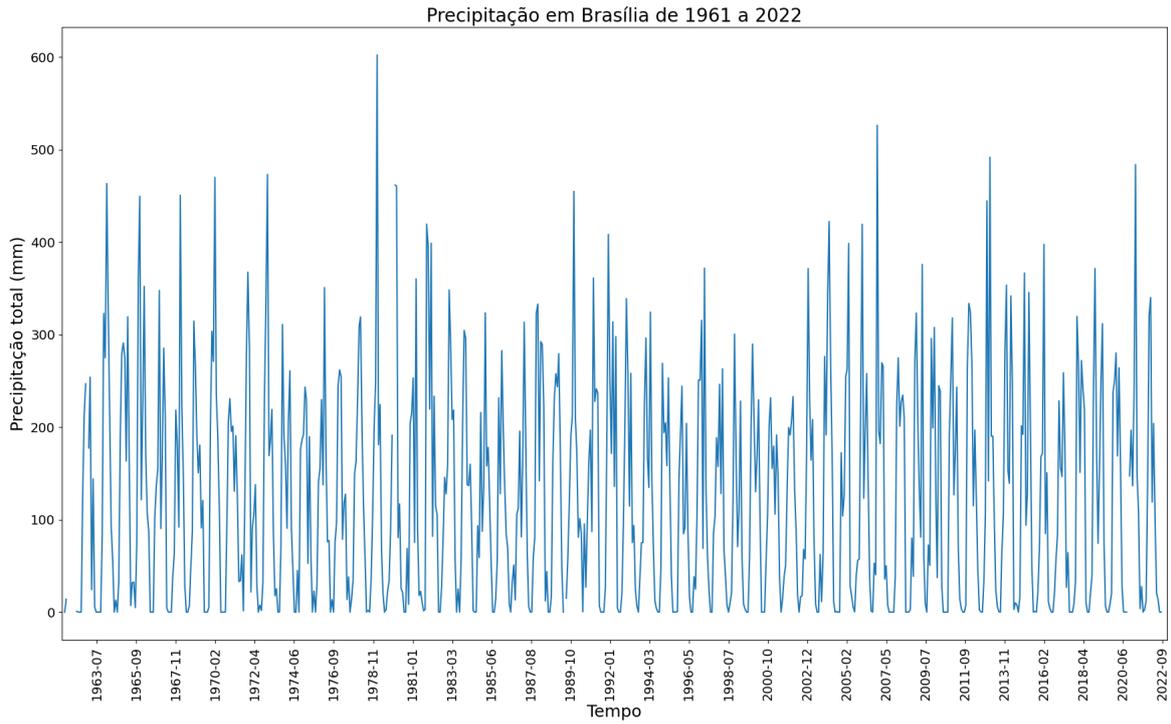


Figura 1: Série temporal mensal do volume de precipitação para Brasília, DF, de 09/1961 até 08/2022

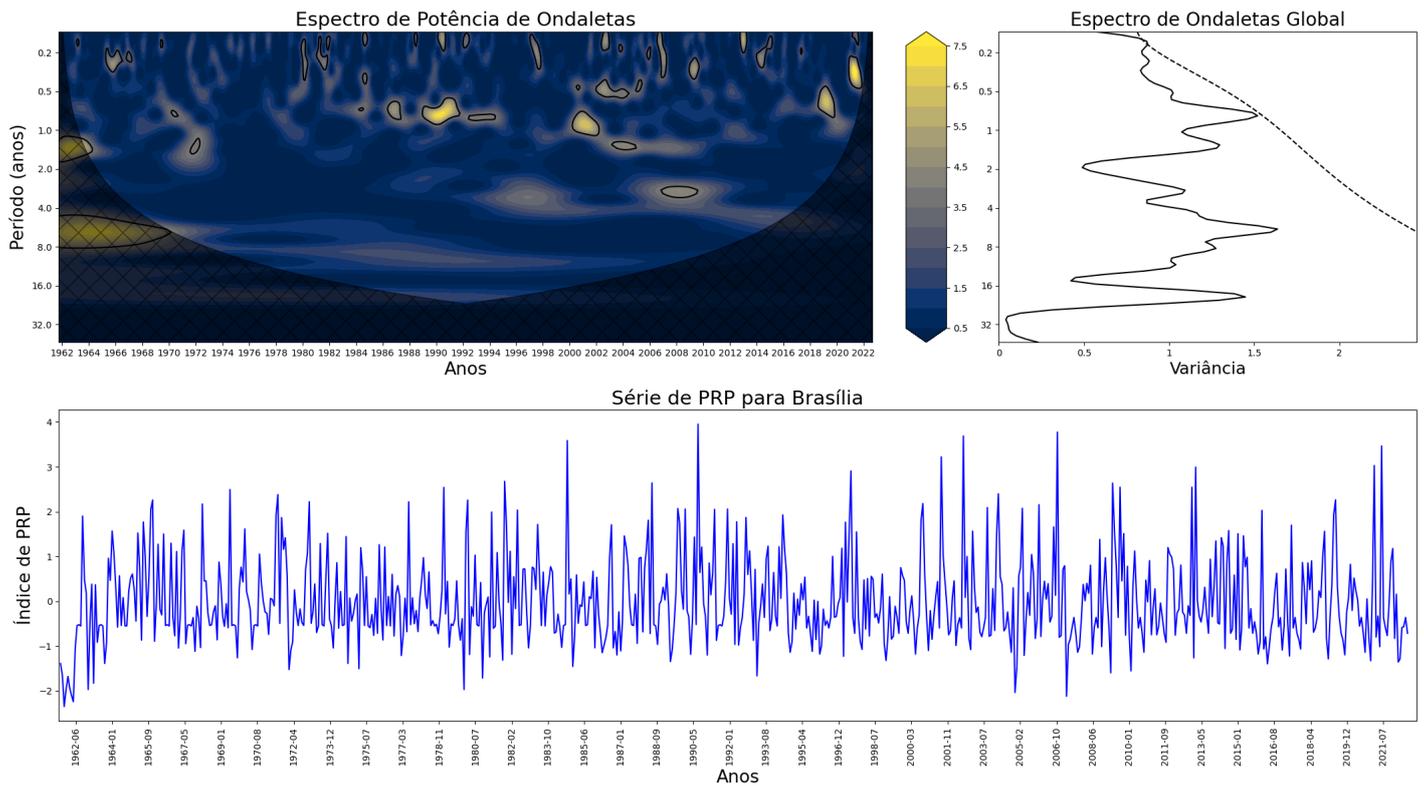


Figura 2: Gráfico com a série temporal de PRP (abaixo); Espectro de Potência de Ondaletas (WPS) (acima, à esquerda), com as regiões circuladas as significativas com 95% de confiança e; Espectro Global de Ondaletas (GWS) (acima, à direita), com a linha pontilhada a linha de significância 95%. $\alpha = 0.15$

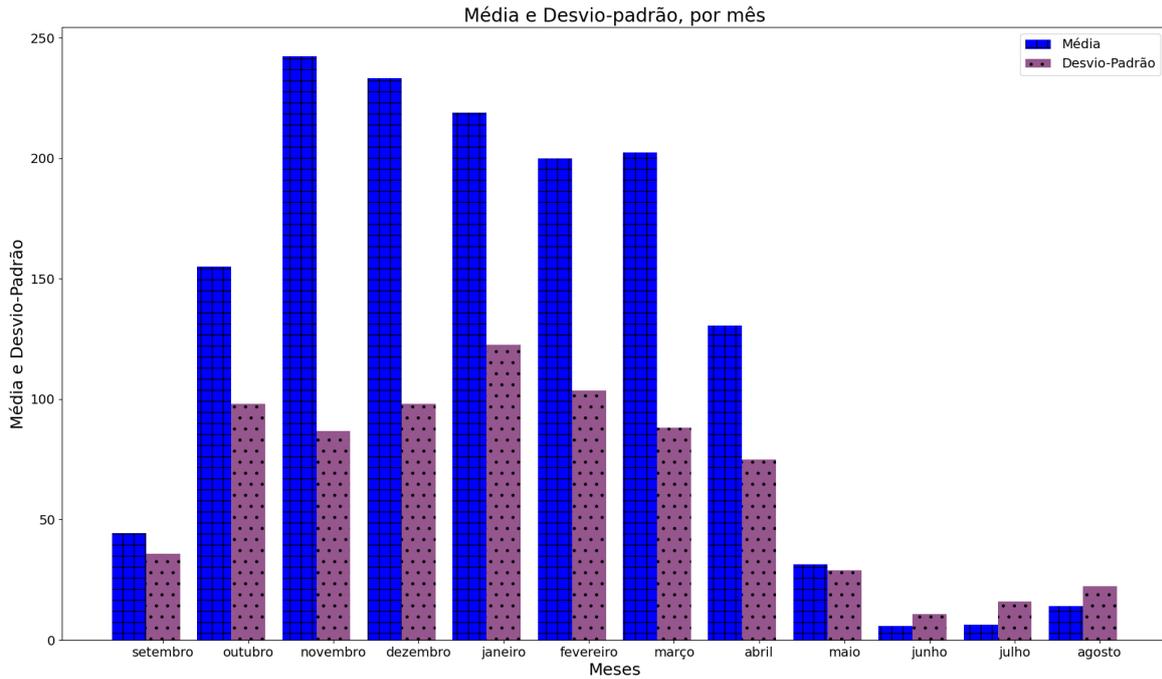


Figura 3: Gráfico com as médias e desvios-padrão mensais de precipitação de toda a série temporal

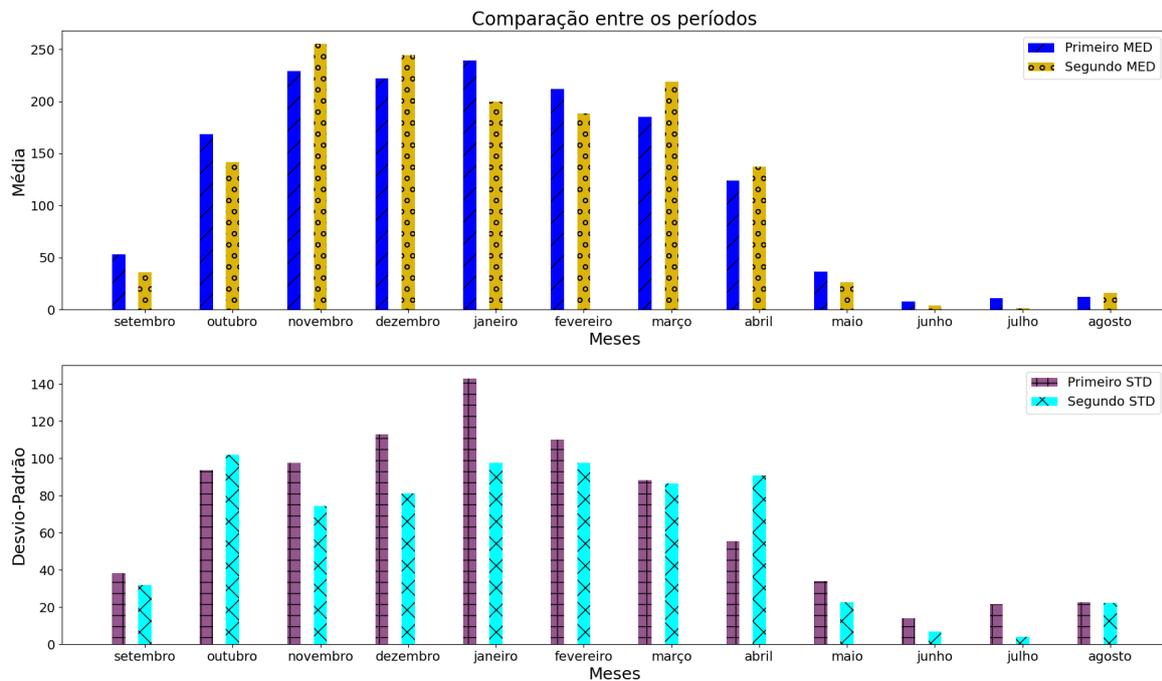


Figura 4: Gráfico com as médias (acima) e desvios-padrão (abaixo) mensais de precipitação no primeiro período e no segundo período

4.1 Analisando o WPS

Percebe-se, ao analisar o Espectro de Potência das Ondaletas (WPS) (figura 2), que ao longo de toda a série temporal (com exceção de 1970, 2000 e 2020), houve uma predominância com energia média-alta da escala de 0,18 a 0,37 anos, ou em torno de 2 a 5 meses, e com significância acima de 95% em meados de 1960, durante os anos 80 e 90, 1995, na década de 2000 e em 2010, que pode indicar uma influência tanto da sazonalidade, ocasionada pelos movimentos do Sol pelo céu ao longo do ano, dos movimentos das massas de ar e das correntes marítimas devidos à mudança na insolação.

Percebe-se, também, uma influência de 0.5 a 2 anos nos anos finais de 1960 e iniciais de 1970, bem como um comportamento mais acentuado na escala de 0.5 a 1 ano durante a década de 80 até meados da década de 90, ocorrendo então uma leve mudança de foco para escalas de 1 até 2 anos pelos próximos 10 anos, quando as escalas dominantes voltam a ser de 0.5 até 1 ano, até o final da série observada.

Há, também, um comportamento bastante presente das escalas de 2 a 6 anos, em todo o período que abrange os meados da década de 80 até o ano de 2015. Há, também, uma energia persistente das frequências de 6 a 12 anos durante todo período de observação. Esses dois ciclos podem se dever ao fato de estar atuando sobre a série temporal o sinal de El Niño, ENOS (El Niño, Oscilação do Sul), e talvez o Dipolo do Atlântico, de acordo com da Silva (2017).

Também é possível perceber que a escala de 16 anos também permeia toda a série temporal. Falta descobrir possíveis candidatos a esse ciclo.

Na região dentro do Cone de Influência, não é possível saber se os comportamentos ali estão bem descritos ou não, mas há bastante atuação de escalas grandes também.

Futuros estudos nessa parte da correlação entre os eventos e a série são necessários para descartar ou elencar os maiores influentes nesse caso.

4.2 Analisando o GWS

Observando o GWS (figura 2), pode-se perceber uma influência bem parecida dos períodos de 0,18 a 1 ano, ou seja, de 2 meses a um ano, com um pico em 9 meses e outro em um ano. Também é possível perceber um pico em 1,5 anos e um menor em 3 anos. Também há uma influência nos períodos de 4 a 12 anos, com um pico em 6 ou 7 anos, e mais um pico em torno de 21 anos. Esses são os períodos mais proeminentes globalmente. Vale ressaltar que somente a influência do período de 2 meses é significativa para o espectro global, mas apesar disso a influência dos períodos de 9 meses, 6 anos e 21 anos é uniforme, sendo as escalas dominantes.

Algo que não ficou muito claro é o porquê de a influência de 6 anos estar ele-

vada, visto que sua contribuição predominante está localizada dentro do Cone de Influência. Algo pode ter ocorrido para que o GWS tenha registrado essa escala na sua análise, visto que é provável que essa escala possa ter energia advinda dos efeitos de borda, e não da série temporal em si. Isso não ficou claro, e será precisa uma análise posterior.

4.3 Analisando a série temporal de Precipitação e de PRP

Observando a série temporal de PRP (figura 2) para Brasília, é possível ver com boa qualidade os extremos de precipitação. Vale ressaltar que os primeiros extremos negativos provavelmente advém das falhas que houve no primeiro ano das medições, então não têm muita confiança.

Percebe-se que os extremos positivos (máximos) principais da série (ou os maiores extremos globais ou os maiores extremos locais, no caso de PRP positivo, e vice-versa para PRP negativos) estão nos anos de: 1969, 1981, 1984, 1988, 1990/1991, 1996/1997, 2002, 2006, 2012, 2015, 2019 e 2021.

PRPs positivos separados por alguns dos períodos proeminentes:

- 1 ano: 1988 e 1990/1991. (1 ocorrência)
- 1,5 anos: 1988 e 1990/1991; 2019 e 2021. (2 ocorrências)
- 3 anos: 1981 e 1984; 2012 e 2015; 2015 e 2019. (3 ocorrências)
- 4 anos: 1984 e 1988; 2002 e 2006; 2015 e 2019. (3 ocorrências)
- 6 ou 7 anos: 1984 e 1990/1991; 1990/1991 e 1996/1997; 1996/1997 e 2002; 2006 e 2012. (4 ocorrências)
- 12 anos: 1969 e 1981; 1984 e 1996/1997; 1996/1997 e 2006; 2006 e 2019. (4 ocorrências)
- 21 anos: 1969 e 1990/1991. (1 ocorrência)

Os mínimos principais da série foram em: 1963/1964 (duvidosos), 1972, 1979, 1984, 1992, 2004/2005, 2006/2007, 2013.

PRPs negativos separados por alguns dos períodos proeminentes:

- 1 ano: Não presente entre os principais
- 1,5 anos: Não presente entre os principais
- 3 anos: 2004/2005 e 2006/2007 (2 ocorrências).
- 4 anos: 1979 e 1984 (1 ocorrência);

- 6 ou 7 anos: 1972 e 1979; 1979 e 1984; 1984 e 1992; 2006/2007 e 2013 (4 ocorrências).
- 12 anos: 1972 e 1984; 1979 e 1972; 1992 e 2004/2005 (3 ocorrências);
- 21 anos: 1963/1964 e 1984 (duvidoso); 1972 e 1992; 1992 e 2013 (3 ocorrências).

Percebe-se, aqui, que tanto os máximos quanto os mínimos sofrem bastante influência do período de 6 ou 7 anos, sendo que os máximos sofreram também, igualmente, influência do período de 12 anos. Com um pouco menos de influência foram os períodos de 3 e 4 anos, para os máximos, e 12 e 21 anos para os mínimos, e os demais períodos não foram muito definitivos para os extremos, mas também se encontram importantes.

Sobre os períodos de 1 ano e abaixo, apesar de não ser fácil observar, é possível ver muitos extremos próximos entre si distando aproximadamente em torno de, principalmente os extremos positivos, mostrando que não só são escalas do GWS, mas que também são visíveis na série temporal.

Por fim, vale ressaltar que é visível um número muito maior de picos de precipitação nos últimos anos da série temporal, a partir de 1983, que, assim como é relatado pelo IPCC (2018), tem ocorrido, entre outros fatores, pelo aumento da temperatura média global ao longo dos anos também. Cabe, a futuros estudos, saber o quanto desse aumento influenciou na precipitação, e o quanto dela é influenciado por fatores microrregionais, como o aumento da urbanização.

4.4 Relacionando informações

Agora, é preciso correlacionar os períodos da série de PRP e os picos do GWS com o WPS para analisar quais as maiores influências e, também, suas relações com o comportamento dos extremos citados. De acordo com da Silva (2017), esperava-se obter uma relação entre mais quantidade de escalas significativas atuando em conjunto em um ano e picos nesse mesmo ano. Esse comportamento foi observado em grande parte dos extremos, como por exemplo, 2006 (onde há as escalas de 3 anos, a de 1 ano, a de 9 meses e a de 12 anos) e houve picos de precipitação, mas o que se observou é que nem todos os pontos obedeciam a essa regra, como é o caso de 2007, em que houve o menor índice de PRP da série, mas ainda assim houve a atuação de diversas escalas temporais, e ainda significantes, mas como dito, foi um ano atípico em termos de estiagem.

4.5 Definindo a Sazonalidade

Olhando o gráfico com as médias de precipitação para cada mês, junto do desvio-padrão (figuras 3 e 4), é possível ver que Brasília tem duas estações bastante defini-

das:

- Uma estação de estiagem, compreendendo os meses de junho a setembro;
- Uma estação chuvosa, de outubro a abril e;
- Dois meses de transição, um da estação seca para a chuvosa (setembro) e outro da estação chuvosa para a seca (maio).

Em Brasília, há o conhecimento de que há duas estações bem definidas, uma seca e uma chuvosa, como se vê no site do GDF (GDF, 2023), além de outras fontes sobre Geografia de Brasília, e os períodos que se conseguiu definir por meio da análise dos gráficos de grandezas mensais corroboram com essa informação. Esses dados eram esperados, por estarem de acordo com o que se observa na região.

Além disso, durante dois períodos de observação, essa caracterização se manteve relativamente estável, com algumas flutuações; no entanto, o principal de haver duas estações bem definidas prevalece. No entanto, é bom analisar as (possíveis) tendências de mudança.

4.6 Discussão

Organizando tudo o que foi dito até então, é preciso responder às perguntas iniciais do texto.

Respondendo à primeira pergunta: Vemos, com este trabalho, que a TO é uma possível ferramenta e com bastante potencial para analisar dados no estudo dos comportamentos da precipitação, que, por ser um tema bastante complexo e interligado, também implica na utilização de diversas formas de análise. Resta, no entanto, uma pergunta: **qual a melhor ferramenta de análise de ciclos (que é o uso pretendido ao se propôr esta ferramenta)?** E, em adição a esta: **É possível obter uma análise de ciclos satisfatória com apenas uma ferramenta? Em outras palavras, uma análise de ciclos ficaria mais enriquecida ao utilizar-se de mais de uma ferramenta?**

Exemplos de ferramentas para se testar essas perguntas são a análise de Fourier e o método das Funções Ortogonais Empíricas.

Sobre a segunda pergunta, os ciclos dos extremos em Brasília tem as escalas sazonal, interanual, decadal e interdecadal (ou seja: 9 meses, 1 ano, 1.5 anos, 3 anos, 6 anos e 21 anos). No entanto, quando se trata de escalas dominantes, as que se sobressaem são as de 9 meses, 6 anos e 21 anos, e a única significativa no GWS acabou sendo a escala de 2 meses e pouco.

Resta, no entanto, saber como essas escalas se relacionam com os agentes causadores, e quais seriam eles. Alguns candidatos podem ser encontrados por meio de

da Silva (2017), em que houve a constatação de frequências semelhantes, embora não se possa afirmar se são os mesmos agentes ou não, por causa dos anos em que os picos acontecem.

Respondendo à terceira pergunta, ao observar a série temporal do índice de PRP (figura 2) para a precipitação em Brasília, é possível ver que, a partir de 1983, os picos na série foram se tornando bem acentuados, com mais disparidade comparado ao resto da série e mais vezes no tempo. Isso quer dizer que a intensidade dos picos tem se tornado maior nos anos mais recentes quando comparado com o começo da série temporal.

Respondendo à quarta pergunta, é possível caracterizar a sazonalidade de um lugar, como Brasília, ao analisar por, pelo menos, 30 anos, o regime de precipitação no local, tanto médio quanto o desvio, e daí agrupar os grupos de meses com características semelhantes (se houver, mesmo que todos tenham características semelhantes: nesse caso, será uma sazonalidade com poucas variações).

Mais análises podem ser feitas quanto à precipitação, principalmente levando em conta o estudo das séries diárias, por exemplo, em que se pode analisar os ciclos diários também, além de determinar os números de dias chuvosos e comparar entre períodos, como fizeram Pedron et al. (2016), para analisar não só a intensidade dos eventos extremos **mensais**, mas também os **diários**, que em curta escala são os que têm a tendência de causar mais estragos por acumular uma mesma quantidade de água em um espaço de tempo menor.

Mais um detalhe que ficou de lado até agora foi o fato de Brasília ter uma escassez de estações para realizar estudos climáticos, visto que as estações nas proximidades da estação 83377 foram desativadas em algum período anterior ao presente, ou foram implantadas muito depois, de forma a não terem tido tempo suficiente para determinar normais climatológicas, entre outros fatores. Então, mais uma sugestão seria a implementação de mais estações meteorológicas a fim de melhorar esse quadro no futuro para estudos mais robustos a respeito de sazonalidade e outros estudos.

5 Conclusão

Com este trabalho, esperava-se encontrar o comportamento dos extremos em Brasília a partir dos dados obtidos pela estação convencional 83377 do INMet, identificar a sazonalidade da microrregião e, assim, constatar se a análise de ondaletas é uma boa alternativa para fazer a análise de séries temporais de precipitação.

Para o caso em questão, a Transformada de Ondaletas é uma boa ferramenta de análise, porque conseguiu-se obter a sazonalidade de Brasília em concordância com outras fontes oficiais, além de determinar os ciclos predominantes na série temporal, suas intensidades e relação com a maior parte dos picos extremos, salvo algumas

exceções.

No entanto, apesar de o trabalho ter atingido seus objetivos, ainda são necessários mais estudos acerca da precipitação em Brasília-DF, por se mostrar um campo de estudos fértil e com diversas potencialidades de abordagem. Quanto mais perguntas forem respondidas, mais perto se chega de se obter uma medida não estrutural efetiva, evitando problemas relacionados à precipitação.

Esses estudos posteriores poderão analisar qual a tendência do regime de chuvas em Brasília (aumentar ou diminuir de frequência), bem como quais os índices climáticos que têm mais correlação com o comportamento da série de Brasília (fazendo, para isso, uma análise de ondaletas cruzada). Também pode ser possível fazer uma comparação com a análise de Fourier, e discutir possíveis discrepâncias e semelhanças nos resultados das duas análises. Além disso, também é aconselhável fazer o estudo dos dados obtidos com outras frequências (frequência diária, por exemplo).

Bibliografia

BOUDES, P. United Nations Conference on the Human Environment. **Encyclopedia Britannica**, 1972. Disponível em: <<https://www.britannica.com/topic/United-Nations-Conference-on-the-Human-Environment>>. Acessado em 30 de ago. de 2022.

CHUVAS em Petrópolis, no Rio de Janeiro, deixam ao menos 171 mortos. **CNN Brasil**, 2022. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/chuvas-em-petropolis-no-rio-de-janeiro/>>. Acessado em 4 fev. 2023.

FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FURACÃO Matthew deixa mortos e destruição no Haiti. **G1**, 2016. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mundo/noticia/2016/10/furacao-matthew-devasta-haiti-e-deixa-mortos.html>>. Acessado em 4 fev. 2023.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. **Geografia**. Brasília, DF, Brasil. GDF. Disponível em: <<https://www.df.gov.br/333/>>. Acessado em 9 de fev. 2023.

GRANDE Recife tem segundo dia de chuvas, ruas alagadas e transtornos. **G1**, 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2022/08/03/mais-chuvas-grande-recife-alagamentos-transtornos.ghtml>>. Acessado em 4 fev. 2023.

HURRICANE Katrina – facts, affected areas & lives lost. **History**, 2022. Disponível em: <<https://www.history.com/topics/natural-disasters-and-environment/hurricane-katrina>>. Acessado em 13 set. 2022.

MACHADO, V. de S. **Princípios de Climatologia e Hidrologia**. 1. ed. Porto Alegre: Ed. SAGAH, 2017.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Calculation of monthly**

and annual 30-year standard normals. Washington, D.C., EUA: WMO, mar. de 1989. (Technical document, n. 341; WCDP, n .10).

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Aquecimento global de 1,5°C: sumário para formuladores de políticas.** Incheon, República da Coreia, 6 de out. de 2018.

PAQUISTÃO vive ‘distopia climática’ devido a inundações com 1.000 mortes. **Veja**, 2022. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/mundo/paquistao-vive-distopia-climatica-devido-a-inundacoes-com-1-000-mortes/>>. Acessado em 4 fev. 2023.

PEDRON, I. T.; DIAS, M. A. F. S.; DIAS, S. de P.; CARVALHO, L. M. V.; FREITAS, E. D. **Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba – Southern Brazil.** International Journal of Climatology. Londres, Reino Unido, v.37, n.3, p. 1250-1264, jul. 2016.

ROCHA, R. V.; SOUZA FILHO, F. de A. de; SILVA, S. M. O. da. **Análise da relação entre a precipitação média do Reservatório Orós, Brasil - Ceará, e os índices PDO e AMO através da análise de <change points e transformada de ondeletas.** Revista Brasileira de Meteorologia. Rio de Janeiro, v. 34, n. 1, p. 139-149, 2019.

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; BARROS FILHO, M. N. M. **Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB.** Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 943-952, set./out. 2017.

DA SILVA, D. F. **Aplicação de análises de ondaletas para detecção de ciclos e extremos pluviométricos no leste do Nordeste do Brasil.** Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 943-952, set./out. 2017.

TEMPOS de refundação e reconstrução. **UnB Agência - Cobertura especial da UnB Agência**, 2011. Disponível em: <<https://unbagencia.wordpress.com/>>. Acessado em 13 set. 2022.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P.; **A Practical Guide to Wavelet Analysis.** Bulletin of the American Meteorological Society. Massachusetts, EUA, Vol. 79, No. 1, jan. 1998.

A Anexo I

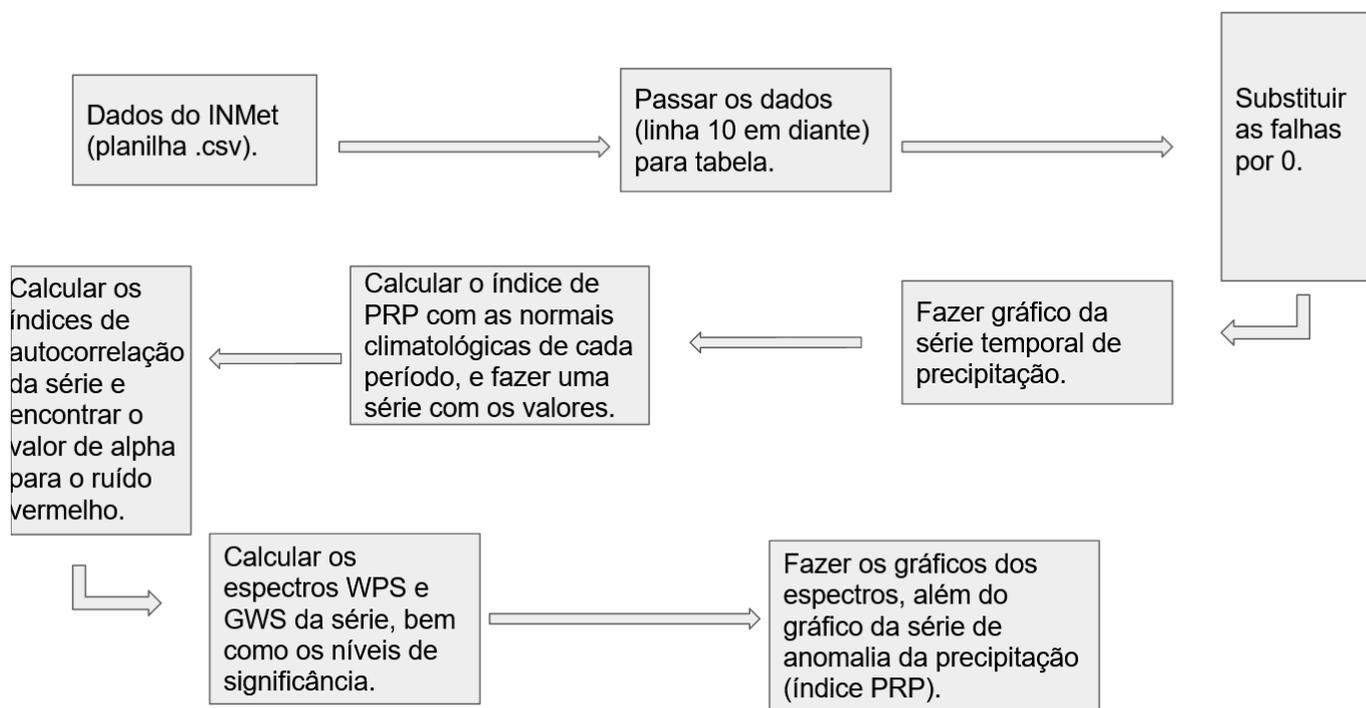


Figura 5: Fluxograma que contém os passos que o programa de computador tomou para realizar a Transformada de Ondasletas.