UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Vitor Matheus Passos Martins

EMPREGO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO NA ESTIMATIVA DO FATOR DE FREQUÊNCIA ADOTADO NO CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL (PMP) PONTUAL EM UMA REGIÃO DE CLIMA EQUATORIAL SUJEITA A ATUAÇÃO CONVECTIVA

Belo Horizonte
2024

Vitor Matheus Passos Martins

EMPREGO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO NA ESTIMATIVA DO FATOR DE FREQUÊNCIA ADOTADO NO CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL (PMP) PONTUAL EM UMA REGIÃO DE CLIMA EQUATORIAL SUJEITA A ATUAÇÃO CONVECTIVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem de processos hidrológicos

Orientador: Eber José de Andrade Pinto

Belo Horizonte
2024

Martins, Vitor Matheus Passos.
M386e Emprego da simulação de Monte Carlo na estimativa do fator de frequência adotado no cálculo da Precipitação Máxima Provável (PMP) pontual em uma região de clima equatorial sujeita a atuação convectiva [recurso eletrônico] / Vitor Matheus Passos Martins. - 2024.
1 recurso online (224 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Eber José de Andrade Pinto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos e apêndices: f. 182-224.

Bibliografia: f. 168-181.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Brasil, Norte - Teses. 4. Precipitação (Meteorologia) - Teses. 5. Método de Monte Carlo - Teses. I. Pinto, Eber José de Andrade. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Reginaldo César Vital dos Santos CRB/6 2165
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

FOLHA DE APROVAÇÃO

"EMPREGO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO NA ESTIMATIVA DO FATOR DE FREQUÊNCIA ADOTADO NO CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL (PMP) PONTUAL EM UMA REGIÃO DE CLIMA EQUATORIAL SUJEITA A ATUAÇÃO CONVECTIVA"

VITOR MATHEUS PASSOS MARTINS

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. EBER JOSÉ DE ANDRADE PINTO - Orientador

Prof. WILSON DOS SANTOS FERNANDES

Prof. FRANCISCO EUSTÁQUIO OLIVEIRA E SILVA

Prof. ELOY KAVISKI

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Profa. Priscilla Macedo Moura

Versão Final aprovada por

Prof. Eber José de Andrade Pinto

Coordenadora Orientador

Belo Horizonte, 05 de abril de 2024.

Documento assinado eletronicamente por **Wilson dos Santos Fernandes**, **Professor do Magistério Superior**, em 05/04/2024, às 18:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Francisco Eustaquio Oliveira e Silva**, **Professor do Magistério Superior**, em 05/04/2024, às 18:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Eloy Kaviski**, **Usuário Externo**, em 10/04/2024, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Eber Jose de Andrade Pinto**, **Professor do Magistério Superior**, em 12/04/2024, às 17:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura**, **Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 22/06/2024, às 06:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3154460** e o código CRC **50CA0F57**.

Referência: Processo nº 23072.219504/2024-39 SEI nº 3154460

Dedico este trabalho a meus pais, Luciélia Passos e Valdomiro Martins, minha irmã Rebeca Martins, como também para a minha amada avó Luzinete Passos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de aprender mais e mais.

Aos meus pais, Luciélia Passos e Valdomiro Martins, por terem me dado boas condições de inserção na vida acadêmica, além da minha irmã Rebeca Martins pela paciência.

À minha avó, Luzinete Passos, por acreditar em mim.

Ao meu orientador, Eber Pinto, pela disponibilidade, orientação e amizade durante esse percurso.

Aos meus colegas de trabalho, especialmente, Gladstone Alexandre e André Lauriano pelos incentivos e auxílios sobre a temática.

Aos meus amigos, Thales Basílio e Robert Nagai, pelo companheirismo desde a graduação, além da minha amiga de ensino médio, Camila Gomes, pelo encorajamento.

Aos professores, técnicos e amigos que fiz durante a participação no Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, que, de uma forma ou outra, colaboraram para a realização deste trabalho. Em especial aos colegas Bruno Rodrigues, Natália Melo, Gabriel Fonseca, Josiane Barcelos, Breno Pereira e Leonardo Rodrigues.

“Cisnes Negros são eventos de baixa probabilidade, mas com impacto extremamente elevado. É um outlier difícil de acontecer, mas que pode ocorrer um dia, e, se ocorrer, terá efeitos catastróficos”.

NASSIM NICHOLAS TALEB

RESUMO

A Precipitação Máxima Provável (PMP) é fundamental no dimensionamento das estruturas de segurança de grandes reservatórios. A WMO (2009) apresenta os dois métodos para estimativa da PMP: Hidrometeorológico e Estatístico de Hershfield. Em muitas situações escolhe-se o Método Estatístico, que é mais simples, e somente utiliza dados de precipitação. Contudo, essa metodologia foi desenvolvida por Hershfield no início da década de 60 e com estimativas para até 24 horas. Os dados empregados na construção do método estavam localizados no hemisfério norte, com 90% dos postos pluviométricos nos EUA, uma região de clima temperado e frio. Regiões tropicais, quentes e úmidas, não foram contempladas pelo patriarca do Método Estatístico. Diante deste contexto, a presente pesquisa objetivou estimar o *K* para o cálculo da PMP a partir de séries de precipitações máximas anuais simuladas pelo Método de Monte Carlo (MMC), para as durações iguais e superiores a 24 horas, em Barcarena/PA (latitude: -1,5058°; longitude: -48,6271°), uma localidade equatorial, quente e úmida no Norte do Brasil, que está próxima a Belém/PA e banhada pela Baia de Marajó. Além disso, avaliou-se e discutiu-se os resultados frente aos demais métodos consagrados na literatura: Método Original de Hershfield (1961a, 1961b e 1965), Método Estatístico com Envoltória Regionalizada, com base no trabalho de Sarkar e Maity (2020), e Método Hidrometeorológico. Foram selecionadas 52 estações pluviométricas para o estudo, mediante argumentações climatológicas de cunho convectivo, localizadas em volta de Barcarena/PA, com dados entre 1949 e 2023 e extensão temporal média de 34 anos, das quais 42 estavam aptas para a simulação sintética, que compreendia um processo do MMC com geração aleatória de 5.000 variáveis aleatórias através de distribuições de extremos. Na região em estudo, a maior precipitação máxima anual registrada de 24 horas foi de 467,4 mm. Os resultados do Método Estatístico com Envoltória Regionalizada, com base no trabalho de Sarkar e Maity (2020), apresentaram um *K* de 24 horas, associado a Estação VILA DO CONDE (00148011) que representava a cidade de Barcarena/PA, igual a 8,42, já a simulação sintética com percentis de 99% e 95% expuseram K_S iguais a 6,92 e 5,33, respectivamente. O que se pode concluir é que essas estimativas de fatores de frequência foram muito menores do que o *K* obtido pela Envoltória Original de Hershfield, que promoveria um fator de 14,94. Notou-se que magnitude dos fatores de frequência das Envoltórias Regionais decrescem à medida que a duração da precipitação aumenta (entre 24 horas e 30 dias). Informa-se também que, a construção de modelos estatísticos que representem melhor a condição climatológica local, tais quais a simulação sintética dos fatores de frequência e a Envoltória Regional dos K_S, conforme Sarkar e Maity (2020), devem ser levados em consideração frente a Envoltória proposta por Hershfield, a qual contempla uma realidade climática bem diferente da vista no Norte do Brasil e com um recorte temporal de dados pluviométricos defasado. Uma das grandes vantagens da simulação sintética é minorar a influência negativa de séries que tenham uma curta duração temporal ou baixa qualidade dos dados.

Palavras-chave: Monte Carlo; fator de frequência; PMP; Norte do Brasil; clima equatorial/tropical.

ABSTRACT

The Maximum Probable Precipitation (PMP) is fundamental in the design of safety structures for large reservoirs. WMO (2009) presents two methods for estimating PMP: Hydrometeorological and Hershfield Statistical. In many situations, the Statistical Method is chosen, as it is simpler and only uses precipitation data. However, this methodology was developed by Hershfield in the early 1960s and with estimates for up to 24 hours. The data used in the construction of the method were located in the northern hemisphere, with 90% of the rainfall levels in the USA, a region with a temperate and cold climate. Tropical, hot and humid regions were not considered by the patriarch of the Statistical Method. Given this context, the present research aimed to estimate *K* for calculating the PMP from series of maximum annual precipitation simulated by the Monte Carlo Method (MMC), for durations equal to and greater than 24 hours, in Barcarena/PA (latitude : -1.5058°; longitude: -48.6271°), an equatorial, hot and humid location in the North of Brazil, which is close to Belém/PA and bathed by Baia de Marajó. Furthermore, the results were evaluated and discussed in relation to other methods established in the literature: Original Hershfield Method (1961a, 1961b and 1965), Statistical Method with Regionalized Envelope, based on the work of Sarkar and Maity (2020), and Hydrometeorological Method. 52 rainfall stations were selected for the study, using climatological arguments of a convective nature, located around Barcarena/PA, with data between 1949 and 2023 and an average temporal extension of 34 years, of which 42 were suitable for the synthetic simulation, which comprised a MMC process with random generation of 5,000 random variables through extreme distributions. In the region under study, the highest maximum annual rainfall recorded in 24 hours was 467.4 mm. The results of the Statistical Method with Regionalized Envelope, based on the work of Sarkar and Maity (2020), presented a *K* of 24 hours, associated with the VILA DO CONDE Station (00148011) which represented the city of Barcarena/PA, equal to 8.42, the synthetic simulation with percentiles of 99% and 95% exposed K_s equal to 6.92 and 5.33, respectively. What can be concluded is that these frequency factor estimates were much lower than the *K* obtained by the Original Hershfield Envelope, which would promote a factor of 14.94. It was noted that the magnitude of the frequency factors of the Regional Envelopes decreases as the duration of precipitation increases (between 24 hours and 30 days). It is also reported that the construction of statistical models that better represent the local climatological condition, such as the synthetic simulation of frequency factors and the Regional Envelope of K_s, according to Sarkar and Maity (2020), must be taken into consideration compared to the Envelope proposed by Hershfield, which contemplates a climatic reality very different from that seen in the North of Brazil and with an out-of-date rainfall data. One of the great advantages of synthetic simulation is to reduce the negative influence of series that have a short temporal duration or low data quality.

Keywords: Monte Carlo; frequency factor; PMP; Northern Brazil; equatorial/tropical climate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classes das chuvas de projeto. “EA” significa “Excedências por Ano” 24
Figura 2 - Fluxograma simplificado do Método Hidrometeorológico.....34
Figura 3 - Pressão de vapor de saturação da água em função da temperatura do ar sobre a água. 38
Figura 4 - Diagrama pseudoadiabático para redução do ponto de orvalho para 1.000 hPa, segundo WMO (2009).....44
Figura 5 – Envoltória máxima do ponto de orvalho persistente por 12 horas em uma estação.....45
Figura 6 – Envoltória dos máximos pontos de orvalho históricas da Estação Meteorológica M6 de Curitiba.....46
Figura 7 - Croqui esquemático das colunas de água precipitável em uma situação hipotética.....48
Figura 8 - Localização geral das unidades operacionais e projetos de expansão na área de abrangência da Diretoria de Ferrosos Leste (DIFL) e Diretoria de Ferrosos Sul (DIFS) da Vale S.A. 49
Figura 9 - Localização das estações climatológicas selecionadas para os estudos. 50
Figura 10 - Eventos pluviométricos de referência de 1 dia selecionados para o cálculo da PMP de 24 horas.....50
Figura 11 – Localização dos postos pluviométricos e das estações meteorológicas utilizados no cálculo da PMP na região Sul do Brasil.....52
Figura 12 – Localização dos postos pluviométricos e das estações meteorológicas utilizados no cálculo da PMP na região Sul do Brasil.....53
Figura 13 - Ajuste da PMP não orográfica para elevação e inclinação, Ilhas Havaianas 57
Figura 14 - Fluxograma simplificado do Método Estatístico 60
Figura 15 - Fator $\boldsymbol{Km}$ em função da média de precipitações máximas anuais 63
Figura 16 - Ajuste da média e do desvio padrão em razão do máximo valor observado e do tamanho da amostra 63
Figura 17 - Fator de frequência ($\boldsymbol{Km}$) em função da duração da chuva e da média das precipitações máximas anuais de 24 horas do Brasil, segundo Barbosa *et al.* (2023) 66

Figura 18 - Espacialização da PMP de 24 horas de duração obtida pelo método empírico de Hershfield (1961a, 1961b e 1965) e pelo método empírico, para todo o Brasil, segundo Barbosa *et al.* (2023) 67
Figura 19 - Diferença percentual do método de Hershfield (1961a, 1961b e 1965) em relação ao método empírico para estimativa da PMP de duração de 24 horas para todo o Brasil 67
Figura 20 – Plotagem dos fatores de frequência locais versus as médias das precipitações máximas anuais de 24 horas de Selangor/Malásia, segundo Desa *et al.* (2001) 69
Figura 21 – Distribuição espacial da PMP de 24 horas da bacia do Qareh-Su seguindo o Método de Hershfield (a) e o método proposto por Alfazi-Gorouh *et al.* (2018) (b) 70
Figura 22 - Dispersão entre a média das máximas anuais diárias sobre a Índia entre 1901-2000 e a curva de envelope superior de Hershfield e o novo modelo proposto 71
Figura 23 - Ajuste das alturas de precipitação frente ao número de unidades de observação dentro da duração de chuva investigada 74
Figura 24 - *K* em função da duração da chuva e da média das precipitações máximas anuais com durações de 1h a 24h – Estado do Paraná 76
Figura 25 - *K* em função da duração da chuva e da média das precipitações máximas anuais com durações de 1 a 10 dias – Estado do Paraná 76
Figura 26 - Localização dos postos pluviométricos complementares 80
Figura 27 – Localização do município de Barcarena com destaques para alguns polos econômicos 85
Figura 28 – Mapa do uso e ocupação do solo da região de Barcarena/PA, bem como a relação com os biomas 87
Figura 29 – Mapa da hidrografia regional de Barcarena/PA e redondezas 88
Figura 30 – Mapa hipsométrico e relevo da região que abrange Barcarena/PA 89
Figura 31 - Tipos de formação de chuvas 90
Figura 32 - Ciclo de vida simplificada de uma célula convectiva, com formação (cumulus), maturação e dissipação. Detalhe para massas de ar quente e úmido (setas em vermelho) ascendendo e ar frio e seco descendo (setas em azul) 91
Figura 33 – Registro de uma Cumulonimbus sobre um corpo hídrico 92
Figura 34 - Registros de uma multicélula convectiva (a) e uma supercélula convectiva (b). 92

Figura 35 – Funcionamento da chuva orográfica 93
Figura 36 – Circulação da Célula de Hadley 94
Figura 37 – Circulação da Célula de Walker 95
Figura 38 – Faixa de ação da ZCIT variando entre o hemisfério Norte e Sul.....96
Figura 39 – Oceano Pacífico Oriental e a sua variação da temperatura em função do ENOS 98
Figura 40 - Condições de circulação em anos de El Niño 99
Figura 41 - Condições de circulação em anos de La Niña 99
Figura 42 - Representação esquemática dos sistemas atmosféricos atuantes na América do Sul, subdivididos em fenômenos meteorológicos de Baixa Troposfera e Alta Troposfera.....102
Figura 43 – Contorno aproximadamente circular de uma CCM no Nordeste do Brasil, no dia 15/01/2013, estimado por Lyra *et al.* (2020) com auxílio de um algoritmo de análise automática 104
Figura 44 - PMA entre o período de 1981 a 2016, na América do Sul 106
Figura 45 - Principais massas de ar atuantes no Brasil 107
Figura 46 - Comparação das normais climatológicas (1991 a 2020) da temperatura média mensal em algumas cidades brasileiras. A Estação INMET de referência para Belém foi a 82191 109
Figura 47 – Resumo comparativo das normais climatológicas (1991 a 2020) quanto às temperaturas mensais mínimas, médias compensadas, máximas, pontos de orvalhos, e umidade relativa do ar compensada para a Estação INMET 82191 de Belém/PA. Esse posto fica a 22 km, aproximadamente, de Barcarena/PA.....110
Figura 48 – Caracterização climática do IBGE (2002) em Barcarena/PA e região adjacente. Na imagem são verificadas também as Isoietas de PMA 112
Figura 49 - Classificação climática para o Brasil, de acordo com os critérios de Koppen, elaborado por Alvarez *et al.* (2013). 115
Figura 50 - Caracterização climática de Koppen-Geiger em Barcarena/PA e região adjacente.....116
Figura 51 - Classificação climática de Koppen-Geiger adaptada por *Kottek et al.* (2006, apud NASCIMENTO, 2017) 118
Figura 52 - Espacialização dos 52 postos pluviométricos utilizados no estudo 125

Figura 53 - Hietograma de precipitação mínima, média e máxima mensal da estação pluviométrica VILA DO CONDE (00148011), após a validação/consolidação dos dados e verificação dos outliers 126
Figura 54 - Exposição dos dois postos climatológicos INMET utilizados no estudo 129
Figura 55 – Fluxograma da metodologia do modelo de simulação do *K* sintético ... 136
Figura 56 - Ajuste entre a distribuição teórica de Gumbel (MOM) e a empírica de Cunnane para os pontos de orvalho persistentes de 24 horas do Inverno Amazônico da estação meteorológica do INMET “A201” 138
Figura 57 - Histograma comparativo entre os pontos de orvalho persistentes por 24 horas, ocorridos no Inverno Amazônico da estação meteorológica do INMET “A201”, e as estimativas da distribuição probabilística de Gumbel (MOM) 138
Figura 58 - Ajuste entre a distribuição teórica de Gumbel (MOM) e a empírica de Cunnane para os pontos de orvalho persistentes de 24 horas do Verão Amazônico da estação meteorológica do INMET “A201” 139
Figura 59 - Histograma comparativo entre os pontos de orvalho persistentes por 24 horas, ocorridos no Verão Amazônico da estação meteorológica do INMET “A201”, e as estimativas da distribuição probabilística de Gumbel (MOM) 139
Figura 60 – Envoltória Regional do $\boldsymbol{Km}$ em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 24 horas 145
Figura 61 – Envoltória Regional do $\boldsymbol{Km}$ em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 3 dias 146
Figura 62 – Envoltória Regional do $\boldsymbol{Km}$ em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 5 dias 146
Figura 63 – Envoltória Regional do $\boldsymbol{Km}$ em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 10 dias 147
Figura 64 – Envoltória Regional do $\boldsymbol{Km}$ em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 15 dias 147
Figura 65 – Envoltória Regional do $\boldsymbol{Km}$ em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 30 dias 148
Figura 66 – Comparativo das Envoltórias de Hershfield e Regional para a duração de 24 horas 151
Figura 67 - Espacialização dos 10 postos pluviométricos excluídos da simulação sintética 152

Figura 68 – Ajuste das distribuições probabilísticas a série temporal de máximos de 1 dia do posto pluviométrico VILA DO CONDE (00148011). Foi escolhida a distribuição probabilística de Gumbel.....154
Figura 69 – Histogramas dos fatores de frequência sintéticos gerados para o posto pluviométrico VILA DO CONDE (00148011) e para todas as 42 estações pluviométricas aptas para a simulação sintética 155
Figura 70 – Envoltórias Regionais dos $\boldsymbol{Km}_S$ Sintéticos com FC/percentil de 95% em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 24 horas a 30 dias 161
Figura 71 – Comparação entre os métodos Estatísticos de construção de Envoltórias para as durações de 24 horas a 30 dias: curva original de Hershfield, Envoltória Regionalizada conforme Sarkar e Maity (2020), Envoltória Regional do *K* com FC/percentil de 95% e a Envoltória Regional do *K* com FC/percentil de 99%.....163

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação entre a consequência da ruptura de uma barragem com os tempos de retorno recomendados para operação e fechamento, segundo ICOLD (2011)....25
Quadro 2 - Critérios para cálculo de cheia de projeto de vertedouros, segundo CBDB 25
Quadro 3 - Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor em função das consequências ou legislação vigente segundo a NBR 13028/2017.....26
Quadro 4 - Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor em período operacional ou de desativação/descaracterização da estrutura segundo a ANM (2022) 26
Quadro 5 - Tempos de retorno mínimos recomendados para as cheias de projeto segundo a ANA (2016).....27
Quadro 6 – Resumo das contribuições referentes aos fatores de frequência no Brasil e no mundo 73
Quadro 7 – Critérios aplicados por Koppen-Geiger para caracterização das regiões climatológicas no globo 113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativas da PMP Hidrometeorológica pontual na mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte situada no quadrilátero ferrífero 51
Tabela 2 - Resultados obtidos por Sugai (1989) para a PMP de 1 dia de duração...54
Tabela 3 – Resultados da PMP nos 3 métodos elencados para as 13 estações pluviométricas (mm).....81
Tabela 4 – Diferença entre os resultados da PMP envolvendo os modelos considerados por Burger (2014) e Carvalho (2000) 81
Tabela 5 - Características básicas das 52 estações pluviométricas. 122
Tabela 6 - Características básicas das 2 estações meteorológicas. 129
Tabela 7 – Valores máximos históricos da temperatura do ponto de orvalho persistente por 24 horas rebatido a 1.000 hPa 140
Tabela 8 - Eventos pluviométricos selecionados como referência para o cálculo da PMP de 24 horas.....140
Tabela 9 – Valores das temperaturas dos pontos de orvalho representativos persistentes por 24 horas dos eventos pluviométricos de referência em 1.000 hPa, medidos em °C.....141
Tabela 10 – Razão de maximização da umidade ($\boldsymbol{\gamma 1}$) dos eventos de referência de 24 horas 142
Tabela 11 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 24 horas para Barcarena/PA.....142
Tabela 12 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 3 dias para Barcarena/PA 143
Tabela 13 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 5 dias para Barcarena/PA 143
Tabela 14 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 10 dias para Barcarena/PA.....144
Tabela 15 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 15 dias para Barcarena/PA.....144
Tabela 16 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 30 dias para Barcarena/PA.....144
Tabela 17 – Resumo das estimativas das PMP_S pontuais Hidrometeorológicas para durações superiores a 24 horas em Barcarena/PA.....144

Tabela 18 – Cálculo da PMP Estatística pontual com Envoltória Regional de 24 horas para Barcarena/PA.....148
Tabela 19 – Cálculo da PMP Estatística pontual com Envoltória Regional de 3 dias para Barcarena/PA.....149
Tabela 20 – Resumo das estimativas das PMP_s pontuais Estatísticas para Barcarena/PA, para as durações de 24 horas, 3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias, com base nas Envoltórias Regionais idealizadas por Sarkar e Maity (2020)..150
Tabela 21 – Quantidade de postos pluviométricos associados a cada uma das distribuições probabilísticas inseridas no estudo.....153
Tabela 22 – Resumo dos resultados das metodologias Hidrometeorológica, Estatística com Envoltória Regionalizada, Estatística com Simulação Sintética com percentil de 95% e Estatística com Simulação Sintética com percentil de 99%, em mm, para a estação VILA DO CONDE (00148011) 156
Tabela 23 – Associação de TR_s às estimativas das PMP_s segundo os Métodos Hidrometeorológico, Estatística com Envoltória Regionalizada, Estatística com Simulação Sintética com percentil de 95% e Estatística com Simulação Sintética com percentil de 99%, utilizando a distribuição de Gumbel (método dos momentos-L), para a estação VILA DO CONDE (00148011) 160

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

α - Coeficiente de ajuste da Envoltória Regional, obtido por ajuste visual e, também, a partir de ferramentas de convergência numérica

ρ – Massa específica do ar

ρ_v – Massa específica do vapor

ΔQ – Variação do calor para o sistema;

τ – Constante psicométrica

γ_1 – Majorador de umidade da precipitação

γ_2 – Majorador de efeitos orográficos/ventos

γ_3 – Correção zona tropical

γ_4 – Correção referente à transposição de chuvas

AB – Alta da Bolívia

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANM – Agência Nacional de Mineração

AR(1) – Modelo autorregressivo multivariado de primeira ordem

ARMA – Modelo autorregressivo, processo de média móvel ou junção dos dois tipos

ASAS – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos do INMET

C_p – Calor específico do ar

C_{ps} – Calor específico do ar seco

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens

CMP – Cheia Máxima Provável

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CV – Coeficiente de variação da série de *n* máximas anuais

d – Duração da chuva de projeto

dp – Infinitesimal de pressão atmosférica

dT – Infinitesimal de temperatura

dz – Infinitesimal da altitude

DPA – Dano Potencial Associado

e – Pressão parcial de vapor

e_s – Tensão de vapor de saturação da água

FC – Faixa de confiança ou percentil

g – Aceleração da gravidade

g_n – Assimetria da série de *n* máximas anuais

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ICOLD – Internacional Comission on Large Dams

k_n – Coeficiente de curtose da série de *n* máximas anuais

$K\ ou\ K_m$ – Fator(es) de frequência (ou recorrência) hidrológico(s)

K_a – Fator de frequência inicial correspondente ao patamar

L – Calor latente de evaporação

LI – Linhas de Instabilidade

l_i – momentos-L amostrais de ordem i

MMC – Método de Monte Carlo

NBR – Normas Brasileiras

p – Pressão atmosférica em um dado ponto

$\bar{P}_d$ – Média das chuvas maximais anuais de d horas de duração

p_0 – Pressão na superfície

p_t – Pressão na tropopausa

p_{histor} – Precipitação histórica

P_{PMP} – Precipitação maximizada

p_{valor} – Probabilidade de obtenção de uma estatística de teste maior ou igual ao encontrado. Compara-se o mesmo com um limite preestabelecido antes da aplicação do teste, que é associado ao nível de significância, e que será denominado por $p_{valor-limite}$

PMA – Precipitação Média Anual

PMF – Probable Maximum Flood

PMP – Precipitação Máxima Provável

q – Umidade específica

r – Razão de mistura

r^* – Razão de mistura saturada

R – Constante universal dos gases

R_s – Constante do ar seco

R^2 – Coeficiente de determinação

S_n – Desvio padrão da série de *n* máximas anuais

S_n^2 – Variância amostral da série de *n* máximas anuais

T – Temperatura

T_{ar} – Temperatura do ar

$T_{dew\ point}$ – Temperatura do ponto de orvalho medido

$\mathrm{T}_{\mathrm{dew\ point}_{24\mathrm{h}}}$ – Temperatura do ponto de orvalho persistente por 24 horas

$T_{dew\ point_{repr-24h}}$– Temperatura do ponto de orvalho representativo persistente por 24 horas

$T_{dew\ point_{repr-24h-1000}}$ – Temperatura do ponto de orvalho representativo persistente por 24 horas rebatido a 1.000 hPa

$T_{dew\ point_{máx-persist-24h}}$– Temperatura do ponto de orvalho máxima persistente por 24 horas

$T_{dew\ point_{máx-persist-24h-1000}}$– Temperatura do ponto de orvalho máxima persistente por 24 horas a 1.000 hPa

T_h – Temperatura do bulbo úmido

TR – Tempos de Retorno ou período de retorno

t_i – quocientes-L amostrais de ordem i

U – Umidade relativa do ar

W – Altura de água precipitável (cm);

WMO – World Meteorological Organization

W_{max} – Máxima água precipitável representativa já registrada na localidade

W_{storm} – Água precipitável estimada representativa para a chuva histórica

W_2 – Máxima água precipitável representativa já registrada na localidade de interesse

W_1 – água precipitável estimada representativa para a chuva histórica a ser transportada.

$W_{El.\ Região-300}$ – Água precipitável contida entre a elevação média da região da chuva e o nível de 300 hPa

$W_{1000-300}$ – Água precipitável contida entre os níveis de 1.000 hPa e 300 hPa

$W_{1000-El.\ Região}$ – Água precipitável contida entre os níveis de 1.000 hPa (nível do mar) e a elevação média da região da chuva

$W_{El.\ Região-300\ repr}$ – Água precipitável representativa contida entre a elevação média da região da chuva e o nível de 300 hPa

$W_{El.\ Região-300\ máx}$ – Água precipitável máxima contida entre a elevação média da região da chuva e o nível de 300 hPa

$\bar{X}_{ajustado}$ – Média ajustada da série de *n* valores de chuvas máximas anuais, para determinada duração

$\bar{X}^{t}{}_{ajustado}$ – Média ajustada da transição entre o patamar e a curva exponencial

X_t – Chuva correspondente a um determinado tempo de recorrência *T*

$\bar{X}_n$ – Média da série de *n* máximas anuais

$X_{máx}$ – Máximo valor da série temporal

X_{min} – Máximo valor da série temporal

$\bar{X}_{n-1}$ – Média da série de $n-1$ valores de chuvas máximas anuais, isto é, excluindo o máximo valor da série $X_{máx}$

X_{PMP} – quantil da Precipitação Máxima Provável

Z_0 – Cota da base da coluna d'agua

Z_1 – Cota do topo da coluna d'agua

z – Altitude

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 23
2 OBJETIVOS 31
2.1 Objetivo Geral 31
2.2 Objetivos Específicos 31
3 REVISÃO DA LITERATURA 32
3.1 Método Hidrometeorológico 34
3.1.1 $\gamma 1$: fator de umidade 35
3.1.2 $\gamma 2$: efeitos orográficos/ventos 55
3.1.3 $\gamma 3$: zona tropical 56
3.1.4 $\gamma 4$: transposição 57
3.2 Método Estatístico 60
3.3 Simulação Estocástica dos Fatores de Frequência 75
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 83
4.1 Localização Geográfica do Município de Barcarena/PA 84
4.2 Vegetação 86
4.3 Hidrografia 87
4.4 Relevo e Hipsometria 89
4.5 Climatologia 90
4.5.1 Formação das chuvas 90
4.5.2 Circulação Geral da Atmosfera 93
4.5.3 El Niño e La Niña 97
4.5.4 Sistemas Atmosféricos na América do Sul e no Brasil 101
4.5.5 Massas de ar no Brasil 106
4.5.6 Classificação Climatológica do IBGE (2002) 110
4.5.7 Classificação Climatológica de Koppen-Geiger 113
5 MATERIAIS E MÉTODOS 119
5.1 Delimitação e seleção das estações pluviométricas 119
5.2 Delimitação e seleção das estações meteorológicas 128
5.3 Sorteio de variaveis aletórias de máximos anuais de precipitação 132
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 137
6.1 Método Hidromeoteorológico 137
6.1.1 Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 24 horas 140
6.1.2 Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual para durações superiores a 24 horas 143
6.2 Método Estatístico e Envoltória Regionalizada 145

6.3 Simulação Sintética dos fatores de frequência e constatações 151
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 164
REFERÊNCIAS.....168
ANEXO A – Tabela de água precipitável segundo a WMO (2009) 182
ANEXO B – MAPA DE CLIMA DO BRASIL (IBGE, 2002) 185
APÊNDICE C – Estatística Descritiva dos Postos Pluviométricos e Teste para Detecção e Identificação de Pontos Atípicos (*outliers*) 186
APÊNDICE D – Testes não-paramétricos e os p-valores associados.....195
APÊNDICE E – Teste de Aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) e a distribuições probabilísticas utilizadas 205
APÊNDICE F – Resultados Estatísticos Gerais: K e PMP 216

1 INTRODUÇÃO

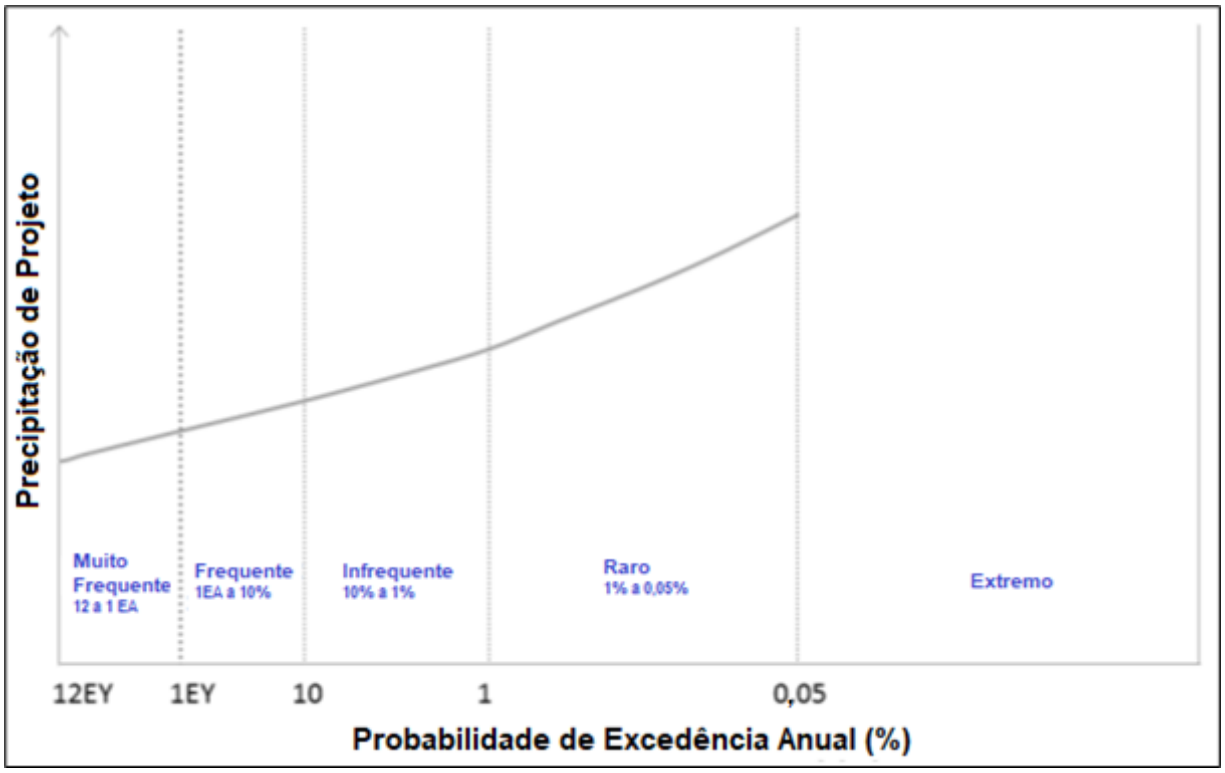
Observa-se um interesse científico e técnico e em estimar limites atmosféricos de precipitação, em diversas regiões do Brasil e do mundo, com a principal finalidade de garantir segurança para as estruturas de reservação. Noções da magnitude máxima das chuvas extremas são bem-vindas na esfera pública e privada, pois permitem que a autoridade pública e o empreendedor, possam se precaver e proteger a população frente à eventos extremos de precipitação, que atualmente estão se tornando mais recorrentes no país.

Desse modo, contextualiza-se a Precipitação Máxima Provável, que é, segundo o "Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)", publicação de nº 1045 da *World Meteorological Organization* (WMO, 2009), a maior altura de chuva meteorologicamente possível de ocorrer para uma dada duração, sobre uma determinada área, em uma determinada época do ano, sem considerar possíveis tendências climáticas a longo prazo. Esta pode ser transformada em Cheia Máxima Provável (CMP ou PMF – "*Probable Maximum Flood"*).

Horton (1936) reflete que deve existir um limite físico superior para a geração de tempestades e cheias em uma determinada bacia hidrográfica. No entanto, Salas *et al.* (2014) e WMO (2009) sinalizam diferenças conceituais da PMP na esfera teórica e operacional: enquanto a definição teórica se apoia na análise científica para representação dos limites superiores da precipitação, a definição operacional expõe como uma metodologia que deve ser utilizada em conjunto com outras técnicas para estimativa dos eventos chuvosos de mais improvável ocorrência.

Algumas referências apresentam associações de probabilidades excedência às estimativas de PMP. National Research Council - NRC (1994) delimitou períodos de retorno vinculados às PMP_S nos Estados Unidos em torno de 10^5 e 10^9 anos. Nathan e Weinnmann (2001, *apud* FERNANDES, 2009) apontaram que PMP_S teriam Tempos de Retorno (TR_S) entre 10^4 e 10^7 anos. Já Ball *et al.* (2019) atribuem probabilidades de excedências anuais menores ou iguais a 0,05%, ou seja, recorrência mínima de 1 a cada 2.000 anos (Figura 1).

Figura 1 – Classes das chuvas de projeto. “EA” significa “Excedências por Ano”



Fonte: adaptado de Ball *et al.* (2019).

Pesquisadores, órgãos reguladores e organizações não governamentais de cunho técnico elucidam a importância do uso da PMP (como também a CMP) nas verificações hidrológicas de reservatórios, e trazem à tona a importância de mensurar a PMP com certa confiabilidade, pois isso impacta diretamente em adequações de vertedouros, viabilidade técnica de novas estruturas, ou em descomissionamentos.

Szymanski e Davies (2004) consideram que, o tempo de retorno a ser considerado para o dimensionamento de extravasores de barragens em processo de descaracterização, deve ser associado a CMP caso haja potencial perdas de uma ou mais vidas em uma condição de ruptura hipotética.

Queiroz *et al.* (2017) apresenta, em seu trabalho, as recomendações da Internacional Comission on Large Dams (ICOLD) em seu Boletim n° 139 de 2011, com diretrizes sobre a verificação de extravasores com base na consequência de uma hipotética ruptura (Quadro 1).

Quadro 1 - Relação entre a consequência da ruptura de uma barragem com os tempos de retorno recomendados para operação e fechamento, segundo ICOLD (2011)

Consequência	Período de retorno de projeto (período operacional)	Período de retorno de projeto (período de fechamento)
Baixo	200 a 500 anos	PMP
Moderada	500 anos a 1.000 anos	PMP
Alta	1.000 anos a PMP	PMP

Fonte: adaptado de Queiroz *et al.* (2017)

Outro trabalho interessante citado por Queiroz *et al.* (2017) é a classificação delimitada pelo Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), onde são apresentadas relações de risco e dimensões da barragem para determinar a cheia de projeto de referência. Pinheiro (2011) consolida, resumidamente, as sugestões no Quadro 2.

Quadro 2 - Critérios para cálculo de cheia de projeto de vertedouros, segundo CBDB

Risco	Dimensão	Cheia de Projeto
Baixo	Pequena	Cheia com período de retorno entre 50 e 100 anos
	Média	Cheia com período de retorno de 100 anos a $\frac{1}{2} * \text{CMP}$
	Grande	$\frac{1}{2} * \text{CMP}$ a $1\ \text{CMP}$
Médio	Pequena	Cheia com período de retorno de 100 anos a $\frac{1}{2} * \text{CMP}$
	Média	$\frac{1}{2} * \text{CMP}$ a $1\ \text{CMP}$
	Grande	$1\ \text{CMP}$
Alto	Pequena	$\frac{1}{2} * \text{CMP}$ a $1\ \text{CMP}$
	Média	$1\ \text{CMP}$
	Grande	$1\ \text{CMP}$

Fonte: adaptado de Pinheiro (2011)

A NBR 13028/2017, que trata da *Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água*, dispõe acerca dos Tempos de Retorno mínimos para dimensionamento do Sistema Extravasor de acordo com as consequências ou danos potenciais associados a

estrutura (Quadro 3). A definição de Dano Potencial Associado (DPA), introduzida na Resolução n° 143 de 10 de julho de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), perpassa por medir os danos ambientais, sociais ou econômicos de uma hipotética falha da barragem. Nota-se uma semelhança com as exigências do Quadro 1.

Quadro 3 - Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor em função das consequências ou legislação vigente segundo a NBR 13028/2017

Dano Potencial Associado (DPA)	Período de retorno de projeto (período operacional)	Período de retorno de projeto (período de fechamento)
Baixo	200 a 500 anos	10.000 anos ou PMP
Médio	500 anos a 1.000 anos	10.000 anos ou PMP
Alto	1.000 anos a PMP	10.000 anos ou PMP

Fonte: adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas/ABNT (2017).

O parágrafo 2° do Art. 24 da Resolução n° 95 de 07 de fevereiro de 2022 da Agência Nacional da Mineração (ANM), resolução essa que consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração, exige um tempo de retorno mínimo a ser considerado no dimensionamento dos vertedouros, como se segue no Quadro 4.

Quadro 4 - Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor em período operacional ou de desativação/descaracterização da estrutura segundo a ANM (2022)

Dano Potencial Associado (DPA)	Período de retorno de projeto (período operacional)	Período de retorno de projeto (período de fechamento)
Baixo	500 anos	10.000 anos ou PMP, a que for mais restritiva para a duração crítica do sistema hidrológico avaliado
Médio	1.000 anos	10.000 anos ou PMP, a que for mais restritiva para a duração crítica do sistema hidrológico avaliado
Alto	10.000 anos ou PMP, a que for mais restritiva para a duração crítica do sistema hidrológico avaliado	10.000 anos ou PMP, a que for mais restritiva para a duração crítica do sistema hidrológico avaliado

Fonte: ANM (2022).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão de Estado brasileiro responsável por auditar todo o sistema elétrico brasileiro, inclusive fiscalizando as barragens para fins de aproveitamento elétrico, conforme é citado na sua Resolução

n° 696 de 15 de dezembro de 2015. A ANEEL recomenda que os projetos de barragens com altura maiores do que 30 m incluam estudos de CMP, conforme diretriz da Eletrobras (2003), que pode ser estimada tanto da consequência da PMP, como de uma análise probabilística de estações fluviométricas. É orientado ao empreendedor do setor elétrico seguir recomendações de outros órgãos reguladores importantes no país como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Este último possui o *Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens VOLUME V - Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens* (2016) que sugere os seguintes tempos de recorrência para as cheias de projeto (Quadro 5):

Quadro 5 - Tempos de retorno mínimos recomendados para as cheias de projeto segundo a ANA (2016)

Altura da barragem, h (m)	Volume, V (hm³)	Tempo de Retorno (anos)
$h < 15$	$V < 3$	500
$15 \leq h < 30$	$3 \leq V < 50$	1.000
$h \geq 30$	$V \geq 50$	CMP

Fonte: Manual V da ANA (2016).

O Manual da ANA (2016) aconselha que a CMP deverá ser estimada com base em modelos de chuva-vazão que recebem como entrada a PMP. Na falta de dados suficientes, poderá ser utilizado, alternativamente, o valor correspondente à cheia com tempo de recorrência de 10.000 anos.

Apesar da associação da PMP com o limite superior, estabelecer essa estimativa não é indubitável ou inquestionável, sendo fortemente dependente da disponibilidade de dados monitorados e vulnerável a incertezas (DOOGE, 1986).

Complementar a isso, Berod *et al.* (1992) argumentam que a questão da PMP não reside na existência de um valor máximo para a precipitação, como sugere sua definição, mas sim na sua determinação. De acordo com os autores mencionados, a complexidade dos processos atmosféricos e a natureza aleatória dos padrões de precipitação tornam impossível a precisão na identificação do valor real do limite superior. Dessa forma, os métodos de estimação da PMP consistem em abordagens que aproximam o limite superior dito empírico do valor verdadeiro de máxima

precipitação. Além disso, a estimativa da PMP é condicionada à disponibilidade de um conjunto de dados observacionais históricos, o que torna a determinação da PMP suscetível às incertezas associadas às amostras disponíveis.

Contextualizando agora os principais métodos recomendados pela WMO (2009), aplica-se, em muitas situações, o Método Hidrometeorológico, de maior complexidade que envolve dados climatológicos, e o Método Estatístico, que somente utiliza dados de precipitação. O Método Estatístico, desenvolvido por Hershfield no início da década de 60, é recomendado para bacias hidrográficas com áreas inferiores a 1.000 km² e para durações de chuva de até 24 horas. Além do mais, os parâmetros e os ábacos sugeridos no manual da WMO (2009) foram determinados com dados pluviométricos, em sua maioria, dos Estados Unidos da América (de clima temperado e frio segundo KOTTEK *et al.*, 2006 apud NASCIMENTO, 2017). Os procedimentos para a estimativa da PMP, de acordo com o manual da WMO (2009), variam com a quantidade e qualidade dos dados disponíveis, a localização e área de drenagem da bacia hidrográfica, bem como, as suas características topográficas, o clima e os tipos de tempestades.

Dessa forma, pesquisadores como Barbosa *et al.* (2023), Silva Neto *et al.* (2020), Conceição e Fontes (2019), Cavalcanti *et al.* (2018), Burger (2014) e Sugai (1989) questionaram o uso indiscriminado da Envoltória Original de Hershfield para o Brasil (ou parte dele) que, no geral, tem um clima classificado como tropical, ou subtropical, com diversas porções classificadas como quentes e/ou úmidas (IBGE, 2002; ALVAREZ *et al.*, 2013). Os mesmos estimaram fatores de frequência (K) menos conservadores do que o apresentado pelo Ábaco de Hershfield, seja através de uma investigação local, seja, por uma elaboração de Envoltória geral para o país. Inclusive, Barbosa *et al.* (2023) apresentaram um comparativo das diferenças percentuais de PMP_S entre o método de Hershfield e o proposto por eles, como discrepância justamente na região Norte e litoral brasileiro, porções estas caracterizadas, em sua maioria, como quentes, úmidas e tropicais.

Dentro do âmbito internacional, Sarkar e Maity (2020) apresentaram uma nova concepção de construção de envoltórias dos fatores de frequência, com um patamar até o máximo *K* local e decaimento exponencial, e aplicaram na Índia, que tem um

clima também tropical (KOTTEK *et al.*, 2006 apud NASCIMENTO, 2017), elucidando diferenças percentuais consideráveis em partes do território indiano quando se confronta com a metodologia original de Hershfield (mais conservador).

Já Alfazi-Gorouh *et al.* (2018) compararam as PMP_S do método de Hershfield para a bacia Iraniana do Qareh-Su, de clima árido e quente (KOTTEK *et al.*, 2006 apud NASCIMENTO, 2017), confrontando com a metodologia proposta por esses pesquisadores, que seria de não utilizar uma envoltória dos K_S, mas apenas os fatores de frequência calculados localmente por posto pluviométrico. Os resultados indicaram uma redução de 50% nas estimativas de PMP.

Desa *et al.* (2001), como também Desa e Rakhecha (2007), elucidaram diferenças consideráveis na Malásia entre os fatores de frequência locais e os extraídos pela Envoltória Original de Hershfield, país esse de clima quente, úmido e tropical (KOTTEK *et al.*, 2006 apud NASCIMENTO, 2017), semelhante ao observado no Norte do Brasil.

Diante do exposto, justifica-se a realização da presente dissertação que buscou adaptar o Método Estatístico de Hershfield, assim como contribuiu para preencher a lacuna da determinação de fatores de frequência, em uma região de clima tropical/equatorial, quente e úmido, em durações iguais ou superiores a 24 horas e, além disso, investigou o que já se emprega na esfera científica para estimar a PMP e as alternativas que podem ser desenvolvidas e implementadas para dar mais confiabilidade ao conceito de limite superior de precipitação em uma determinada região.

É sinalizado por Bertoni e Tucci (1993), bem como Papalexiou e Koutsoyiannis (2006), a insuficiência das informações disponíveis para a inferência com precisão de um limite superior para a precipitação. Neste contexto, insere-se os processos estocásticos, que dão a oportunidade de determinar o K de um posto pluviométrico após diversas simulações aleatórias, e vincular a estimativa do fator de frequência a uma faixa de confiança. Além disso, as “m” trajetórias temporais simuladas para uma estação pluviométrica, que geram “m” fatores de frequência, se tornam uma forma de contornar a estimação determinística do K, sobretudo, de séries amostrais curtas.

Assim sendo, simulações sintéticas de séries de precipitações máximas anuais fornecem subsídios estatísticos para uma melhor tomada de decisão do hidrólogo.

O trabalho de Burger (2014) foi utilizado como base para a construção da simulação sintética dos fatores de frequência, todavia, a presente dissertação questiona alguns pontos metodológicos da autora, isto é, ao invés da utilização do Método de Monte Carlo (MMC) com faixa de confiança de 99,9% partir de um modelo autorregressivo multivariado de primeira ordem *AR(1)*, houve a proposição do uso do MMC + números pseudoaleatórios + distribuição de extremos, mediante a percepção de que máximos anuais de precipitações tendem a serem independentes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é estimar o K (fator de frequência hidrológico) do Método Estatístico da Precipitação Máxima Provável (PMP) pontual, a partir de séries de precipitações máximas anuais simuladas pelo Método de Monte Carlo (MMC), em uma localidade equatorial, quente e úmida no Norte do Brasil, para durações iguais e superiores a 24 horas.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir as distribuições de probabilidades de extremos que melhor se adequam aos dados de precipitações máximas anuais presentes na localidade de estudo;
- Corroborar para a geração sintética dos fatores de frequência utilizando o MMC, números pseudoaleatórios e distribuições de extremos;
- Avaliar e discutir os resultados dos fatores de frequência sintéticos e suas estimativas de PMP, na localidade de estudo, frente aos demais métodos consagrados na literatura: Método Original de Hershfield (1961a, 1961b e 1965), Método Estatístico com Envoltória Regionalizada, com base no trabalho de Sarkar e Maity (2020), e Método Hidrometeorológico.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Segundo a World Meteorological Organization (WMO, 2009), a PMP é definida como a maior altura de chuva meteorologicamente possível de ocorrer sobre uma determinada bacia hidrográfica, correspondente a uma dada duração e época do ano, sem levar em conta as tendências climáticas de longo prazo. Estatisticamente, a PMP representa uma chuva em que a probabilidade de ocorrência de excedência deste evento é nula, ou quase nula.

Para o cálculo da PMP é necessário séries históricas extensas de variáveis climáticas e pluviométricas. A própria WMO (2009) recomenda o uso de 50 anos ou mais, para variáveis climáticas, e 30 anos ou mais, para dados pluviométricos. No entanto, essas ressalvas se esbarram na dificuldade de monitoramento dentro do território brasileiro, haja vista que a densidade de monitoramento climático em várias regiões do país é baixa e recente.

Informa-se que, a representatividade e precisão da PMP são influenciadas pela disponibilidade e qualidade dos dados requeridos para o cálculo (DOOGE, 1986). Concomitantemente, tem-se que a metodologia e critérios adotados durante os estudos também refletem diretamente nos resultados encontrados (BEROD *et al.*, 1992).

A WMO (2009) apresenta vários métodos disponíveis para a estimação da PMP, sendo os seguintes:

a) O método local (maximização da tempestade local ou modelo local);
b) O método de transposição (transposição por tempestade ou modelo de transposição);
c) O método de combinação (maximização temporal e espacial da tempestade, ou combinação de tempestades ou modelo de combinação);
d) O método inferencial (modelo teórico ou de raciocínio);
e) O método generalizado (estimativa generalizada);
f) O método estatístico (estimativa estatística).

Em suma, o Método Local usa apenas um posto meteorológico. Já o Método da Transposição recorre ao transporte hipotético de uma tempestade intensa de um local para o outro. O Método da Combinação soma o efeito de duas ou mais tempestades em uma dada localidade, utilizando dos princípios de meteorologia sinótica. O Método Inferencial cria um modelo 3D da atmosfera e determina uma equação geral das tempestades, e é recomendado para bacias com áreas de centenas de milhares de km², sendo que o usuário deve ter um ótimo domínio sobre os fenômenos atmosféricos regionais, inclusive equacionando-os. Em relação ao Método Generalizado, comumente denominado de Método Hidrometeorológico ou Método Físico, tenta maximizar a umidade do máximo acumulado de chuva, para uma dada duração, já registrado em uma determinada zona homogênea. Geralmente busca-se delimitar zonas de cálculo da PMP. Por fim, o Método Estatístico é originalmente baseado nos clássicos trabalhos de Hershfield (1961a, 1961b e 1965).

A WMO (2009) destaca, principalmente, o método generalizado e o método estatístico, inclusive dando maiores detalhes e exemplos de aplicação.

Os métodos hidrometeorológicos podem se diferenciar entre àqueles baseados na maximização de tempestades observadas, e os que simulam condições extremas por meio de modelos de tempestades com diferentes níveis de sofisticação. De qualquer forma, o intuito dessa metodologia é maximizar a umidade das maiores tormentas registradas na região com base em dados históricos de umidade, pressão de vapor, temperatura local e temperatura do ponto de orvalho. Caso ocorra efeitos orográficos, necessidade de transposição ou inserção em uma zona tropical, estes devem estar inclusos na análise, promovendo, assim, fatores adicionais maximizadores da chuva torrencial hipotética.

Já em relação aos métodos estatísticos, adota-se a equação geral de frequência apresentada por Chow (1951). A priori, a extração do K_m é retirado de uma única envoltória calibrada para aproximadamente 2.700 estações localizadas, em sua maior parte, nos Estados Unidos da América (90% do total). Desse modo, a WMO (2009) propõe no seu manual o uso dessa envoltória para a delimitação de fatores de frequências hidrológicos sobre qualquer estação do globo.

Apresenta-se, no item 3.1, a construção matemática do Método Hidrometeorológico, e as contribuições científicas associadas. No item 3.2 expõe-se o Método Estatístico e a suas particularidades em diversos estudos. No item 3.3 apresenta-se a simulação sintética dos fatores de frequência atrelado a um estudo brasileiro.

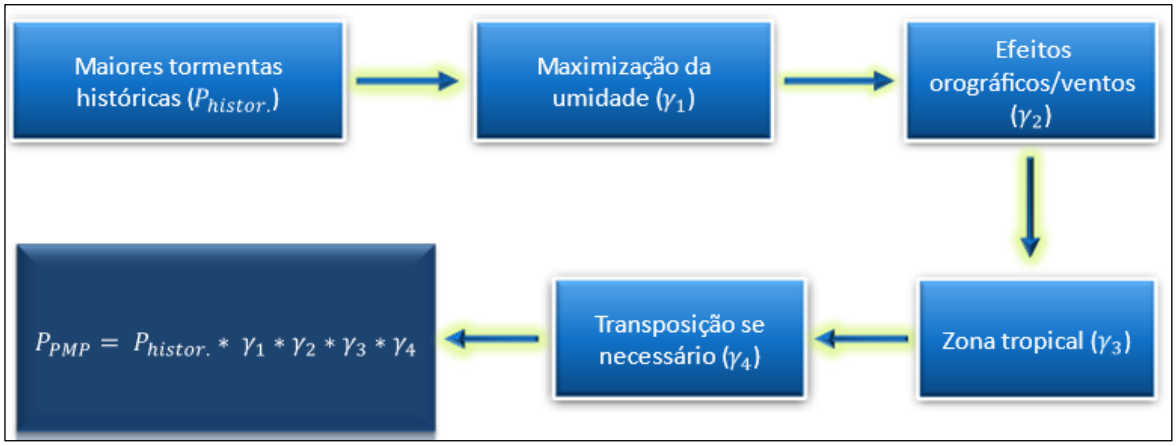
3.1 Método Hidrometeorológico

De maneira sucinta, tem-se que no Método Hidrometeorológico, a PMP é determinada a partir de processos de maximização do teor de umidade da massa de ar causadora da precipitação. Assim, neste método, são consideradas as condições meteorológicas mais severas dos eventos observados, partindo do princípio que o total precipitado tende a crescer à medida que se eleva o teor de umidade do fluxo de ar que alimenta as tempestades.

A aplicação deste método é susceptível à disponibilidade dos dados pluviométricos de um número significativo de tormentas severas observadas na bacia hidrográfica em estudo e, cuja base de cálculo consiste em: a) seleção das maiores chuvas intensas observadas na região; b) obtenção da umidade representativa e máxima provável de cada evento selecionado e c) cálculo dos fatores de maximização da umidade e estimativa das chuvas maximizadas (TUCCI, 2009).

A Figura 2 expõe um fluxograma simplificado do cálculo da PMP via Método Hidrometeorológico.

Figura 2 - Fluxograma simplificado do Método Hidrometeorológico



Fonte: autoria própria.

De modo geral, tal método consiste na seguinte equação:

$$P_{PMP} = p_{histor} * \gamma_1 * \gamma_2 * \gamma_3 * \gamma_4 \quad (1)$$

Onde P_{PMP} é a precipitação maximizada, p_{histor} corresponde à precipitação histórica a ser ajustada e γ são os fatores majoradores, os quais consideram as interferências relativas à topografia, zonas tropicais, bem como o ajuste da umidade pelas transposições das precipitações.

Define-se, então, γ_1 como o majorador de umidade da precipitação histórica; o fator γ_2 representa os efeitos orográficos/ventos, que deve ser utilizado em áreas envolvidas por barreiras físicas, como cadeias de montanhas, que influenciam nas alturas de chuvas regionais.; γ_3 simboliza áreas inseridas em zonas tropicais, sendo necessárias correções, envolvendo a elevação média e declividade média da área de interesse; já γ_4 dispõe acerca de correções de chuvas transportadas de uma localidade para àquela de interesse. A seguir, apresenta-se, detalhadamente a construção dos fatores de majoração elencados na ótica de alguns autores.

3.1.1 γ_1: fator de umidade

O fator de umidade γ_1 corresponde a majoração da precipitação histórica com base na hipótese de aumento do influxo de umidade da tempestade, conforme a Equação (2):

$$\gamma_1 = \frac{W_{max}}{W_{storm}} \quad (2)$$

Onde:

W_{max}: máxima água precipitável representativa já registrada na localidade;

W_{storm}: água precipitável estimada representativa para a chuva histórica $p_{histor.}$

Segundo Raudkivi (1979), a massa de água precipitável (W) delimitada numa coluna de água unitária entre as cotas Z_0 e Z_t, sem considerar a convergência de massas, é dada por:

$$W = \int_{Z_0}^{Zt} \rho_v * dz \quad (3)$$

Onde:

ρ_v : massa específica do vapor;

dz: infinitesimal da altitude.

Z_0: cota da base da coluna d'agua

Z_1: cota do topo da coluna d'agua

Tomando a equação de estabilidade hidrostática do ar atmosférico:

$$dp = -\rho * g * dz \quad (4)$$

Onde:

dp: infinitesimal de pressão atmosférica;

ρ: massa específica do ar;

g: aceleração da gravidade;

dz: infinitesimal da altitude

E substituindo a Equação (3) na Equação (4), tem-se o seguinte:

$$W = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_0} q * dp \quad (5)$$

Onde:

p_t: pressão na tropopausa;

p_0: pressão na superfície;

q: umidade específica.

Dado que a umidade específica e a razão de mistura (r) podem ser consideradas iguais, a Equação (5) é modificada da seguinte maneira:

$$r = 0{,}622 * \frac{e}{p - e} \quad (6)$$

Onde:

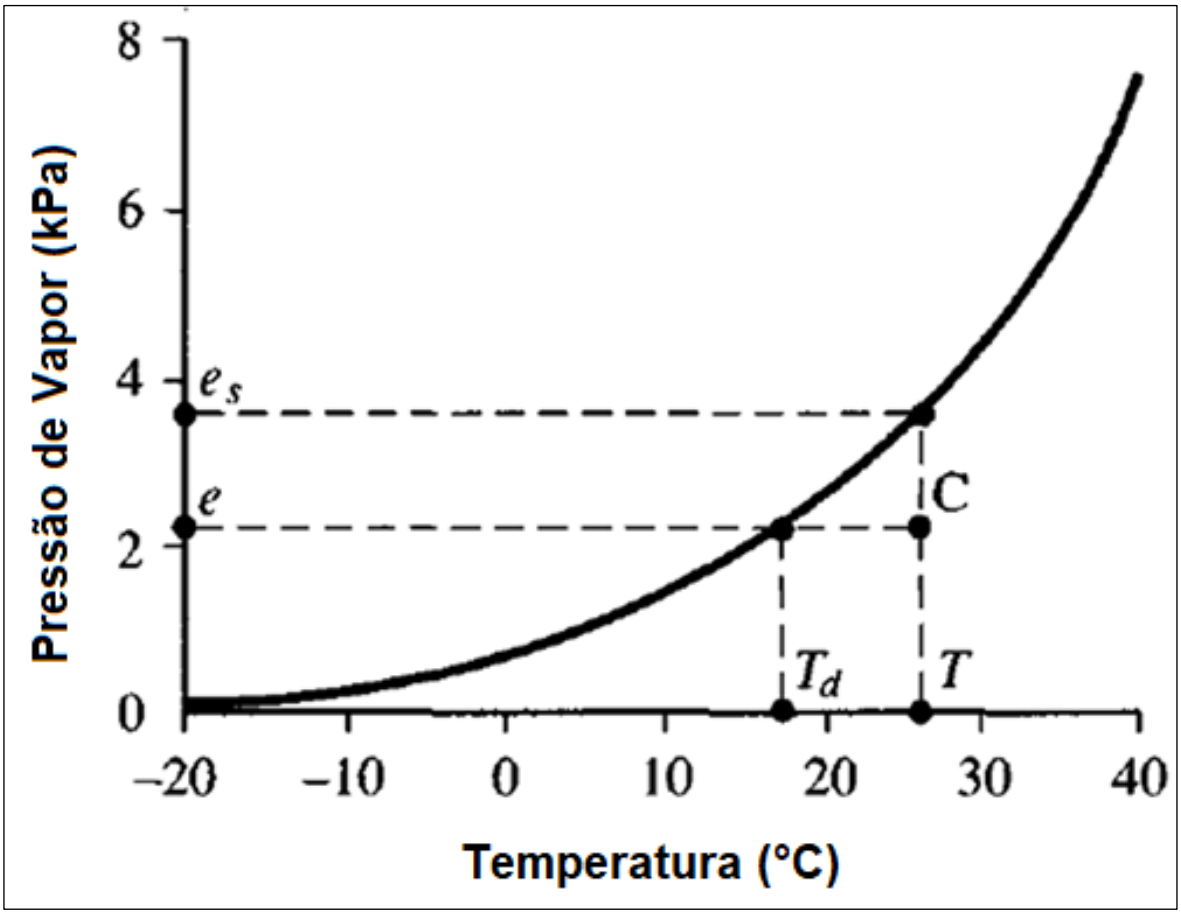
e: pressão parcial do vapor, que consiste na pressão exercida pelo vapor de água abrangido num determinado volume de ar úmido;

p: pressão atmosférica em um dado ponto.

Admite-se que, durante a chuva na atmosfera, a mesma se encontra toda saturada (r = r*, sendo o último a razão de mistura saturada). Essa condição não é de toda verdadeira, pois a superfície de contato entre a camada de ar e a base da nuvem não está totalmente saturada, mas bem próxima disso. A temperatura que condiciona a condição de saturação é chamada de “ponto de orvalho”. Nesse estado, a pressão parcial de vapor é igual a tensão de saturação.

A Figura 3 apresenta a relação da pressão de vapor de água com a temperatura do ar. O ponto “C” tem pressão de vapor “e” e temperatura “T”, sendo que a pressão de vapor saturada é “e_s”. A umidade relativa do ar “U” é representada pelo quociente $\frac{e}{e_s}$. A temperatura em que o ar está saturado pela pressão de vapor “e” é a temperatura do ponto de orvalho "$T_{dew\ point}$".

Figura 3 - Pressão de vapor de saturação da água em função da temperatura do ar sobre a água.



Fonte: adaptado de Chow, Maidment e Mays (1988).

Conforme citado por Sugai e Fill (1991), quando se estuda, teoricamente, de processos meteorológicos, considera-se, em geral, que o processo de ascensão na atmosfera de uma massa de ar, com mudança de temperatura e pressão, é adiabático (não há trocas de calor). Na condição de atmosfera totalmente saturada, uma ínfima parcela da massa de água precipitada é perdida, no entanto, essa perda é desconsiderada, pois a razão de mistura é sempre muito menor que a unidade, denominado assim o processo como pseudo-adiabático.

Para a obtenção das pressões de vapor saturado da água e_s, tabelas psicométricas, como a exposta em Roche (1963), fornecem valores de referência, todavia, é comum utilizar a equação de Tetens, de acordo com as Equações (7) ou (8) apresentada por Raudkivi (1979, *apud* CHOW, MAIDMENTS e MAYS, 1988). Cabe ressaltar que o resultado será o mesmo para a estimativa do e_s, independentemente da equação que se utilize (Equações (7) ou (8)).

$$e_s(T) = 0{,}61078 * 10^{\frac{(7{,}5*T)}{(237{,}3+T)}}, para\ T\ >\ 0$$
$$e_s(T) = 0{,}61078 * 10^{\frac{(9{,}5*T)}{(265{,}5+T)}}, para\ T\ <\ 0 \quad (7)$$

Onde:

e_s: pressão de vapor de saturação da água (kPa), que consiste na condição na qual foi alcançado o limiar superior de vapor de água abrangido num determinado volume de ar umedecido;

T: temperatura (°C).

$$e_s(T) = 0{,}611 * exp(\frac{17{,}27\ *\ T}{237{,}3\ +\ T}) \quad (8)$$

Onde:

e_s: pressão de vapor de saturação da água (kPa);

T: temperatura (°C).

A pressão parcial de vapor em um dado instante (e) pode ser calculada com mais precisão a partir do seguinte equacionamento.

$$e =\ e_s(T_h) - \tau * (T_{ar} - T_h) \quad (9)$$

Onde:

e: pressão parcial de vapor (kPa);

T_h: temperatura do bulbo úmido (°C);

T_{ar}: temperatura do ar (°C);

τ: constante psicométrica convencionada como 0,067 kPa*C^{-1} e 0,081 kPa*C^{-1} para psicrômetro aspirados/ventilados e não aspirados/não ventilados, respectivamente. Caso a região monitorada tenha uma pressão atmosférica muito menor do que a pressão a nível do mar, considera-se τ = A * p, tal que A é $0{,}00067\ °C^{-1}$ para

psicrômetro aspirado/ventilado e $0{,}00080\ °C^{-1}$ para não aspirados/não ventilados, respectivamente. A constante psicrométrica representa uma constante física que relaciona a variação de temperatura e umidade absoluta do ar em um processo adiabático de aquecimento e resfriamento do ar (HAINES, 2016).

Na ausência de dados sobre a temperatura do bulbo úmido, afere-se a pressão parcial de vapor a partir da Equação (10), que tende a superestimá-lo.

$$e = U * e_s(T_{ar}) \tag{10}$$

Onde:

e: pressão parcial de vapor (kPa);

U: umidade relativa do ar.

Segundo Raudkivi (1979), e alicerçado nas leis da termodinâmica, conjugando as equações de estado do ar atmosférico (Equação (11)) + equação de estabilidade hidrostática do ar (Equação (4)) + equação de conservação de energia (Equação (12)), chega-se à equação que rege a variação da temperatura e pressão do ar conforme a altitude especificada.

$$p = \rho\ *\ R_s\ *\ T \tag{11}$$

Onde:

p: pressão atmosférica do ar em um dado ponto;

ρ: massa específica do ar;

R_s: constante do gás para o ar seco igual a 287 J/(kg*°K);

T: temperatura.

$$\Delta Q = C_p\ *\ dT\ -\ \frac{dp}{\rho} \tag{12}$$

Onde:

ΔQ: variação do calor para o sistema;

C_p: calor específico do ar;

dT: infinitesimal de temperatura;

dp: infinitesimal de pressão atmosférica;

ρ: massa específica do ar.

Portanto, a partir de uma atmosfera saturada, e um processo de ascensão pseudo-adiabático, a equação de energia entre os níveis atmosféricos “a” e “b” (ELETROBRAS, 1987), procede em:

$$C_{ps} * ln(\frac{T_b}{T_a}) - R_s * ln(\frac{p_b}{p_a}) + (\frac{L_b * r * (b)}{T_b}) - \frac{L_a * r(a)}{T_a} = 0 \quad (13)$$

Onde:

C_{ps}: calor específico do ar seco à pressão constante, igual a 1005 J/(kg*°K);

R_s: constante do gás para o ar seco igual a 287 J/(kg*°K);

T_a *e* T_b : Temperatura do ar na altitude “a” e “b” (°K);

p_a *e* p_b: pressão na altitude “a” e “b” (Pa);

$r(a)$ *e* $r(b)$: razão de mistura de saturação em “a” e “b”;

L_a *e* L_b*:* calor latente de evaporação em “a e “b” que pode ser calculada por Linsley, Kohler e Paulhus (1949, *apud* SUGAI, 1991):

$$L = 3145780 - 2361 * T \quad (14)$$

Onde:

L: calor latente de evaporação (J/kg);

T: temperatura (°K).

A pressão p em uma dada altitude “z” pode ser estimada por (RAUDKIVI, 1979):

$$p = 101{,}3 * (1 - \frac{0{,}0065}{288} * z)^{5{,}2568} \quad (15)$$

Onde:

p: pressão atmosférica em um dado ponto (kPa);

z: altitude (m).

Portanto, conhecendo o nível “a” (temperatura, pressão, razão de mistura e calor latente) e arbitrando incrementos de pressão em “b” até chegar em p_t, é possível determinar os valores de $r(b)$, T_b e L_b a partir das Equações (6), (13) e (14). Assim, fragmenta-se a integral da Equação (5) em vários subintervalos para calculá-los, somá-los, e então, obter a água precipitável. Sugai e Fill (1991), para os estudos da PMP no sul do Brasil, partiu da pressão local da região estudada ($p_0 = 100\ kPa$) até $p_t = 10\ kPa$ em intervalos de 1 em 1 kPa.

Alternativamente, a WMO (2009) sistematizou uma forma menos onerosa de resolver a integral da Equação (5), gerando ábacos de fácil manipulação, conforme apresentado na Tabela A.1 do ANEXO A. É importante ressaltar que, há a necessidade de saber o nível altimétrico médio da área de chuva e a temperatura do ponto de orvalho representativa rebatida a 1.000 hPa (nível do mar).

Inicialmente, para se obter a temperatura do ponto de orvalho, é necessário medi-lo em aparelhos de monitoramento meteorológico ou estimá-lo a partir da seguinte equação:

$$T_{dew\ point} = \frac{237{,}3 * log_{10}(\frac{e}{0{,}6108})}{7{,}5 - log_{10}(\frac{e}{0{,}6108})} \quad (16)$$

Onde:

$T_{dew\ point}$: temperatura do ponto de orvalho medido (°C);

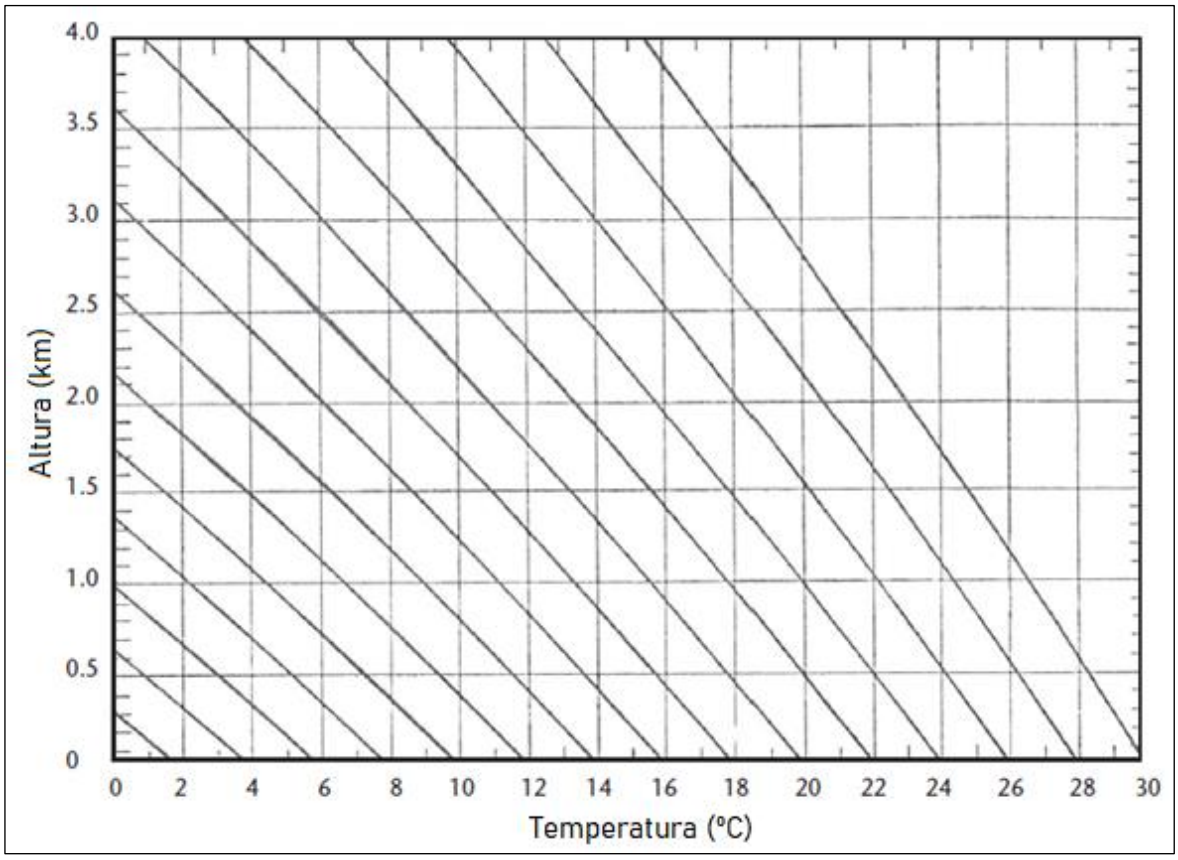
e: tensão de vapor (kPa) estimada pela Equação (9) ou (10).

É importante ressaltar que, toda essa estimativa carrega consigo limitações e simplificações, dada à complexibilidade atmosférica verificada no grande sistema circulatório do planeta, ainda mais em escalas menores com suas dinâmicas atmosféricas peculiares. Clark e Schloellar (1970) encontraram alturas de águas precipitáveis 1,5 cm menores, em dias chuvosos, do que os indicados por meio das estimativas matemáticas que envolvem temperatura de pontos de orvalhos. Apesar disso, o método se apresenta conservador ao estimar uma altura de água precipitável maior do que supostamente seria o real.

Os dados de temperatura do ponto de orvalho precisam ser representativos do fluxo de umidade alimentadora da tempestade. Logo, frisa-se que os mesmos sejam originários de estações meteorológicas localizadas entre a fonte de umidade e o local da precipitação (todavia, respeitando um raio máximo de 1.600 km). Conforme recomendado por WMO (2009), os pontos de orvalho devem ser persistentes por ao menos 12 h ou, à critério do usuário, por 24h, ao invés de um máximo isolado. Outras durações são recomendadas com base em argumentações mais sólidas e comparadas com a dinâmica climatológica local e a duração da chuva a ser analisada.

Para a utilização da Tabela A.1 do ANEXO A, é necessário rebater o ponto de orvalho obtido do posto meteorológico selecionado para o nível do mar (1.000 hPa) com o auxílio do ábaco da Figura 4.

Figura 4 - Diagrama pseudoadiabático para redução do ponto de orvalho para 1.000 hPa, segundo WMO (2009)



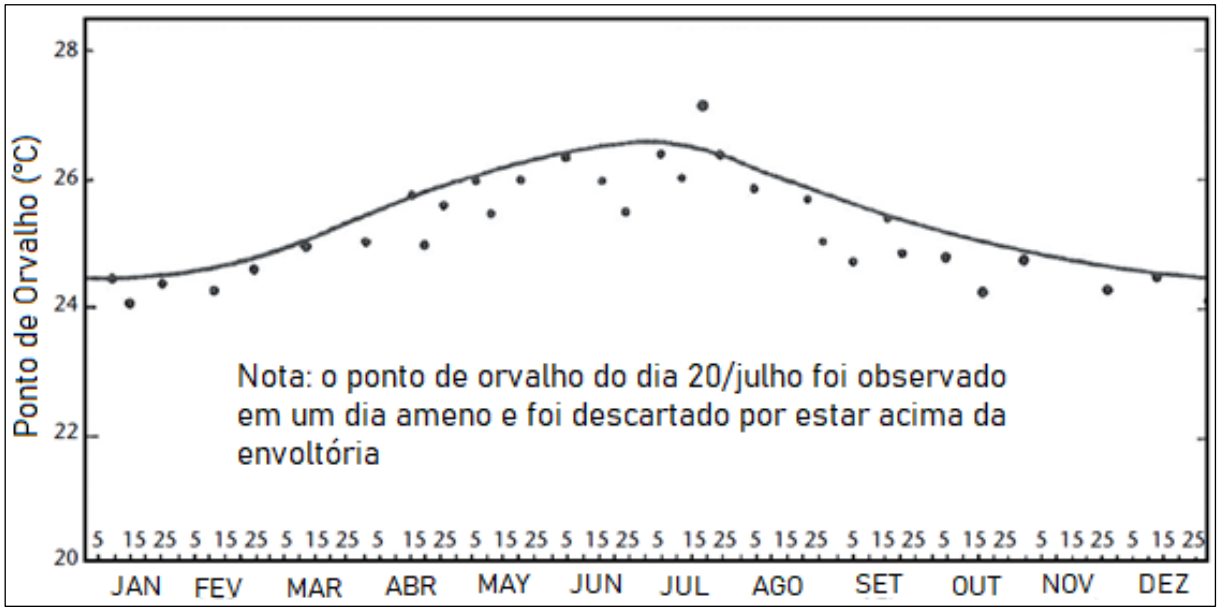
Fonte: adaptado de WMO (2009).

Para a obtenção da temperatura do ponto de orvalho máxima persistente, $T_{dew\ point_{máx-persist}}$, é recomendação da WMO (2009) deter uma série temporal climática com extensão temporal igual ou maior a 50 anos. Exige-se a verificação de presença de *outliers* delimitando uma envoltória de máximos durante todos os dias do ano. Caso contrário, deve-se estimar um quantil de Tempo de Retorno (TR) de 100 anos para o $T_{dew\ point_{máx-persist}}$. A WMO (2009) também cita o uso de TR 50 anos. No Sul do Brasil, Sugai (1989) optou por empregar TR 50 anos ajustando uma distribuição gaussiana. Pinheiro (2011), em Minas Gerais, seguiu a recomendação da WMO (2009) e utilizou TR 100 anos para as estimativas de ponto de orvalho. Alfazi-Gorouh *et al*. (2018), no Irã, utilizaram TR 50 anos.

Contudo, é necessário determinar os limites sazonais para a seleção dos máximos anuais de $T_{dew\ point}$. A WMO (2009) recomenda a faixa de 15 dias antecedentes e posteriores ao dia e mês da precipitação a ser analisada. A entidade preconiza a

criação de uma envoltória sazonal, conforme é mostrado na Figura 5, para auxiliar na eliminação de *outliers* e percepção da variação dos máximos pontos de orvalhos ao longo do ano, de forma a captar o máximo valor representativo da data que ocorreu a precipitação histórica.

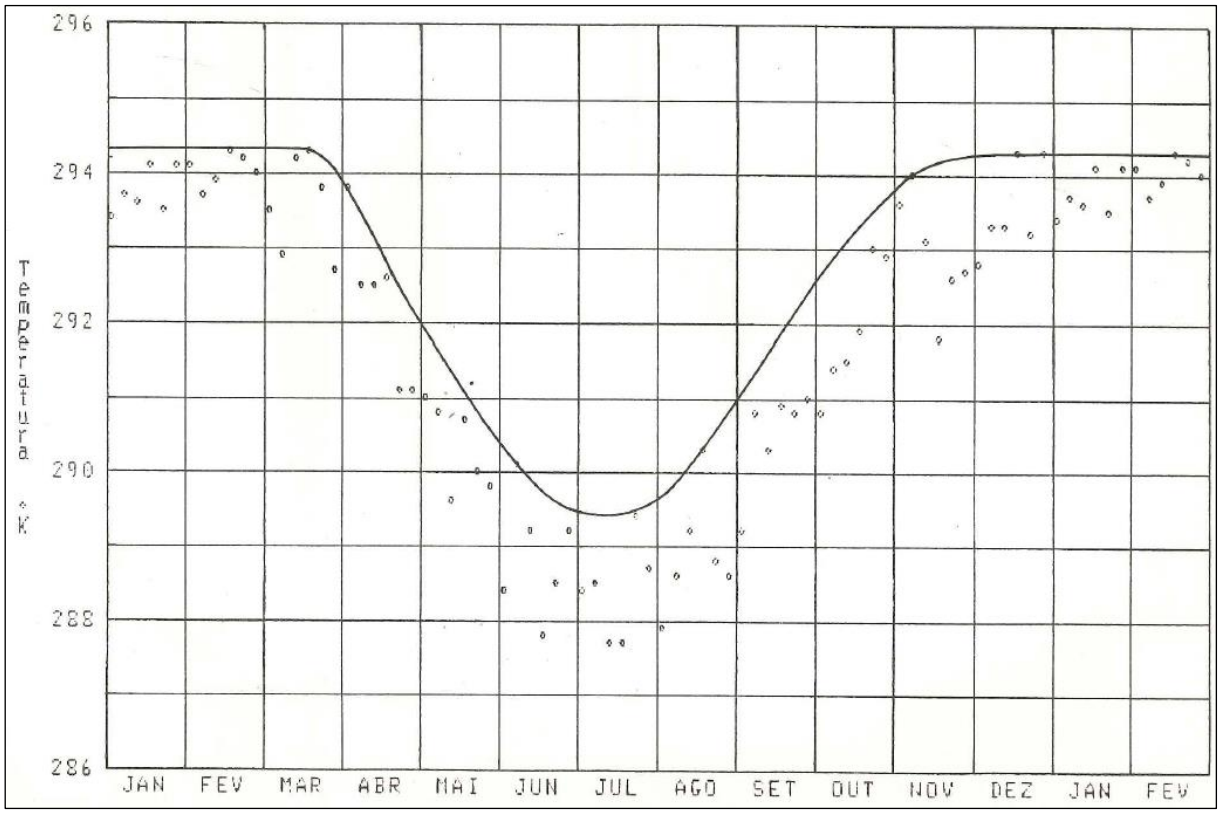
Figura 5 – Envoltória máxima do ponto de orvalho persistente por 12 horas em uma estação



Fonte: adaptado de WMO (2009).

Sugai (1989), em seu estudo para o Sul do Brasil, adotou uma abordagem similar agrupando pontos de orvalho em cada mês em 6 classes (dia 1 a 5, 6 a 10, etc.), resultando numa matriz 6 x 12 valores de pontos de orvalhos máximos persistentes por 12 horas. A partir disso, a autora determinou uma envoltória de pontos de orvalho máximos centrados no ponto médio de cada intervalo de 5 dias. Cita-se que Carvalho (2000) seguiu o mesmo padrão de análise dos pontos de orvalho no seu estudo de regionalização da PMP no Paraná, que teve como base os resultados apresentados por Sugai (1989). A Figura 6 é um exemplo de envoltória elaborada pela Sugai (1989).

Figura 6 – Envoltória dos máximos pontos de orvalho históricas da Estação Meteorológica M6 de Curitiba



Fonte: Sugai (1998).

Já Pinheiro (2011), nos estudos para Minas Gerais, adotou o período mais chuvoso na região que é o verão (trimestre dezembro-janeiro-fevereiro) para selecionar o máximo ponto de orvalho compreendido nessa época do ano.

Em lugares com alta insolação, próximos a numerosos e grandes corpos hídricos, a temperatura de orvalho medida pode estar superestimada, fruto da evaporação local, e não das condições meteorológicas que ocorrem nos níveis superiores. Logo, deve-se ter uma atenção especial aos máximos pontos de orvalhos encontrados na série histórica.

Os oceanos são grandes reguladoras climáticos, e a umidade que advém destes influenciam as grandes precipitações. Portanto, em áreas de interesse próximas ao mar, aconselha-se obter estações que também estão próximas ao litoral e não estações no interior. No entanto, a caracterização climática regional é que vai responder quais são os sistemas meteorológicos que alimentam e intervém diretamente nas tormentas locais.

No processo de maximização da umidade, só é considerada apenas a coluna de água precipitável entre a superfície do terreno onde ocorrerá a chuva de interesse até algum nível da troposfera. Geralmente, adota-se algum valor entre 400 e 200 hPa, sendo o mais comum 300 hPa (aproximação expedita de 11 mil metros em relação ao nível do mar). Acima de 400 hPa, há pouca umidade e o efeito sobre o fator de maximização é insignificante (WMO, 2009).

Assim sendo, deve-se ajustar os cálculos para obter apenas a água precipitável acima do nível do terreno de interesse até 300 hPa ($W_{El.\ Região-300}$), que geralmente é medida em cm ou mm, conforme indicado na Equação (17).

$$W_{El.\ Região-300} = W_{1000-300} - W_{1000-El.\ Região} \quad (17)$$

Onde:

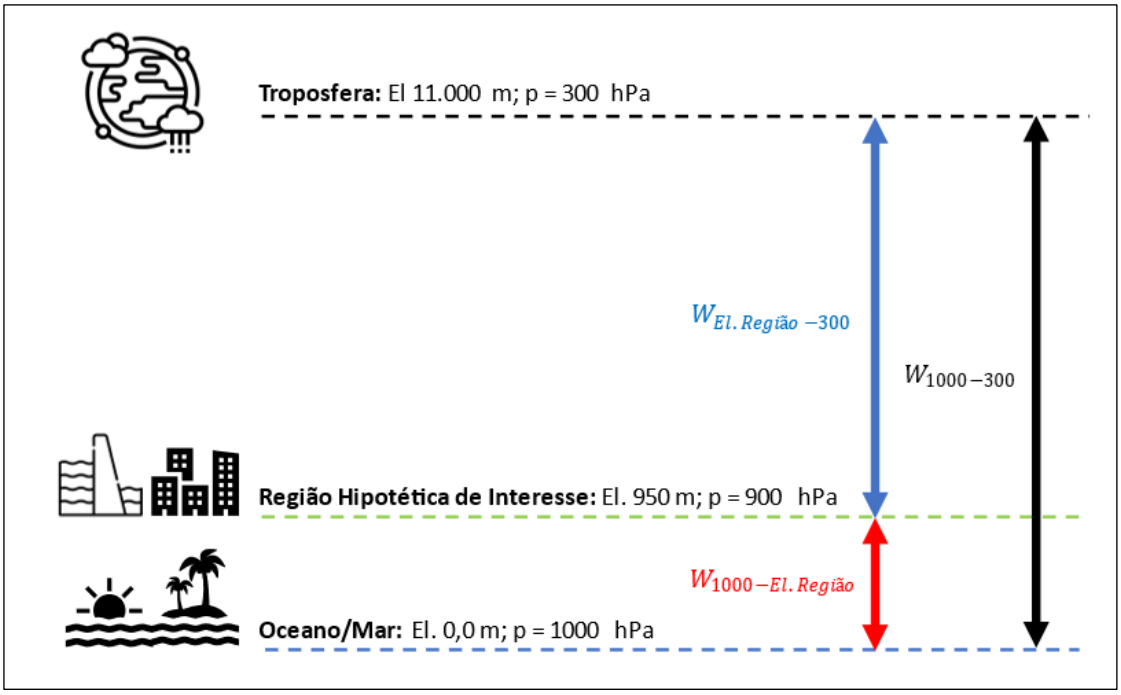
$W_{El.\ Região-300}$: água precipitável contida entre a elevação média da região da chuva e o nível de 300 hPa;

$W_{1000-300}$: água precipitável contida entre os níveis de 1.000 hPa e 300 hPa;

$W_{1000-El.\ Região}$: água precipitável contida entre os níveis de 1.000 hPa (nível do mar) e a elevação média da região da chuva.

A Figura 7 apresenta uma elucidação gráfica acerca dos tipos de água precipitável.

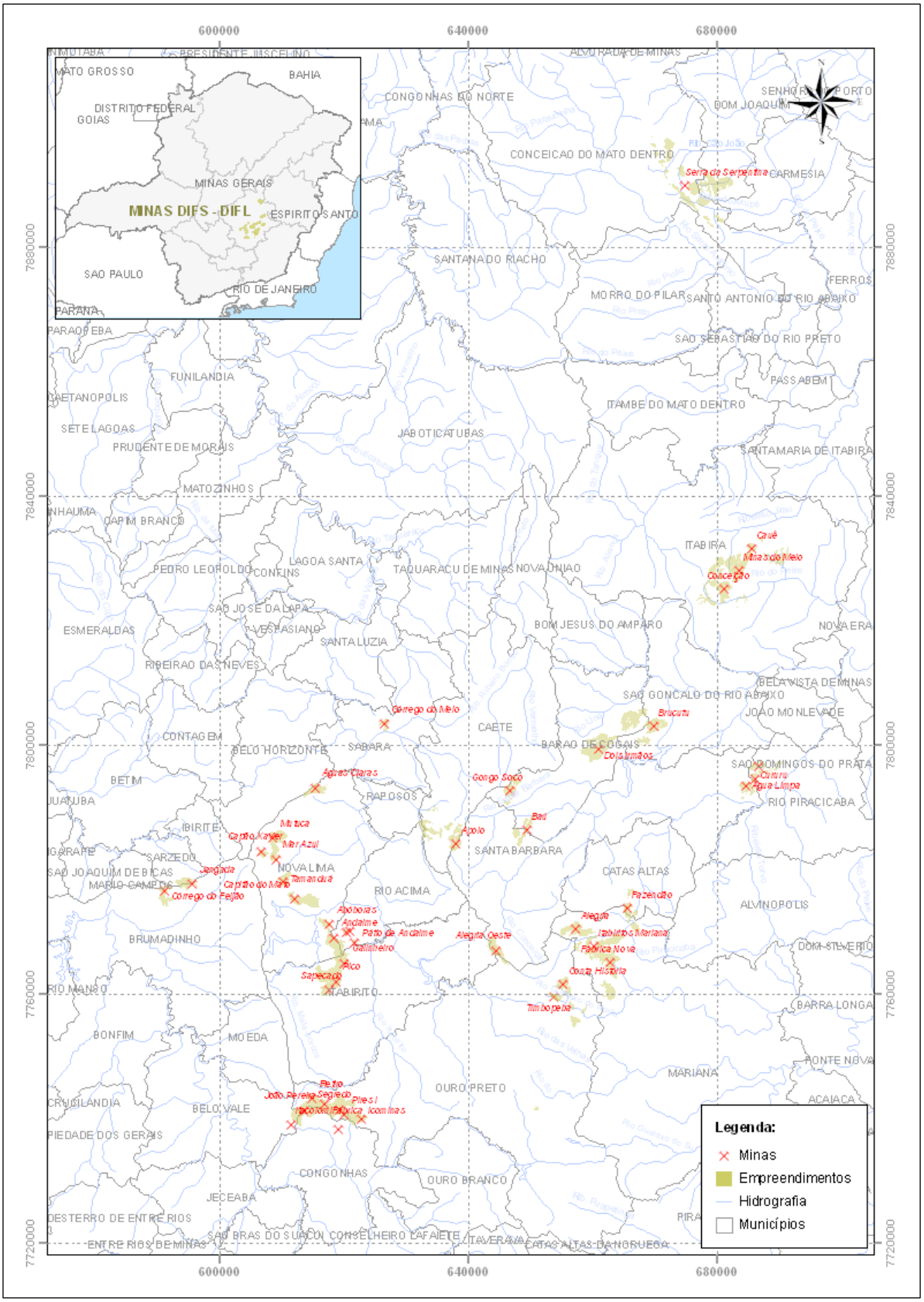
Figura 7 - Croqui esquemático das colunas de água precipitável em uma situação hipotética



Fonte: autoria própria.

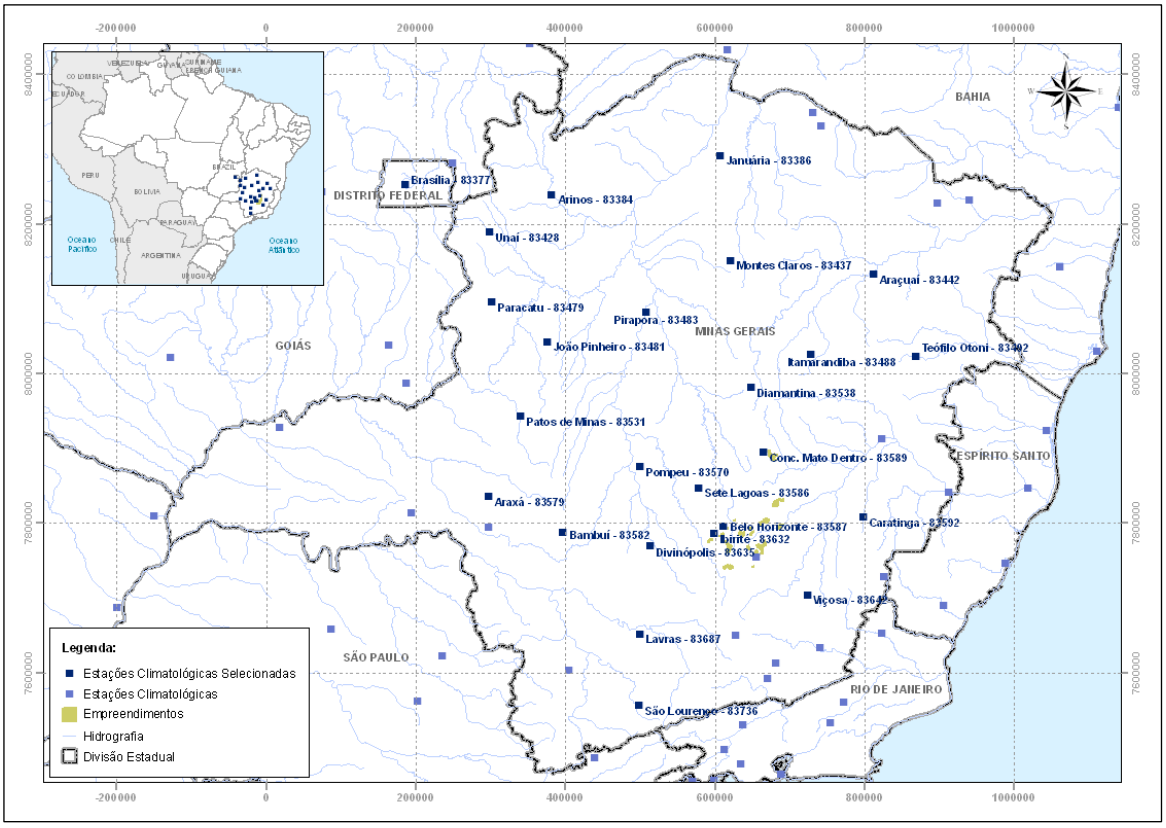
Dando mais detalhes acerca de um dos principais estudos de PMP Hidrometeorológica pontual no Brasil, Pinheiro (2011) calculou estimativas representativas para complexos minerários da Vale S.A. na mesorregião Metropolitana de Minas Gerais para as durações entre 24 horas e 30 dias. A região estudada tem as coordenadas enquadradas pelos paralelos S 20°28’42” e 19°00’08” e meridianos W 44°09’36” e 43°09’47”, que coincide, em partes, com o quadrilátero ferrífero mineiro. A seguir, na Figura 8, é elucido os complexos minerários da Vale S.A. abarcados no estudo do Pinheiro (2011) e, na Figura 9, são apresentadas as estações meteorológicas utilizadas e a Figura 10 expõe as alturas pluviométricas de referência para o cálculo da PMP de 24 horas.

Figura 8 - Localização geral das unidades operacionais e projetos de expansão na área de abrangência da Diretoria de Ferrosos Leste (DIFL) e Diretoria de Ferrosos Sul (DIFS) da Vale S.A.



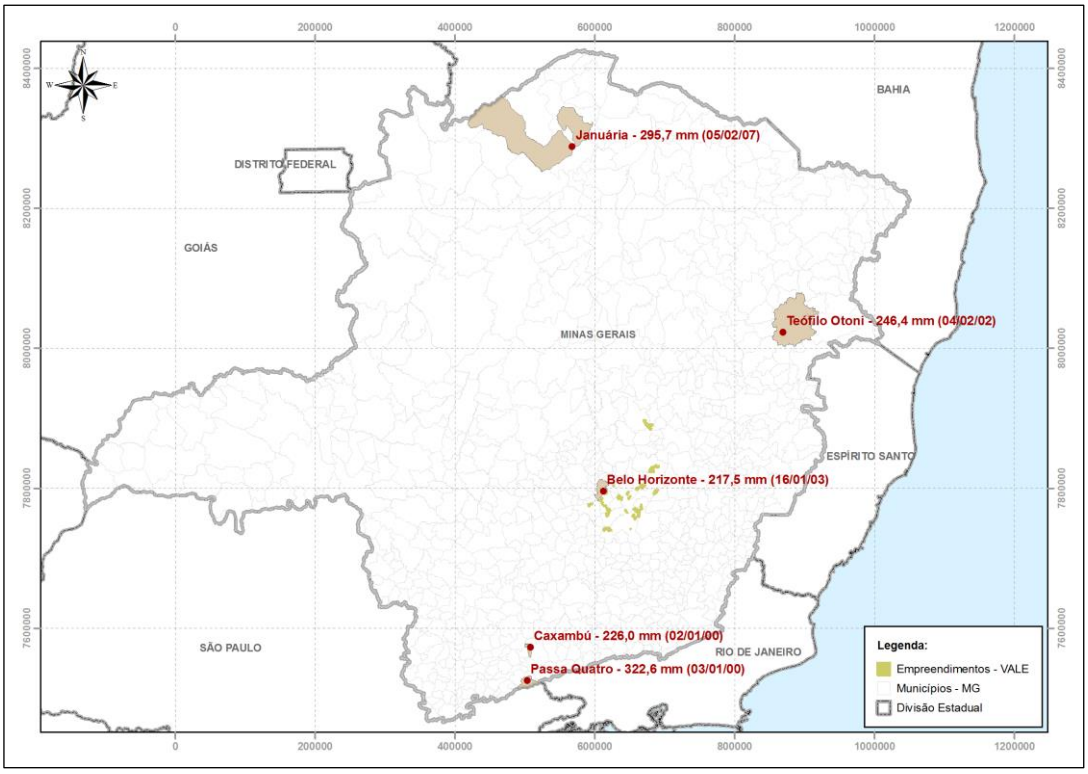
Fonte: Pinheiro (2011).

Figura 9 - Localização das estações climatológicas selecionadas para os estudos.



Fonte: Pinheiro (2011).

Figura 10 - Eventos pluviométricos de referência de 1 dia selecionados para o cálculo da PMP de 24 horas.



Fonte: adaptado de Pinheiro (2011).

A Tabela 1 aborda todas as estimativas da PMP, no que tange às durações de 24 horas a 30 dias, para a mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte situada no quadrilátero ferrífero. O fator de umidade γ_1 variou entre 1,16 e 1,29 neste estudo de caso. Para o Complexo Minerário de Mariana, foi adotado um fator de majoração extra de 1,15 devido aos efeitos orográficos (γ_2). Pinheiro (2011) não disserta, em detalhes, como foi o processo de cálculo para se chegar em γ_2 = 1,15, todavia, o item 3.1.2 discutirá, em linhas gerais, a forma de obtenção.

Tabela 1 - Estimativas da PMP Hidrometeorológica pontual na mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte situada no quadrilátero ferrífero

Estação	Duração								
	24 horas	2 dias	3 dias	5 dias	7 dias	10 dias	15 dias	20 dias	30 dias
PMP pontual na DIFL-DIFS *	345	389	452	579	784	871	990	1213	1397
PMP pontual nas minas do Complexo Mariana	397	447	520	666	902	1002	1139	1395	1607

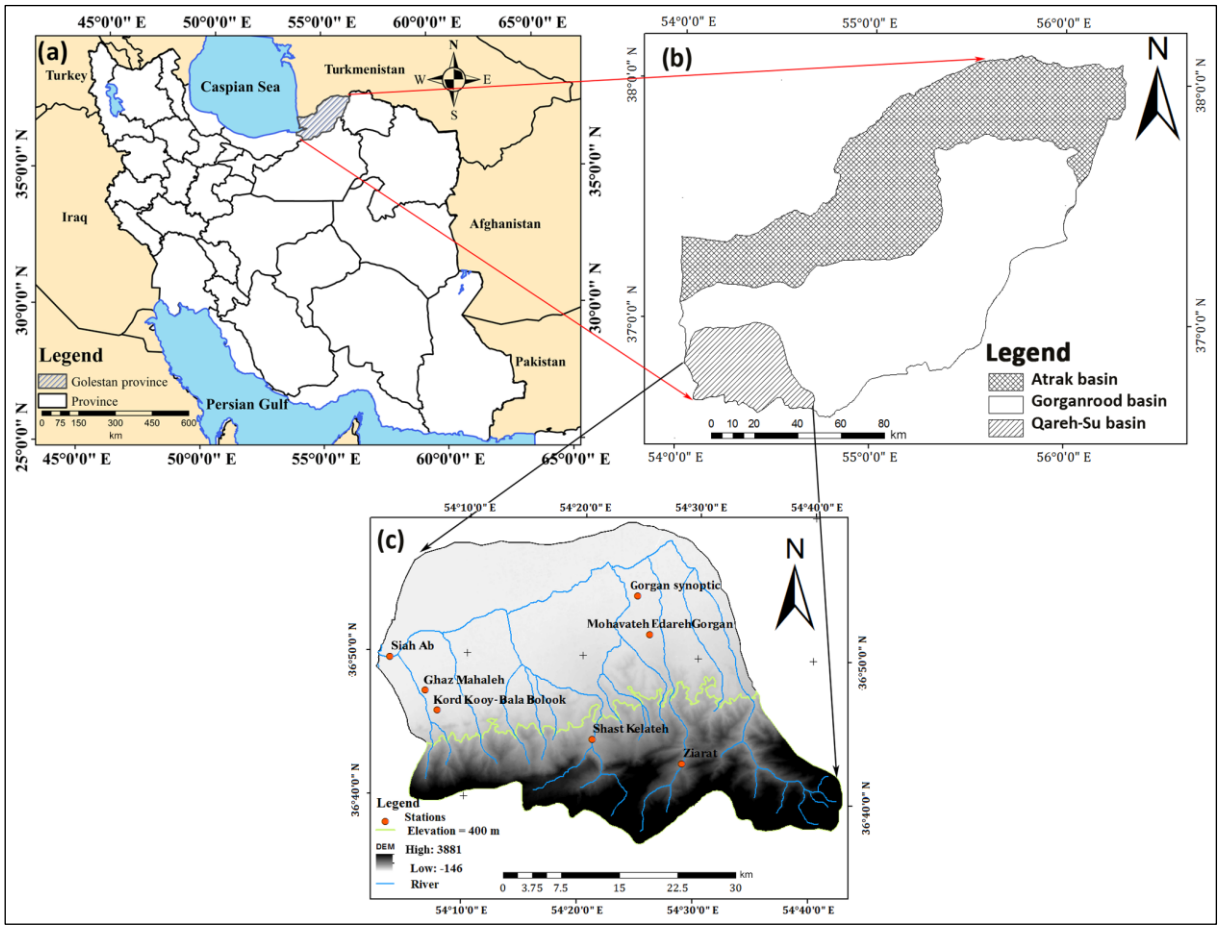
* Exceto no Complexo Mariana.

Fonte: adaptado de Pinheiro (2011).

Por mais que esse estudo tenha sido encomendado pela Vale S.A., a abrangência de considerar estações pluviométricas e estações climáticas fora do quadrilátero ferrífero, chegando a quase todos as regiões de Minas Gerais, traz uma certa generalização estadual para a estimativa da PMP.

Alfazi-Gorouh *et al.* (2018) analisaram as estimativas da PMP Hidromeoteorológica da bacia do Qareh-Su, localizada no estado de Golestan/Irã, parte norte do país. A localidade é uma das mais úmidas para o país e, através dos 7 postos pluviométricos de referência para o estudo, apresentam uma precipitação média anual (PMA) em torno de 596 mm. A Figura 11 evidencia a localização da bacia do Qareh-Su e as estações de monitoramento (6 estações pluviométricas e 1 meteorológica → Nome Gorgan Synoptic).

Figura 11 – Localização dos postos pluviométricos e das estações meteorológicas utilizados no cálculo da PMP na região Sul do Brasil

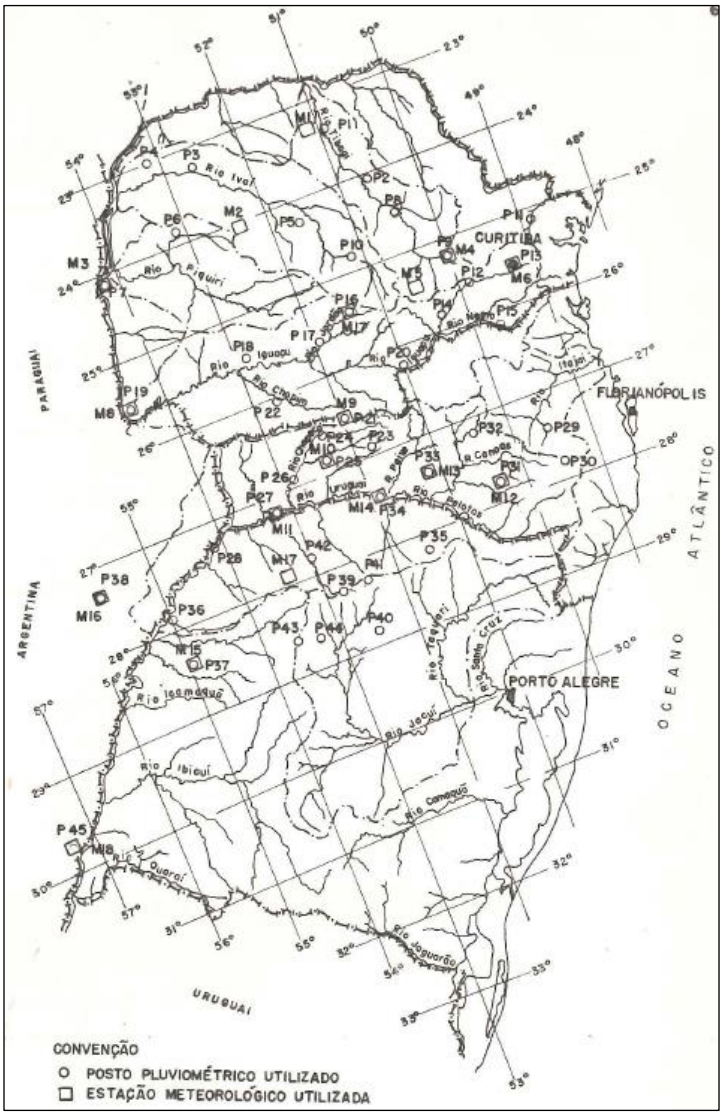


Fonte: Alfazi-Gorouh *et al.* (2018).

Os autores encontraram, para essa área estuda, fatores de umidade (γ_1) variando entre 1,17 e 1,54, com o valor médio de 1,31. Fatores orográficos/intensidade dos ventos foram inseridos, logo, o γ_2 variou entre 1,10 e 1,70, com o valor médio de 1,45. Com base nisso, a estimativa máxima da PMP Hidrometeorológica na bacia de Qareh Su foi de 143,1 mm. Foram delimitados, por eles, o uso da estimação do máximo ponto de orvalho persistente por 12 horas, através do quantil TR 50 anos.

Sugai (1989) contribuiu, em sua dissertação, para o desenvolvimento de estimativas da PMP no Sul do Brasil com durações de 1 e 2 dias, selecionando 45 postos pluviométricos e 18 postos meteorológicos, conforme é mostrado na Figura 12, dentro das bacias dos rios Tibagi, Ivaí, Piquiri, Iguaçu, Itajaí, Uruguai e Jacuí.

Figura 12 – Localização dos postos pluviométricos e das estações meteorológicas utilizados no cálculo da PMP na região Sul do Brasil



Fonte: Sugai (1989).

Sugai (1989) estimou a PMP tanto pelo Método Estatístico (com *K* fixo igual a 9, sendo mais bem detalhado na sequência do presente trabalho) quanto pelo Método Hidrometeorológico para durações de 1 dia e 2 dias. No Método Hidrometeorológico, a água precipitável foi obtida de duas maneiras: a primeira forma, denominada “sem ajuste”, envolvia determinar o máximo valor de ponto de orvalho histórico para uma respectiva época do ano; a segunda forma, denominada “com ajuste”, estimou o quantil TR 50 anos de uma distribuição normal dos valores históricos para uma determinada época do ano (Sugai observou uma assimetria próxima de zero para a série histórica das temperaturas de ponto de orvalho). A Tabela 2 apresenta as estimativas de Sugai (1989) para a PMP com 1 dia de duração para o Sul do Brasil.

Tabela 2 - Resultados obtidos por Sugai (1989) para a PMP de 1 dia de duração

N°	Código	Posto	Período	PMP Estatística	PMP Hidrometeorológica	
					Sem ajuste	Com ajuste
P1	2350000	Jataizinho	1938-1985	250	222	228
P2	2450006	Salto Mauá	1916-1986	309	295	210
P3	2352000	Porto Paraíso do Norte	1953-1987	262	230	223
P4	2353001	Santa Isabel do Ivaí	1958-1986	273	310	301
P5	2451014	Ivaiporã	1956-1985	325	245	275
P6	2353002	Balsa do Goioerê	1962-1986	363	266	305
P7	2454001	Guaíra	1941-1986	352	311	334
P8	2450002	Tibagi	1939-1986	234	266	266
P9	2550024	Vila Velha	1954-1986	235	209	219
PIO	2451003	Tereza Cristina	1957-1986	260	189	205
Pll	2548001	Praia Grande	1940-1986	268	276	301
P12	2549001	Porto Amazonas	1940-1986	210	162	174
PI 3	2549006	Curitiba	1889-1985	247	190	198
P14	2550001	São Mateus do Sul	1938-1986	280	254	247
P15	2649006	Rio Negro	1925-1986	202	168	184
P16	2551000	Guarapuava	1925-1986	258	342	374
P17	2551004	Santa Clara	1950-1986	340	285	285
P18	2552000	Quedas do Iguaçu	1950-1986	374	310	339
P19	2554000	Foz do Iguaçu	1941-1987	396	283	313
P20	2651000	União da Vitória	1938-1987	2.52	226	240
P21	2651006	Palmas	1925-1986	397	252	300
P22	2652007	Porto Palmeirinha	1956-1987	420	301	356
P23	2651001	Campina da Alegria	1944-1987	326	426	401
P24	2652000	Abelardo Luz	1958-1987	295	303	336
P25	2652006	Xanxerê	1941-1971	314	296	280
P26	2652004	Passo Nova Erechim	1959-1985	229	197	197
P27	2753003	Irai	1939-1985	291	247	262
P28	2754001	Alto Uruguai	1949-1987	341	217	229
P29	2749002	Ituporanga	1941-1987	266	205	205
P30	2749032	Santa Clara	1960-1984	273	299	294
P31	2750005	Lajes	1931-1985	251	213	202
P32	2750010	Ponte Alta do Norte	1960-1987	221	229	217
P33	2751002	Campos Novos	1931-1985	294	256	239
P34	2751005	Marcelino Ramos	1931-1972	326	211	235
P35	2851014	Lagoa Vermelha	1914-1985	270	188	188
P36	2755001	Porto Lucena	1949-1987	400	314	319
P37	2854011	São Luiz Gonzaga	1912-1985	361	300	300
P38	2755000	Posadas	1955-1983	354	251	290

N°	Código	Posto	Período	PMP Estatística	PMP Hidrometeorológica	
					Sem ajuste	Com ajuste
P39	2852006	Usina Carazinho	1941-1987	370	360	360
P40	2852017	Maurício Cardoso	1952-1978	301	296	286
P41	2852020	Passo Fundo	1912-1985	282	281	268
P42	2753004	Linha Cescon	1959-1987	379	263	263
P43	2853005	Cruz Alta	1939-1985	341	352	352
P44	2853014	Santa Clara do *I*ngaí	1945-1987	322	221	221
P45	2957000	Paso de Los Libres	1956-1983	425	405	não calculado

Fonte: adaptado de Sugai (1989, apud Carvalho, 2000).

3.1.2 γ_2: efeitos orográficos/ventos

A WMO (2009) preconiza ajustes necessários para regiões que sofrem fortes influências orográficas e, por consequência, intensidades elevadas de rajadas de ventos. A razão de maximização do vento é simplesmente a velocidade máxima média histórica do vento para uma determinada duração e direção em um período sazonal especificado (caso se tenha 50 anos ou mais de observações) dividido pela velocidade máxima média do vento verificada na tormenta a ser maximizada na mesma duração e direção. Recomenda-se elaborar uma envoltória sazonal suavizada para determinar as velocidades máximas históricas a serem utilizadas naquela fração do ano (similar ao feito na Figura 5 para os pontos de orvalhos máximos representativos). A Equação (18) equaciona o fator de maximização pela intensidade dos ventos γ_2 :

$$\gamma_2 = \frac{Wind_{max}}{Wind_{storm}} \tag{18}$$

Onde:

$Wind_{max}$: velocidade máxima média histórica das rajadas de vento para uma determinada duração e direção dentro do período sazonal adequado para a chuva histórica;

$Wind_{storm}$: velocidade máxima média registrada no momento da chuva histórica para uma dada direção.

Caso se tenha menos do que 50 anos de dados de velocidades máximas médias de rajadas de vento, é aconselhado pela WMO (2009) estimar quantis com 50 ou 100

anos de período de retorno (usualmente o primeiro), sendo construída a mesma curva da envoltória sazonal para às máximas velocidades dos ventos.

Pinheiro (2011) não seguiu o exposto na WMO (2009) neste quesito e propôs "...um fator empírico adicional igual a 1,15, para levar em conta os efeitos dinâmicos associados à orografia, que podem induzir ainda mais a convecção e resultar em índices pluviométricos mais elevados", quando o próprio teve que lidar com a região da Serra da Caraça, inserida em Minas Gerais "onde os totais pluviométricos anuais superam 2000 mm". Já Alfazi-Gorouh *et al.* (2018) estimou a máxima velocidade histórica do vento, $Wind_{max}$, com o quantil associado ao tempo de retorno de 100 anos, e o $Wind_{storm}$ através da máxima persistência de 12 horas durante a tempestade.

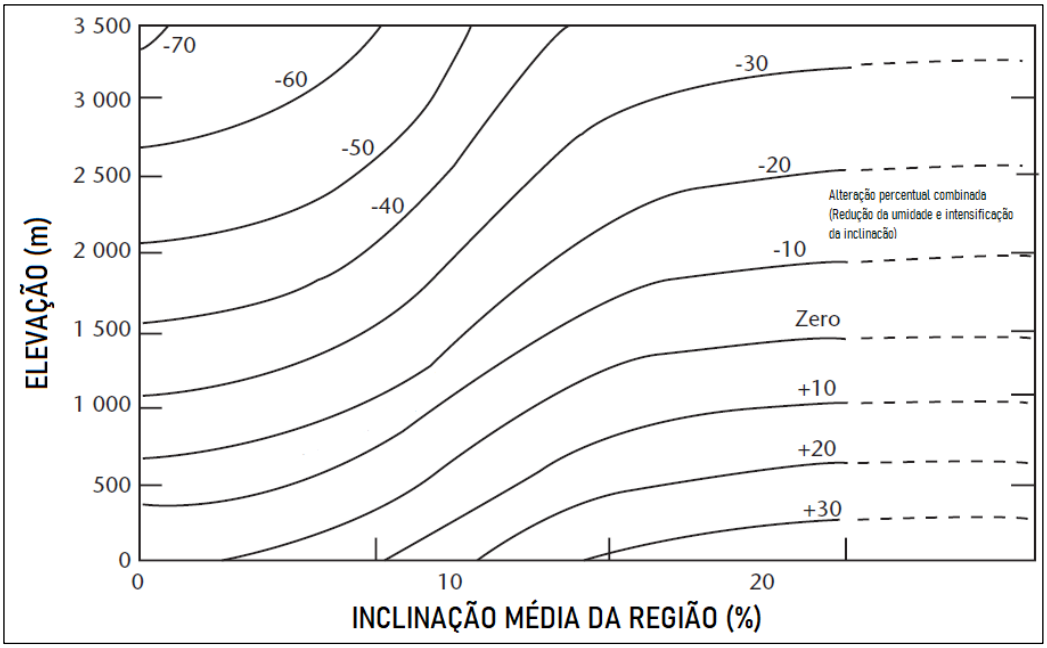
3.1.3 γ_3: zona tropical

É bem verdade que há um foco maior da WMO (2009) nas regiões temperadas do globo, onde há uma maior concentração de estações pluviométricas e meteorológicas. Além disso, as condições meteorológicas encontradas dentro das latitudes 30° N e 30° S são diferentes das zonas temperadas, dada a grande quantidade de umidade disponível, influência dos oceanos e grandes corpos hídricos, bem como das temperaturas elevadas vistas entre os trópicos de capricórnio e câncer.

A despeito desses empecilhos, a WMO (2009) apresenta algumas correções que podem ser feitas na metodologia para englobar também as zonas tropicais. Contudo, ela não é tachativa quanto ao que deve ser usado e o que não deve, cabendo ao usuário ponderar acerca dos diversos estudos de caso apresentados no manual.

Destaque para Schwarz (1963), o qual apresenta um ajuste para PMP_s não-orográficas envolvendo a elavação média e declividade média da região de interesse (vide Figura 13). Cita-se que esse trabalho, entitulado *"Probable Maximum Precipitation in the Hawaiian Islands",* foi elaborado em Ilhas do estado norte americano do Havaí, logo, não seria o mais ideal para aplicar no Brasil, mas, devido à escassez de estudos em regiões tropicais, se comparado a regiões temperadas, se torna uma possibilidade. Logo, o γ_3 é endossado com alguns dos descontos ou majorações provenientes dessa reflexão apresentada.

Figura 13 - Ajuste da PMP não orográfica para elevação e inclinação, Ilhas Havaianas



Fonte: adaptado de Schwarz (1963, apud WMO, 2009).

United States Weather Bureau (1970), Rakhecha e Kennedy (1985) e Lin (1988) apresentaram curvas de duração-área-altura de PMPs (“*DAD curves*”) para o Vietnã, Índia e Ilha de Hainan (China), inclusive apresentando ajustes para tempestades com tufões e desagregação da PMP pontual de 24 horas em outras durações, inserindo a magnitude de área de drenagem como variável dependente. São abordagens mais simplistas e servem para uma primeira estimativa da PMP, dentro dessas regiões citadas, a partir de ábacos já preestabelecidos. Contudo, é sabido que são referências mais antigas e reverberam ainda mais a questão de poucos estudos atualizados de precipitações máximas prováveis dentro dos limites tropicais do globo.

3.1.4 γ_4: transposição

Por definição, a transferência de uma precipitação de uma região para outra, obedecendo certo grau de homegeneidade climática e topográfica entre as mesmas, se chama transposição (WMO, 2009).

A necessidade de transpor tempestades atende à não observância de chuvas torrenciais ocorridas nas região de interesse dentro do período de monitoramento disponível, gerando uma certa limitação de potenciais chuva intensas mais representativa para a região e que não foram ainda registradas, seja pela baixa

densidade de monitoramento, seja pelo curto espaço temporal disponibilizado por estações pluviométricas locais. A dinâmica atmosférica não impõe muros verticais para condições extremas de tempestades na circuvizinhança, logo, é plausível, caso necessário, a transposição de dados de uma bacia hidrográfica rica em dados, para outras menos abastadas.

Esse princípio também é utilizado em outras vertentes científicas como a regionalização de vazões e assinaturas hidrológicas, conforme visto nos trabalhos de Naghettini e Pinto (2007), Addor *et al*. (2018), McMillan (2020 e 2021), Nascimento (2021) e Martins e Silva (2023).

De acordo com a WMO (2009), o procedimento de transposição é obedecido pelos seguintes passos:

1) Analisa-se meteorologicamente a tempestade a ser transportada, ou seja, é definido os fenômenos climáticos intervenientes na região que alimentam as tormentas;
2) Observa-se os limites geográficos de homogeneidade desta tempestade, isto é, define-se a área de influência que aqueles fenômenos climáticos citados terão maior poder de ação;
3) Consolida-se algum controle topográfico existente, isto é, barreira orográfica que impede a movimentação de massas de um lado para o outro, concentrando umidade em uma face da montanha e na outra aumentando os índices de aridez (geralmente barreiras orográficas superiores a 800 m impedem o processo de transposição de precipitações que ocorrem na face barlavento para o sotavento;
4) Por fim, aplica-se fatores de ajustes, manipulando o ponto de orvalho máximo característico do local de projeto frente ao ponto de orvalho representativo da chuva a ser transportada.

É importante citar que, a dinâmica climática litorânea, em geral, se difere daquela vista continente à dentro, devido à grandes massas de água como oceanos. O usuário do método deve-se atentar a isso.

Desse modo, a Equação (19) apresenta, de forma geral, o fator de ajuste γ_4 necessário para a transposição (WMO, 2009):

$$\gamma_4 = \frac{W_2}{W_1} \tag{19}$$

Onde:

W_2: máxima água precipitável representativa já registrada na localidade de interesse, similar ao W_{max};

W_1: água precipitável estimada representativa para a chuva histórica, p_{histor}, a ser transportada.

É importante ressaltar que, a comparação entre as águas precipitáveis devem ser feitas preferencialmente rebatidas a 1000 hPa, com o auxílio do ábaco da Figura 4, e considerar a elevação média do local da chuva e/ou da região receptora da precipitação, conforme mostrado na Equação (17), para a utilização da Tabela A.1 do ANEXO A. Esse fator γ_4 pode assumir qualquer valor maior que zero, não se limitando a ser maior que 1.

ELETROBRAS (1987) apresenta um exemplo simplificado de transposição em que, o fator é basicamente a mesma formulação da Equação (19), claro, considerando as elevações das regiões envolvidas. Neste trabalho, o uso do fator γ_4 substitui o papel do γ_1, isto é, não há coexistência entre estes termos na Equação (1), conforme orientado pelo autor.

As diferenças de elevações, entre a região doadora e a região receptora da tormenta, devem estar incluidas na determinação do fator de transposição, pois, quanto mais elevada é a região analisada, menos altura precipitável ela conterá entre o terreno e a alta atmosfera. Todavia, estudos envolvendo transposição (Hart, 1982; Miller *et al*.; 1984; Schreiner e Riedel, 1978) apontaram que áreas com diferenças de até 300 m tiveram suas questões altimétricas desprezadas e, assim, consideradas similares.

Por outro lado, há também situações que, se as diferenças das alturas pluviométricas entre as regiões puderem ser justificadas pelas diferenças de umidade que não

envolvam diferenças de elevação, abre-se precedente para omitir o ajuste da elevação. Logo, o W_2 é calculado com os dados da região doadora, contudo considerando a coluna disponível sobre a elevação média da região receptora (local de projeto), que pode ser inferior ou superior à cota do local da chuva observada.

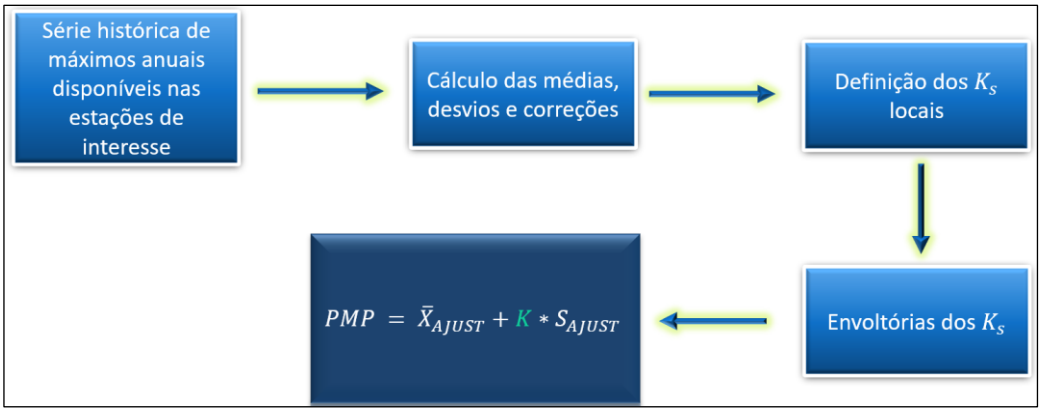
Independente de considerar, ou não, as elevações médias das regiões analisadas no fator de ajuste da transposição, as diferenças entre as mesmas não podem passar de 700 m.

3.2 Método Estatístico

Caso a região de estudo tenha déficit no monitoramento meteorológico, o uso do Método Estatístico se torna uma ferramenta importante e rápida na obtenção das estimativas das PMPs. Comumente, utiliza-se o Método Estatístico proposto por Hershfield em 1961 e atualizado em 1965. A abordagem de Hershfield é simples e amplamente aplicável; todavia, essa não representa diretamente toda a influência de fatores meteorológicos e topográficos para a obtenção da PMP como o Método Hidrometeorológico estabelece.

A Figura 14 apresenta o fluxograma do cálculo da PMP via Método Estatístico de forma simplificada.

Figura 14 - Fluxograma simplificado do Método Estatístico



Fonte: autoria própria.

Assim, conforme citado na introdução, este método é uma adaptação baseada na equação geral de frequência (CHOW, 1951), a qual sugere a aplicação da equação de distribuição de frequências para a análise hidrológica:

$$X_t = \bar{X}_n + K * S_n \quad (20)$$

Onde:

X_t: chuva correspondente a um determinado tempo de recorrência *T*;

$\bar{X}_n$: média da série de *n* máximas anuais;

S_n: desvio padrão da série de *n* máximas anuais;

$K\ ou\ K_m$: fator de frequência (ou recorrência) hidrológica.

Dessa maneira, Hershfield (1961a, 1961b e 1965) considerou que, para a determinação da PMP, há um valor superior limite, ou seja, valor esse que não será excedido. Portanto, a equação foi reinterpretada da seguinte forma:

$$X_{PMP} = \bar{X}_n + K_m * S_n \quad (21)$$

Onde:

X_{PMP}: estimativa da Precipitação Máxima Provável (PMP) para um dado local e duração;

$\bar{X}_n$: média da série de *n* valores de chuvas máximas anuais, para determinada duração;

S_n: desvio padrão da série de *n* valores de chuvas máximas anuais, para determinada duração;

K_m: fator de frequência (ou recorrência) hidrológico.

Adaptando a Equação (21) e determinando $X_{PMP} = X_{máx}$, Hershfield calculou os fatores de frequência para cada uma das séries de chuva das estações estudadas (denominado também de fatores de frequência locais ou históricos). Ressalta-se ainda que, para o cálculo da média e desvio padrão, o valor máximo foi excluído.

$$K = \frac{X_{máx} - \bar{X}_{n-1}}{S_{n-1}} \quad (22)$$

Onde:

$K\ ou\ K_m$: fator de frequência (ou recorrência);

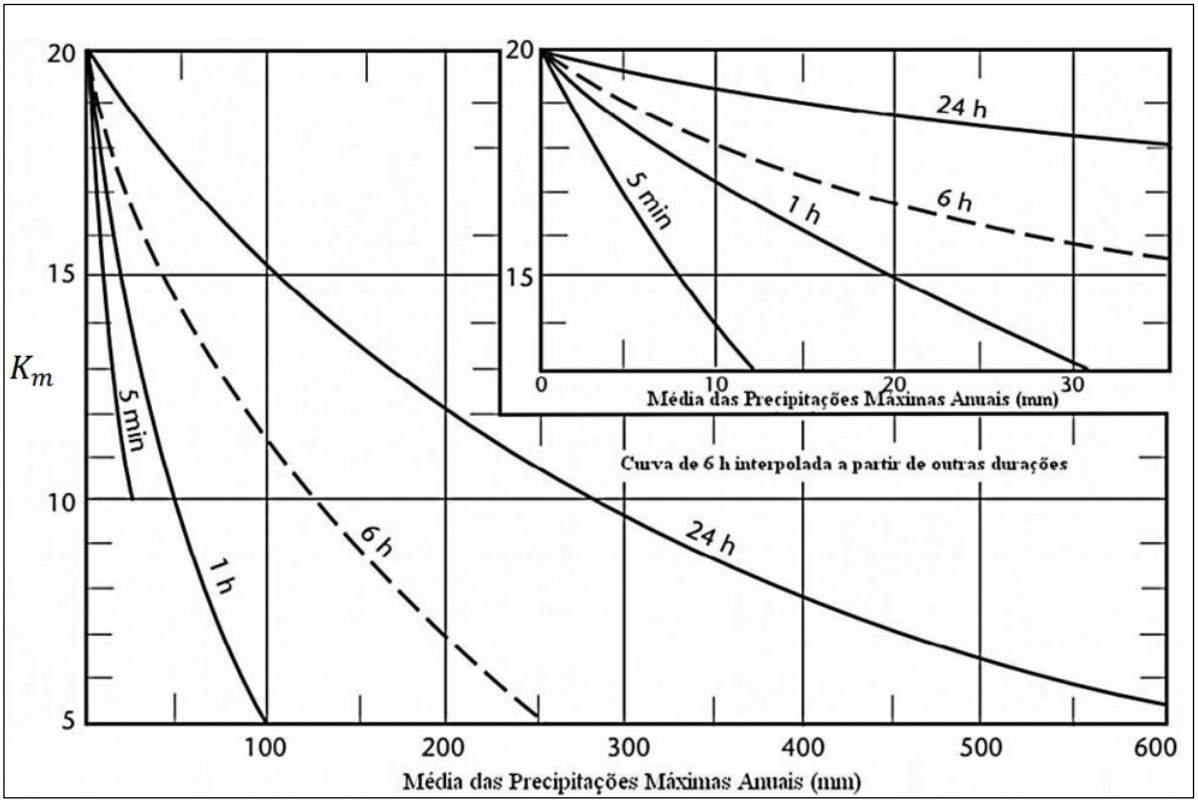
$X_{máx}$: máximo valor da série temporal;

$\bar{X}_{n-1}$: média da série de $n-1$ valores de chuvas máximas anuais, isto é, excluindo o máximo valor da série $X_{máx}$;

S_{n-1}: desvio padrão da série de $n-1$ valores de chuvas máximas anuais, isto é, excluindo o máximo valor da série $X_{máx}$.

Calculados tais fatores, Hershfield construiu um ábaco geral (teoricamente para todo o planeta) que possibilitou obter o fator K_m e, consequentemente, estimar a PMP, em função dos valores da média e da duração das precipitações máximas. Posteriormente, ao objetivar minimizar a influência de *outliers* nas séries estudadas, ele desenvolveu métodos para o ajuste de K conforme a média, o desvio padrão das séries e o tamanho da amostra em estudo. Reitera-se que, a influência destes valores atípicos se potencializa, à medida que a extensão da série de dados se reduz. A Figura 15 apresenta o Ábaco Original de Hershfield para obtenção dos fatores de frequência hidrológicas para durações de chuvas de 5 min, 1 hora, 6 horas e 24 horas. A Figura 16 aborda os ajustes nas médias e desvios padrões das séries de máximos recomendada pelo autor.

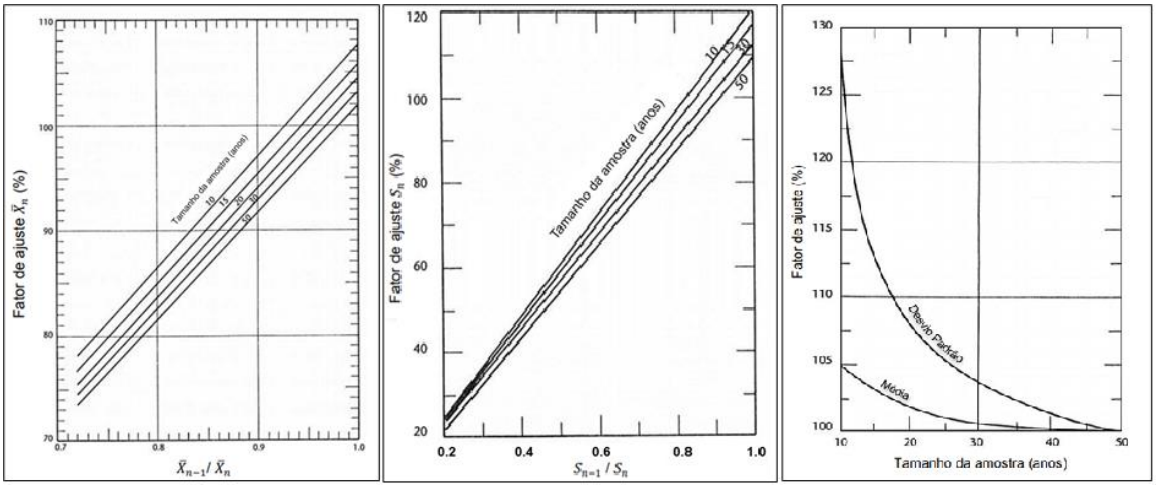
Figura 15 - Fator K_m em função da média de precipitações máximas anuais



Fonte: adaptado de Hershfield (1965).

É importante salientar que, inicialmente, Hershfield (1961b) fixou o K_m = 15 para toda e qualquer estação, contudo, posteriormente, Hershfield (1965) retificou seu estudo e observou que K_m varia inversamente com a precipitação média máxima anual de uma dada estação (Figura 15). Ou seja, ele observou uma relação matemática exponencial existente entre essas duas variáveis.

Figura 16 - Ajuste da média e do desvio padrão em razão do máximo valor observado e do tamanho da amostra



Fonte: adaptado de Hershfield (1961b).

Enfatiza-se que, Hershfield utilizou 2.645 estações pluviométricas para a elaboração do Envoltória Geral dos fatores de frequência (Figura 15), onde 100% estão localizadas no Hemisfério Norte e 90% nos Estados Unidos. Ou seja, a proposição das envoltórias desse método se baseou em estações com regime de precipitação completamente diferente de regiões tropicais, quentes e úmidas.

A base pluviográfica utilizada por Hershfield estava, em sua maioria, em zonas temperadas e frias do globo terrestre, além da extensão temporal se limitar até o início da década de 60, não considerando registros de precipitações mais recentes no planeta. Além disso, sabe-se ainda que, a América do Sul apresenta algumas regiões com grandes índices pluviométricos, e é uma das regiões com maior atuação simultânea de vários sistemas atmosféricos de alta e baixa troposfera, conforme apresentado por Reboita *et al.* (2010), inviabilizando, desta forma, a aplicação simples e direta do método de Hershfield em sua forma original.

De modo geral, tem-se que as etapas para estimar a PMP, por meio da metodologia de Hershfield, são as seguintes:

1) Calcular a média e desvio padrão da série das precipitações da região em estudo;
2) Calcular a média e o desvio padrão novamente, desconsiderando o valor máximo da série;
3) Ajustar os valores de média e desvio padrão devido à presença de *outliers*, bem como para o tamanho da série, por meio da Figura 16;
4) Determinar o fator de frequência K com base no ábaco de Hershfield apresentado na Figura 15, considerando a média ajustada;
5) Estimar a PMP por meio da Equação (21).

Uma alternativa para o passo 4) é conceber uma nova envoltória regional através dos fatores de frequência locais dos postos pluviométricos selecionadas a partir da Equação (22) e, após isso, determinar o K de interesse. Autores como Barbosa *et al.* (2023) e Sarkar e Maity (2020) utilizaram dessa alternativa, sendo mais bem detalhados na sequência do texto.

Assim sendo, para uma melhor clareza na sequência do presente estudo, denomina-se a construção de envoltórias de alguma região específica do globo terrestre, com base em fatores de frequência locais (dos próprios postos pluviométricos da região de interesse) como Envoltória Regional, ou Envoltória Regionalizada, dos fatores de frequência hidrológicos.

Apesar da praticidade envolvida na metodologia estatística de Hershfield, pode-se citar algumas desvantagens, como o fato de o método requerer curvas de redução de área para ajustar os valores para grandes áreas de drenagem, visto que a metodologia produz apenas valores pontuais de PMP. Além disso, há a dificuldade em se obter o valor adequado e representativo para o fator de frequência (K), o qual é influenciado pela disponibilidade dos dados hidrológicos de valores extremos, bem como pela possível diferença climática entre o local de interesse e a conjuntura climática da Envoltória Original de Hershfield. Assim, um elevado valor de K, levará a uma estimativa maior da PMP e, consequentemente, um cenário antieconômico; em contrapartida, um menor valor de K, levará à subestimação da PMP e, por conseguinte, qualquer estrutura projetada com base nesta estimativa, estará exposta a um risco maior (WMO, 2009).

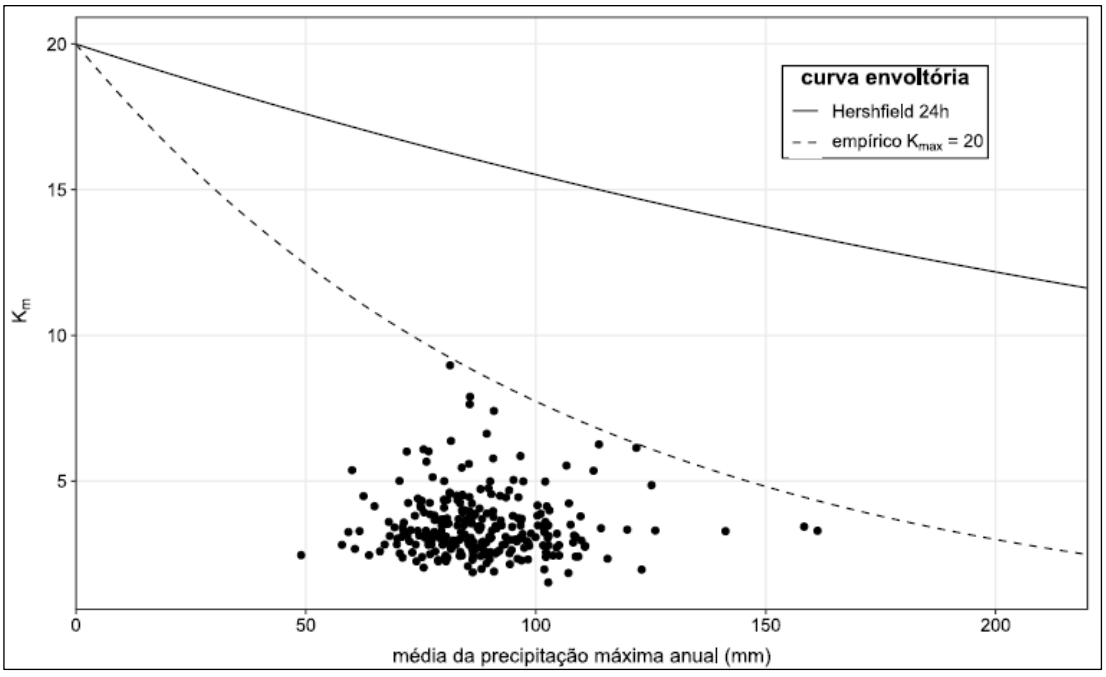
No geral, esta metodologia tende a produzir valores de PMP maiores do que àqueles a serem obtidos a partir do Método Hidrometeorológico (SUGAI, 1989).

No Brasil, há estudos relacionados à investigação da PMP Estatística em vários estados. Como exemplo, Silva Neto *et. al.* (2020), com dados de 1989 a 1999 de 10 estações, encontraram para Tocantins o valor máximo de 16,64 para o K_m com duração de 24 h com base no Ábaco Original de Hershfield, em contrapartida o máximo K local calculado foi igual a 4,81 (com uma média das máximas diárias não ultrapassando 100 mm). Já Cavalcanti *et al.* (2018), em estudos na capital pernambucana (Recife-PE), com uma base de dados de 1998 a 2012 (15 anos), obtiveram o K local de 24 h igual a 4,90. Sugai (1989) avaliou no Sul do Brasil 130 postos pluviométricos, com um total de 4.510 anos de observação, obtendo um K histórico máximo igual a 9,0 para a duração de 1 e 2 dias, diferente da magnitude máxima de 20 apresentada na Envoltória Original de Hershfield. No semiárido baiano, Conceição e Fontes (2019), investigaram PMP Estatísticas associadas a quatro

estações pluviométricas, às quais estão localizadas nas cidades de Jacobina, Itaetê, Morro do Chapéu e Pindobaçu. Estes autores obtiveram K locais variando entre 2,43 e 4,57 para 24 horas, diferente do obtido pela Envoltória Original de Hershfield que apontou magnitudes entre 15,95 e 16,46.

Barbosa *et al.* (2023) investigaram a variabilidade dos fatores de frequência de todo o Brasil, apenas para a duração de 24 horas, com base em 270 estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A Figura 17 ilustra as estações avaliadas sob a Envoltória Original de Hershfield e uma nova envoltória empírica proposta pelos autores, com base nos fatores de frequência locais (nota-se um máximo valor de fator de frequência local em torno de 9,6). É importante citar que, foi adotado o ano hidrológico coincidente com o ano civil.

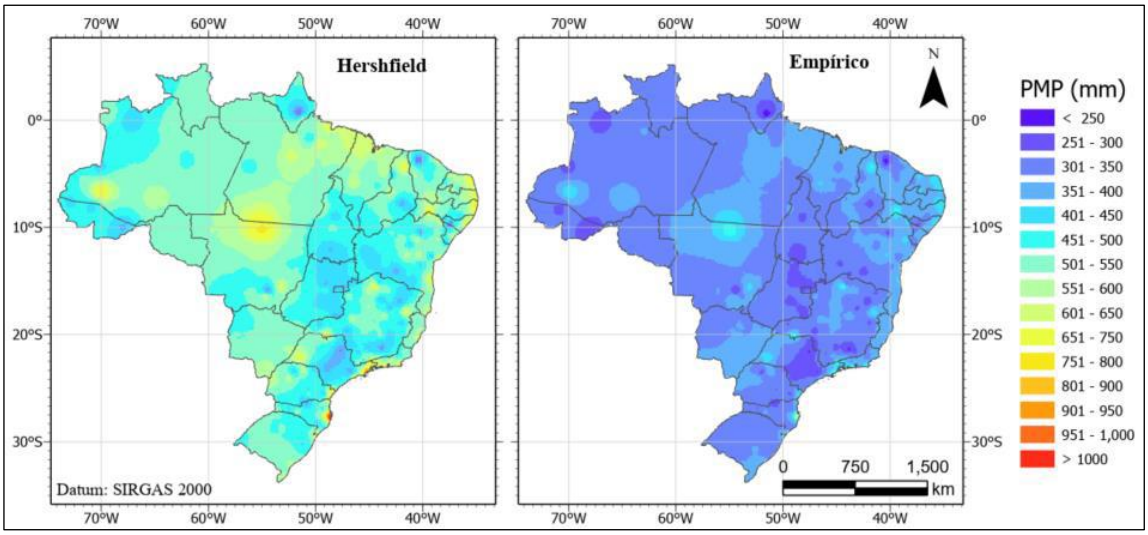
Figura 17 - Fator de frequência (K_m) em função da duração da chuva e da média das precipitações máximas anuais de 24 horas do Brasil, segundo Barbosa *et al.* (2023)



Fonte: Barbosa *et al.* (2023).

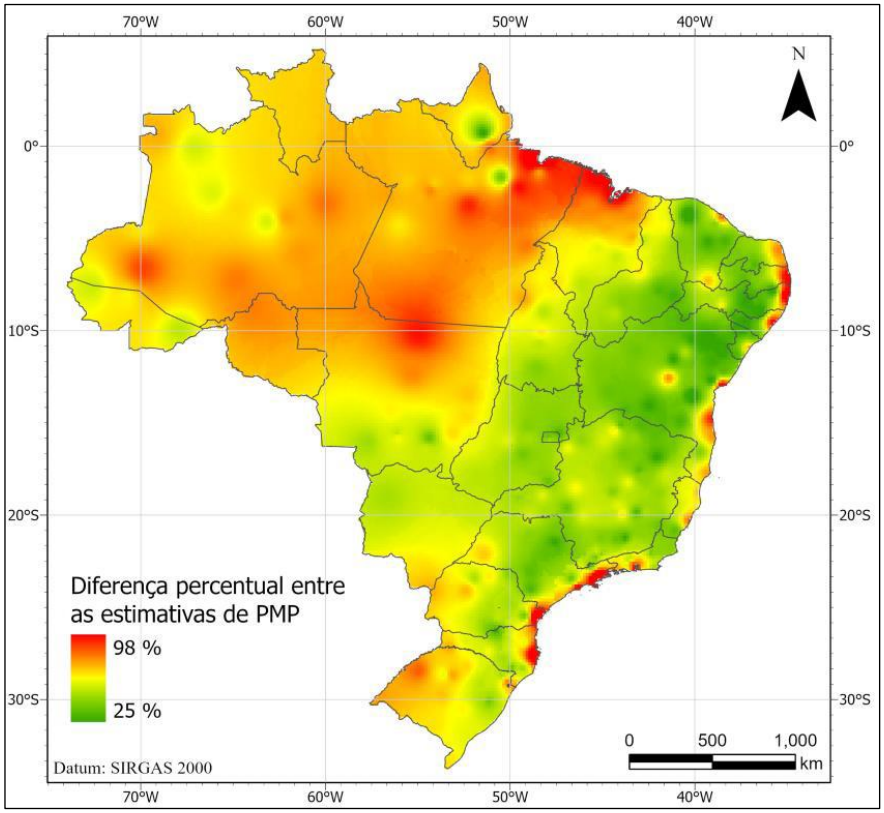
Os mesmos autores apresentaram, na Figura 18, uma espacialização dos resultados da PMP de 24 horas para todo o Brasil, via técnica de interpolação IDW, utilizando o Método de Hershfield e o método empírico proposto por eles (Envoltória Regionalizada). Além disso, foram apresentadas diferenças percentuais entre as duas estimativas na Figura 19, com destaque para o Norte e litoral brasileiro.

Figura 18 - Espacialização da PMP de 24 horas de duração obtida pelo método empírico de Hershfield (1961a, 1961b e 1965) e pelo método empírico, para todo o Brasil, segundo Barbosa *et al.* (2023)



Fonte: adaptado de Barbosa *et al.* (2023)

Figura 19 - Diferença percentual do método de Hershfield (1961a, 1961b e 1965) em relação ao método empírico para estimativa da PMP de duração de 24 horas para todo o Brasil



Fonte: adaptado de Barbosa *et al.* (2023)

Koutsoyiannis (1999) investigou a metodologia de Hershfield (1961), que inicialmente, preconizava o uso fixo de $K_m = 15$ para qualquer estação pluviométrica dentro do contexto das estimativas da PMP de 24 horas (posteriormente, em 1965, o próprio

Hershfield apresentou a ideia de envoltória dos fatores de frequência versus média das precipitações máximas anuais, abandonando a orientação de um valor fixo de K_m). Koutsoyiannis (1999), analisando os postos pluviométricos utilizados pelo Hershfield (1961b), percebeu que, a utilização fixa do $K_m = 15$ para estimar a PMP é similar a estimar o quantil da distribuição de probabilidades GEV com TR = 60.000 anos.

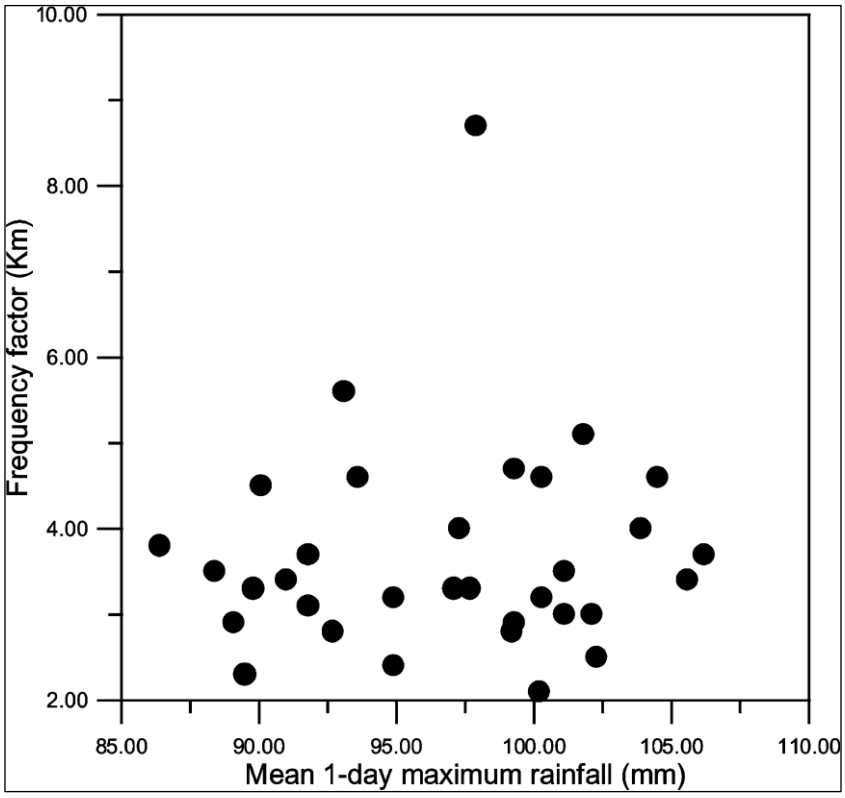
Foi selecionado por Koutsoyiannis (1999) uma estação do *National Observatory of Athens* com dados de 1860-1995 (136 anos), $\bar{X}$= 47,9 mm e $\bar{S}$ = 21,7 mm e máximo histórico observado de 150,8 mm. O Método de Hershfield (1965) foi aplicado e gerou um K_m = 17,2, logo, a PMP estimada foi de 424,1 mm. Aplicando a metodologia expressa por Koutsoyiannis (1999), para se obter qual seria o TR associado à altura de chuva de 424,1 mm, obteve-se um tempo de recorrência aproximado de 60.000 anos.

Pinto (2001) e Koutsoyiannis (1999) mostraram que o Método Original Hershfield (1961a, 1961b e 1965) não estima exatamente um limite físico para a PMP, mas sim associa a ela uma probabilidade de excedência.

Lan *et al*. (2017) revisaram o fator K_m de Hershfield para 24 horas em Hong Kong, levantando 65 estações com dados por volta de 1981 e 2010, e encontrando K_m locais variando entre 1,9 e 5,5.

Desa *et al.* (2001) analisaram o estado de Selangor, na Malásia, de característica quente e úmida. Este local possui uma PMA em torno de 2.285 mm, temperatura média anual de 27 ºC e umidade sempre acima dos 80%. Utilizaram-se 33 postos pluviométricos, com extensão temporal variando entre 33 e 66 anos (com a maioria superando 50 anos de dados). Foi obtido um máximo fator de frequência local de 24 horas igual a 8,7 (sendo que a maioria dos fatores não passaram de 5), muito diferente do que foi determinado por Hershfield (1961b), que seria em torno de 15. A Figura 20 apresenta uma plotagem dos fatores de frequência contra as médias das precipitações máximas anuais de 24 horas de Selangor.

Figura 20 – Plotagem dos fatores de frequência locais versus as médias das precipitações máximas anuais de 24 horas de Selangor/Malásia, segundo Desa *et al.* (2001)



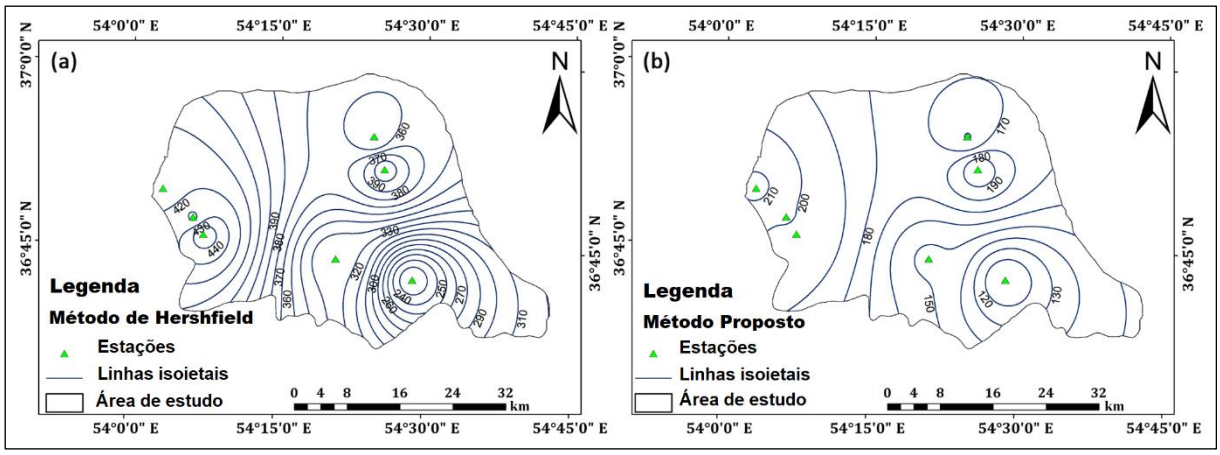
Fonte: Desa *et al.* (2001).

Desa e Rakhecha (2007), no estado de Johor da Malásia, estudaram 39 estações com extensão temporal entre 14 e 55 anos (com a maioria dos postos superando 40 anos) e, novamente, questionaram a utilização do $K_m = 15$ fixo, para 24 horas, do trabalho de Hershfield (1961b) para determinar a PMP Estatística. Os autores acreditam que utilizar os trabalhos originais de Hershfield, seja $K_m = 15$, seja a Envoltória Original, podem levar a superestimação das estimativas de PMP em estações pluviométricas com altos índices pluviométricos médios e máximos anuais, já que o fator de frequência local máximo encontrado em Johor foi igual a 7,5 (sendo que a maioria dos fatores foram menores do que 6). Desa *et al.* (2003, apud DESA e RAKHECHA, 2007) determinaram um *K* local máximo de 7,4 para a província malasiana de Kelantan.

Voltando ao trabalho de Alfazi-Gorouh *et al.* (2018), foram analisadas também as estimativas de PMP Estatística, e os fatores de frequência associados, na bacia do Qareh-Su, localizada no Irã. Os autores compararam a espacialização da PMP Estatística via Método de Hershfield e via método proposto por eles, que nada mais é do que cálculos dos fatores de frequência locais para a estimativa da PMP (Figura

21). Em resumo, o K_m local máximo de 24 horas foi igual a 5,3, enquanto o máximo K_m obtido da Envoltória Original de Hershfield foi igual a 18,0.

Figura 21 – Distribuição espacial da PMP de 24 horas da bacia do Qareh-Su seguindo o Método de Hershfield (a) e o método proposto por Alfazi-Gorouh *et al.* (2018) (b)



Fonte: Alfazi-Gorouh *et al.* (2018).

Diante dessa necessidade de aprimorar a metodologia clássica de Hershfield, atualizações também foram apresentadas por Sarkar e Maity (2020) e aplicada na Índia (110 anos de dados diários observados de 4951 pontos de grades 0,25° x 0,25° fornecido pelo Departamento de Meteorologia da Índia (IMD)), onde a envoltória é construída em duas partes:

- A primeira por um patamar constante com a magnitude igual ao *K* local máximo, compreendendo o intervalo das abcissas a partir da origem até a média das máximas anuais geradora do *K* local máximo (que é também a média de transição entre o patamar e a curva exponencial);
- A segunda é o prosseguimento da curva, todavia com o decaimento exponencial, similar ao visto no Ábaco Original de Hershfield.

A seguir, apresenta-se na Equação (23), as equações de Sarkar e Maity (2020) para a curva exponencial e o patamar:

$$K = \begin{cases} K_a, se\ \bar{X}_{ajustado} \leq \bar{X}^t \\ K_a * e^{-\alpha * (\bar{X}_{ajustado} - \bar{X}^t)}, se\ \bar{X}_{ajustado} > \bar{X}^t \end{cases} \quad (23)$$

Onde:

$K\ ou\ K_m$: fator de frequência (ou recorrência) hidrológico;

K_a: fator de frequência inicial correspondente ao patamar;

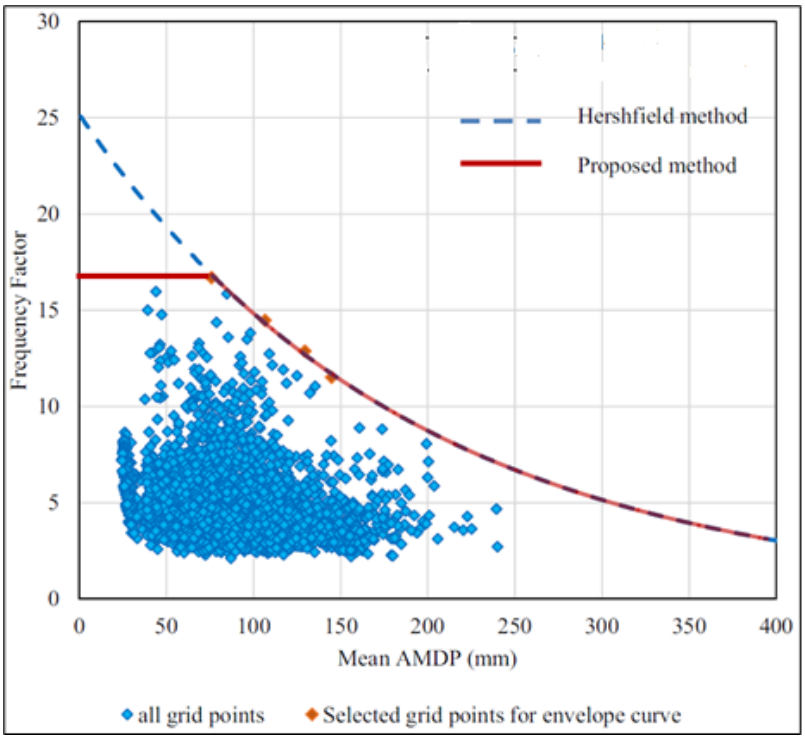
α: coeficiente de ajuste da Envoltória Regional, obtido por ajuste visual e, também, a partir de ferramentas de convergência numérica;

$\bar{X}_{ajustado}$: média ajustada da série de *n* valores de chuvas máximas anuais, para determinada duração;

$\bar{X}^t$: média ajustada da transição entre o patamar e a curva exponencial.

A Figura 22 ilustra o exposto, onde Sarkar e Maity (2020) determinaram a envoltória atualizada sugerida nos seus estudos com o intuito de amenizar os fatores de frequência estimados, já que a utilização da metodologia original de Hershfield (1961a, 1961b e 1965), em outros países diferentes do EUA, pode levar a uma estimação conservadora do K, conforme apresentado ao longo da revisão bibliográfica do presente item. Essa contribuição dos autores Sarkar e Maity caracteriza uma forma de obtenção da Envoltória Regional dos fatores de frequência, com as citadas particularidades.

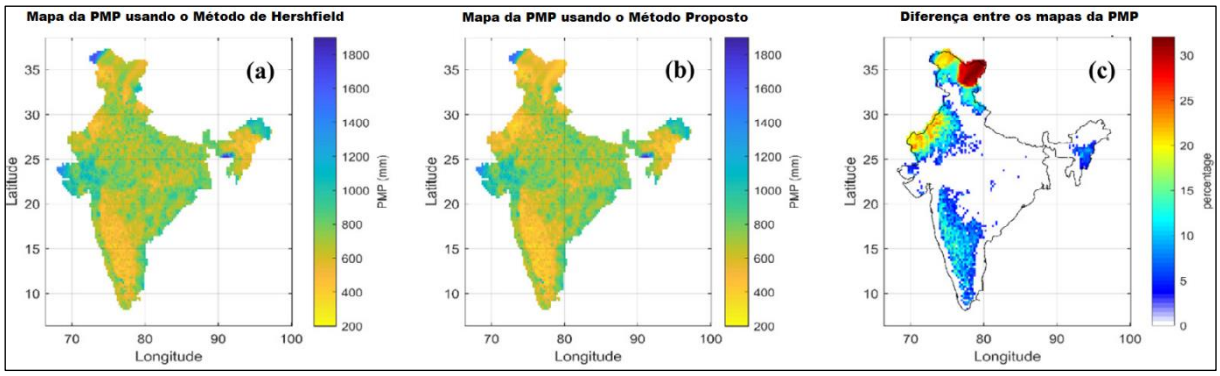
Figura 22 - Dispersão entre a média das máximas anuais diárias sobre a Índia entre 1901-2000 e a curva de envelope superior de Hershfield e o novo modelo proposto



Fonte: adaptado de Sarkar e Maity (2020).

Sarkar e Maity (2020), no mesmo trabalho, apresentaram uma comparação entre as estimativas de PMP utilizando o método proposto e o método de Hershfield, para toda a Índia (Figura 22). Calcularam, na mesma figura, a diferença percentual entre as estimativas dada por: $\boldsymbol{D} = \frac{\boldsymbol{PMP_{Hershfield} - PMP_{Proposta}}}{\boldsymbol{PMP_{Proposta}}} * \boldsymbol{100\%}$, onde $PMP_{Hershfield}$ é a estimativa de PMP de acordo com o método de Hershfield existente e a $PMP_{Proposta}$ é a estimativa de PMP de acordo com o método proposto pelos pesquisadores Sarkar e Maity.

Figura 16 – PMP de 1 dia desenvolvido para o período de 1901-2000 usando Método Original de Hershfield (a) e método proposto por Sarkar e Maity (2020) (b). Além disso, é apresentado a diferença percentual entre as estimativas (c)



Fonte: adaptado de Sarkar e Maity (2020).

Burger (2014) estudou 50 estações convencionais e 37 pluviógrafos no estado do Paraná, e elaborou Envoltórias Regionais desse estado brasileiro, com K_m máximo igual a 15. Além disso, uma equação de regressão do Ábaco Original de Hershfield foi apresentado, como também simulações sintéticas do K, através de modelos *AR(1)*, foram apuradas. Verificou-se. pela autora. que o K sintético decresce à medida que se aumenta a duração da chuva (1 dia a 10 dias), conforme visto para o *K* obtido da Envoltória Regional do Paraná. Maiores detalhes desse trabalho serão apresentados no item 3.3.

O Quadro 6 apresenta um resumo das contribuições referentes aos fatores de frequência dos pesquisadores mencionados ao longo do texto.

Quadro 6 – Resumo das contribuições referentes aos fatores de frequência no Brasil e no mundo

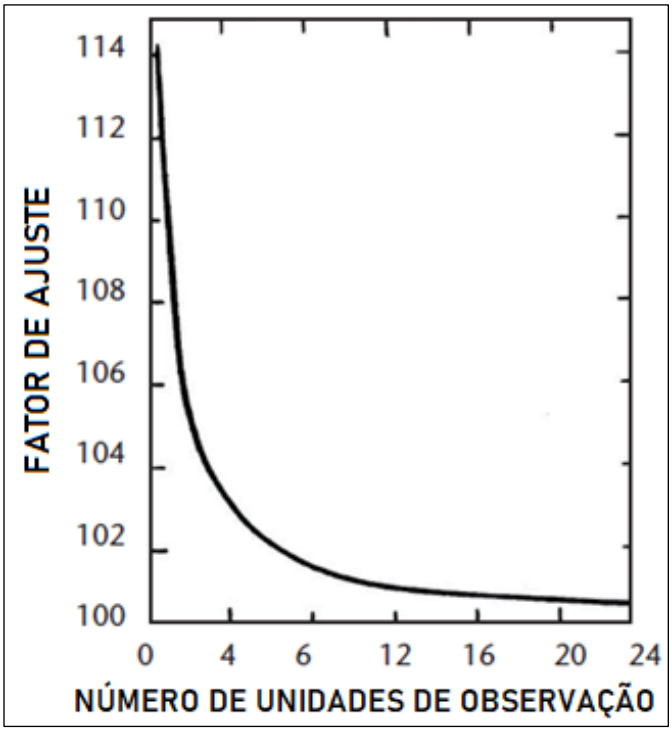
Autores	Informações dos dados	Contribuição
Barbosa *et al.* (2023)	270 estações do INMET.	Conceberam uma Envoltória Regional dos fatores de frequência para todo o Brasil, com máximo *K* local em torno de 9,6, bem como especializaram as estimativas de PMP em todo o território nacional.
Silva Neto *et al*. (2020)	10 estações do Tocantins com dados de 1989 a 1999.	K_m = 16,64, representando o fator de frequência máximo da Envoltória de Hershfield para 24 horas. Em contrapartida, o fator de frequência local máximo (*K*) foi igual a 4,81.
Sarkar e Maity (2020)	110 anos de dados diários observados de 4951 pontos de grades 0,25 x 0,25 ° fornecido pelo Departamento de Meteorologia da Índia (IMD).	Foi elaborado uma nova proposta de envoltória dos fatores de frequência formada por um patamar constante e uma curva exponencial.
Conceição e Fontes (2019)	4 estações pluviométricas no Semiárido baiano, com dados entre 1942 e 2018.	K_S locais variando entre 2,43 a 4,57, diferente do que apontava a Envoltória Original de Hershfield, em torno de 15,95 a 16,46.
Cavalcanti *et al*. (2018)	Base de dados englobando os anos de 1998 a 2012 da estação pluviométrica de Recife/PE.	*K* local igual a 4,9.
Alfazi-Gorouh *et al.* (2018)	6 estações pluviométricas e 1 estação meteorológica na bacia do Qareh-Su, localizada no Irã.	K_S locais variando entre 2,9 e 5,3, diferente do que apontava a Envoltória Original de Hershfield, em torno de 17,2 e 18,0.
Lan *et al*. (2017)	65 estações na região de Hong-Kong com dados entre 1985 e 2010.	K_S locais variando entre 1,79 e 5,46.
Burger (2014)	50 estações convencionais e 37 pluviógrafos do estado do Paraná.	Elaboração de uma equação de regressão para o Ábaco Original de Hershfield; Envoltória Regional do Paraná; simulações sintéticas dos fatores de frequências com modelos *AR(1)*.
Desa e Rakhecha (2007)	39 estações em Johor, na Malásia, com registros superiores a 40 anos, em sua maioria.	A maioria dos K_S locais estiveram abaixo de 6,0, e o maior valor registrado como fator de frequência local foi 7,5, bem distante dos máximos valores da Envoltória Original de Hershfield (Km = 20). Desa *et al*. (2003, apud DESA e RAKHECHA, 2007) determinaram um *K* local máximo de 7,4 para a província malasiana de Kelantan.
Desa *et al.* (2001)	33 estações em Selangor, na Malásia, com registros superiores a 50 anos, em sua maioria.	A maioria dos K_S locais estiveram abaixo de 5,0, e o maior valor registrado como fator de frequência local foi 8,7, bem distante dos máximos valores da Envoltória Original de Hershfield (Km = 20)
Koutsoyiannis (1999)	Investigou as 2.645 estações englobadas nos estudos de Hershfield.	É possível associar uma probabilidade de excedência, utilizando TR 60.000 e distribuição probabilística GEV, para PMP_S que empregam um K_m fixo igual a 15. Pinto (2001) e Koutsoyiannis (1999) mostraram que o Método Original de Hershfield (1961a,

Autores	Informações dos dados	Contribuição
		1961b e 1965) não estima exatamente um limite físico para a PMP, mas sim associa a ela uma probabilidade de excedência.
Sugai (1989)	130 postos pluviométricos no Sul do Brasil, totalizando 4.150 anos de observação.	*K* local máximo igual a 9,0.

Fonte: conforme indicado.

Comentando brevemente acerca do trabalho de Weiss (1964 apud WMO, 2009), este apresentou um ábaco de ajuste das precipitações obtidas por intervalos fixos de observação (Figura 23), que pode ser aplicado em acumulados diários com o intuito de se obter alturas de 24 horas, por exemplo. Desse modo, a WMO (2009) expõe e recomenda aplicar essa correção nas precipitações utilizadas no Método Estatístico.

Figura 23 - Ajuste das alturas de precipitação frente ao número de unidades de observação dentro da duração de chuva investigada



Fonte: adaptado de Weiss (1964 apud WMO, 2009).

Como exercício, dados diários de precipitação das estações convencionais da ANA, normalmente, são medidos em intervalos fixos de um dia ao outro (7 horas da manhã de um dia a 7 horas da manhã do dia seguinte, a título de exemplo), logo, o fator de conversão para 24 horas, segundo a Figura 23, seria em torno de 1,13 a 1,14.

3.3 Simulação Estocástica dos Fatores de Frequência

Um dos avanços nas últimas décadas, relacionado a estimativa do fator de frequência do Método Estatístico da PMP, foi o uso da simulação estocástica. Nesta abordagem, de uma maneira geral, emprega-se o Método de Monte Carlo (MMC) para a geração de séries sintéticas de precipitações máximas anuais. Um trabalho de referência para a simulação estocástica dos fatores de frequência no Brasil foi o elaborado por Burger (2014), aplicado dentro dos limites territoriais do estado paranaense.

Antes de aplicar os conceitos da Hidrologia Estocástica, Burger (2014) buscou entender a metodologia Original de Hershfield e trazer adaptações para o método utilizando dados de precipitações do estado do Paraná. O primeiro produto gerado foi um modelo matemático de ajuste não-linear da Envoltória de Hershfield. Para a regressão, usou-se o algoritmo do recozimento simulado + método dos mínimos quadrados, ajustando equações aritméticas das curvas de fatores de frequência de Hershfield para 5 min, 1h e 24 horas. Estabeleceu-se, assim, a Equação (24) e comparou-se a aderência do modelo matemático com os fatores de frequência de Hershfield de 6 horas. O coeficiente de determinação, R^2, foi de 0,995.

$$K = 20 - \frac{0{,}732 - \bar{P}_d^{\,0{,}693}}{(d + 0{,}372)^{0{,}420}} \tag{24}$$

Onde:

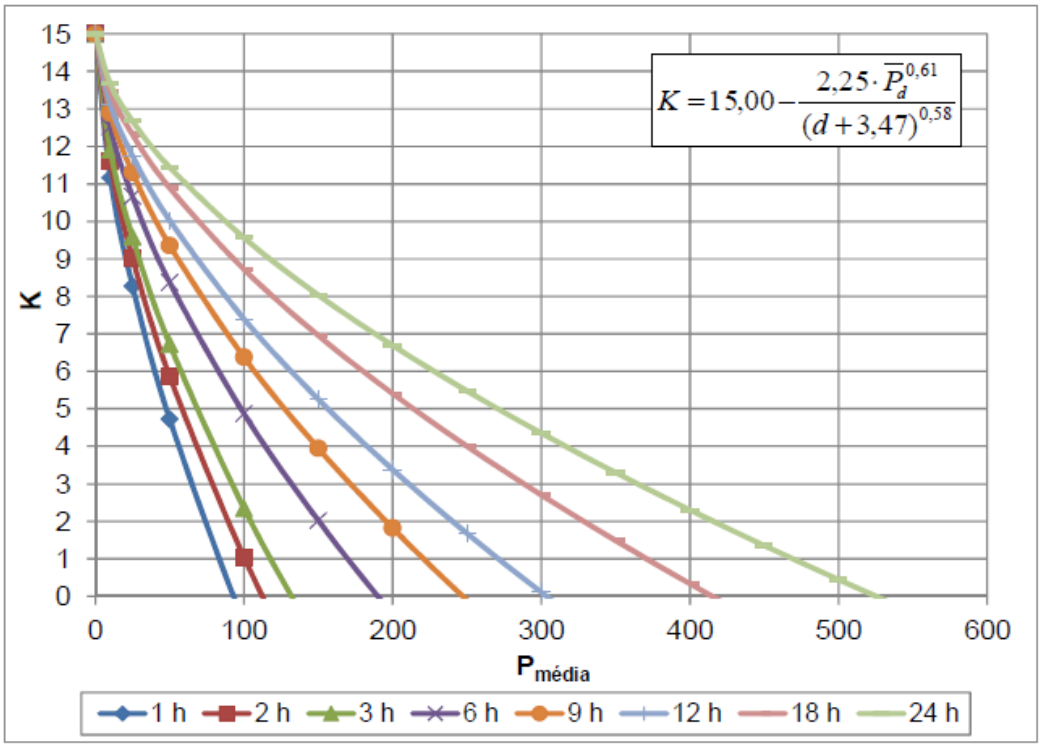
d: duração da chuva de projeto (h);

$\bar{P}_d$: média das chuvas maximais anuais de d horas de duração (mm).

Na sequência, foi feito uma tentativa de extrapolar a curva de Hershfield para durações maiores que 24 horas, todavia, Burger (2014) conclui que o modelo matemático da Equação (24) “serve apenas para a interpolação das curvas, e não para a extrapolação das mesmas”.

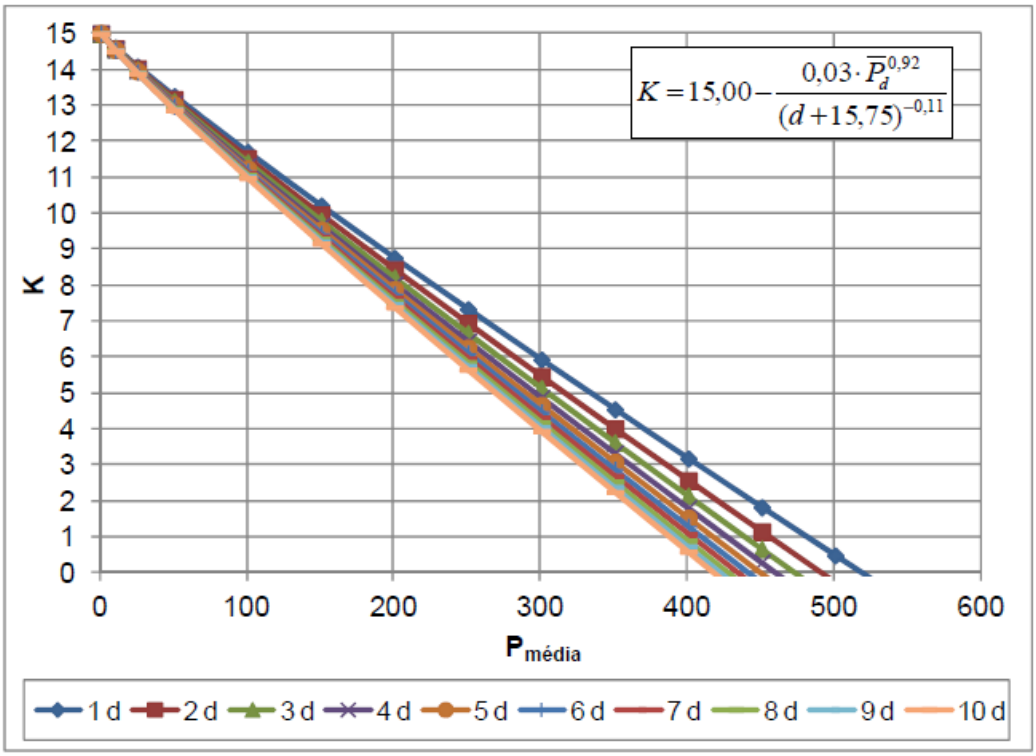
Concomitantemente, Burger (2014) definiu uma Envoltória Regional para os fatores de frequência do estado do Paraná utilizando estações convencionais e automáticas, com o produto sendo a Figura 24 e Figura 25.

Figura 24 - *K* em função da duração da chuva e da média das precipitações máximas anuais com durações de 1h a 24h – Estado do Paraná



Fonte: Burger (2014).

Figura 25 - *K* em função da duração da chuva e da média das precipitações máximas anuais com durações de 1 a 10 dias – Estado do Paraná



Fonte: Burger (2014).

Comparando o comportamento dos K_s das estações paranaenses, à medida que se aumenta as durações das chuvas, de 1 a 10 dias, as magnitudes dos fatores de frequência tendem a decair. A Equação (24) não captou essa tendência, por isso, a autora desaconselhou o uso do modelo matemático de regressão para durações maiores do que 24 horas, sendo útil apenas para durações iguais ou menores do que 24 horas.

Tendo então referências estatísticas construídas para o Paraná, Burger (2014) obteve estimativas de PMP a partir de um modelo de geração de séries sintéticas de precipitações maximais anuais de "*d*" dias de duração, por intermédio de um modelo autorregressivo multivariado de primeira ordem *AR(1)*, seguindo uma distribuição log-normal a 3 parâmetros, com o intuito de estimar o valor de K. Por conseguinte, foram definidas percentis de 99,9% para a extração do fator de frequência sintético representativo para cada estação pluviométrica, através do MMC.

Já que os dados de chuvas máximas anuais geralmente não se apresentam como oriundos de uma distribuição Gaussiana, pelo contrário, se apresentam com assimetria positiva, possuindo cauda para a direita, e com limite inferior próximo a zero (características de distribuições de extremos), Burger (2014) os transformaram em normalmente distribuídos através de uma distribuição marginal como a log-normal a 3 parâmetros.

Voltando ao MMC, define-se como um modelo computacional usado para simular problemas envolvendo processos estocásticos e determinísticos. Para o problema em questão, não há necessidade de fornecer todas as equações que regem o problema físico, bastando apenas que haja relações dos dados de entrada com funções de densidade de probabilidade. Espera-se que, a partir de inúmeras simulações (quantas forem suficientes) o modelo estime uma grandeza associada a um percentil aceitável para o usuário.

Já o *AR (1)* é um submodelo dos modelos ARMA, sendo que estes podem ser do tipo autorregressivo, processo de média móvel ou junção dos dois tipos. Recomenda-se o seu uso em casos que o modelo apresenta resíduos normalmente distribuídos e quando a série histórica detém um forte grau de autocorrelação, além dos dados

serem estacionários (BOX e JENKINS, 1970; BOX *et al.*, 1994). Segundo Chatfield (2001), há também uma premissa de se utilizar dados normalmente distribuídos, e se não for possível, recomenda-se fazer alguma transformação para torná-los normais ($ln(x)$, $\sqrt[2]{x}$, $\sqrt[3]{x}$, diferença entre posições, distribuições marginais etc.). Caso os dados sejam não estacionários, preza-se por modelos *ARIMA*, onde a inserção do "*I*" (*Integrated*) na sigla representa a tentativa de eliminar a não-estacionariedade entre os dados. Em última instância, a sazonalidade entre os dados solicita o uso de modelos *SARIMA*, onde a inserção do "*S*" (*Seasonality*) na sigla caracteriza uma relação do ano corrente com um ano anterior de qualquer ordem.

Modelos *ARMA* dispõe, como premissa, a estacionariedade das séries históricas e, caso esse fato não seja constatado nos dados utilizados, é necessário a retirada da tendência para que o modelo autorregressivo possa ser utilizado. Como a Burger (2014) utilizou o modelo *AR(1)* para a geração das séries sintéticas, foi necessário verificar a estacionariedade através de testes estatísticos de hipótese como o método de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975; KENDALL e GIBBONS 1990), fortemente recomendado para análise de séries temporais hidrológicas. Poderia ser utilizado também outros testes para verificação de não-estacionariedade como o teste não-paramétrico de Spearman, conforme visto em NERC (1975) e citado em Naghettini e Pinto (2007).

As séries históricas consideradas não-estacionárias tiveram que ser padronizadas, com cada variável sendo subtraída pela média e dividida pelo desvio padrão da estação pluviométrica analisada. Assim, pôde-se gerar as séries sintéticas e, após isso, ser devolvido a tendência para as novas séries sintéticas geradas em prol de determinar o fator de frequência sintético, respeitando a característica estatística do posto analisado. Metcalfe e Cowpertwait (2009) ilustram outras formas de retirada de tendencia, sendo alguns dos exemplos: a decomposição aditiva, decomposição multiplicativa, decomposição por média móvel, decomposição por regressão linear ou polinomial etc. Cabe ao usuário definir o adequado para cada caso e verificar a presença de estacionariedade pós transformação das séries temporais.

É necessário também um pré-tratamento dos dados antes das verificações de independência ou tendências, através da eliminação de outliers presente nas

amostras. De acordo com Naghettini e Pinto (2007), é possível detectar e/ou eliminar valores atípicos com *a Amplitude inter-quartis* ou então com o teste de hipótese denominado Grubbs e Beck, descrito por Grubbs (1950, 1969) e estendido por Grubbs e Beck (1972). Há também o *método de dupla-massa* para avaliar a consistência das estações dentro de um conjunto regional, concebido por USGS (1996).

Quanto à base de dados, foram selecionadas 50 estações convencionais do Instituto Águas do Paraná por Burger (2014) e 37 pluviógrafos com medições horárias (com 80% delas possuindo pelo menos 15 anos de dados).

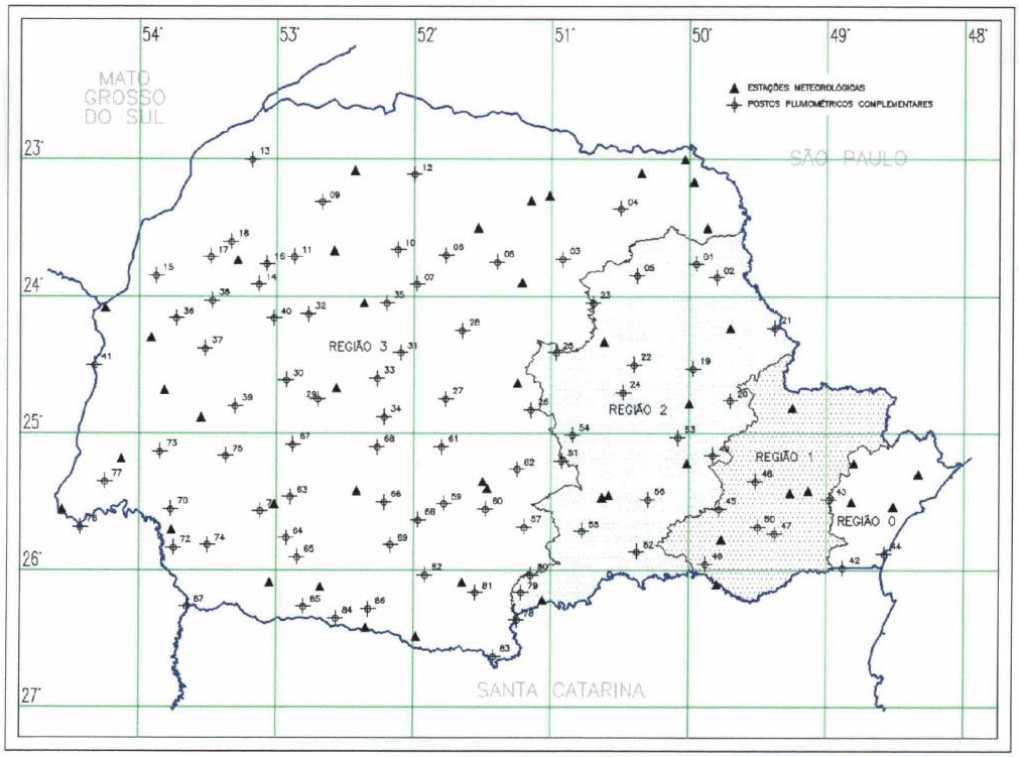
Desse modo, Burger (2014) incorporou 5.000 fatores de frequências sintéticos para cada estação medidora de chuva (ou seja, para cada série histórica associou-se 5.000 séries sintéticas), adotando como representativo o fator de recorrência vinculado ao percentil de 99,9%. A autora verificou que, o K sintético decresce à medida que se aumenta a duração da chuva (1 dia a 10 dias), como foi visto para a Envoltória Regional dos fatores de frequência locais construída para o estado do Paraná (Figura 25). Os resultados encontrados pela autora para os K_S sintético, independente da duração da chuva, foram mais conservadores que os K_S locais/históricos (em torno de 4,2 vezes maior) e inferiores aos K_S obtidos pelo modelo matemático da Equação (24) (este apresentou, em média, 1,11 vezes maior que o anterior). Constatou-se também que, utilizando somente séries temporais entre 30 e 50 anos resultaram em K_S simulados maiores que o K_S locais/históricos cerca de 1,4 vezes maiores, na média.

Isto posto, a simulação sintética dos fatores de frequência se apresenta como uma oportunidade de gerar novas trajetórias de precipitações máximas diferentes daquelas registrada historicamente e sortear, aleatoriamente, o K representativo daquele posto pluviométrico. Essa nova forma de obtenção parece garantir um mínimo de robustez frente a escassez de dados amostrais monitorados, principalmente para postos pluviométricos com reduzidos anos de monitoramento.

Destacando um outro ponto relevante do trabalho de Burger (2014), é apresentado uma comparação com o modelo regionalizado da PMP Hidrometeorológica do estado do Paraná, feita por Carvalho (2000) usando como alicerce os resultados pontuais da PMP Hidrometeorológica obtidos por Sugai (1989). Carvalho (2000) utilizou 45

estações meteorológicas, com alguns dados até dezembro de 1995, para atualizar o trabalho feito por Sugai (1989), e posteriormente, regionalizou PMP de 1 a 4 dias utilizando um modelo de regressão log-linear com parâmetros determinados pelo método dos mínimos quadrados ponderados (WSL). Foram consideradas como variáveis do modelo a média e desvio padrão das chuvas máximas anuais, média das temperaturas máximas diárias e localização da estação meteorológicas em zonas homogêneas do Paraná. A Figura 26 apresenta a localização dos postos pluviométricos e das estações meteorológicas utilizadas no estudo de Carvalho (2000).

Figura 26 - Localização dos postos pluviométricos complementares



Fonte: Carvalho (2000).

Em uma das suas conclusões, Carvalho (2000) verificou que 95% das PMP regionalizadas se afastaram da PMP pontual de Sugai (1989) numa magnitude entre $\pm 19\%$ e $\pm 24\%$, sendo considerada satisfatória, pela autora, para análise de eventos extremos.

Retornando à contribuição de Burger (2014), foram levantadas 13 estações pluviométricas distribuidas no estado parananese. que não foram utlizadas no trabalho de Carvalho (2000), para que fosse possível comparar a qualidade do modelo de

Carvalho (2000) com duas propostas metodológicas de Burger (2014): PMP Estatística com simulação sintética dos K associado ao percentil de 99,9% e a PMP Estatística utlizando a Envoltória Regional dos *K* do Paraná (Figura 25). A Tabela 3 apresenta os resultados da PMP para cada modelo e a Tabela 4 expõe uma comparação entre os métodos.

Tabela 3 – Resultados da PMP nos 3 métodos elencados para as 13 estações pluviométricas (mm)

Estação	Método de Regionalização de Carvalho (2000)				Método de Simulação Sintética de Burger (2014): K com percentil de 99,9%				Envoltória Regional do Paraná de Burger (2014): Figura 25			
	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias
002548043	243	377	442	480	799	947	1427	1349	716	788	919	891
002548049	238	368	434	476	522	742	817	809	687	766	811	797
002549040	203	293	322	331	282	350	397	458	358	450	486	509
002549054	201	291	316	320	244	320	342	375	344	398	432	452
002550035	216	293	348	376	350	475	528	938	437	510	579	640
002450054	203	272	324	352	250	288	329	345	361	414	447	451
002449045	201	264	310	331	668	868	887	919	652	850	900	915
002252022	224	291	322	338	280	520	821	790	423	636	646	639
002353047	269	381	434	460	286	384	407	516	432	498	507	556
002553007	255	376	434	463	270	450	505	618	414	572	624	653
002452041	213	327	385	418	300	277	408	377	388	381	448	464
002651035	253	368	429	467	276	661	828	1079	426	600	724	804
002350032	238	318	359	382	292	454	478	451	429	560	567	560

Fonte: adaptado de Burger (2014).

Tabela 4 – Diferença entre os resultados da PMP envolvendo os modelos considerados por Burger (2014) e Carvalho (2000)

Estação	Diferença entre a Simulação Sintética em relação a Regionalização				Diferença entre a Envoltória Regional em relação a Regionalização				Diferença entre a Envoltória Regional em relação a Simulação Sintética			
	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias	1 dia	2 dias	3 dias	4 dias
002548043	229%	151%	223%	181%	195%	109%	108%	86%	-10%	-17%	-36%	-34%
002548049	120%	102%	88%	70%	189%	108%	87%	67%	32%	3%	-1%	-2%
002549040	38%	19%	23%	38%	76%	53%	51%	54%	27%	29%	22%	11%
002549054	21%	10%	8%	17%	71%	37%	37%	41%	41%	24%	26%	21%
002550035	62%	62%	52%	150%	102%	74%	66%	70%	25%	7%	10%	-32%
002450054	24%	6%	1%	-2%	78%	52%	38%	28%	44%	44%	36%	31%
002449045	232%	228%	186%	177%	224%	222%	190%	176%	-2%	-2%	1%	0%
002252022	25%	79%	155%	134%	89%	119%	101%	89%	51%	22%	-21%	-19%
002353047	6%	1%	-6%	12%	60%	31%	17%	21%	51%	30%	25%	8%
002553007	6%	19%	16%	33%	62%	52%	44%	41%	54%	27%	23%	6%
002452041	41%	-15%	6%	-10%	82%	17%	16%	11%	29%	38%	10%	23%
002651035	9%	80%	93%	131%	69%	63%	69%	72%	54%	-9%	-13%	-26%
002350032	23%	43%	33%	18%	81%	76%	58%	47%	47%	23%	19%	24%

Fonte: adaptado de Burger (2014).

Nota-se que, os resultados obtidos pelo método de simulação sintética foram maiores do que a PMP Hidrometeorológica Regionalizada. Em média, para durações de 1 a 4 dias, as diferenças encontradas foram de 64%, 60%, 68% e 73%, respectivamente.

A Envoltória Regional do Paraná também atingiu valores superiores PMP Hidrometeorológica Regionalizada, com aumento médio de 106%, 78%, 68% e 62% para 1 a 4 dias respectivamente.

No geral, nota-se que a PMP da Envoltória Regional do Paraná elaborada pela Burger (2014) é, em média, mais conservadora do que o método de simulação sintético com percentil de 99,9%.

Em uma de suas conclusões, Burger (2014) recomenda a ampliação desse estudo em outras regiões do Brasil, sendo então uma das motivações da presente pesquisa, que é investigar e estimar os fatores de frequência hidrológicos com mais confiabilidade.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Conforme já apresentado, para a estimativa da PMP, é importante entender e caracterizar a área de estudo do presente trabalho, principalmente com relação às variantes climatológicas, para manipular melhor os dados pluviométricos e meteorológicos. Portanto, na sequência será apresentado, em detalhes, o relevo local, a vegetação, a hidrografia e, principalmente, a climatologia que influencia diretamente nos eventos chuvosos.

Conforme citado no objetivo geral, o foco do presente estudo é, em linhas gerais, estudar o K em uma região de clima tropical/equatorial no Norte do Brasil, com característica úmida e quente, para que seja executado contribuições em uma localidade divergente climatologicamente das que foram abordadas nos trabalhos de Hershfield (1961a, 1961b, 1965).

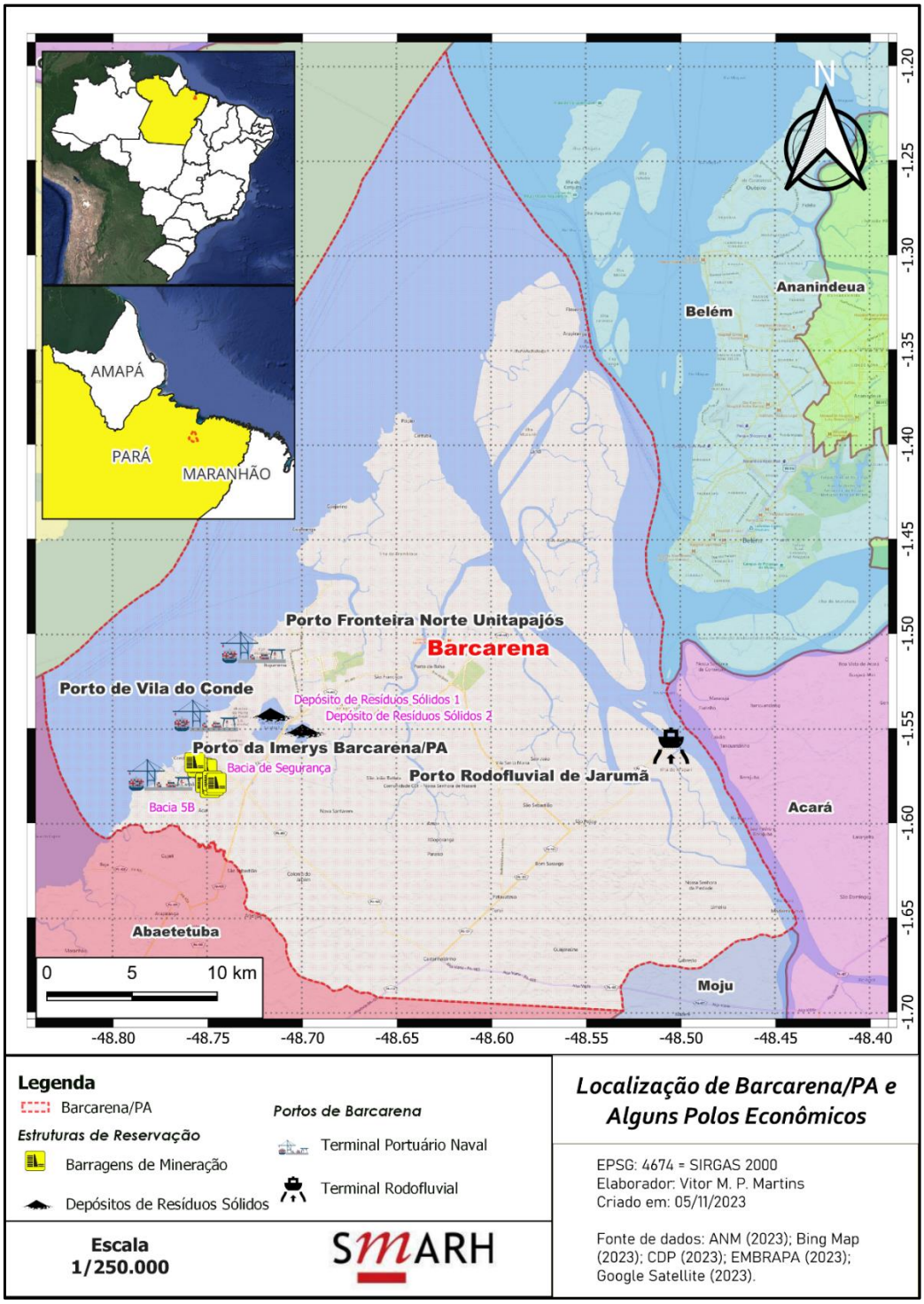
O município de Barcarena/PA é o ponto focal do estudo, pois o seu entorno é demarcado por ser uma região de intensa precipitação no Brasil, importante vetor econômico com as refinarias e seus reservatórios, pontos de mineração e suas barragens, polo marítimo exportador de grãos e eventos extremos de precipitação que merecem a investigação. Além disso, a possibilidade de se aplicar os métodos já consagrados na literatura para estimativa da PMP e contribuir com a simulação sintética dos fatores de frequência em uma região que, historicamente, carece de monitoramento hidrometeorológico, se mostra um desafio que, se vencido, abre-se mais precedentes e condições de investigação em áreas similares. Burger (2014), que trabalhou com simulações sintéticas dos fatores de frequência no Paraná, sugere em suas conclusões que, deve-se ampliar os estudos de PMP em outras regiões do país.

Além disso, é interessante que estudos hidrológicos e ambientais sejam intensificados na Amazônia, importante bioma da América do Sul que influencia na circulação geral da atmosfera, e que carece de compromisso político quanto a sua segurança climática, ecossistêmica e econômica.

4.1 Localização Geográfica do Município de Barcarena/PA

O território municipal de Barcarena fica localizado no estado do Pará, com área de 1.310 km², entre as latitudes -1,20°:-1,70° e longitudes -48,84°:-48,40° (EPSG: SIRGAS 2000), sendo que faz limite com os municípios de Belém (capital do estado), Acará, Moju, Abaetetuba e Ponta de Pedras. Sua estratégica posição geográfica para a foz do Rio Pará (integrante da macrobacia do Rio Tocantins/Araguaia) favoreceu a instalação de indústrias, mineradoras, refinarias, depósitos de grãos e equipamentos portuários para escoamento. A Figura 27 apresenta a localização de Barcarena/PA, além de algumas entidades econômicas e de infraestrutura que participam da economia regional. É importante citar a proximidade desse município com a linha equatorial.

Figura 27 – Localização do município de Barcarena com destaques para alguns polos econômicos



Fonte: conforme indicado.

O estado do Pará e a cidade de Barcarena possuem aptidão para a atividade minerária, possuindo diversos minérios com alto valor agregado. Segundo o Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM) da ANM (2023), existem em Barcarena/PA 10 barragens de mineração de posse *da IMERYS RIO CAPIM*

CAULIM S.A, um grupo comercial que extrai e beneficia o minério caulim (utilizado em tintas, papel cerâmica entre outros). Essa mesma empresa possui um porto privado para exportação do seu produto.

Existe também outro terminal portuário naval privado: o Porto Fronteira Norte Unitapajós. A Unitapajós é uma *joint venture* do grupo agrícola Bunge com o Grupo Amaggi, sendo que ela a utiliza para escoar a sua produção estocada em depósitos e silos dentro e fora dos limites territoriais de Barcarena.

O terceiro e último terminal portuário naval é o Porto de Vila do Conde, administrado pela Companhia do Pará, uma repartição federal que promove a gestão desse equipamento público. Há ainda uma rota de cabotagem entre o Porto Trombetas (PA) e Porto de Vila do Conde. Adjacente a este porto, está implementado um distrito industrial composto pelo Complexo Alumínico, constituído pelas unidades da Alunorte – Alumina do Norte do Brasil S.A., Albrás – Alumínio Brasileiro S.A, Alubar – Alumínios de Barcarena S.A (CDP, 2023 e EMBRAPA, 2023). Segundo a Hydro (2023a e 2023b), a refinaria da Alunorte possui duas estruturas de depósito de resíduos, o Depósito de Resíduos Sólidos 1 e o Depósito de Resíduos Sólidos 2, os quais não configuram como barragens, de acordo com a legislação brasileira.

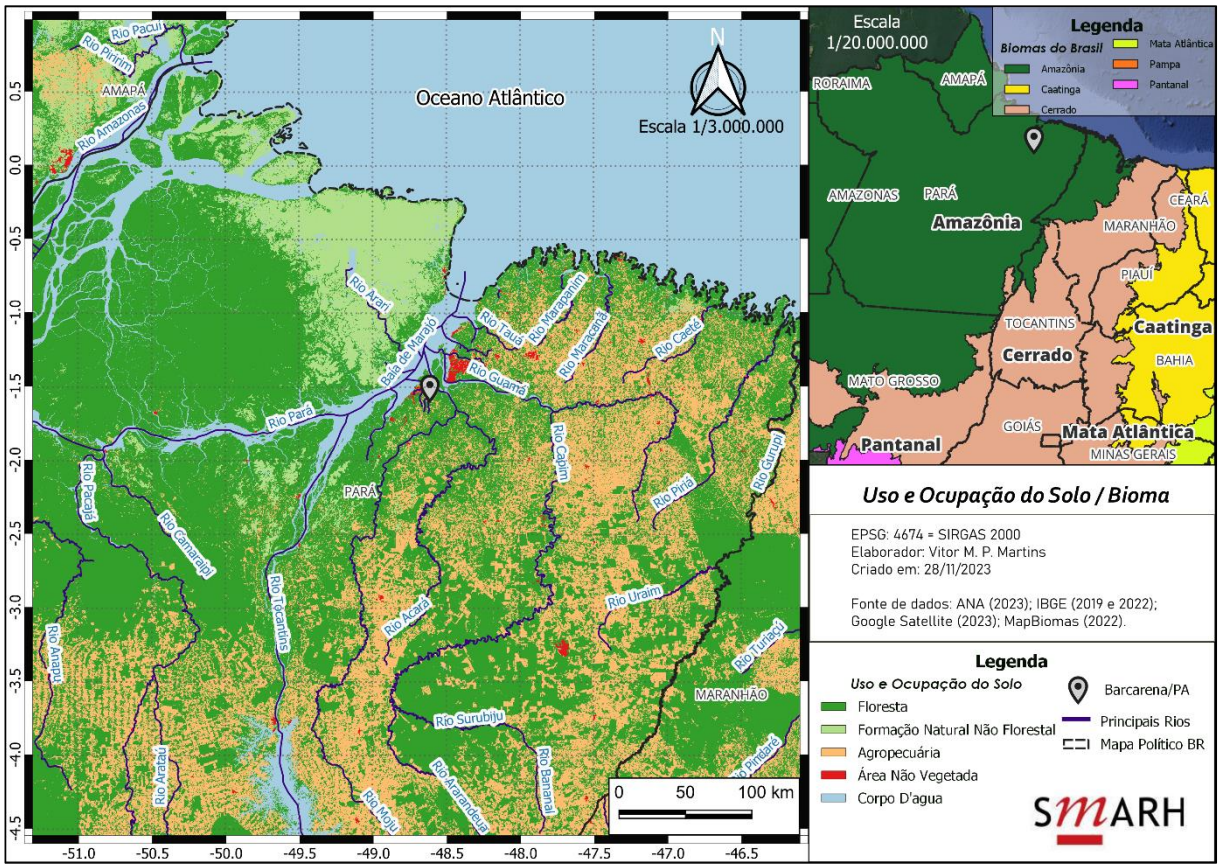
Há também, ao menos, um terminal rodofluvial denominado Porto Rodofluvial de Jarumã, que promove travessias de pedestres e veículos terrestres através de embarcações de transporte fluvial.

4.2 Vegetação

Segundo o IBGE (2019), o bioma amazônico é preponderante no Norte do brasil e, conforme a Figura 28, a região em volta de Barcarena/PA é totalmente dominada por esse bioma. Entrando em detalhes quanto a vegetação, percebe-se uma crescente ocupação agropecuária (pastagem, agricultura e silvicultura) no que antes era considerado florestas nativas (tais como a floresta amazônica e suas regiões alagáveis, manguezais e as formações savânicas em menor grau). Formação Natural não Florestal é também verificado na região, principalmente na Ilha de Marajó, sendo representadas, especificamente, por formações campestres, campos alagados e região pantanosa, apicuns, e alguns afloramentos rochosos. Alguns núcleos de Área

não Vegetada são apresentados no citado mapa, os quais simbolizam áreas mais urbanizadas, pontos de mineração, praias, dunas e areal, entre outros.

Figura 28 – Mapa do uso e ocupação do solo da região de Barcarena/PA, bem como a relação com os biomas



Fonte: conforme indicado.

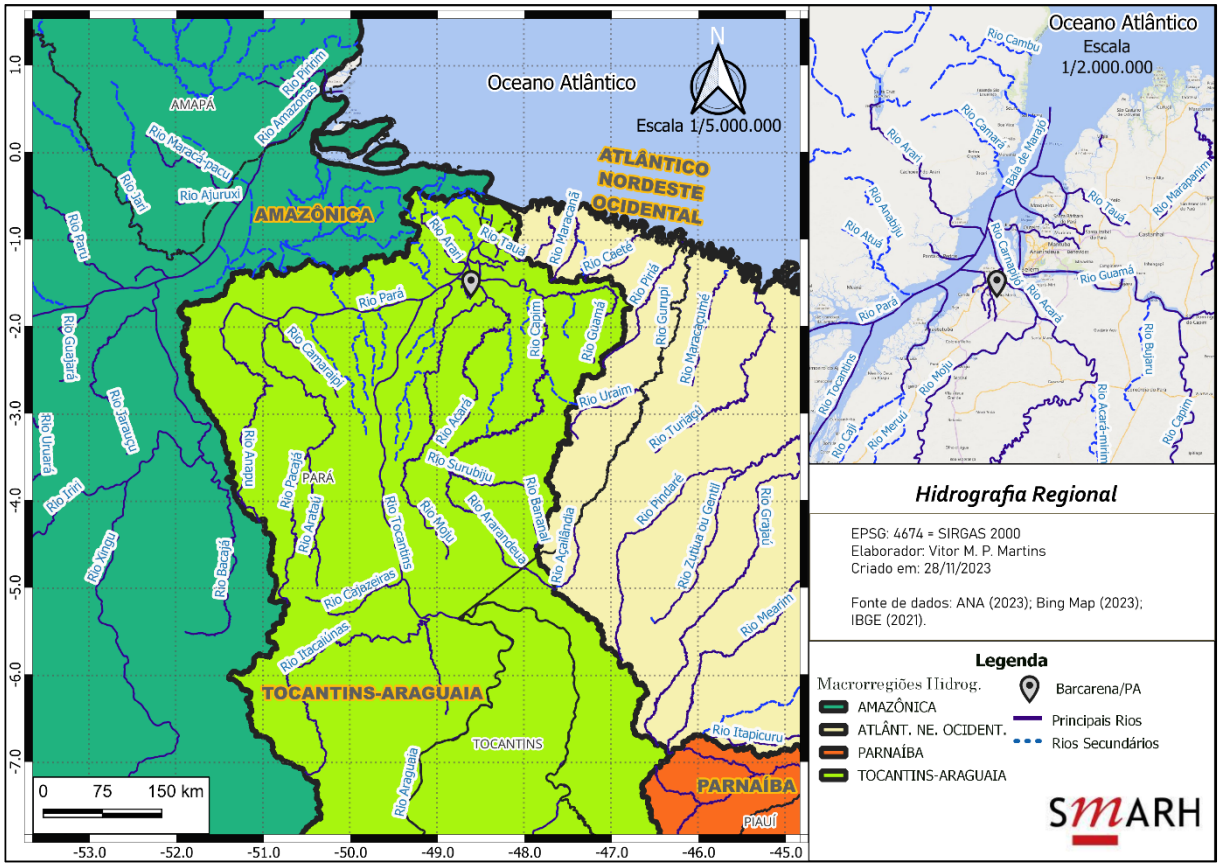
4.3 Hidrografia

Segundo o IBGE (2021), a partir da normativa do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, a resolução nº 32 de 15/10/2003 se estabeleceu 12 Regiões Hidrográficas brasileiras (Macrorregiões Hidrográficas) com similaridades naturais, sociais e economicamente homogêneas. A ANA, em 2006, promoveu um detalhamento maior das Regiões Hidrográficas, com o intuito de delimitar comitês de Bacias Hidrográficas, chamando-as de Unidades Hidrográficas (mesorregiões hidrográficas) e quantificando-as em 56 unidades. Estas, por sua vez, foram fracionadas em 456 Unidades de Planejamento Hídrico (UPHs) ou Microrregiões Hidrográficas.

A região de Barcarena está dentro da Macrorregião Hidrográfica do *Tocantins-Araguaia,* mais precisamente na Mesorregião Hidrográfica do *Baixo Tocantins,* onde o Rio Araguaia despeja no Rio Tocantins, e este corre para o Rio Pará que desagua na Baía de Marajó para se encontrar com o Oceano Atlântico. Barcarena/PA se encontra inserida na Microrregiões Hidrográfica do Acará/Guamá. Destaca-se a existência da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, com o seu reservatório iniciando logo na contribuição do Rio Cajazeiras para o Rio Tocantins.

No lado oeste se encontra a grande Região Hidrográfica *Amazônica*, especificamente a *Foz do Amazonas* próxima a Ilha de Marajó. Rios como o Xingu, Jari, Paru e Jari aparecem como afluentes do Rio Amazonas. Na face leste, a Região Hidrográfica do *Atlântico Nordeste Ocidental* se apresenta com as Mesorregiões Hidrográficas do Rio *Gurupi, Mearim e Itapecuru.* A Figura 29 apresenta a hidrografia regional e as bacias hidrográficas citadas.

Figura 29 – Mapa da hidrografia regional de Barcarena/PA e redondezas



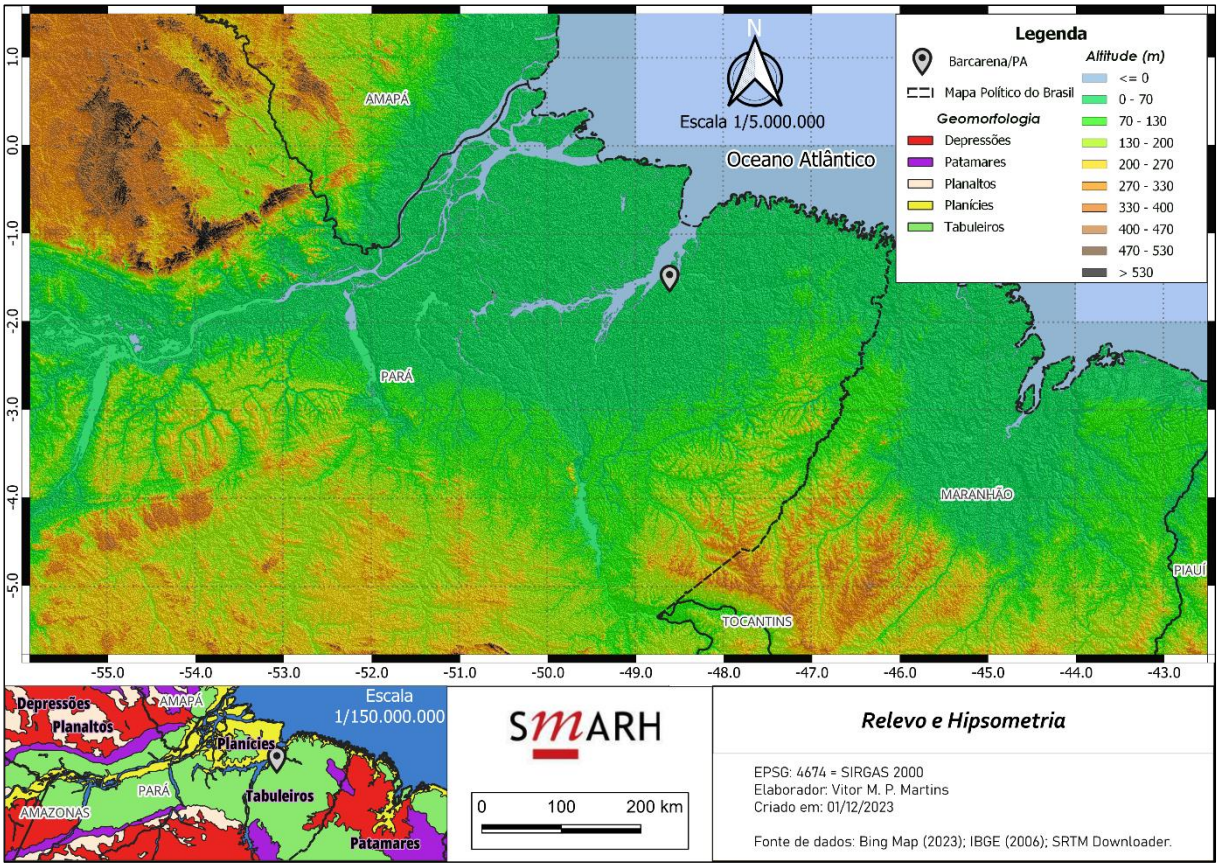
Fonte: conforme indicado.

4.4 Relevo e Hipsometria

A Figura 30 apresenta a variação hipsométrica da região em torno da área de estudo, bem como os tipos de relevo, segundo classificação do IBGE (2006). Exatamente onde está localizado Barcarena/PA, são verificados, majoritariamente, *Tabuleiros Costeiros* e, em pequena porção, *Planícies Fluviomarinhas*. Em um segundo nível, a mais de 200 km do ponto focal do presente estudo, são classificadas também áreas de *Planaltos*, *Patamares* e *Depressões*.

Percebe-se uma região bem planificada nas circunvizinhanças de Barcarena/PA, que não passam, em sua maioria, da elevação altimétrica 70 m. Os pontos mais altos do mapa hipsométrico são vistos no sentido noroeste e sudoeste do Pará, oeste do Amapá e sudoeste do Maranhão. Toda a região costeira é plana, com largas áreas de foz da Baia de Marajó e do Rio Amazonas.

Figura 30 – Mapa hipsométrico e relevo da região que abrange Barcarena/PA



Fonte: conforme indicado.

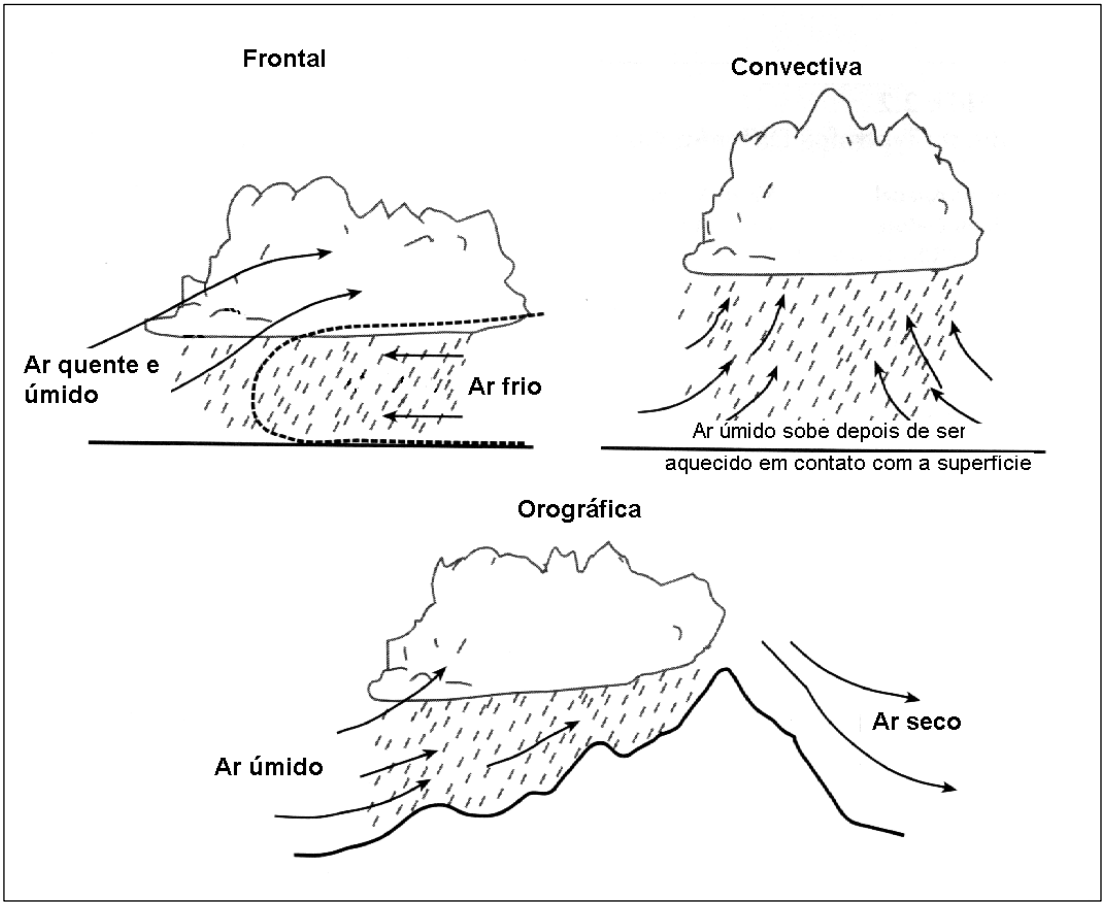
4.5 Climatologia

Na sequência do presente subtópico, será apresentado uma breve contextualização da formação das chuvas, células de circulação geral da atmosfera, mecanismos climáticos regionais, massas de ar brasileiras, classificação climatológica e outros fatores importantes que interferem nas condições hidrológicas do município de Barcarena/PA.

4.5.1 Formação das chuvas

Em geral, a formação da chuva está associada à movimentação ascendente de massas de ar úmidas. A forma como a massa de ar ascende à atmosfera determina os principais tipos de chuva (Figura 31), sejam elas frontais, convectivas ou orográficas (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Figura 31 - Tipos de formação de chuvas



Fonte: Collischonn e Tassi (2010).

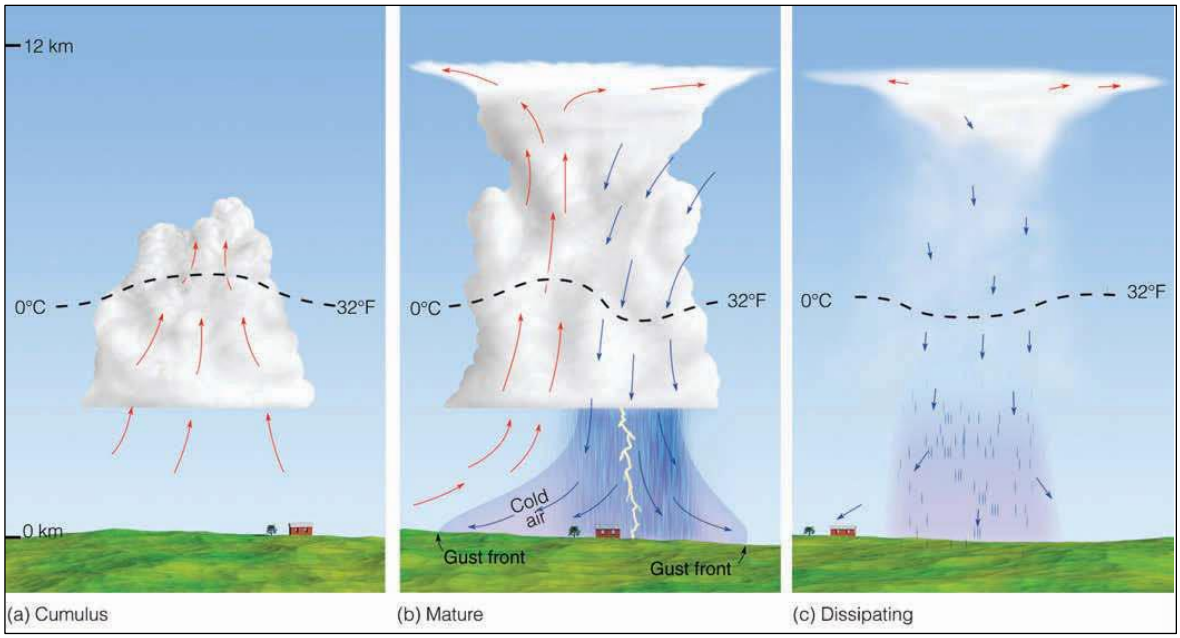
As chuvas ciclônicas ou frontais acontecem quando há o encontro entre duas massas de ar, que apresentam diferentes umidades e temperaturas. O ar mais quente, geralmente menos denso e mais úmido, é empurrado para cima por intermédio da massa de ar frio, normalmente mais densa. A umidade da massa de ar quente sofre condensação à medida

que ascende na atmosfera, ocorrendo precipitação. Esse tipo de chuva, usualmente, cobre centenas de quilômetros de extensão, movimentam-se lentamente (duração de chuvas longas) e tem uma intensidade baixa. Corriqueiramente, ocorre mais sobre o Sul do Brasil e, em segunda instância, nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e, por vezes, Nordeste (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Já as chuvas convectivas são bem marcantes das regiões tropicais, e nada mais são do que ascensões de massas de ar aquecidas pelas superfícies quentes dos oceanos e continentes, ocorrendo em pequenas áreas, caracterizadas pela alta intensidade pluviométrica e curta duração. Problemas de inundações em áreas urbanas são, muitas vezes, originadas de chuvas convectivas (COLLISCHONN e TASSI, 2010).

A movimentação convectiva se materializa na formação de nuvens com aparência de torre e expansão lateral no topo tipo bigorna, comumente chamada de *Cumulonimbus*. A gênese da célula convectiva é iniciada no estágio inicial chamado de *cumulus*, onde a presença de um ar quente, úmido e instável ascende verticalmente durante todo o dia e atinge seu pico no período da tarde. Sendo denominada posteriormente como *Cumulonimbus*, essa nuvem tem uma vida útil aproximada de 30 minutos e, após esse período, há o início da condensação e formação da precipitação líquida (AHRENS, 2008). A Figura 32 ilustra o exposto.

Figura 32 - Ciclo de vida simplificada de uma célula convectiva, com formação (cumulus), maturação e dissipação. Detalhe para massas de ar quente e úmido (setas em vermelho) ascendendo e ar frio e seco descendo (setas em azul)



Fonte: Ahrens (2008).

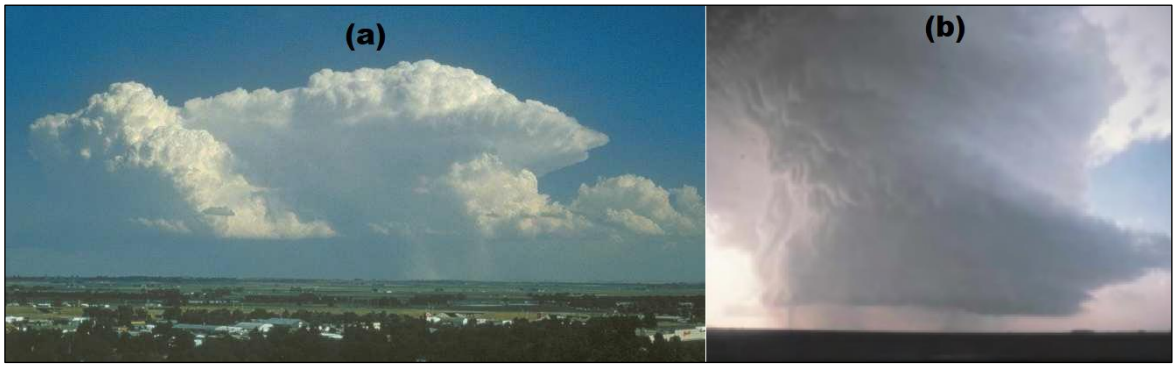
Na Figura 33 é apresentada uma foto da nuvem *Cumulonimbus*, onde fortes ventos sopram da direita para a esquerda e formam um efeito bigorna no topo. Sob a nuvem há formação de precipitação líquida bem definida. Na Figura 34 são ilustradas composições de nuvens *Cumulonimbus* que formam multicélulas, ou, a depender do tamanho, supercélulas. Esses aglomerados de células convectivas podem ter seus topos chegando a 18 km de altura acima da superfície e um comprimento de base podendo exceder 40 km (AHRENS, 2018).

Figura 33 – Registro de uma Cumulonimbus sobre um corpo hídrico



Fonte: Ahrens (2007).

Figura 34 - Registros de uma multicélula convectiva (a) e uma supercélula convectiva (b).

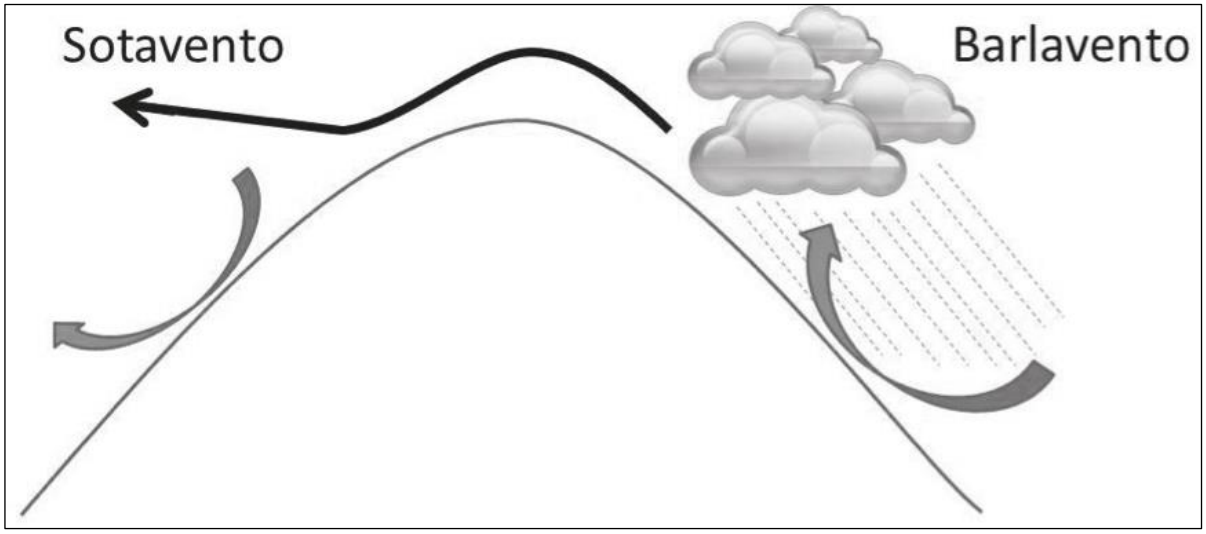


Fonte: Ahrens (2007).

Finalmente, as chuvas orográficas decorrem de locais onde há um grande obstáculo físico representado por uma porção de relevo mais acentuada em relação à média da região. Cordilheiras ou serras altas impedem a passagem de ventos quentes e úmidos, forçando a massa de ar a subir mais alto na atmosfera. Neste exato momento, a umidade do ar se condensa, formando nuvens próximas ao pico da serra, onde chove com certa regularidade. Portanto, a vertente de barlavento recebe mais precipitação do que a face de sotavento,

conforme mostrado na Figura 35 (Zanatta *et al.*, 2016). A Serra do Mar, posicionada entre o litoral norte do Rio Grande do Sul até o sul do Espírito Santo, promove um empecilho orográfico importante (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Figura 35 – Funcionamento da chuva orográfica



Fonte: Zanatta *et al.* (2016).

O município de Barcarena/PA e cidades circunvizinhas não apresentam barreiras orográficas (como demonstrado no item 4.4), portanto, é pouco provável que a região sofra com chuvas orográficas, pelo contrário, tenderá a formar chuvas de origem frontal e, principalmente, precipitações a partir de células convectivas, motivada pela sua posição geográfica no globo no contexto da circulação geral da atmosfera, além de outros fatores como a intensa incidência solar, proximidade com grandes corpos hídricos, entre outros (mais detalhes na sequência).

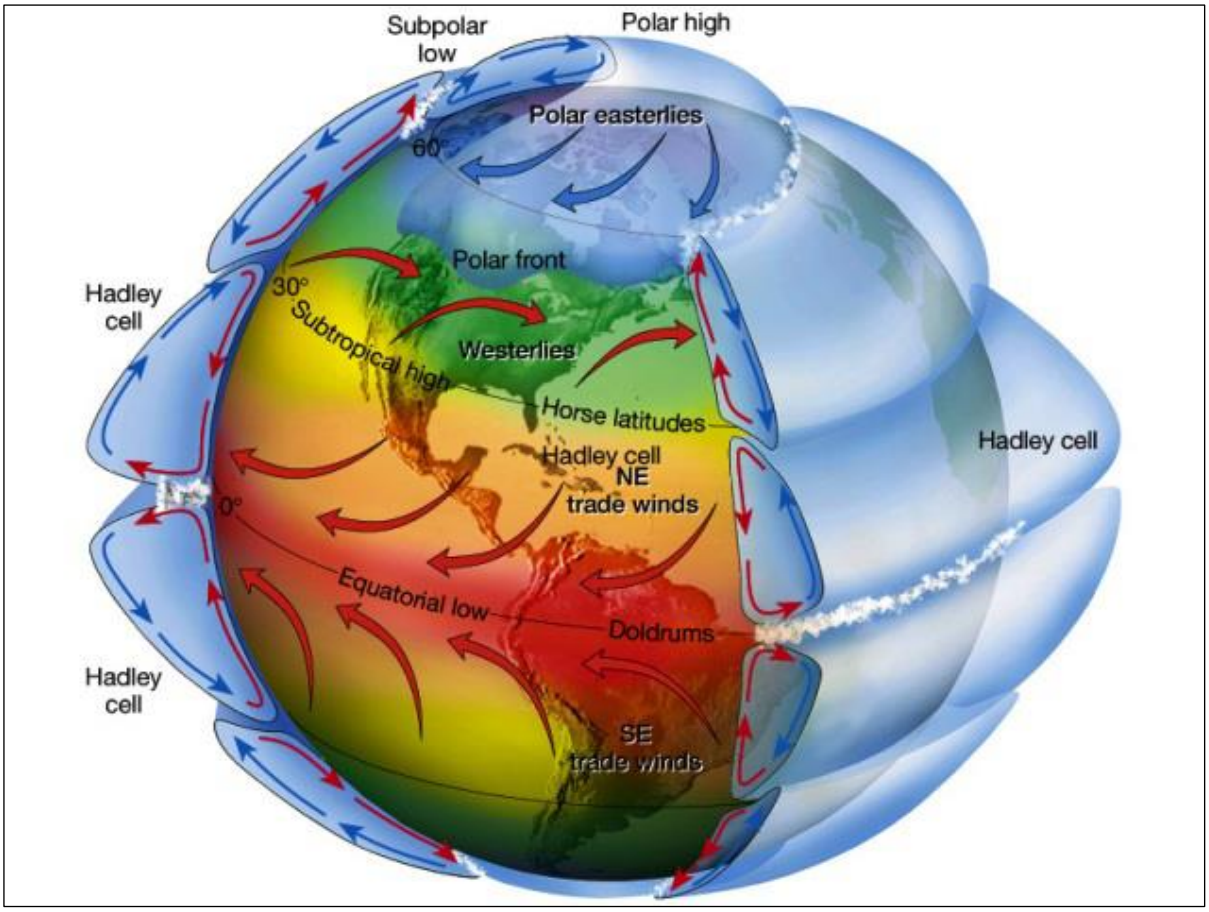
4.5.2 Circulação Geral da Atmosfera

Alguns modelos tentam descrever a dinâmica da circulação geral da atmosfera. Um dos paradigmas mais conhecidos são as Células de Hadley e Walker. As Células de Hadley atuam no sentido meridional (em resumo, existe ramos ascendentes sobre os trópicos e ramos descendentes nas latitudes subtropicais). Já as Células de Walker atuam no sentido zonal (onde, por exemplo sobre o oceano Pacífico, opera o ramo ascendente na porção oeste, e ramo descendente na porção leste). Assim, a circulação é dita de Hadley quando ocorre no sentido norte-sul e, de Walker, quando se faz no sentido leste-oeste (FERREIRA e MELLO, 2005).

A atuação destas células está diretamente relacionada às variações térmicas dos oceanos e aos eventos *El Niño* e *La Niña*. Dessa forma, tais alterações são responsáveis pelo deslocamento das posições destas células e, consequentemente, tem-se que as intensidades pluviométricas, bem como a duração do período chuvoso da região associada a estas células, podem ser afetadas.

Nota-se, na Figura 36, a ação dos ventos alísios incidindo na linha equatorial de forma angulada (aproximadamente 30°) e fomentando a circulação das células de Hadley. Porções de umidade são movimentadas pelos ventos alísios de uma região a outra no globo e a sua evaporação e ascensão na atmosfera é auxiliada, na região equatorial, pela intensa incidência solar.

Figura 36 – Circulação da Célula de Hadley

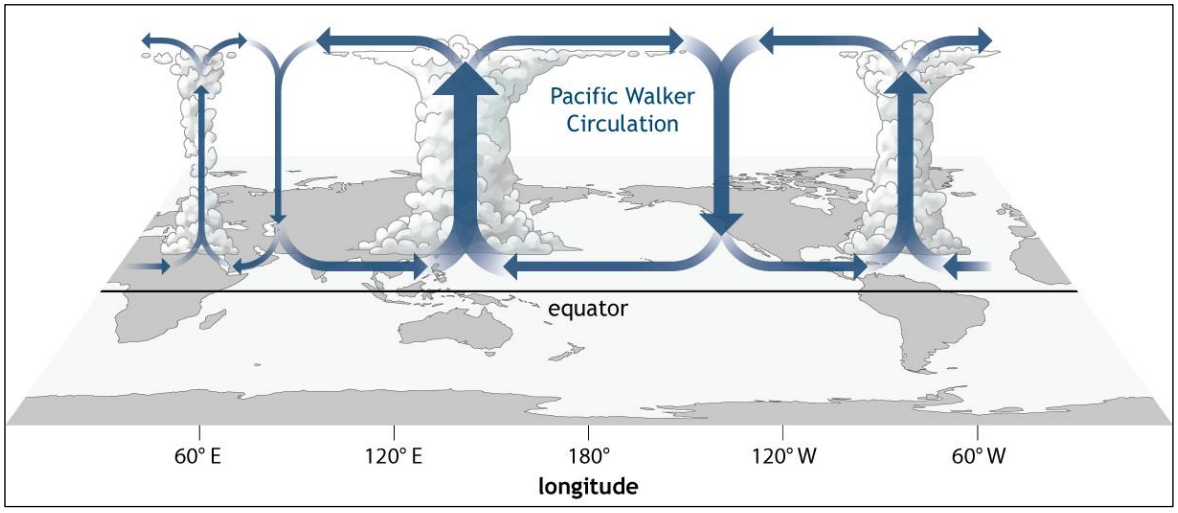


Fonte: Master/USP (2010).

Avaliando a Figura 37, a qual compreende a dinâmica das Células de Walker, verifica-se uma grande região de ascensão de massa úmida sobre o norte do continente sul-americano, Leste da América Central e costa leste da América do Norte que

fundamentam a origem de tormentas tropicais. Outra região com grande ascensão de umidade está sobre o Sul e Sudeste Asiático, as quais sofrem com monções em determinadas épocas do ano. Uma zona de ascensão, de intensidade bem menor, é formada na porção central e nordeste do continente africano.

Figura 37 – Circulação da Célula de Walker



Fonte: adaptado de Liberto (2014).

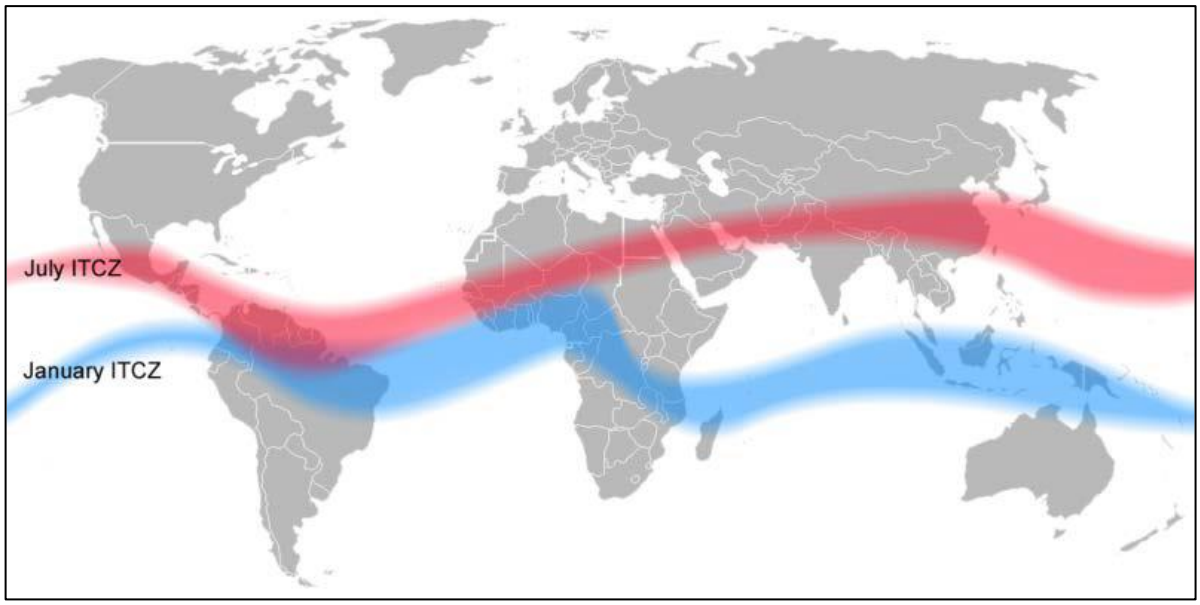
Salientando outro aspecto interessante da circulação geral da atmosfera, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a qual está localizada no ramo ascendente da célula de Hadley, é um dos mais importantes sistemas meteorológicos atuante nos trópicos. Tal sistema é o causador da sazonalidade da precipitação em Belém e região, pois coincide com o período chuvoso que acontece no decorrer da marcha da ZCIT em direção ao hemisfério Sul (CAMPOS *et al.*, 2015). A ZCIT apresenta uma estrutura que consiste em um conjunto de características, tais como: zona de confluência dos ventos alísios de sudeste e nordeste, região do cavado equatorial, zona de máxima temperatura da superfície do mar e banda de cobertura de nuvens convectivas (COELHO *et al.*, 2004).

A ZCIT atua no sentido de transferir calor e umidade dos níveis inferiores da atmosfera das regiões tropicais para os níveis superiores da troposfera, bem como para médias e altas latitudes também. De modo geral, a ZCIT, dinamicamente, é uma região de baixa pressão, tendo convergência de escoamento em baixos níveis e divergência em altos níveis. Sendo assim, tal sistema é a fonte principal de precipitação nos trópicos (chuvas fortes), responsável por condições de mau tempo sobre uma extensa área e

o desenvolvimento vertical das nuvens que se estende até a alta troposfera das regiões tropicais (MASTER/USP, 2010).

Conforme MASTER/USP (2010), a ZCIT apresenta uma influência favorável a nebulosidade e, por consequência, formação de precipitação, abaixo da linha do equador, nos meses de janeiro a junho (chegando a 5° e 6° Sul), e de julho a dezembro, acima da linha do equador (chegado até a 14° N). A Figura 38 apresenta a marcha da ZCIT no globo.

Figura 38 – Faixa de ação da ZCIT variando entre o hemisfério Norte e Sul



Fonte: MASTER/USP (2010).

Há ainda fenômenos externos que se conectam com a ZCIT como o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que compreende um sistema de alta pressão semipermanente que transita sobre o Atlântico tropical sul, com eixo alinhado a latitude 30º S. A ASAS é formada no ramo subsidente da célula de Hadley, estando mais ao leste nos meses de outubro a abril e oeste entre maio e setembro. A relação entre a ASAS e ZCIT é que, a partir do primeiro, partem os ventos alísios para o segundo, que está aproximadamente sobre a linha do equador. O sistema Alta da Bolívia (AB) é compreendido como um anticiclone posicionado em altos níveis atmosféricos e é formado durante a primavera e verão, sendo caracterizado como uma região de alta pressão formada pelo ar que é forçado a descer, com características de uma massa quente e seca que impede a formação de nuvens e

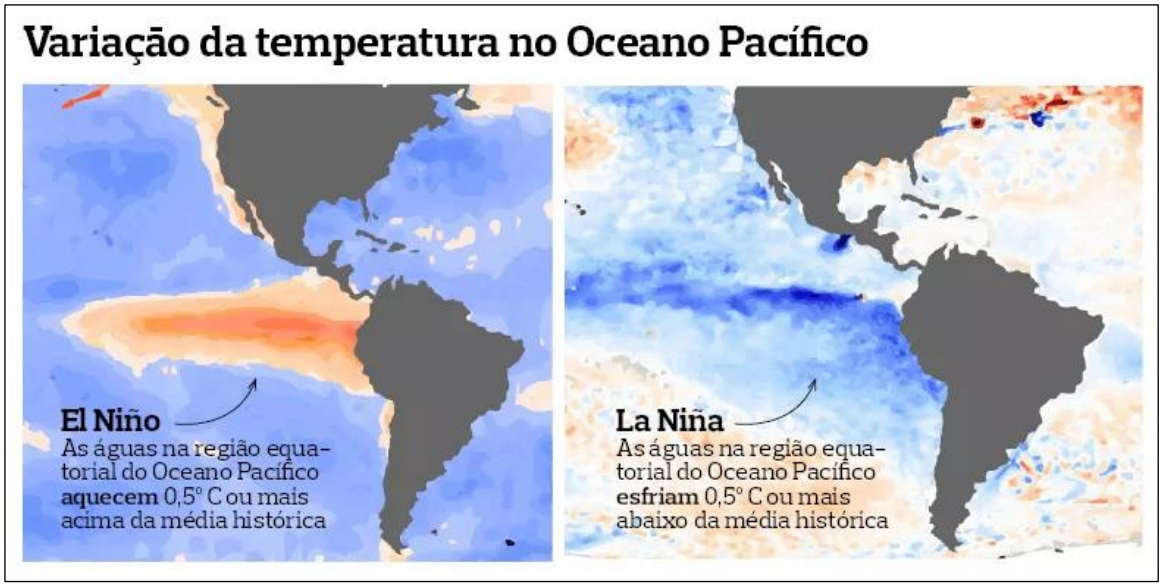
precipitação. Ele interage com a célula de Hadley e, consequentemente, a ZCIT, agindo sobre o nordeste brasileiro.

Portanto, Barcarena/PA é favorecia com precipitações durante o ano todo, dado que zonas de ascensão de umidade estão posicionados no Norte do Brasil e da América do Sul, conforme mostrado nas Células de Circulação Hadley-Walker. Os primeiros meses do ano civil parecem receber mais precipitações sobre a área de estudo, dado que há uma atuação mais intensa da ZCIT abaixo da linha do equador.

4.5.3 El Niño e La Niña

Abordando outro fenômeno climatológico também importante, O *El Niño* e *La Niña* (tecnicamente chamados de ENOS ou ENSO) podem ser caracterizados por serem fenômenos que ocorrem no oceano Pacífico Equatorial (e na atmosfera adjacente), sendo que o primeiro se refere ao maior aquecimento do oceano Pacífico Equatorial e, o segundo, às condições em que o oceano está mais frio do que a média histórica (ver Figura 38). Assim, a alteração da temperatura do oceano Pacífico Equatorial acarreta efeitos globais na temperatura e precipitação. Ou seja, onde a superfície está mais aquecida que o normal, há a ascensão de massas de ar e, por consequência, aumento das precipitações. Agora em regiões menos aquecidas que o normal haverá descendência das massas de ar e declínio das quantidades pluviométricas médias (INPE, 2023).

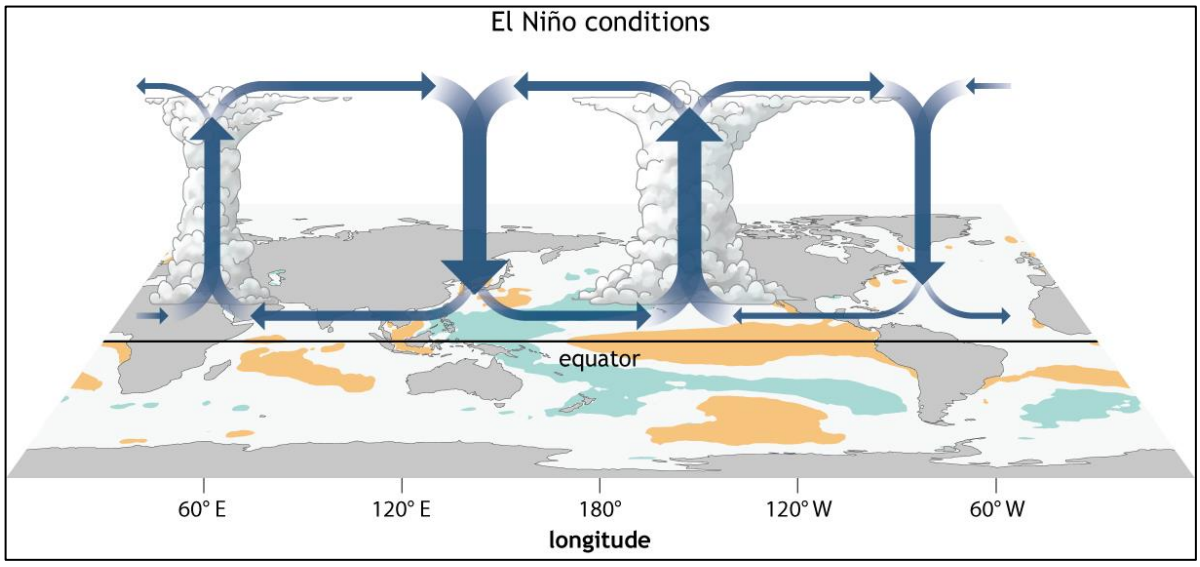
Figura 39 – Oceano Pacífico Oriental e a sua variação da temperatura em função do ENOS



Fonte: Neto e Galera (2018).

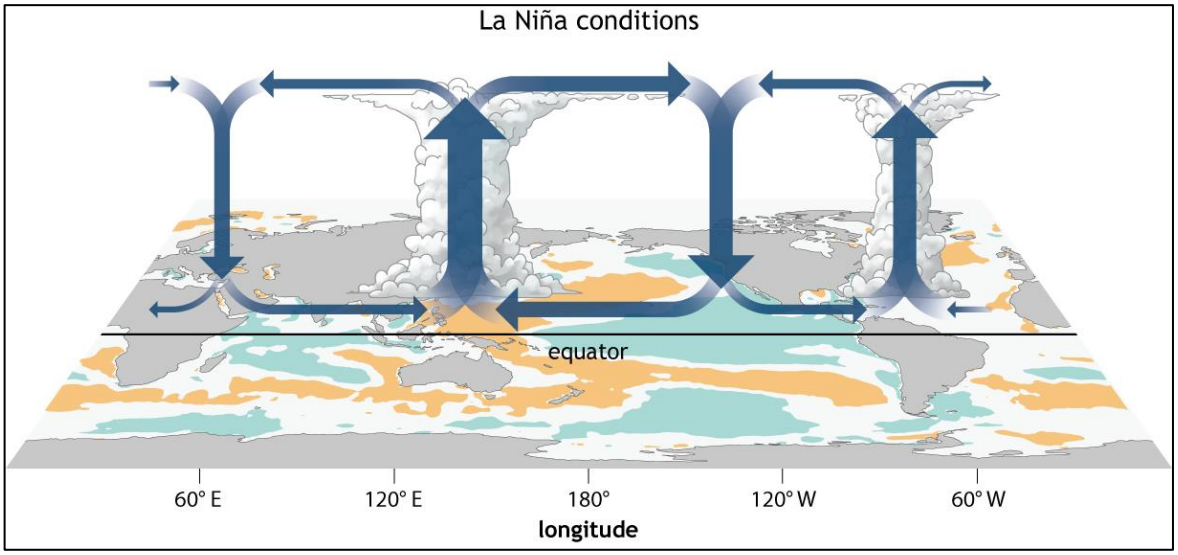
O fenômeno do *El Niño*, em linhas gerais, é o enfraquecimento dos ventos alísios que incidem aproximadamente a 30º em direção a linha do equador. Esse enfraquecimento desfavorece a ressurgência da corrente marítima de Humboldt (fria) na costa oeste da América do Sul, ou seja, a massa de água quente próxima ao Chile e Equador não se desloca para a Oceania e fica estacionada nessa região, impedindo o afloramento da massa de água fria. Logo, todo o sistema climático, que normalmente mantém um padrão de circulação global “normalizado” (Figura 37), se desorganiza em novas Células de Walker, conforme a Figura 40. O *La Niña* é o inverso, ou seja, o aumento da intensidade dos ventos alísios modifica novamente os fenômenos climáticos no globo terrestre, conforme mostra a Figura 41. Neste sistema, as águas no Pacífico Ocidental (próximo a Austrália e Indonésia) estão ainda mais quentes que o normal e as águas no Pacífico Oriental (próximo a costa Oeste da América do Sul) estão ainda mais frias, ou seja, de modo geral, há uma diminuição ainda maior dos índices pluviométricos da costa oeste do Chile e Peru (nota-se a existência do Deserto do Atacama) e uma intensificação no regime chuvoso do leste da América do Sul e enchentes na costa australiana (LIBERTO, 2014).

Figura 40 - Condições de circulação em anos de El Niño



Fonte: Liberto (2014).

Figura 41 - Condições de circulação em anos de La Niña



Fonte: Liberto (2014).

De maneira geral, tais fenômenos não apresentam uma periodicidade definida, sendo ainda um desafio para os pesquisadores a determinação da tais acontecimentos. Todavia, é sabido que estes eventos influenciam nas séries históricas de precipitação em diversas regiões, sendo que no Norte do Brasil (e circunvizinhanças de Barcarena/PA) impacta da seguinte forma: em anos de *El Niño*, há a redução nos totais pluviométricos em meses considerados mais chuvosos; paralelamente, em anos de *La Niña*, ocorrem elevações nos índices pluviométricos.

De forma complementar, no sul e sudeste do Brasil, o *El Niño* promove aumento das temperaturas médias no sul e sudeste do Brasil e chuvas mais intensas no sul do Brasil, já em anos de *La Niña*, geralmente, há uma leve redução nos totais pluviométricos e, por vezes, uma diminuição da temperatura no sul e sudeste do Brasil devido ao avanço da massa de ar polar. No Nordeste Brasileiro, o *El Niño* promove regiões de subsidências, que enfraquecem a ZCIT e a faz ser deslocada mais para o Norte, diminuindo os quantis pluviométricos. Em contrapartida, em anos de *La Niña, A* ZCIT pode se desenvolver próxima ao nordeste e contribuir para a precipitação intensa (CAVALCANTI, 2012).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) atualiza os anos de ocorrência do *El Niño* e *La Niña,* sendo que está registrado em INPE (2023) que entre agosto e julho dos anos 2006-2007, 2009-2010, 2015-2016 aconteceu o fenômeno *El Niño,* bem como entre 2007-2008, 2010-2011 e 2017-2018 aconteceu o fenômeno *La Niña*. Esses fatos são relevantes para entender a dinâmica climatológica do Norte do País e caracterizar eventos de extremos de precipitações e secas. A plataforma do INPE (http://enos.cptec.inpe.br/) apresenta o histórico completo dos anos de *El Niño* e *La Niña.*

Dissertando mais acerca das anomalias nas temperaturas dos oceanos, com base nos trabalhos de Mantua e Hare (2002), Cavalcanti (2012) e Ding *et al.* (2023), inicialmente destaca-se a Oscilação Decadal do Atlântico (ODA) Norte. Esse processo é caracterizado por anomalias positivas das temperaturas da superfície da bacia do Oceano Atlântico Norte (todavia em alguns poucos casos há oscilações negativas). A ODA interage também com o Dipolo do Atlântico (DA), que é caracterizado pela diferença das anomalias de temperatura da superfície da bacia do oceano Atlântico Norte e a bacia oceano Atlântico Sul, onde este tem sua fase positiva associada às chuvas acima da média no Norte e Nordeste do Brasil e a sua fase negativa provocando chuvas abaixo da média nestas mesmas regiões.

Já a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) é definida como um fenômeno que provoca anomalias negativas na superfície do Pacífico Norte Central e positivas no Pacífico Equatorial e costa oeste das Américas. Caso haja troca de fase, os fenômenos têm o seu padrão invertido nas regiões citadas. A ODP influencia bastante o El Niño e La

Niña, visto que atua modificando as temperaturas das águas do Oceano Pacífico e litoral oeste da América.

Dessa maneira, a ocorrência do *El Niño* e *La Niña* é um componente fundamental ao se analisar os valores extremos, superiores e inferiores, na área em estudo. Portanto, ao verificar valores destoantes das médias das normais pluviométricas e climatológicas, se faz importante estudar os processos atmosféricos relacionados.

4.5.4 Sistemas Atmosféricos na América do Sul e no Brasil

Segundo Nimer (1989), são variados os fatores estáticos e dinâmicos que incidem no comportamento climatológico de uma região, tal como a distância até o oceano, distância até corpos hídricos de grandes dimensões, a posição latitudinal, topografia e a dinâmica dos fenômenos de circulação global. O Brasil é demarcado pela existência de diversos tipos de climas e comportamentos singulares, devido à sua vasta escala continental e elevado grau de variabilidade de características morfoclimáticas, vegetação e relevo ao longo do território nacional.

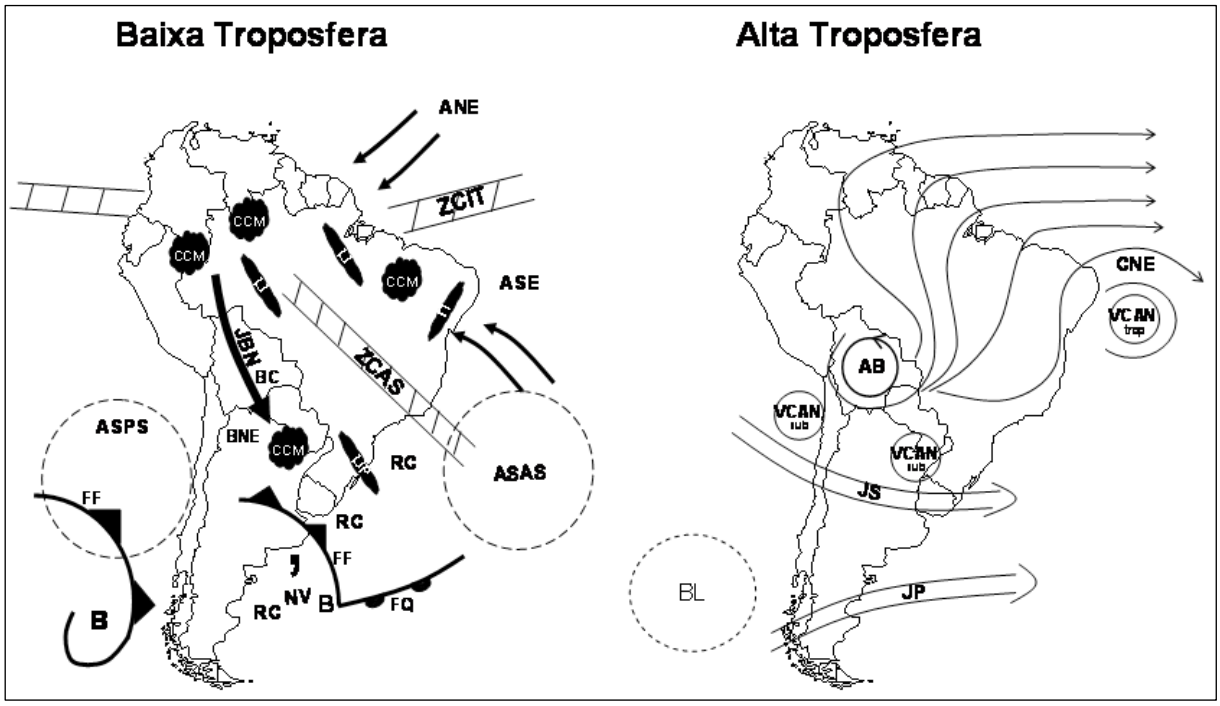
O Brasil está inserido no continente sul-americano, onde atuam diversos sistemas atmosféricos. Massas de ar equatoriais, tropicais, polares dentre outros efeitos sazonais incidem sobre o Brasil, demarcando estações climáticas notáveis (VECCHIA *et al*., 2020).

Uma síntese dos diversos sistemas que atuam na América do Sul fora apresentada por Reboita *et al.* (2010) e Vecchia *et al.* (2020), com base na Figura 42. Destacam-se, na baixa troposfera, os fenômenos de ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) que traz umidade da região amazônica para o Sudeste brasileiro, Ventos Alísios do Sudeste e Nordeste (ASE e ANE) que empurram as massas de ar, Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que promovem tempestades no litoral do Brasil, Linhas de Instabilidades (LI) importantes para formação das precipitações, além das Frentes Frias e Quentes (FF e FQ) que envolve as ações de convecção, orográficas e choque de massas de massas de ar. Também são citados os fenômenos de Baixa Pressão (B), Baixa do Chacho (BC), região de Baixas Térmicas no Noroeste Argentino (BNE), Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM), Jato de Baixos Níveis a leste

dos Andes (JBN), Linhas de Instabilidade Pré-frontal (LIP), Nuvem Vírgula (NV) e Regiões Ciclogenéticas (RC).

Já à alta troposfera sobressaem o Alta da Bolívia (AB) que atua no verão provocando maiores índices pluviométricos no Centro-Oeste do Brasil e regiões vizinhas, o Jato Subtropical (JS) bem como o Jato Polar (JP) que sopram do Oeste para o Leste e têm poder de empurrar massas de ar, afetando a circulação global e influenciando até rotas de aviação (ZANATTA *et al*., 2016). Outros fenômenos são o Cavado do Nordeste do Brasil (CNE), Bloqueios Atmosféricos (BL) e Subvórtices Ciclônicos de Altos Níveis Subtropicais e Tropicais (VCAN).

Figura 42 - Representação esquemática dos sistemas atmosféricos atuantes na América do Sul, subdivididos em fenômenos meteorológicos de Baixa Troposfera e Alta Troposfera



Fonte: Reboita *et al*. (2010).

A ZCAS, que influenciam nos diversos eventos pluviométricos no Sudeste do Brasil, traz umidade da região amazônica, oriunda da alta umidade intrínseca a esse bioma, caracterizando esse fenômeno também como “rios voadores”. Esse sistema pode ser descrito também pela circulação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que induz a convergência do escoamento de noroeste do jato de baixos níveis com o escoamento de nordeste e ainda com os ventos alísios de nordeste, criando uma banda de nebulosidade (REIBOTA *et al.,* 2010).

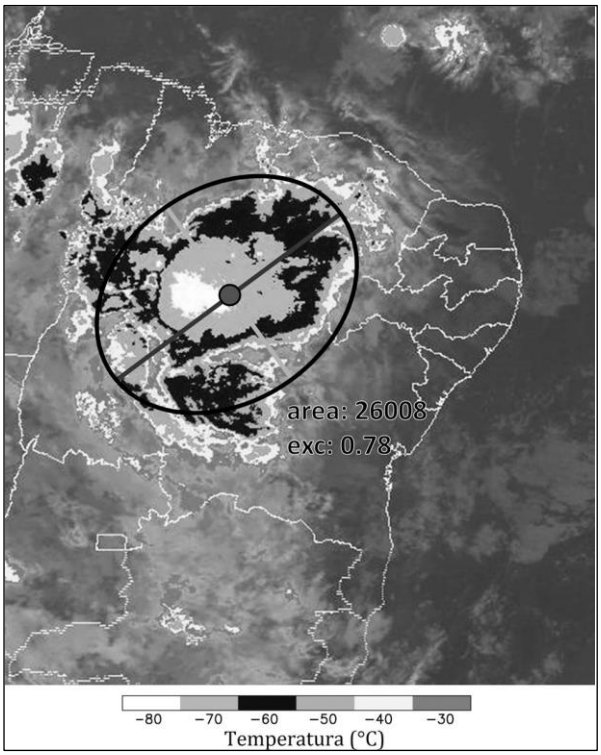
O jato de baixos níveis são, basicamente, escoamentos intensos na baixa troposfera com velocidade máxima ocorrendo entre 1 e 2 km de altura, ocupando uma região estreita horizontalmente. Quando o jato de baixos níveis atuam ao leste dos Andes (JBN), esses se caracterizam por um escoamento meridional partindo da Amazônia para os subtópicos da América do Sul (SANTOS e REIBOTA, 2018).

Os ventos alísios, que também contribuem para a formação úmida da ZCAS, são ventos constantes provenientes de áreas de alta pressão, em regiões subtropicais, que são dispersoras de ventos, e vão em direção a área equatorial, que é uma zona de baixa pressão (ZANATTA *et al.,* 2016). No caso dos alísios de nordeste, eles vão do hemisfério norte para a zona equatorial, onde convergem com os outros escoamentos.

Segundo Reboita *et al.* (2010), os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM_s) se destacam atuando também no Norte e Nordeste do Brasil, e nada mais são do que conjuntos de nuvens do tipo *Cumulonimbus,* cercada por uma densa camada de *Cirrus*, que causam intensas precipitações. Esses sistemas se apresentam em formato circular e com crescimento rápido médio entre 6 e 12 horas (SILVA DIAS, 1987 apud REBOITA *et al.,* 2010; MADDOX, 1980). Salio *et al.* (2007) informam que CCM_s tropicais possuem uma vida útil menor que 9 horas, tamanho, em sua maioria, menor do que 150.000 km² e atuam, principalmente, no verão e outono. Já Machado *et al.* (1994) pesquisaram acerca dos ciclos de sistemas convectivos na América do Sul e atestaram CCM_s com raios de 240 km e tempo de vida médio de 15 horas para latitudes médias no verão.

Lyra *et al.* (2020) também destacam uma conformação circular (Figura 43) das CCM_s investigadas nos 65 casos analisados no Nordeste do Brasil, entre 2008 e 2017, com área de cobertura média deste sistema de 120.000 km², e um caso extremo registrando 428.000 km² aproximadamente. Além disso, 82% dos casos ocorreram no verão e outono, com destaque para o mês de março.

Figura 43 – Contorno aproximadamente circular de uma CCM no Nordeste do Brasil, no dia 15/01/2013, estimado por Lyra *et al.* (2020) com auxílio de um algoritmo de análise automática



Fonte: Lyra *et al.* (2020).

Outro sistema interferente na dinâmica das chuvas são as depressões dinâmicas, ou também denominadas linhas de instabilidades tropicais (LI) induzidas em pequenas dorsais, as quais, no interior de massas de ar, provocam as precipitações. Estas chuvas se caracterizam por ventos moderados a fortes, por trovoadas e, até granizo (NIMER, 1989).

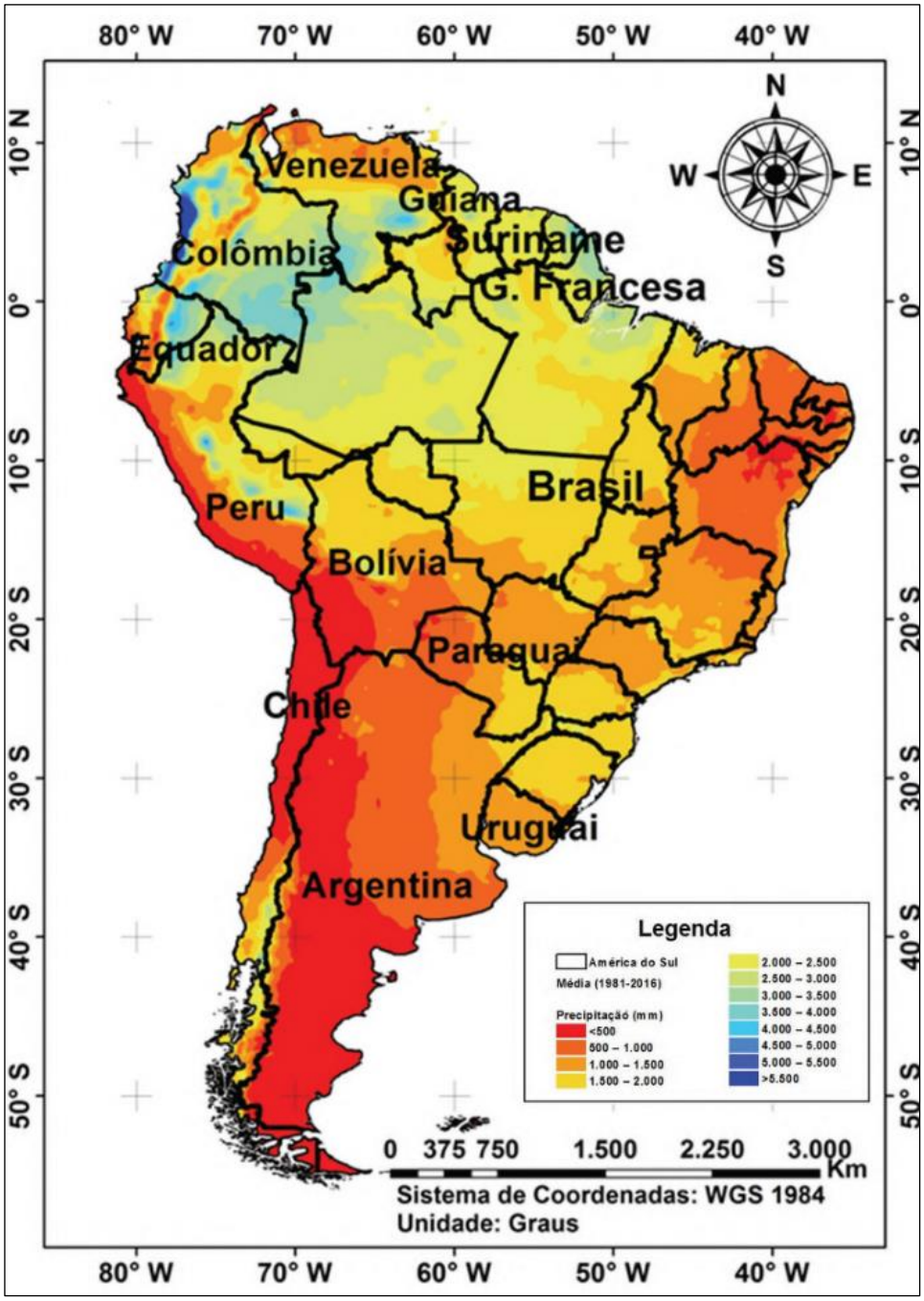
Nimer (1989) indica que a origem deste sistema LI está associada ao movimento ondulatório na frente polar ao contato com o ar quente da zona tropical. Dessa forma, as LI se formam, ao norte da frente polar, a partir destas ondulações; tendo a Amazônia como a principal região de origem destas correntes de ar. Assim, após a formação dessas, há o deslocamento para, comumente, Leste ou Sudeste (por vezes, nota-se também a semi-estacionariedade). Outra movimentação interessante das LIs é aquela sobre o Pará, a qual se desloca, em geral, até o Maranhão, raramente chegando até o sertão nordestino.

De modo geral, as LIs são comuns em toda região tropical do Brasil, se destacando nos meses de dezembro a fevereiro, nos quais há um decréscimo de pressão, visto o

forte aquecimento do interior do continente na época de verão. De acordo com o CDP (2016), este sistema, de pequena escala, ocorre associado à ZCIT. Assim, no verão e outono desenvolve-se mais ao sul da linha do Equador e, no inverno e na primavera, mais ao norte. O crescimento das LI_s pode ser influenciado pela intensificação dos ventos alísios e das frentes de massa de ar que chegam à linha do equador.

A Figura 44 ilustra as precipitações médias anuais, entre o período de 1981 e 2016, de toda a América do Sul elaborado por Vecchia *et al*. (2020). Conforme se observa no Brasil, é notório a Região do Nordeste apresentando baixos índices pluviométricos tal qual é a costa do Chile e Peru, onde está localizado o deserto do Atacama, umas das regiões mais secas do globo. A floresta amazônica demarca uma grande área com altos índices pluviométricos anuais, que envolve os países do Norte da América do Sul, a maioria dos estados amazônicos brasileiros e grande parte do Mato Grosso e uma parcela do Maranhão. Em geral, as Regiões do Sudeste e Sul demarcam uma pluviosidade mediana durante o ano; O Centro-Oeste brasileiro sofre com as baixas umidades em algumas épocas do ano.

Figura 44 - PMA entre o período de 1981 a 2016, na América do Sul



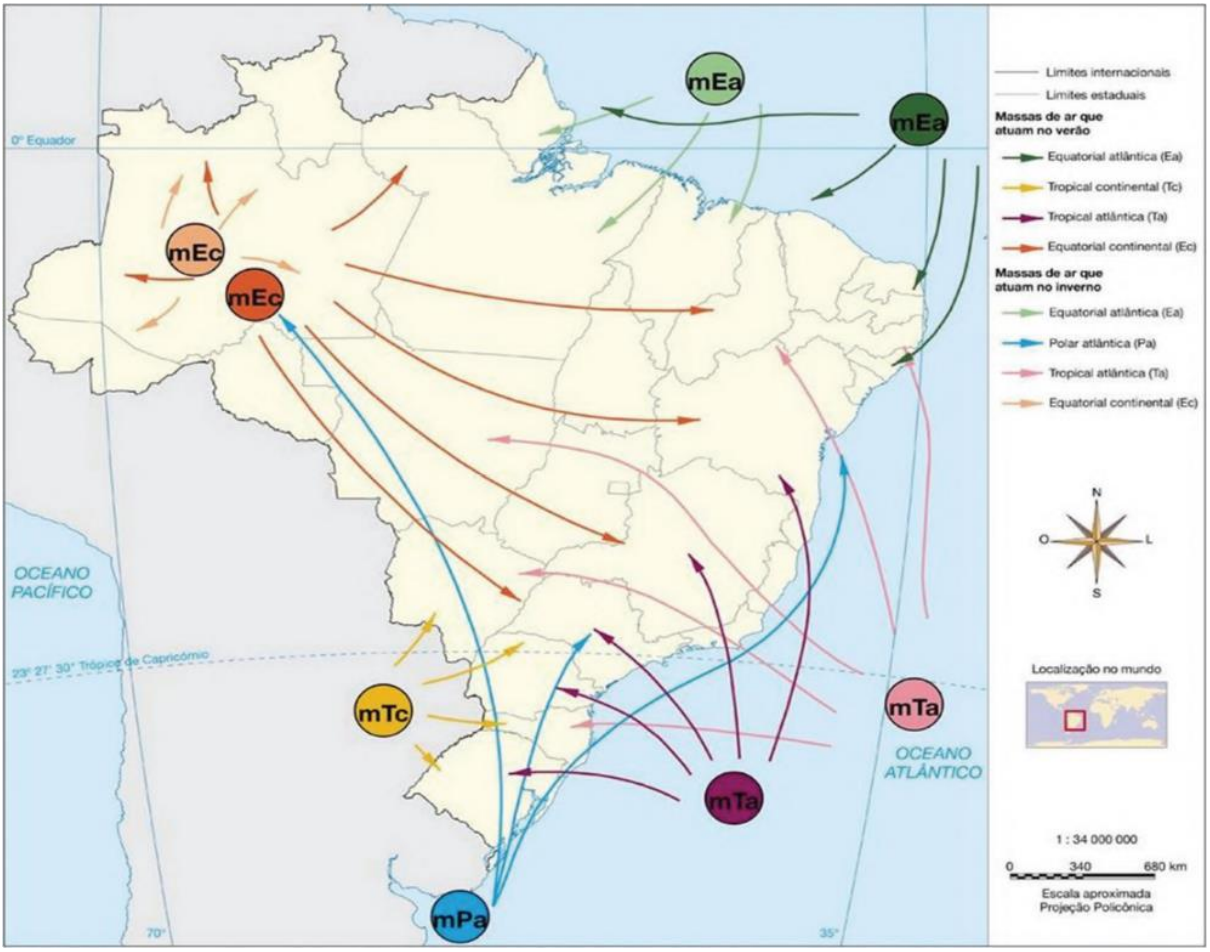
Fonte: Vecchia *et al.* (2020)

4.5.5 Massas de ar no Brasil

É importante também contextualizar, brevemente, as cinco principais massas de ar que atuam no Brasil e as suas ações. Conforme apresentado na Figura 45, enfatiza-se as massas tropicais (mTc e mTa), polares (mPa) e equatoriais (mEc e mEa). Informa-se que as massas de ar podem ser secas ou úmidas, frias ou quentes, isto é,

carregam as características das suas regiões de origem e alteram o tempo atmosférico por onde passam (ZANATTA *et al*., 2016).

Figura 45 - Principais massas de ar atuantes no Brasil



Fonte: Nimer (1989).

Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007) a massa Polar atlântica (mPa) tem sua origem no Oceano Atlântico Sul, próximo à Patagônia, caracterizada por ser uma massa de ar fria e úmida intensificando as suas ações no inverno das Regiões Sul e Sudeste do Brasil, diminuindo a temperatura média local. Essa massa, que é formada em altitudes elevadas, percebe um favorecimento para a sua movimentação na América do Sul devido ao alinhamento longitudinal do relevo sul-americano (principalmente da cordilheira do Andes) e a existência de calhas naturais de rios extensos, tal qual os rios da bacia do rio da Prata. Um sub-ramo se desloca até o pacífico e exerce influência na corrente marítima de Humboldt e o outro sub-ramo segue as calhas da bacia do rio da Prata, chegando, porventura, em latitudes mais

baixas, que demarcam, por exemplo, a região da floresta amazônica, arrefecendo a temperatura das localidades atingidas.

A massa Tropical atlântica (mTa), a qual se forma nas altas pressões subtropicais do Oceano Atlântico é caracterizada pelo calor e umidade, demarcando a tropicalidade típica brasileira no litoral e tendo uma atuação mais intensa no verão do Hemisfério Sul. Contudo no inverno, segundo Zanatta *et al*. (2016), ela propicia chuvas frontais de inverno na Região Nordeste devido ao seu encontro com a massa Polar atlântica (mPa). Também permite a formação de chuvas orográficas devido ao choque com a Serra do Mar no Sul/Sudeste

A massa Tropical continental (mTc) é formada sobre o continente (na região do Chaco, centro da América do Sul), composta de ar quente e seco, e é responsável pelo "bloqueio atmosférico" que impede o deslocamento de frentes frias para as latitudes mais baixas e a formação de nuvens convectivas profundas, as quais corroboram com chuvas e ventos fortes e turbulentos. Tem sua intensificação da atuação no final do inverno e início da primavera (ZANATTA *et al*., 2016).

A massa Equatorial atlântica (mEa) age próxima a linha do equador, principalmente no nordeste da floresta amazônica, trazendo umidade do oceano atlântico para a costa do Brasil, sendo geralmente fresca na parte inferior e quente na parte superior (NIMER, 1989). Além disso também influencia na Região Nordeste, trazendo altas temperaturas e elevada pluviosidade.

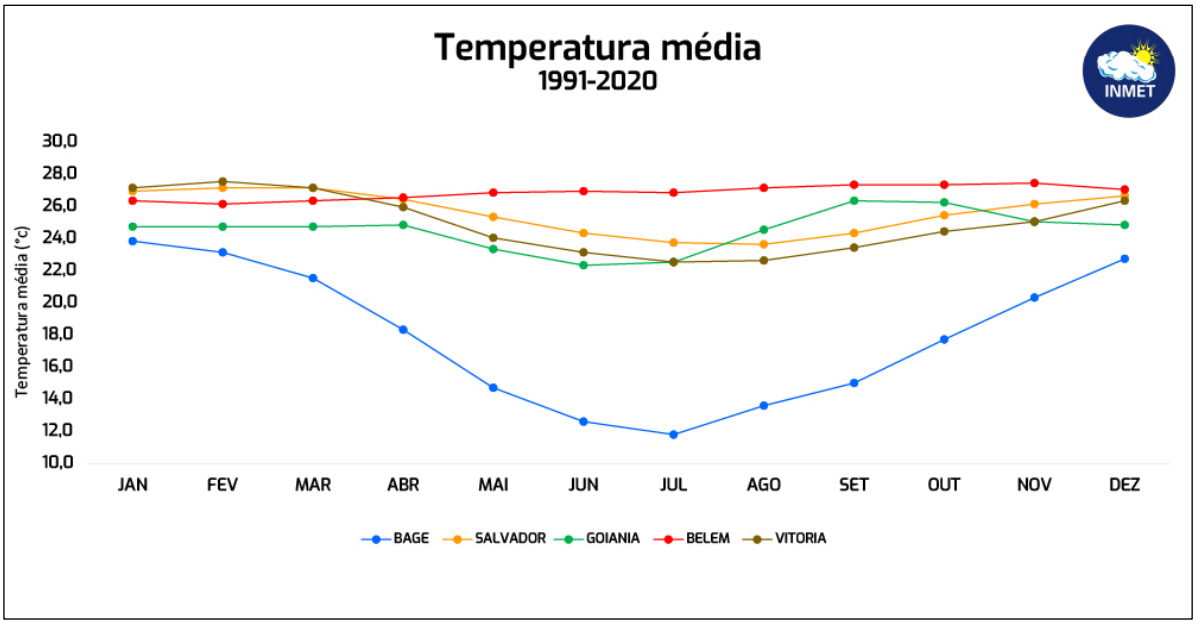
A massa Equatorial continental (mEc) é originada na Amazônia Central, composta de ar quente e úmido, e tem atuação constante na Região Norte, provocando instabilidade e convecção. A mEc é privilegiada pela umidade advinda dos rios amazônicos, evapotranspiração e da influência oceânica. Popularmente adotou-se o termo "rio voadores" para a transferência de umidade da Região Norte para o Centro-Oeste, Sudeste e Sul do país através dessa massa de ar, sendo vital para a segurança hídrica desses locais (ZANATTA *et al.*, 2016).

O Norte do País possui a menor densidade de monitoramento meteorológico em comparação com as demais regiões do Brasil. A sua grande extensão territorial impõe

dificuldades no que tange a caracterizar, em detalhes, as variabilidades regionais de cada porção de terra nortista (NIMER, 1989). Nota-se, de acordo com o autor, um acúmulo de estações meteorológicas nas margens do Rio Amazonas e seus afluentes, em contraste com escassez no restante da região. O clima da região Norte, muito marcado pela influência da bacia amazônica, é caracterizado por elevadas temperaturas, umidade alta e volumes de precipitação consideráveis. Em específico para a região de Barcarena/PA, nota-se, sobretudo, uma atuação intensa da **mEa** como fonte de umidade alimentadora das precipitações (advinda do oceano Atlântico e da Baia de Marajó) e, em segunda instância, a **mEc**, de caráter continental e úmido.

Uma informação comparativa interessante é a variação mínima da temperatura média da cidade de Belém/PA para como outras cidades brasileiras, conforme demonstrado na Figura 46 pelo INMET (2022). O clima quente em Belém é verificado durante todo o ano, com temperaturas médias mensais sempre acima de 26,0 °C. Outra questão interessante, abordada na Figura 47, é a relação mensal das temperaturas mínimas, médias compensadas, máximas, e pontos de orvalho para com a variação da umidade relativa do ar mensal compensada, para a Estação INMET 82191 de Belém/PA, utilizando os dados das Normais Climatológicas do INMET de 1991-2020.

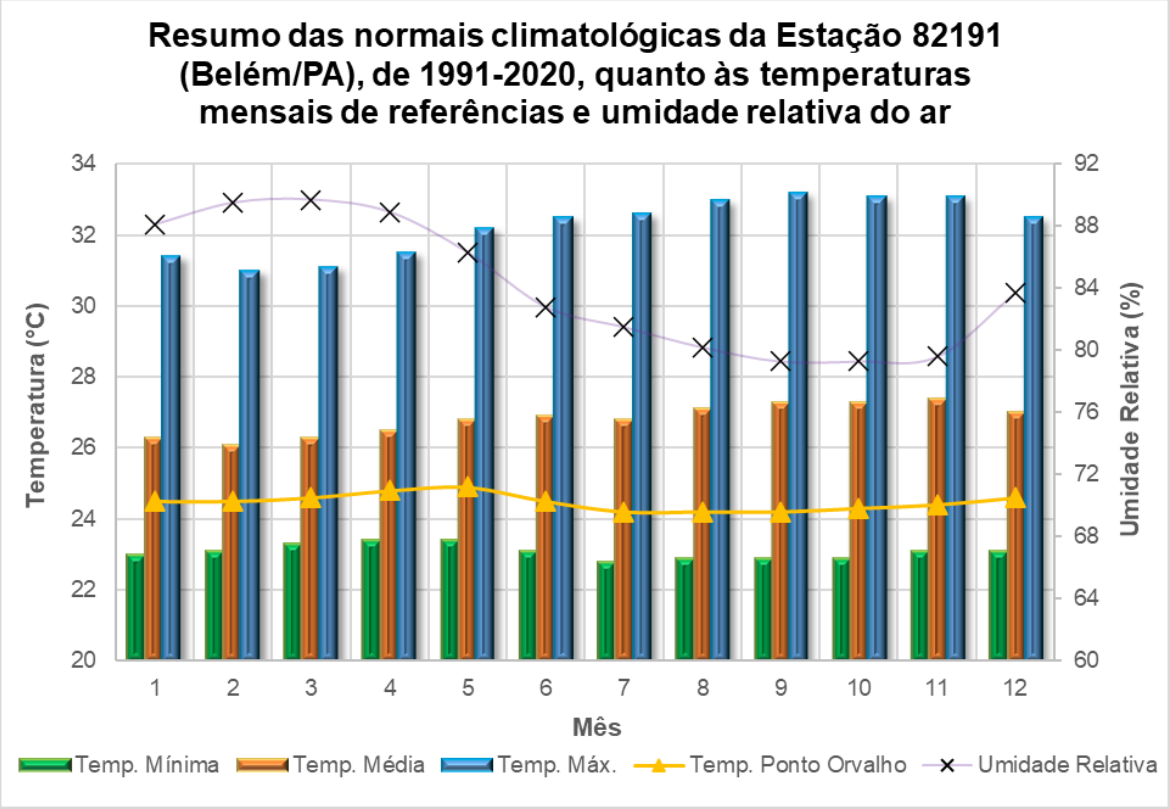
Figura 46 - Comparação das normais climatológicas (1991 a 2020) da temperatura média mensal em algumas cidades brasileiras. A Estação INMET de referência para Belém foi a 82191



Fonte: INMET (2022).

Nota-se, com base na Figura 47 e nas normais climatológicas de 1991-2020 do INMET (2022), registros altos de temperatura do ar durante o ano no posto INMET 82191, configurando um clima quente nesse ponto, com as temperaturas anuais médias, mínimas e máximas iguais a 26,8 ºC, 23,1ºC e 32,3ºC. A temperatura do ponto de orvalho anual média foi de 24,5ºC e a umidade relativa do ar compensada anual média de 84,1%. Registra-se mais umidade relativa do ar compensada entre os meses de janeiro a junho do que de julho a dezembro.

Figura 47 – Resumo comparativo das normais climatológicas (1991 a 2020) quanto às temperaturas mensais mínimas, médias compensadas, máximas, pontos de orvalhos, e umidade relativa do ar compensada para a Estação INMET 82191 de Belém/PA. Esse posto fica a 22 km, aproximadamente, de Barcarena/PA.



Fonte: autoria própria.

4.5.6 Classificação Climatológica do IBGE (2002)

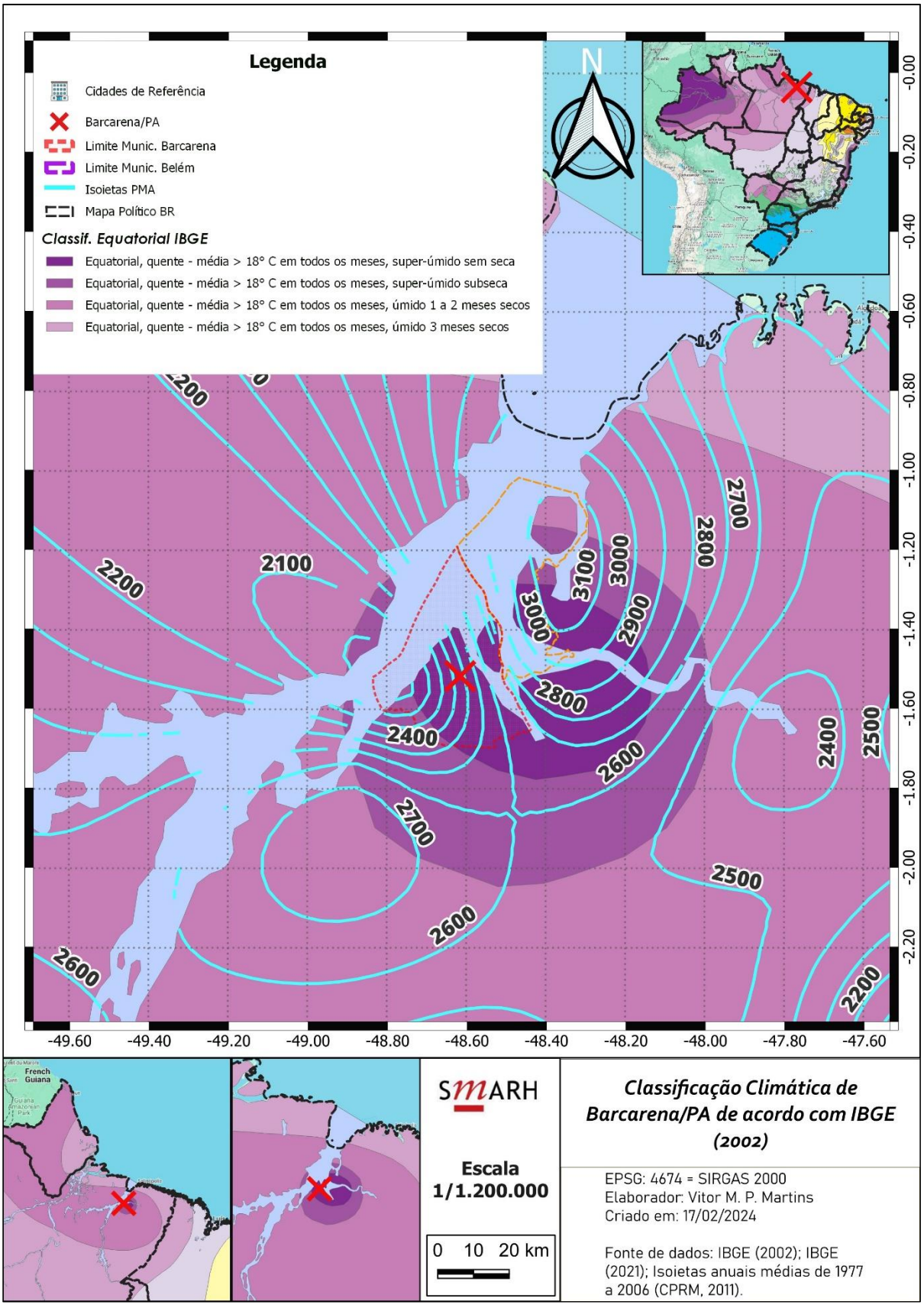
O IBGE (2002) desenvolvou um Mapa de Clima do Brasil, que apresenta uma análise generalista das temperaturas e índices pluviométricos médios dentro do país. Grandes grupos de classificação são delimitados por: Mesotérmico Mediano, Mesotérmico Brando, Subquente e Quente. Existem subclasses classificadas como úmido, superúmido, semiárido, semiúmido e essas estão localizadas em zonas Equatoriais,

Tropicais e Temperadas. Há ainda diferenças entre as regiões classificadas de acordo com a quantidade de meses secos, iniciando com regiões que possuem alta umidade presente na atmosfera, ou seja, sem meses secos ou quase nenhum mês seco (subseca), transitando entre locais com alguns meses secos, chegando até em regiões semi-áridas com secas prolongadas dentro de 11 meses do ano.

Barcarena/PA e a região metropolitana de Belém/PA comungam um núcleo sensivelmente circular (raio em torno de 25 km) de clima Quente/superúmido e Equatorial, sem meses secos. Um cinturão abraçando núcleo interno é formado pela classificação climatológica Quente/superúmido Equatorial subseco, com um raio próximo de 50 km. Em uma mesoescala, forma-se uma zona de formato irregular, demarcando o clima Quente/úmido Equatorial com 1 a 2 meses secos. Numa escala macro, ocorre uma quarta classificação envolta das 3 já citadas, com clima Quente/úmido Equatorial com 3 meses secos, cobrindo uma extensa área da região Norte do Brasil.

Na Figura 48 está apresentado um fragmento do Mapa de Clima do Brasil, com enfoque na região de estudo do presentre trabalho. O mapa completo do Brasil, com todas as descrições de legendas e informações adicionais está apresentado no ANEXO B.

Figura 48 – Caracterização climática do IBGE (2002) em Barcarena/PA e região adjacente. Na imagem são verificadas também as Isoietas de PMA



Fonte: conforme indicado.

4.5.7 Classificação Climatológica de Koppen-Geiger

Uma outra forma de classificar climatologicamente uma região, de forma objetiva, é utilizando a classificação climática de Koppen-Geiger, a qual foi primeiramente fundamentada na vegetação que ocorre naturalmente em cada região do planeta por Wladimir Koppen e, posteriormente, foi relacionada com outros fatores como temperatura, precipitação pluvial e suas características sazonais (PEEL *et al.*, 2007). Através disso, foi possível dividir o planeta em 5 grandes porções climatológicas, delimitadas pelas letras A, B, C, D e E, que apontam, respectivamente, para o *Clima tropical, Clima seco, Clima subtropical úmido, Clima continental temperado e Clima polar* (ALVAREZ *et al*., 2013).

Esses grandes grupos foram subdivididos em classificações que variam com a precipitação e a temperatura do local. No Quadro 7 é possível visualizar o resumo da classificação climática de Koppen-Geiger.

Quadro 7 – Critérios aplicados por Koppen-Geiger para caracterização das regiões climatológicas no globo

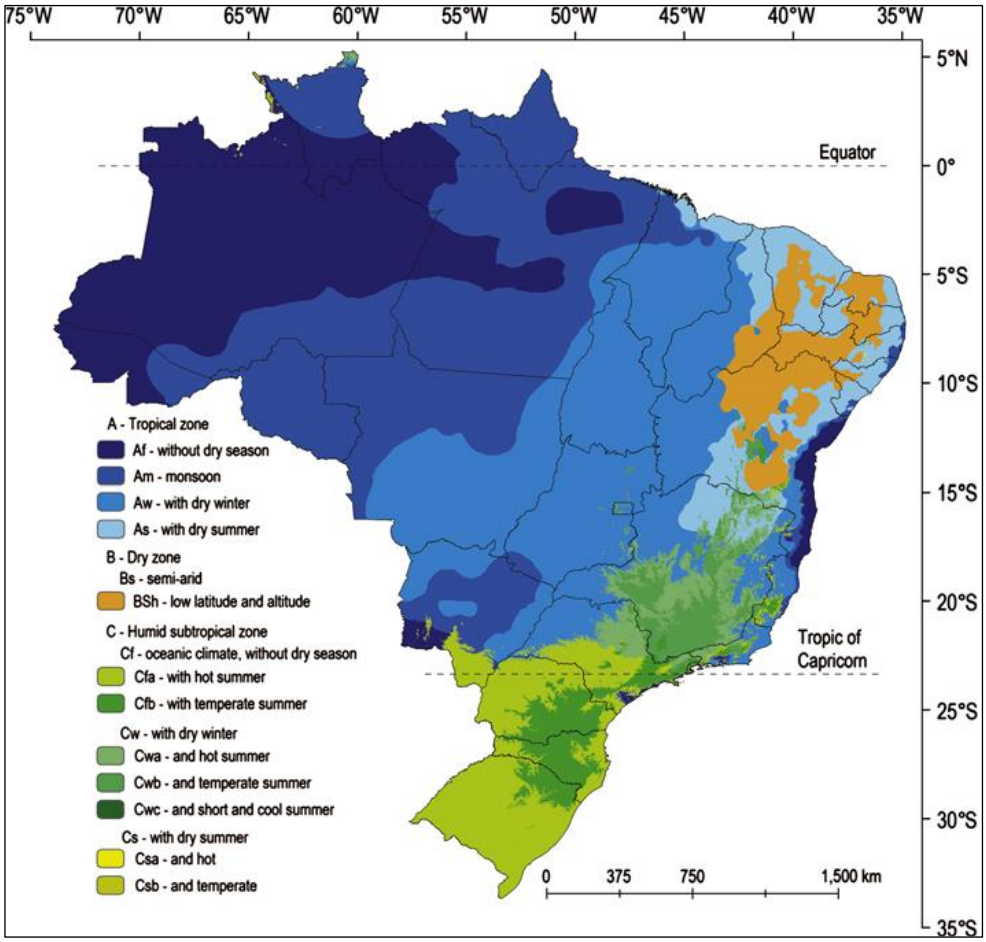
Grupo	Subgrupo	Tipo	Símbolo
(A) Tropical	(f) sem estação seca	-	Af
	(m) monção	-	Am
	(s) verão seco	-	As
	(w) inverno seco	-	Aw
(B) Seco ou Árido	(S) Semi-arido	(h) quente	BSh
		(k) frio	BSk
	(W) Árido/Deserto	(h) quente	BWh
		(k) moderadamente frio	BWk
(C) Subtropical úmido	(f) sem estação seca	(a) verão quente	Cfa
		(b) verão fresco	Cfb
		(c) verão moderadamente frio	Cfc
	(w) inverno seco	(a) verão quente	Cwa
		(b) verão fresco	Cwb
		(c) verão moderadamente frio	Cwc
	(s) verão seco	(a) verão quente	Csa
		(b) verão fresco	Csb
		(c) verão moderadamente frio	Csc
(D) Continental Temperado ou Frio	(f) sem estação seca	(a) verão quente	Dfa
		(b) verão fresco	Dfb
		(c) verão moderadamente frio	Dfc
		(d) inverno muito frio	Dfd

Grupo	Subgrupo	Tipo	Símbolo
	(w) inverno seco	(a) verão quente	Dwa
		(b) verão fresco	Dwb
		(c) verão moderadamente frio	Dwc
		(d) inverno muito frio	Dwd
	(s) verão seco	(a) verão quente	Dsa
		(b) verão fresco	Dsb
		(c) verão moderadamente frio	Dsc
		(d) inverno muito frio	Dsd
(E) Polar	(T) Tundra	-	ET
	(F) Glacial	-	EF

Fonte: adaptado de Alvarez *et al*. (2013) e Nascimento *et al.* (2017)

Alvarez *et al.* (2013) executou um trabalho de classificação climatológica especificamente para os limites territoriais do Brasil, com base na Classificação de Koppen-Geiger. Foram extraídos dados de temperatura e precipitação de 2.950 estações brasileiras disponíveis no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO). O produto do artigo foi um mapa geral do Brasil, com resolução espacial dos *grids* de 1 ha, determinando os tipos climáticos que se encontram no território nacional. A Figura 49 apresenta a classificação de Koppen-Geiger para o Brasil, elaborado por Alvarez *et al.* (2013), onde são observados os Climas Tropical, Seco e Subtropical úmido dentro do país.

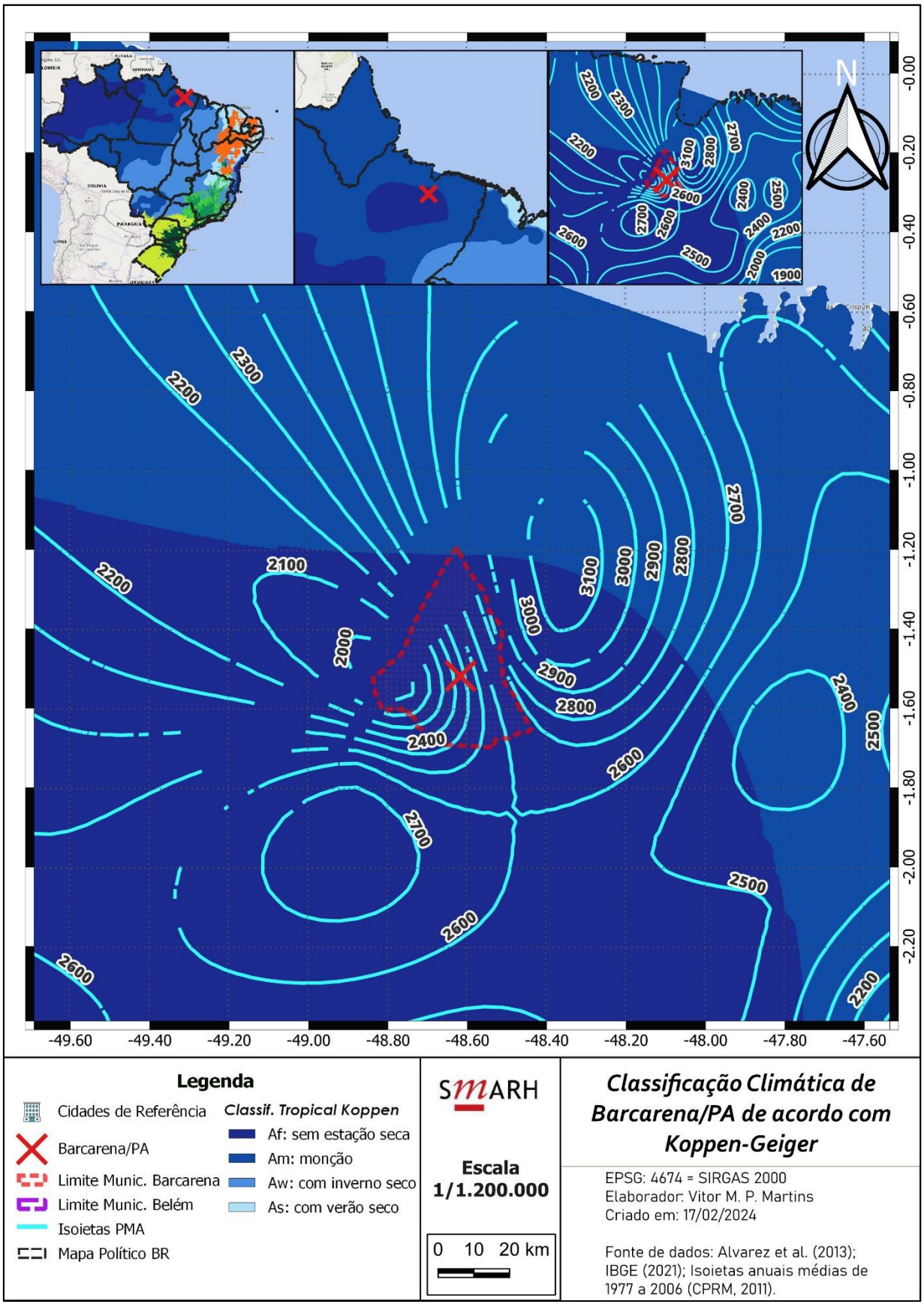
Figura 49 - Classificação climática para o Brasil, de acordo com os critérios de Koppen, elaborado por Alvarez *et al.* (2013).



Fonte: Alvarez *et al.* (2013).

A Figura 50 expõe a Classificação de Koppen-Geiger para a região no entorno de Barcarena/PA.

Figura 50 - Caracterização climática de Koppen-Geiger em Barcarena/PA e região adjacente



Fonte: conforme indicado.

É verificado, na Figura 50, que Barcarena/PA está posicionada no grupo climático A, que representa as zonas tropicais e, objetivamente, são aquelas áreas com temperatura média no mês mais frio (T_{COLD}) superior a 18 ºC, se caracterizando por uma precipitação pluvial anual superior a 700 mm e precipitação maior que a evapotranspiração. Mais especificamente quanto ao subgrupo, Barcarena/PA está classificado como **Af**, ou seja, clima tropical sem estação seca, isto é, há um período mais chuvoso e menos chuvoso (umidade o ano todo), sem momentos de seca demarcados. Além do $T_{COLD} \geq 18\,°C$, o mês menos chuvoso (R_{DRY}) da zona **Af** tem acumulado mensal médio maior ou igual a 60 mm.

Em sua vizinhança, a classificação **Am** é exposta também e, nada mais é do que um clima tropical de monção, ou seja, há uma breve estação seca e com chuvas intensas durante o resto do ano (NASCIMENTO *et al.*, 2017). Além do $T_{COLD} \geq 18\,°C$, a zona **Am** tem $R_{DRY} < 60\,mm$, em contrapartida a PMA tem que ser, no mínimo, maior que $25 * (100 - R_{DRY})$. A capital do estado do Pará, Belém, que faz divisa com Barcarena, apresenta os dois subtipos climáticos citados.

Portanto, a classificação climática de Koppen-Geiger e a do IBGE (2002) são importantes ferramentas para a seleção das estações pluviométricas e meteorológicas utilizadas em estudos de estimação de precipitações intensas, uma vez que, por meio da umidade. pluviometria e da temperatura em uma dada região, é possível agrupar climas semelhantes em uma área que pode ser dita homogênea para aqueles eventos extremos analisados. Em vista disso, uma investigação climatológica por zonas é sim uma das alternativas para delimitar regiões de estudo. Todavia, é importante ressaltar que a classificação climática de Koppen-Geiger e a do IBGE (2002) são embasadas em valores médios e não em valores extremos. Contata-se, na Figura 50, que a PMA dentro do limite municipal de Barcarena/PA está variando entre 2000 e 2800 mm, demonstrando a acentuada variabilidade de chuvas que ocorrem dentro de um mesmo município.

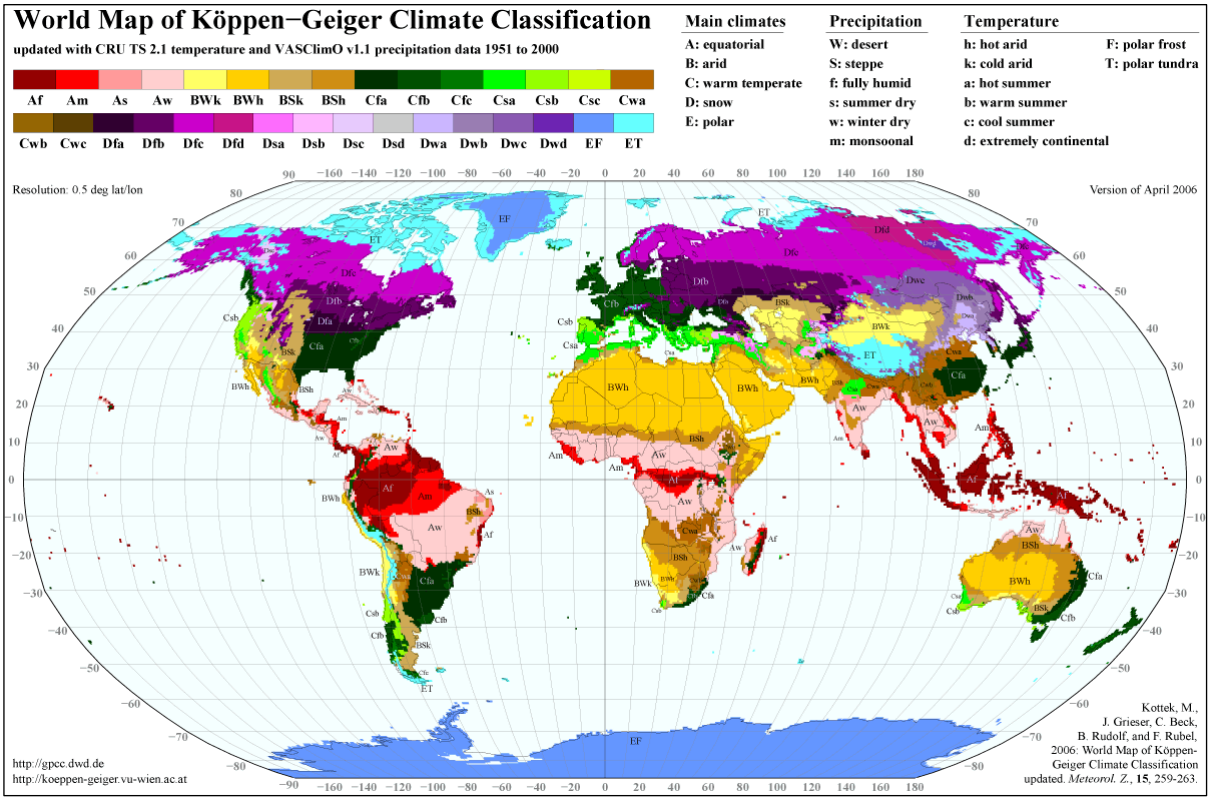
Conforme já explanado anteriormente, células convectivas são verificadas na região de estudo e, sua característica é promover tormentas em pequenas porções de terra. É plausível que, regiões ao lado das células convectivas não sofram com as pancadas de chuvas, sendo essa uma possível explicação para a acentuada densificação das

isoietas de PMA. É interessante atentar-se ao formato circular/elipsoidal das isoietas próximo a Barcarena/PA.

Neste caso, devido à tipologia dos fenômenos climatológicos atuantes em Barcarena/PA, o estudo em áreas bem reduzidas seria o mais interessante para avaliação dos núcleos de convecção. Todavia, o Brasil carece de um extenso e distribuído monitoramento climatológico e pluviométrico, tampouco analisando a Região Norte. Logo, torna-se necessário a ampliação da área de atuação e seleção das estações.

De forma adicional e comparativa, é apresentado na Figura 51 a classificação climática global, de acordo com os critérios de Koppen-Geiger, elaborado por Kottek *et al.* (2006, apud NASCIMENTO, 2017) com dados de 1951 a 2000 e resolução espacial de 0,5° x 0,5°. Nota-se uma diferença climática significativa entre o EUA e o Norte do Brasil, além disso, o hemisfério norte apresenta peculiaridades distintas do hemisfério sul.

Figura 51 - Classificação climática de Koppen-Geiger adaptada por *Kottek et al.* (2006, apud NASCIMENTO, 2017)



Fonte: Kottek *et al.* (2006, apud NASCIMENTO, 2017).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada no presente trabalho se encontra detalhada em 3 subitens. O item 5.1 mostra a seleção preliminar e tratamento das estações pluviométricas a serem utilizadas na estimação da PMP Estatística, seja via Envoltória Regionalizada (conforme Sarkar e Maity (2020)), seja através do emprego do método de Monte Carlo (MMC) para o sorteio de variaveis aleatórias de alturas de chuva empregadas na estimativa dos fatores de frequência. O item 5.2 descreve a seleção das estações climatológicas e as premissas adotadas para a estimação da PMP Hidrometeorológica. Já o item 5.3 expõe, em detalhes, os métodos empregados no sorteio de variáveis aleatórias utilizadas no cálculo dos fatores de frequência da PMP Estatística por meio do MMC, e a definição de percentis de 95% e 99%.

5.1 Delimitação e seleção das estações pluviométricas

Antes de entrar em detalhes acerca seleção dos postos e métodos, é importante destacar que o Manual Nº 1045 da WMO (2009), uma das principais referências do presente trabalho, apresenta recomendações sobre a estimação da PMP e não obrigações. Através da apresentação de diversos exemplos, em diversas partes do mundo pela WMO (2009), o hidrólogo se inspira e toma decisões que fazem sentido à luz da sua localidade de interesse para selecionar os postos, definir corretamente as premissas e estimar a PMP. A base do método de estimativa da PMP, seja ela Hidrometeorológica ou Estatística, é uma aplicação oriunda do hemisfério norte, logo algumas concepções são aplicadas de formas diferentes para o hemisfério sul, tendo o usuário a sensibilidade e o julgamento de engenharia de unir o conhecimento técnico à sua realidade local, e não necessariamente uma aplicação rígida e direta das recomendações do manual. Dessa maneira, embora Sugai (1989), Carvalho (2000), Pinheiro (2011), Alfazi-Gorouh *et al.* (2018), Sarkar e Maity (2020) e outros tenham se baseado nos manuais da WMO, estes autores seguiram caminhos distintos em algumas etapas do cálculo da PMP.

Entende-se que, a seleção das estações pluviométricas para esse tipo específico de modelagem hidrológica deve considerar, principalmente, os efeitos climatológicos intervenientes nas tormentas típicas da região. Ou seja, o entendimento do processo

de formação de precipitação e os sistemas climatológicos atuantes são determinantes para a escolha de uma estação “A” e não consideração de uma estação “B”.

Dadas as condições climatológicas explicitadas ao longo do texto, os fenômenos convectivos juntamente com as frentes de massas de ar são os principais formadores de precipitação em Barcarena/PA e circuvizinhanças. Os efeitos orográficos não contribuem, majoritariamente, com as precipitações locais, haja vista que não há nenhuma barreira orográfica importante.

Nota-se que, a circulação geral atmosférica (Células de Hadley e Walker; ZCIT; oscilações na temperatura dos oceanos dentre outros), atuação dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM_s) no Norte e Nordeste do Brasil, bem como a alta incidência solar na zona equatorial, promovem regiões de convecção sobre Barcarena/PA, que fomentam a ascensão da umidade proveniente do oceano Atlântico, bem como de volumosos rios e da evapotranspiração da Floresta Amazônica. A atmosfera local, com altos índices de umidade e temperatura (INMET, 2022), faz com que haja uma rápida saturação atmosférica, condensando os vapores d’água em precipitações durante o ano todo. As classificações climatológicas do IBGE (2002) e de Koppen-Geiger (ALVAREZ *et al.* 2013) solidificam ainda mais as argumentações.

Dentro de um contexto mais regional, *a priori*, estabeleceu-se uma região de busca inicial das estações pluviométricas para compor a Envoltória Regional dos K_s, bem como da simulação sintética. Definiu-se um limite circular, com o centroide em Barcarena/PA, considerando as argumentações climatológicas de atuação preponderante de células convectivas na região, vinculado a referência de Ahrens (2018), em que supercélulas tem a possibilidade de ultrapassar 40 km de base com seu formato semelhante a um cilindro. A classificação climática brasileira, elaborada pelo IBGE (2002), apresentou duas zonas climatológicas com formato que faz alusão a uma feição circular, apresentando raios hipotéticos de 25 e 50 km, centrados entre Barcarena e Belém. CCM_s se apresentam como fenômenos convectivos que são formados por *Cumulonimbus* e *Cirrus,* que causam intensas precipitações no Norte e Nordeste do Brasil, possuindo um formato circular com áreas médias em torno de 120.000 e 150.000 km² (SILVA DIAS, 1987 apud REBOITA *et al.,* 2010; MADDOX,

1980; REBOITA *et al.,* 2010; SALIO *et al.*, 2007; LYRA *et al.*, 2020). Uma outra argumentação a favor de se adotar uma circunferência limite é a densificação das isoietas de PMA próximos ao município barcarenense, com também formato circular/elipsoidal.

Seria interessante a abordagem de uma área mais reduzida, devido aos efeitos convectivos, que por natureza são concentrados, através de um raio de seleção ligeiramente superior às dimensões citadas no parágrafo anterior, ou seja, entre 50 e 100 km, contudo, devido à baixa densidade de monitoramento pluviométrico no Brasil, e principalmente no Norte do país, foi necessário estender essa região de estudo para um raio maior em prol de equalizar as recomendações técnicas da ciência climática, além do interesse em investigar a variabilidade fatores de frequência em uma amostragem maior de postos pluviométricos. Foi determinado, portanto, um raio de 200 km $(A \cong 126.000\ km^2)$, que compreenderia uma área próxima à média dos eventos de CCMs que ocorreram no Norte e Nordeste do Brasil. Como já informado, a WMO (2009) recomenda que o usuário do método visualize as limitações regionais e adeque o processo de estimativa da PMP com a realidade local.

Logo, dentro do raio de 200 km, estavam disponibilizados, inicialmente 105 postos de monitoramento pluviométrico, segundo a plataforma HIDROWEB da ANA e Banco de Dados Meteorológicos do INMET (BDMEP). Após uma análise de consolidação das médias mensais e anuais dos dados, comparação entre estações, busca por registros jornalísticos, vídeos e fotos disponíveis na internet acerca de inundações históricas, verificação de outliers via Teste de Grubbs e Beck (GRUBBS, 1950, 1969; GRUBBS e BECK, 1972), que está disponibilizado no **APÊNDICE C** conforme apresentação em Naghettini e Pinto (2007), bem como a adoção de uma extensão serial mínima de 20 anos, totalizaram-se 52 estações pluviométricas.

Frisa-se que, a WMO (2009) recomenda 30 anos ou mais de extensão dos postos pluviométricos para a PMP pontual Estatística, contudo, devido ao carente monitoramento hídrico no Brasil e principalmente na região Norte, foi necessário ajustar o limiar mínimo para 20 anos de dados com o intuito de se obter uma maior quantidade de estações e representatividade mais localizada, à luz da dinâmica climática bem peculiar da região envolta de Barcarena/PA. Frente a necessidade de

obter alguns postos com boa qualidade de monitoramento e, principalmente, garantir representatividade espacial, selecionou-se também os postos BOM JARDIM (00147006), SÃO SEBASTIÃO DA BOA VISTA (00149005) e MAUNÁ (00149006) que possuíam quase 20 anos de dados.

Desse modo, as 52 estações pluviométricas selecionadas estão apresentadas na Tabela 5, sendo que a média da extensão temporal é de, aproximadamente, 34 anos. Como informação suplementar, caso fosse utilizado um raio de 100 km, haveria apenas 19 estações com condições de serem inseridas no presente estudo.

Tabela 5 - Características básicas das 52 estações pluviométricas.
[1] Coordenadas geográficas em SIRGAS 2000

Estação	Código	Operadora	Coordenadas Geográficas [1]		Altim. média (m)	Período de Dados	Anos Hidrol. Consolidados	Distância à Barcarena (km)
			Lat.	Long.				
ABAETETUBA	00148010	CPRM	-1,750°	-48,867°	9	1980 a 2022	39	38
ACAMPAMENTO MENDES JUNIOR	00247008	CPRM	-2,343°	-47,847°	45	1995 a 2023	21	125
ACARÁ	00148009	CPRM	-1,961°	-48,206°	26	1980 a 2022	40	67
ANAJÁS	00049009	CPRM	-0,985°	-49,939°	3	1999 a 2022	23	159
BADAJÓS	00247000	CPRM	-2,513°	-47,768°	10	1972 a 2022	47	145
BAIÃO	00249003	CPRM	-2,785°	-49,669°	37	1984 a 2022	34	183
BELÉM	00148001	EMBRAPA/IPAGRO	-1,450°	-48,500°	15	1961 a 2014	28	15
BELÉM	00148002	INMET	-1,435°	-48,438°	7	1949 a 2019	67	22
BELÉM (INMET)	82191	INMET	-1,436°	-48,437°	7	1961 a 2022	58	22
BELÉM (INMET)	A201	INMET	-1,411°	-48,440°	21	2003 a 2023	20	23
BOM JARDIM	00147006	ANA	-1,567°	-47,100°	38	1972 a 1989	16	169
BUJARU	00148017	CPRM	-1,521°	-48,046°	10	1994 a 2022	28	63
CAMETÁ	00249001	INMET	-2,250°	-49,500°	6	1975 a 1998	23	127
CAMETÁ (INMET)	82263	INMET	-2,240°	-49,500°	10	1970 a 2023	50	127
CAPANEMA	00147002	CPRM	-1,204°	-47,178°	25	1966 a 2022	55	164
CASTANHAL	00147007	CPRM	-1,298°	-47,939°	48	1972 a 2022	47	79
CASTANHAL (INMET)	A202	INMET	-1,301°	-47,948°	47	2003 a 2023	20	78
COLÔNIA SANTO ANTÔNIO	00147011	CPRM	-1,655°	-47,491°	37	1982 a 2022	40	126

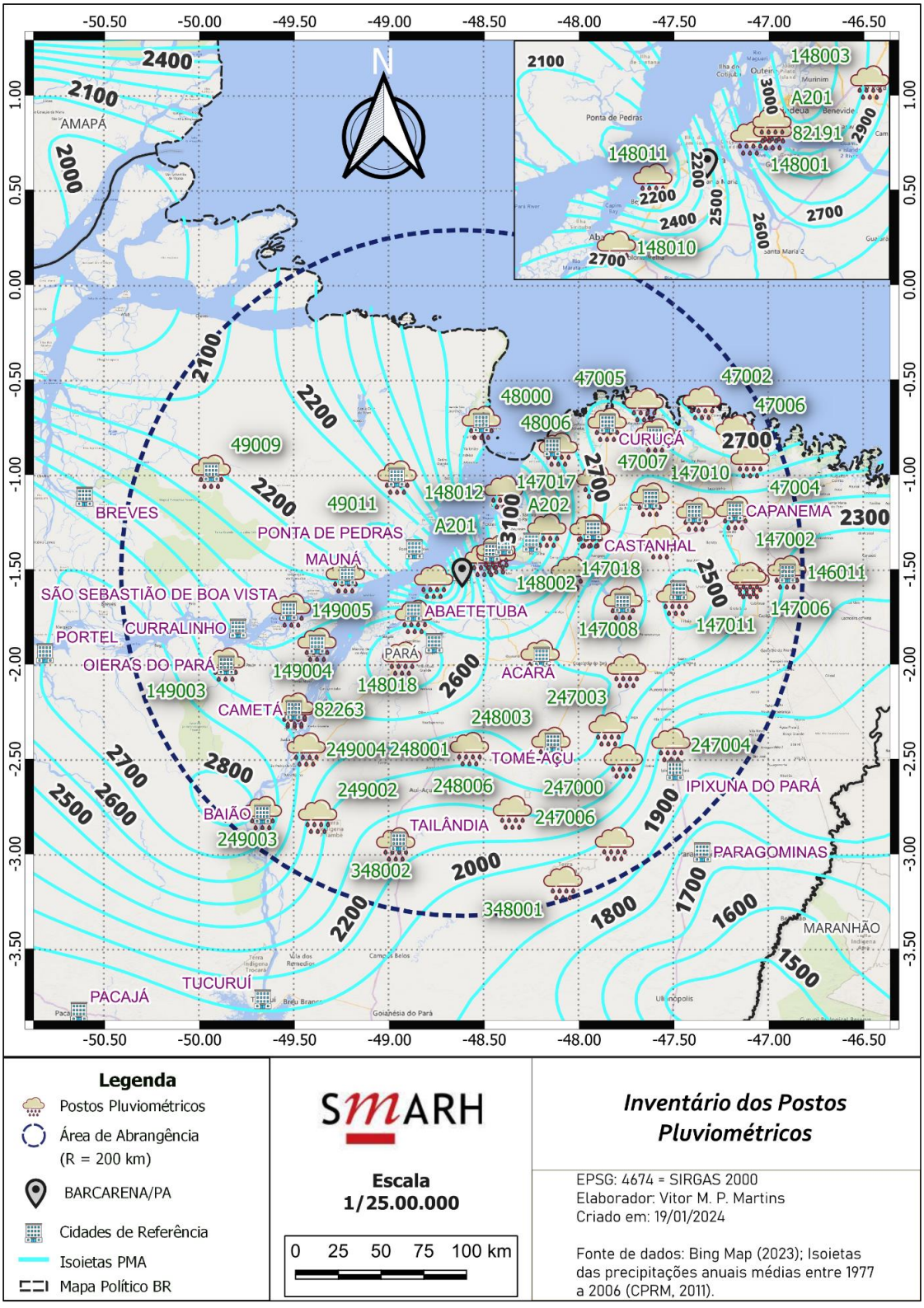
Estação	Código	Operadora	Coordenadas Geográficas [1]		Altim. média (m)	Período de Dados	Anos Hidrol. Consolidados	Distância à Barcarena (km)
			Lat.	Long.				
CURUÇÁ	00047003	CPRM	-0,738°	-47,854°	17	1981 a 2022	34	121
FAZENDA JAUARÁ	00247003	CPRM	-2,036°	-47,751°	12	1982 a 2023	37	112
FAZENDA MARINGA	00348001	CPRM	-3,154°	-48,086°	61	1982 a 2022	35	191
FAZENDA SÃO RAIMUNDO	00247004	CPRM	-2,426°	-47,516°	70	1982 a 2022	35	159
FAZENDA URUCURE	00248001	CPRM	-2,448°	-48,579°	31	1982 a 2022	38	103
IGARAPÉ-AÇU	00147010	CPRM	-1,133°	-47,628°	31	1980 a 2022	39	118
IGARAPÉ-MIRI	00148018	CPRM	-1,971°	-48,934°	12	1995 a 2023	25	61
JOANA COELI	00149004	CPRM	-1,898°	-49,382°	5	1994 a 2023	25	95
MAGALHÃES BARATA	00047007	CPRM	-0,794°	-47,600°	24	1995 a 2022	25	139
MARUDA	00047005	CPRM	-0,634°	-47,658°	17	1989 a 2022	29	145
MOSQUEIRO	00148012	CPRM	-1,094°	-48,399°	14	1982 a 2022	39	53
MUANÁ	00149006	CPRM	-1,536°	-49,232°	6	2004 a 2023	17	68
NOVA TIMBOTEUA	00147019	CPRM	-1,211°	-47,386°	44	1995 a 2022	26	141
OEIRAS DO PARÁ	00149003	CPRM	-2,002°	-49,864°	6	1982 a 2022	38	149
OUREM	00147016	CPRM	-1,552°	-47,117°	15	1988 a 2022	31	167
PA-256 / RIO ACARA-MIRIM	00248006	CPRM	-2,782°	-48,352°	25	1990 a 2022	32	144
PA-256 / RIO CAPIM	00247006	CPRM	-2,948°	-47,814°	31	1989 a 2022	31	182
PRIMAVERA	00047004	CPRM	-0,929°	-47,099°	16	1982 a 2022	39	181
SALINÓPOLIS	00047002	CPRM	-0,623°	-47,354°	26	1977 a 2022	39	172
SANTA CRUZ DO ARARI	00049011	CPRM	-1,016°	-48,960°	6	1999 a 2023	23	68
SANTA ISABEL DO PARÁ	00148003	CPRM	-1,296°	-48,171°	34	1972 a 2022	49	55
SANTA LUZIA DO PARÁ	00146011	CPRM	-1,516°	-46,906°	76	1994 a 2022	27	190
SANTA MARIA DO PARÁ	00147018	CPRM	-1,357°	-47,574°	40	1990 a 2022	29	117
SÃO DOMINGOS DO CAPIM	00147008	CPRM	-1,678°	-47,770°	5	1975 a 2023	45	96
SÃO JOÃO DE PIRABAS	00047006	CPRM	-0,775°	-47,178°	27	1989 a 2022	31	180
SÃO SEBASTIÃO DA BOA VISTA	00149005	CPRM	-1,717°	-49,517°	10	2004 a 2022	18	102
SOURE (ILHA DE MARAJÓ)	00048000	INMET	-0,728°	-48,516°	9	1961 a 1998	33	89

Estação	Código	Operadora	Coordenadas Geográficas [1]		Altim. média (m)	Período de Dados	Anos Hidrol. Consolidados	Distância à Barcarena (km)
			Lat.	Long.				
TAILÂNDIA	00348002	CPRM	-2,950°	-48,967°	49	1994 a 2022	26	164
TERRA ALTA	00147017	CPRM	-1,039°	-47,913°	34	1991 a 2022	31	95
TOMÉ-AÇU	00248003	CPRM	-2,421°	-48,149°	12	1984 a 2022	36	113
VIGIA	00048006	CPRM	-0,868°	-48,110°	15	1982 a 2022	39	92
VILA DO CARMO	00249004	CPRM	-2,450°	-49,438°	15	1994 a 2023	27	138
VILA DO CONDE	00148011	CPRM	-1,566°	-48,767°	17	1980 a 2022	38	17
VILA ELIM	00249002	CPRM	-2,804°	-49,378°	9	1980 a 2023	41	166

Fonte: autoria própria.

O **APÊNDICE C** apresenta um resumo das estatísticas descritivas de todos os postos pluviométricos nas durações de 24 horas, 3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias e a Figura 52 especializa os 52 postos pluviométricos utilizados no estudo.

Figura 52 - Espacialização dos 52 postos pluviométricos utilizados no estudo



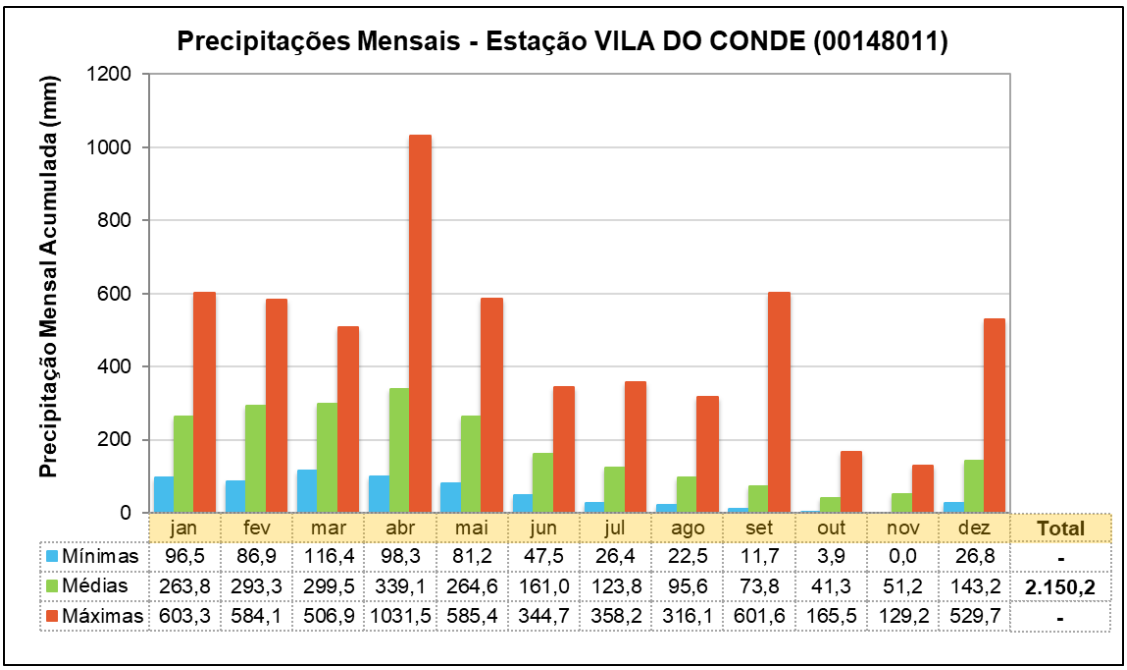
Fonte: conforme indicado.

Destaca-se, na Tabela 5, a estação VILA DO CONDE (00148011), que foi delimitada como representativa para o cálculo da PMP em Barcarena/PA, devido à qualidade de

dados, extensão serial, registros de eventos intensos e proximidade com o centro municipal. Além disso, esse posto fica localizado no bairro/distrito de nome homônimo, que apresenta uma maior densidade demográfica do município, devido às proximidades com a área industrial e portos da região. Portanto, as suas estatísticas descritivas conduziram às estimativas da PMP dentro dos métodos apresentados no presente estudo, para Barcarena/PA.

A Figura 53 apresenta a consolidação mensal pluviométrica da estação VILA DO CONDE (00148011), onde, juntamente com as informações climatológicas consolidadas na revisão da literatura, em especial quanto a atuação intensificada da ZCIT abaixo da linha do equador entre janeiro e junho, foi definido que o ano hidrológico considerado para o presente trabalho, para todos os postos pluviométricos analisados, iniciará em janeiro e finalizará em dezembro. Pode ocorrer uma certa variação do início do período chuvoso, começando em dezembro e finalizando em maio, contudo, prezou-se pela combinação entre a informação pluviométrica da estação de referência e a literatura técnica-científica quanto aos fenômenos climatológicos intervenientes sobre Barcarena/PA.

Figura 53 - Hietograma de precipitação mínima, média e máxima mensal da estação pluviométrica VILA DO CONDE (00148011), após a validação/consolidação dos dados e verificação dos outliers



	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Total
Mínimas	96,5	86,9	116,4	98,3	81,2	47,5	26,4	22,5	11,7	3,9	0,0	26,8	-
Médias	263,8	293,3	299,5	339,1	264,6	161,0	123,8	95,6	73,8	41,3	51,2	143,2	**2.150,2**
Máximas	603,3	584,1	506,9	1031,5	585,4	344,7	358,2	316,1	601,6	165,5	129,2	529,7	-

Fonte: autoria própria.

As estações pluviométricas convencionais medem somente o acumulado diário, logo, os eventos de 1 dia de duração foram transformados em alturas de 24 horas por meio do fator de multiplicação 1,14 (CETESB / ASCETESB, 1986). A utilização desse fator se deve ao fato de que os dados de chuva diários de uma estação pluviométrica são obtidos de leituras diárias de pluviômetros em certa hora do dia. Essa leitura corresponde ao valor compreendido entre os horários de observação pluviométrica, enquanto a precipitação de 24 h é o maior valor de chuva correspondente a um período consecutivo de 24 horas, não necessariamente coincidente com o período de observação.

Conforme apresentado nas revisão bibliográfica, Weiss (1964 apud WMO, 2009) preconizou ajustes das precipitações obtidas por intervalos fixos de observação (Figura 23), portanto, utilizou-se o fator de 1,04 para as estações INMET convencionais, que monitoram parâmetros climáticos 3 vezes ao dia (horários sinópticos 00h, 12h e 18h UTC), e para as estações INMET automáticas, que monitoram parâmetros climáticos a cada hora, o fator utilizado foi de 1,005.

Portanto, com os 52 postos pluviométricos foram elaboradas Envoltórias Regionais dos fatores de frequência locais, nas durações de 24 horas, 3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias, da localidade equatorial/tropical, quente e úmida onde se encontra Barcarena/PA e cidades vizinhas, seguindo as diretrizes do trabalho de Sarkar e Maity (2020) para PMP_s Estatísticas. A partir disso, foi possível associar as médias das precipitações máximas anuais de Estação VILA DO CONDE (00148011) aos K_s extraídos dessa Envoltória Regionalizada.

Outro produto extraído com a coletânea de 52 postos pluviométricos foi a simulação sintética dos fatores de frequência, com base nos ajustes das distribuições de extremos que geraram diversas trajetórias seriais, e que se pôde associar a um percentil. Detalhes desse processo serão abordados no item 5.3.

Apresenta-se, a seguir, as etapas para a construção das Envoltórias Regionalizadas conforme Sarkar e Maity (2020). Cita-se que o passo a passo faz referência a figuras e equações já apresentadas na revisão bibliográfica.

1) Cálculo das médias e desvios padrões das séries de precipitações selecionadas para a região em estudo, por duração analisada;
2) Ajuste dos valores de médias e desvios padrões devido à presença de *outliers*, bem como pelo tamanho da série, por meio da Figura 16;
3) Cálculo dos fatores de frequências locais segundo a Equação (22) e elaboração da Envoltória Regionalizada conforme diretrizes de Sarkar e Maity (2020), ou seja, com patamar constante até o máximo *K* local e decaimento exponencial similar aos trabalhos de Hershfield, sendo que a abcissa representa às médias ajustadas;
4) Por fim, estimar a PMP por meio da Equação (21), sendo que o *K* deve ser obtido das Envoltórias Regionais no passo 3.

5.2 Delimitação e seleção das estações meteorológicas

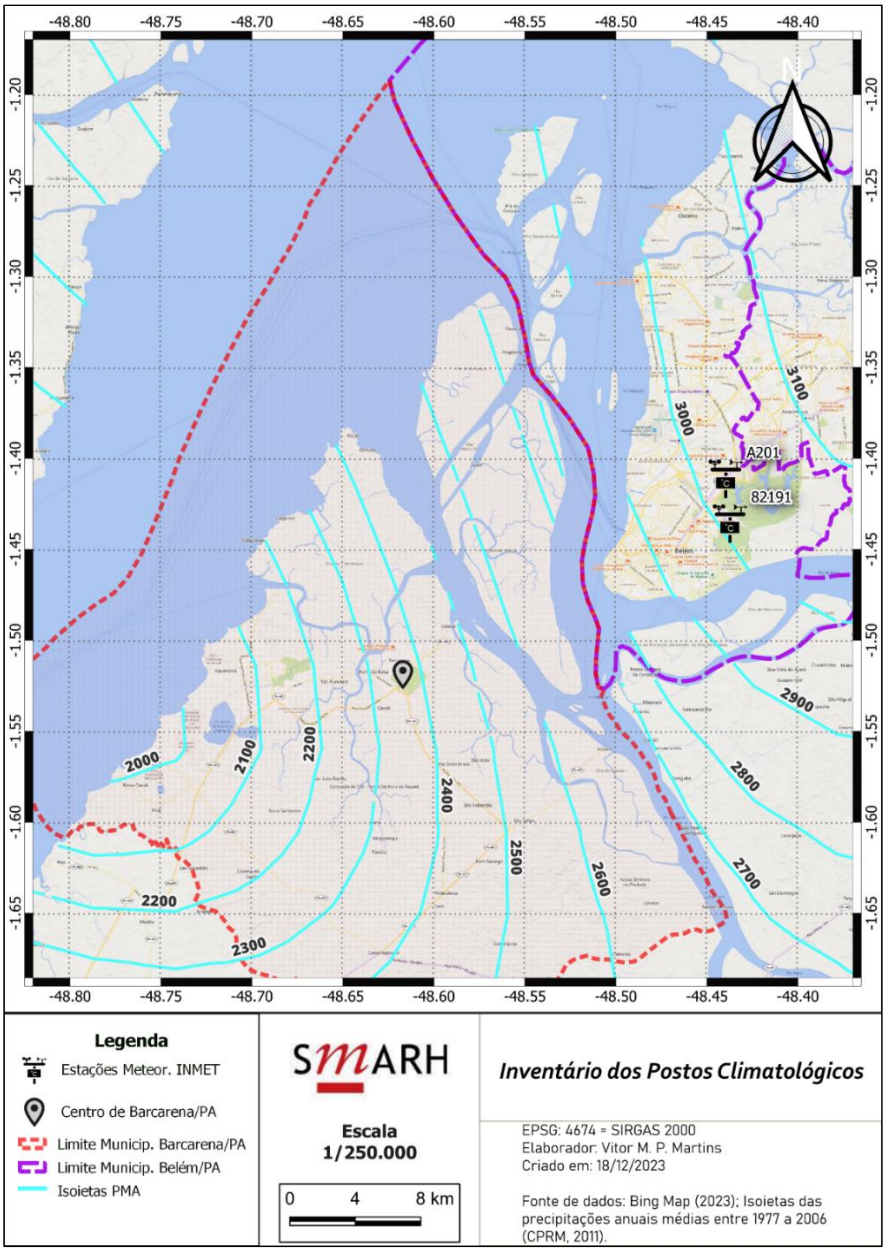
Dado todo o contexto climatológico enfocado nos fenômenos localizados sobre Barcarena/PA, e na premissa de se escolher estações climatológicas entre a fonte alimentadora de umidade e a região de interesse (WMO, 2009), seria interessante que houvesse estações meteorológicas dentro dos limites municipais (de preferência próximas ao litoral/Baia de Marajó), com a possibilidade, então, de se obter dados mais precisos de temperatura do ar, umidade média do ar e ponto de orvalho durante a formação das tormentas.

No entanto, não há postos meteorológicos cadastrados dentro de Barcarena/PA, segundo o INMET, mas sim logo no município fronteiriço de Belém/PA que pode sofrer tormentas oriundas das mesmas fontes de umidade da primeira, dado à sua similar posição geográfica no globo, questões convectivas e praticamente os mesmos corpos hídricos envolvidos. Logo, foram selecionadas estações climatológicas mais próximas possíveis de Barcarena que estão localizadas na capital do estado, Belém/PA, com códigos “A201” e “82191”. A Tabela 6 abaixo apresenta, em resumo, algumas informações acerca destas estações. Há uma estação de código “82193” no banco de dados do INMET que se encontra em Belém/PA, todavia não apresentou dados e não foi considerada. A Figura 54 apresenta, espacialmente, os dois postos climatológicos utilizados no estudo.

Tabela 6 - Características básicas das 2 estações meteorológicas.
[1] Coordenadas geográficas em SIRGAS 2000

Estação	Código	Operador	Coordenadas Geográficas [1]		Altim. média (m)	Período de Dados	Anos Hidrol. Consolidados	Distância à Barcarena (km)
			Lat.	Long.				
Belém/PA	82191	INMET	-1,436°	-48,437°	7	1961 a 2022	62	22
Belém/PA	A201	INMET	-1,411°	-48,440°	21	2003 a 2022	20	23

Figura 54 - Exposição dos dois postos climatológicos INMET utilizados no estudo



Fonte: conforme indicado.

A Estação Pluviométrica de VILA DO CONDE (00148011) foi o posto de referência para Barcarena/PA dentro do Método Hidrometeorológico, ou seja, ela se apresentou

como a fonte da obtenção das alturas de chuvas históricas que foram majoradas para a estimativa da PMP, seguindo a metodologia apresentada pela WMO (2009), para as durações de 24 horas, 3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias.

As variáveis climatológicas selecionadas foram a temperatura do ar, umidade relativa do ar, temperatura de bulbo úmido, precipitação e temperatura de ponto de orvalho das estações meteorológicas de referência. Inicialmente, selecionou-se estes atributos climáticos entre os meses de janeiro a junho, também conhecido como Inverno Amazônico (época mais chuvosa), onde ocorre uma gama maior de chuvas intensas durante o ano. No entanto, foi verificado que algumas precipitações máximas históricas estavam alocadas em julho a dezembro e eram bem representativas para as durações críticas analisadas, logo, houve a necessidade de criar uma janela temporal alternativa para estes eventos dentro destes meses citados. Essa estimação com duas janelas temporais diferentes é necessária, especificamente para Barcarena e região metropolitana de Belém, porque, como já explicado anteriormente, esses locais sofrem com vários mecanismos climáticos atuantes e precipitações intensas ao longo do ano. Portanto, além de selecionar estes atributos climatológicos entre os limites sazonais de janeiro a junho, criou-se uma janela temporal paralela de julho a dezembro, de forma trazer um rigor maior nas estimativas hidromeoteorológicas.

Com relação à máxima temperatura do ponto de orvalho persistente, $T_{dew\ point_{máx-persist}}$, foi determinado o uso da persistência por 24 horas para todas as durações utilizadas na estimativa da PMP Hidrometeorológica (24 horas a 30 dias), conforme também utilizado por Pinheiro (2011). Segundo a WMO (2009), caso a estação climatológica tenha uma extensão temporal igual ou superior a 50 anos (como é o caso do posto meteorológico INMET “82191”), é possível obter, como representativo da estação, o máximo valor histórico persistente por 24 horas varrendo os registros temporais. Na ausência da estação meteorológica possuir uma série temporal menor do que 50 anos (como é o caso do posto meteorológico INMET “A201”), é recomendação da WMO (2009) estimar a $T_{dew\ point_{máx-persist-24h}}$, temperatura do ponto de orvalho persistente por 24 horas, através de um quantil associado a um tempo de retorno de 100 anos. Assim sendo, somente para a “A201”,

determinou-se o uso do TR 100 anos utilizando a distribuição de probabilidades Gumbel (Máximos), conforme apresentado na Equação (25).

$$
\begin{gathered}
FAP: F_x(\mathrm{x}) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{y-\beta}{\alpha}\right)\right] \\
Inversa\ FAP: y(TR) = \beta - \alpha * ln\left[-ln\left(1-\frac{1}{TR}\right)\right] \\
Média: E[Y] = \beta + 0{,}5772 * \alpha \\
Variância: Var[Y] = \sigma_Y^2 = \frac{\pi^2 * \alpha^2}{6}
\end{gathered}
\tag{25}
$$

Onde:

FAP: função acumulada de probabilidade da variável aleatória X;

α: parâmetro de escala;

β: parâmetro de posição;

TR: Tempo de Retorno em anos.

Apresenta-se, a seguir, as etapas para estimar a PMP Hidrometeorológica. Cita-se que os detalhes estão apresentados na revisão bibliográfica.

1) Se a estação climatológica possuir 50 anos ou mais de dados, identificar o máximo ponto de orvalho persistente por 24 horas no nível da estação. Caso não, estimar o quantil TR 100 anos do máximo ponto de orvalho persistente por 24 horas no nível da estação;
2) Rebater o máximo ponto de orvalho persistente por 24 horas para o nível do mar (1.000 hPa) utilizando a Figura 4;
3) Selecionar os eventos chuvosos, por duração, a serem maximizados e delimitar os pontos de orvalho representativos persistentes por 24 horas das precipitações analisadas;
4) Rebater os pontos de orvalho representativos persistentes por 24 horas para o nível do mar (1.000 hPa) utilizando a Figura 4;
5) Consultando a Tabela A.1 do ANEXO A, obter a máxima água precipitável representativa já registrada na localidade utilizando a temperatura obtida no

passo 2. Consultando novamente a Tabela A.1 do ANEXO A, obter a água precipitável estimada representativa para a precipitação histórica analisada utilizando a temperatura obtida no passo 4. Desse modo, calcular o γ_1 pelo quociente das duas águas precipitáveis calculadas nesse passo;

6) Avaliar a necessidade dos fatores $\gamma_2, \gamma_3 \; e \; \gamma_4$;
7) Calcular a PMP Hidrometeorológica por meio da Equação (1).

5.3 Sorteio de variaveis aletórias de máximos anuais de precipitação

Entende-se que, máximos anuais de precipitações tendem a serem independentes, ou seja, que nenhuma observação existente na amostra pode influenciar a ocorrência de qualquer observação subsequente. Testes não-paramétricos, como o proposto por Wald e Wolfowitz (1943) e Turning Points, apresentado na literatura de Brockwell e Davis (2002), verificam a condição de rejeitar ou não a hipótese de independência das possíveis variáveis aleatórias da amostra. Apresentam-se, como alternativa, os testes de autocorrelação e autocorrelação parcial dos termos da série histórica. O intuito é verificar algum grau de autocorrelação entre as séries com defasagens de ordem 1, 2, 3 e etc. Se houver autocorrelação entre os termos da série, indica-se o uso de modelos ARMA, caso contrário, a hipótese de dados históricos independentes aponta para o uso de simulações sintéticas a partir de distribuições de extremos alimentados por números pseudoaleatórios (CHATFIELD, 2001; METCALFE e COWPERTWAIT, 2009).

Quando os dados de precipitações são considerados independentes e estacionários, usa-se modelos de simulação que integram o MMC com números pseudoaleatórios, que são sorteados entre 0 e 1, para representar a probabilidade de excedência (ou não excedência) de uma distribuição estatística e, assim, extrair quantis correspondentes a estes. Ou seja, com base na estatística descritiva das séries temporais históricas, é possível estimar parâmetros de distribuições aderentes aos dados e, assim, gerar *"m"* trajetórias de extensão "*n"*, com "*n"* igual ao tamanho a série histórica. Manipula-se então, não apenas uma trajetória (a histórica), mas *m* trajetórias simuladas com as características estatísticas preservadas da série original.

Assim sendo, a partir das séries históricas pluviométricas selecionadas e tratadas, seguiu-se com as estimativas dos fatores de frequência sintéticos através do MMC acoplado com a geração aleatória de trajetórias seriais auxiliadas por uma distribuição de probabilidades que se ajustasse aos dados máximos diários anuais de cada uma das estações aptas. Os parágrafos na sequência darão mais detalhes do processo.

Foi necessário realizar a análise de frequência local (AFL) das séries históricas para a seleção do modelo probabilístico. A AFL assume como hipótese a independência, homogeneidade, aleatoriedade e estacionariedade dos dados. As hipóteses de Independência, Homogeneidade e Aleatoriedade foram, respectivamente, avaliadas pelos testes não-paramétricos de Wald e Wolfowitz (1943), Mann e Whitney (1947) e NERC (1975), descritos em Naghettini e Pinto (2007) e apresentados no **APÊNDICE D**, sob um nível de significância de 5%. A hipótese de estacionariedade foi avaliada pelo teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975; KENDALL e GIBBONS, 1990), também sob um nível de significância de 5%, com os pormenores descritos em artigos de Hipel e McLeod (1994) e Libiseller e Grimvall (2002) e disponibilizado também no **APÊNDICE D.**

Aquelas séries históricas que apresentaram tendência diária, isto é, rejeitarem a hipótese nula do teste de Mann-Kendall, não foram eliminados da análise, pelo contrário, tiveram suas tendências retiradas por um modelo linear e foram utilizadas na AFL. O modelo linear utilizado foi do tipo $y = a + bx$, onde a variável dependente "x" representava o índice temporal, de 1 a n, e a variável dependente "y" as alturas de chuvas máximas anuais históricas em ordem cronológica.

As distribuições probabilísticas candidatas para o ajuste foram Exponencial (exp), Gama (gam), Generalizada de Pareto (gpa), Generalizada Logística (glo), GEV (gev), Gumbel (gum), Log-Normal (ln2), Log-Normal-3P (ln3), Log-Pearson-III (lp3) e Pearson-III (pe3). Os parâmetros das distribuições teóricas de probabilidades candidatas foram calculados pelo método dos momentos-L, descritos em Hosking e Wallis (1997) e em Naghettini e Pinto (2007), com os detalhes das funções apresentados no **APÊNDICE E**. A aderência da distribuição teórica candidata à curva da distribuição empírica foi avaliada pelo teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (disponível em Naghettini e Pinto (2007) e apresentado no **APÊNDICE E)**, a

5% de significância, RMSE entre o quantil empírico e o teórico (Equação (26)), além de uma análise visual do ajuste gráfico.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i^{empir} - Y_i^{teórico})^2}{n}} \quad (26)$$

Onde:

$Y_i^{teórico}$: quantil teórico *"i"*;

Y_i^{empir}: quantil empírico *"i"*;

n: número total de observações.

A ideia do Método de Monte Carlo (MMC) foi constituída da seguinte maneira para presente estudo: foram selecionadas as distribuições de probabilidades que melhor se aderem às séries dos máximos diários anuais, e sorteadas 5.000 variáveis aleatórias de comprimentos iguais a extensão serial de cada estação. Para tanto foi utilizado a biblioteca ***lmom*** da linguagem de programação ***R*** para calcular as inversas das distribuições selecionadas empregando os parâmetros calculados a partir dos dados das séries históricas. Além disso, a função ***runif()*** foi utilizada para gerar um número pseudoaleatório randômico entre 0 e 1, e desse modo, alimentou-se as inversas das distribuições probabilísticas para geração das séries sintéticas. Todo esse processo do MMC foi feito para os máximos anuais das durações de 24 horas, 3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias.

No caso das séries históricas diárias que tiveram a hipótese nula rejeitada no teste de Mann-Kendall, as características de não-estacionariedade presentes anteriormente foram retornadas às variáveis aleatórias sorteadas, para que estas permaneçam com suas tendências históricas conservadas para a próxima etapa. Prezou-se por devolver a mesma conformação linear da tendência conforme se apresentou nos dados históricos, isto é, cada uma das 5.000 trajetórias sintéticas geradas pela série histórica que teve a sua tendência retirada pôde receber a tendência linear somadas a seus quantis.

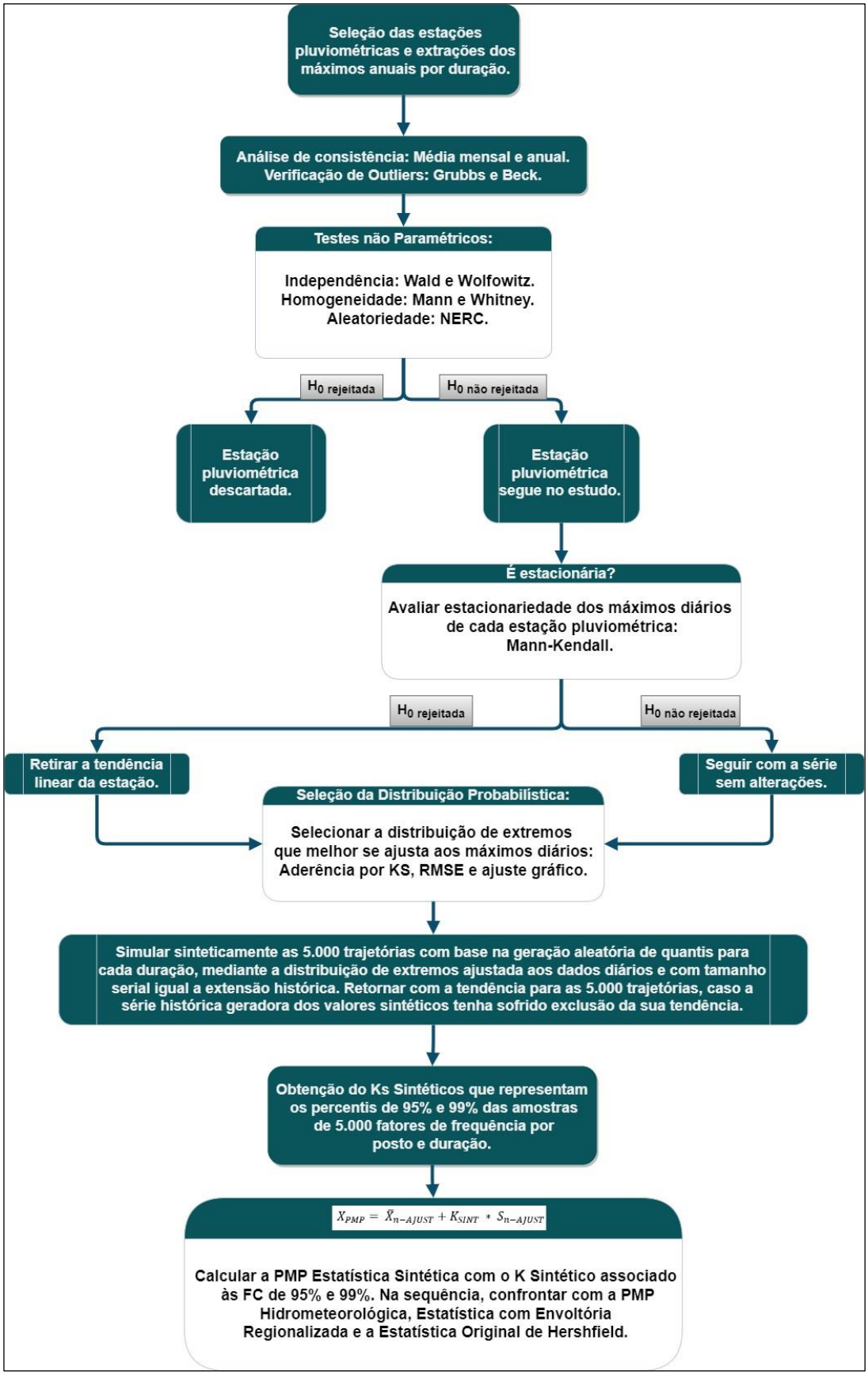
O passo subsequente foi, com base na Equação (22), calcular os fatores de frequência locais das 5.000 variáveis aleatórias sorteadas a partir da distribuição de probabilidades selecionada para a estação pluviométrica. De forma que se associou a cada estação pluviométrica uma amostra de 5.000 valores de K_S. Em seguida, considerando as amostras dos fatores de frequência, separaram-se os fatores de frequência associados aos percentis 95% e 99% para cada estação pluviométrica.

$$K = \frac{X_{máx} - \bar{X}_{n-1}}{S_{n-1}} \qquad \text{Repetição da Eq. (22)}$$

Finalmente, foi realizado o confronto dos K_S simulados estimados a partir do emprego do MMC, e as respectivas PMP_S Estatísticas Sintéticas (utilizando a Equação (21)), com os resultados advindos da PMP Hidrometeorológica e a PMP Estatística com Envoltória Regionalizada conforme Sarkar e Maity (2020). A Figura 55 apresenta um fluxograma explicando as etapas do modelo de simulação proposto.

$$X_{PMP} = \bar{X}_n + K_m * S_n \qquad \text{Repetição da Eq. (21)}$$

Figura 55 – Fluxograma da metodologia do modelo de simulação do *K* sintético



Fonte: autoria própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

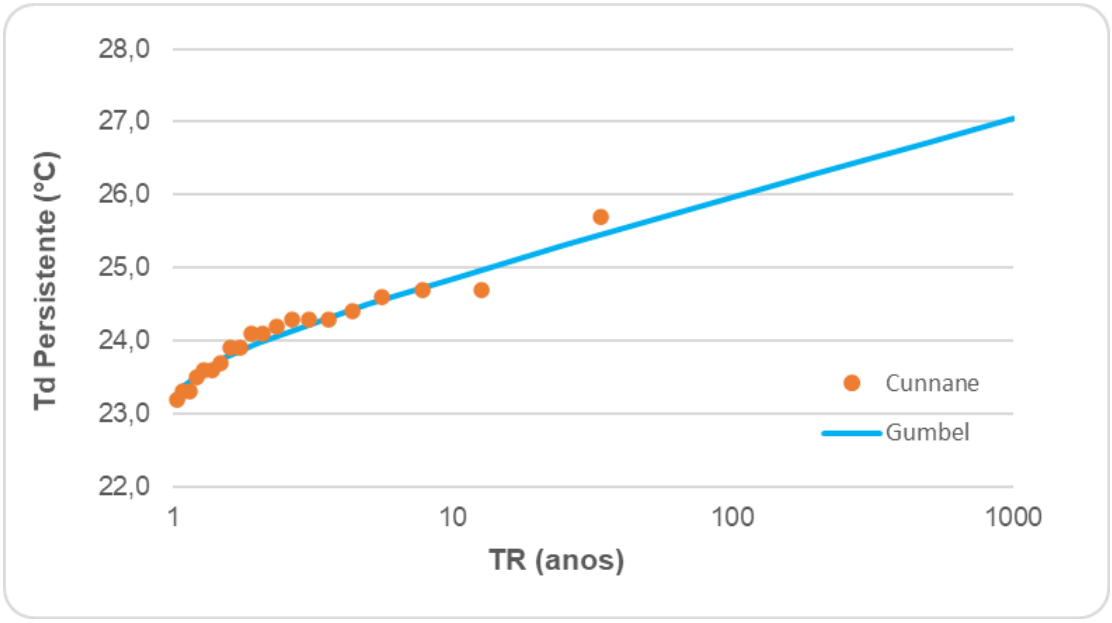
De forma a proporcionar uma melhor didática nesse item, foram expostos, inicialmente, os dois métodos mais consolidados na literatura quanto a temática PMP, ou seja, o Método Hidrometeorológico no item 6.1 e o Método Estatístico associado a Envoltória Regionalizada no item 6.2. Finalmente, no item 6.3 foi abordado simulação sintética dos fatores de frequência e as discussões associadas.

Em linhas gerais, o intuito foi avaliar e discorrer acerca da validade (ou não) dos métodos apresentados frente a uma localidade equatorial, quente e úmida no Norte do Brasil, como é Barcarena/PA, principalmente sobre a nova perspectiva apresentada neste trabalho que é sortear aleatoriamente o K através, e unicamente, pelas distribuições de extremos.

6.1 Método Hidromeoteorológico

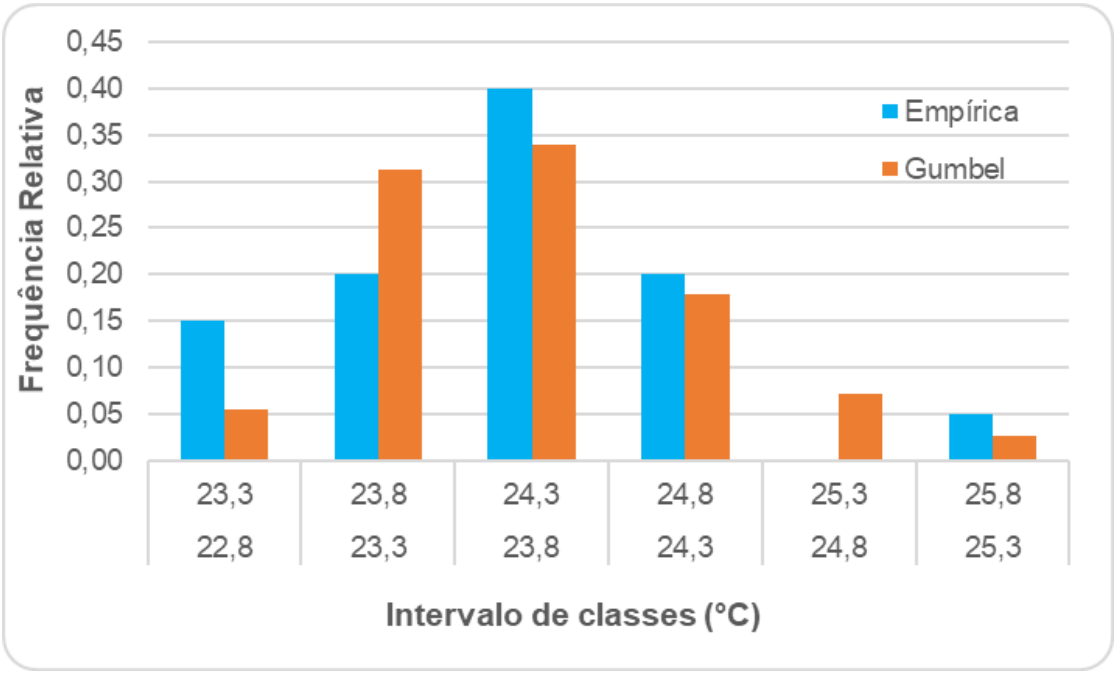
Primeiramente, identificou-se os máximos pontos de orvalho persistente por 24 horas no nível da estação para cada uma das sazonalidades delimitadas: Inverno Amazônico (janeiro a junho) e Verão Amazônico (julho a dezembro). Como a estação meteorológica INMET “82191” possui mais do que 50 anos de dados, foi necessário apenas identificar os máximos registros de pontos de orvalhos persistentes por 24 horas nas duas janelas temporais definidas. Já para a estação meteorológica INMET “A201”, por esta ter uma extensão temporal menor do que 50 anos, foi fundamental ajustar uma curva probabilística aos dados históricos de máximos anuais dos pontos de orvalhos persistentes por 24 horas, nas janelas do Inverno Amazônico (Figura 56 e Figura 57), assim como para o Verão Amazônico (Figura 58 e Figura 59).

Figura 56 - Ajuste entre a distribuição teórica de Gumbel (MOM) e a empírica de Cunnane para os pontos de orvalho persistentes de 24 horas do Inverno Amazônico da estação meteorológica do INMET "A201"



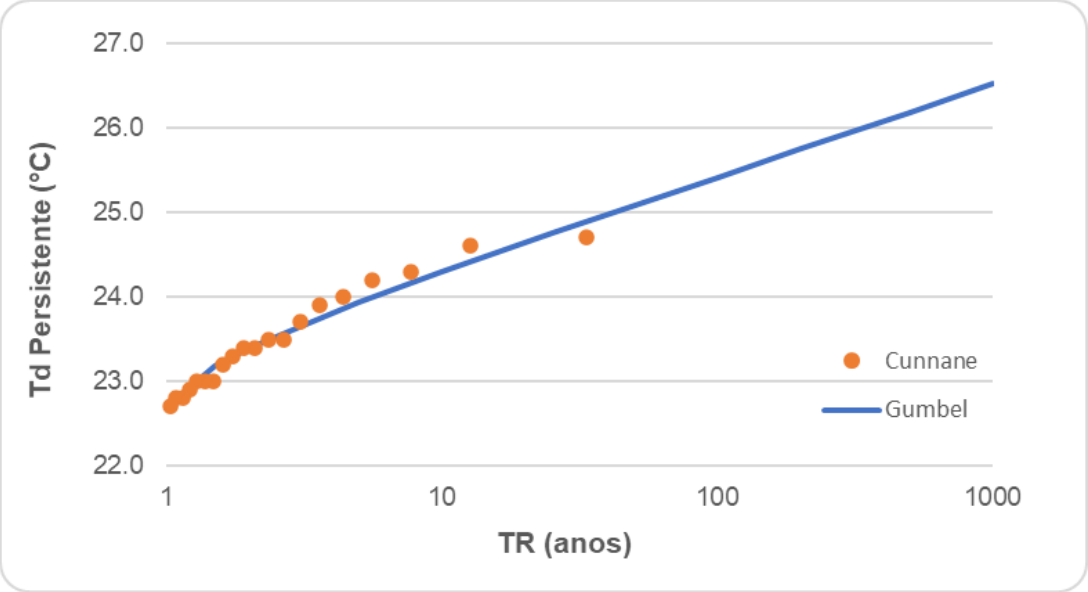
Fonte: autoria própria.

Figura 57 - Histograma comparativo entre os pontos de orvalho persistentes por 24 horas, ocorridos no Inverno Amazônico da estação meteorológica do INMET "A201", e as estimativas da distribuição probabilística de Gumbel (MOM)



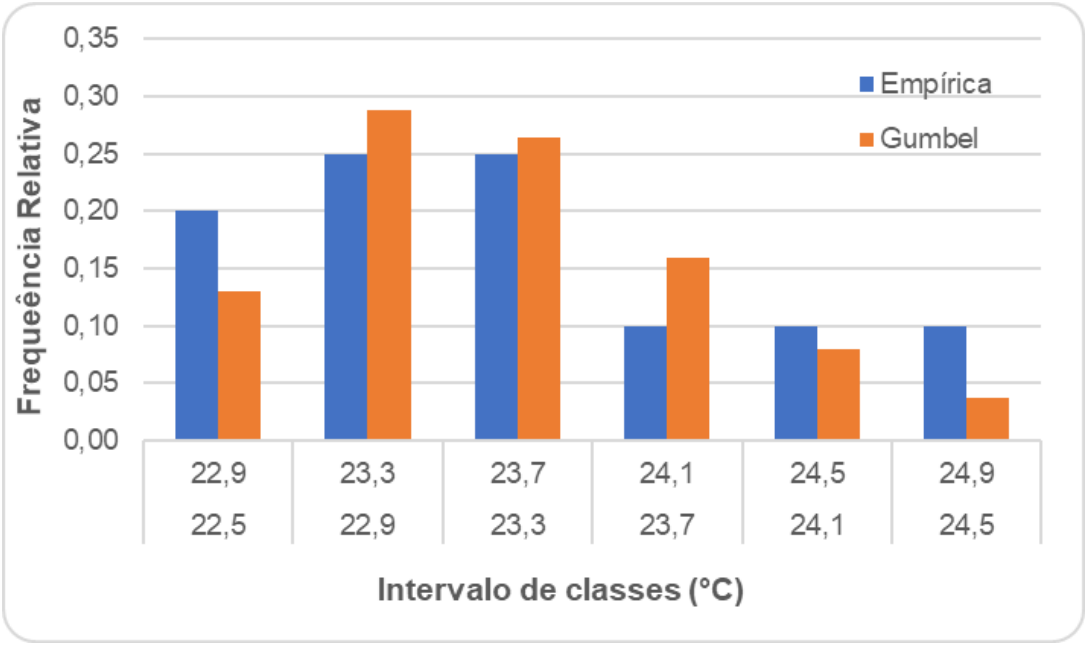
Fonte: autoria própria.

Figura 58 - Ajuste entre a distribuição teórica de Gumbel (MOM) e a empírica de Cunnane para os pontos de orvalho persistentes de 24 horas do Verão Amazônico da estação meteorológica do INMET "A201"



Fonte: autoria própria.

Figura 59 - Histograma comparativo entre os pontos de orvalho persistentes por 24 horas, ocorridos no Verão Amazônico da estação meteorológica do INMET "A201", e as estimativas da distribuição probabilística de Gumbel (MOM)



Fonte: autoria própria.

Toda as $T_{dew\ point_{máx-persist-24h}}$ foram rebatidas ao nível do mar (1.000 hPa), conforme preconizado pela WMO (2009) para utilização da tabela de água precipitável **(ANEXO A).**

A Tabela 7 expõe os pontos de orvalhos máximos persistentes por 24 h para cada estação meteorológica selecionada.

Tabela 7 – Valores máximos históricos da temperatura do ponto de orvalho persistente por 24 horas rebatido a 1.000 hPa

Estação Meteorológ.	Quantidade de anos disponíveis	Data Máxima Persistência	Altim. média (m)	$T_{dew\ point_{máx-persist-24h}}$ (°C)	
				Nível Estação	1.000 hPa
82191 (Belém/PA)	62 anos – Inverno Amazônico	29/01/1964	7	27,6	**27,6**
82191 (Belém/PA)	62 anos – Verão Amazônico	26/12/2019		26,0	**26,0**
A201 (Belém/PA)	20 anos – Inverno Amazônico	-	21	26,0 (TR 100)	**26,0**
A201 (Belém/PA)	20 anos – Verão Amazônico	-		25,4 (TR 100)	**25,4**

Fonte: autoria própria.

6.1.1 Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 24 horas

Através da estação pluviométrica VILA DO CONDE (00148011), foram selecionadas precipitações de referência para a estimação das PMP Hidrometeorológica pontual de 24 horas para Barcarena/PA, as quais estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Eventos pluviométricos selecionados como referência para o cálculo da PMP de 24 horas

Estação Pluviométrica	Altitude	Data Evento Pluviométrico	$P_{1\ dia}$ (mm)	$P_{24\ horas}$ (mm)
VILA DO CONDE (00148011)	El. 17,0 m	25/01/2014	188,3	**214,7**
VILA DO CONDE (00148011)	El. 17,0 m	16/09/2012	199,1	**227,0**

Fonte: autoria própria.

Quanto aos pontos de orvalhos representativos da precipitação, foram obtidas informações dentro da faixa de, no mínimo, 24 horas antes e depois da tormenta. A Tabela 9 expõe as temperaturas do ponto de orvalho nos horários sinóticos (00 h, 12 h e 18 h UTC +0), registradas nas estações meteorológicas consideradas representativas do fluxo de umidade que alimenta a precipitação, no nível da estação. Após isso, há a determinação do ponto de orvalho persistente por 24 horas, $T_{dew\ point_{24h}}$, e o ponto de orvalho representativo persistente por 24 horas, $T_{dew\ point_{repr-24h}}$. Por fim, delimita-se o ponto de orvalho representativo persistente por

24 horas rebatido a 1.000 hPa ($T_{dew\ point_{repr-24h-1000}}$), que neste caso é igual ao $T_{dew\ point_{repr-24h}}$ dada a proximidade altimétrica de Barcarena/PA para com o oceano.

Tabela 9 – Valores das temperaturas dos pontos de orvalho representativos persistentes por 24 horas dos eventos pluviométricos de referência em 1.000 hPa, medidos em °C

Evento pluviométrico 214,7 mm (24 h): 25/01/2014 (VILA DO CONDE - 00148011)						
Data	Hora UTC (h)	Chuva Ref. (mm)	Estação Meteorol. 82191 (Belém)		Estação Meteorol. A201 (Belém)	
			$T_{dew\ point}$	$T_{dew\ point_{24h}}$	$T_{dew\ point}$	$T_{dew\ point_{24h}}$
24/01/2014	00:00	-	23,8	-	22,7	-
24/01/2014	12:00	-	25,4	-	25,0	-
24/01/2014	18:00	10,6	25,4	21,4	21,7	21,7
25/01/2014	00:00	-	21,4	21,4	22,6	21
25/01/2014	12:00	-	23,5	21,4	21,0	21
25/01/2014	18:00	214,7	23,5	21,4	21,8	21
26/01/2014	00:00	-	24,1	23,5	22,5	21
26/01/2014	12:00	-	24,0	23,5	23,0	21,7
26/01/2014	18:00	67,4	23,9	23,8	21,7	20,9
27/01/2014	00:00	-	23,8	-	20,9	-
$T_{dew\ point_{repr-24h}} = T_{dew\ point_{repr-24h-1000}}$			**23,5**		**22,6***	
Evento pluviométrico 227,0 mm (24 h): 16/09/2012 (VILA DO CONDE - 00148011)						
Data	Hora UTC (h)	Chuva Ref. (mm)	Estação Meteorol. 82191 (Belém)		Estação Meteorol. A201 (Belém)	
			$T_{dew\ point}$	$T_{dew\ point_{24h}}$	$T_{dew\ point}$	$T_{dew\ point_{24h}}$
15/09/2012	00:00	-	25,0	-	23,9	-
15/09/2012	12:00	-	24,7	-	23,7	-
15/09/2012	18:00	11,3	23,3	23,3	21,6	21,6
16/09/2012	00:00	-	24,1	23,3	22,6	21,6
16/09/2012	12:00	-	23,8	23,3	23,1	21,6
16/09/2012	18:00	227,0	26,0	23,8	24,0	22,6
17/09/2012	00:00	-	24,1	23,8	22,6	22,6
17/09/2012	12:00	-	23,8	23,8	23,1	22,5
17/09/2012	18:00	0,0	26,7	22,8	22,5	21,3
18/09/2012	00:00	-	22,8	-	21,3	-
$T_{dew\ point_{repr-24h}} = T_{dew\ point_{repr-24h-1000}}$			**23,8**		**22,0***	

Fonte: autoria própria.

*Como a Estação A201 é automática (medições horárias), foram analisados também os dados de ponto de orvalho contidos em cada hora, ao invés de somente analisar os horários sinóticos (00 h, 12 h e 18 h UTC +0).

Na sequência, foram calculados os fatores e maximização da umidade das precipitações de referência de 24 horas, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Razão de maximização da umidade (γ_1) dos eventos de referência de 24 horas

Evento pluviométrico 214,7 mm: 25/01/2014 (Vila do Conde); Altitude média: El. 17,0 m		
Variável	**82191 (Belém)**	**A201 (Belém)**
$T_{dew\ point_{repr-24\ h-1000}}$	23,5	22,6
$W_{El.\ Região-300\ _{repr}}$ (mm)	71,00	65,50
$T_{dew\ point_{máx-persist-24h-1000}}$	27,6	26,0
$W_{El.\ Região-300\ _{máx}}$(mm)	100,90	88,00
γ_1	1,42	1,34
γ_1 máx	**1,42**	
PMP 24 h (mm)	**304,8**	
Evento pluviométrico 227,0 mm: 16/09/2012 (Vila do Conde); Altitude média: El. 17,0 m		
Variável	**82191 (Belém)**	**A201 (Belém)**
$T_{dew\ point_{repr-24\ h-1000}}$	23,8	22,0
$W_{El.\ Região-300\ _{repr}}$ (mm)	72,98	62,10
$T_{dew\ point_{máx-persist-24h-1000}}$	26,0	25,4
$W_{El.\ Região-300\ _{máx}}$(mm)	88,00	83,60
γ_1	1,21	1,35
γ_1 máx	**1,35**	
PMP 24 h (mm)	**306,4**	

Fonte: autoria própria.

Por fim, a Tabela 11 apresenta o resumo do cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 24 horas para Barcarena/PA

Tabela 11 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 24 horas para Barcarena/PA

Estação Pluviom.	**Período Evento Chuvoso (UTC -3)**	**P (mm)**	**γ_1 máx**	**$PMP_{24\ horas}$ (mm)**
VILA DO CONDE (00148011)	24/01/2014 às 07:00 à 25/01/2014 07:00	214,7	1,42	304,8
VILA DO CONDE (00148011)	15/09/2012 às 07:00 à 16/09/2012 07:00	227,0	1,35	**306,4**

Fonte: autoria própria.

Efeitos orográficos (γ_2) não se aplicam à Barcarena/PA devido à baixa intensidade da velocidade dos ventos e inexistências de grandes barreiras físicas para a movimentação das massas de umidade. Observando a Figura 13, dentro do item 3.1.3

acerca dos efeitos de zona tropical (γ_3), a região é próxima ao nível do mar, se caracterizando por baixas altitudes e pequena declividade média, não sendo considerado nenhum acréscimo ou decréscimo no valor estimado da PMP Hidrometeorológica. E quanto à transposição (γ_4), não foi necessário o uso desse fator para as estimativas apresentadas.

Desse modo, foi adotada como a PMP Hidrometeorológica pontual com duração de 24 horas para Barcarena/PA a maior estimativa apresentada na Tabela 11, que é o valor de 306,4 mm.

6.1.2 Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual para durações superiores a 24 horas

Para as durações acima de 24 horas seguiu-se com o mesmo procedimento metodológico destacado para a PMP de 24 horas, onde foram selecionadas as precipitações de referência e foram calculados os fatores de maximização da umidade. Reforça-se que, foi também adotado a temperatura do ponto de orvalho persistente por 24 horas para as durações de 3 dias a 30 dias (WMO, 2009; PINHEIRO, 2011).

Entre a Tabela 12 e Tabela 16 são apresentados os resumos das estimativas das PMP_S pontuais Hidrometeorológicas de 3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias.

Tabela 12 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 3 dias para Barcarena/PA

Estação Pluviom.	Período Evento Chuvoso (UTC -3)	P (mm)	γ_1 máx	$PMP_{3\ dias}$ (mm)
VILA DO CONDE (00148011)	24/01/2014 às 07:00 à 27/01/2014 às 07:00	256,7	1,45	372,2
VILA DO CONDE (00148011)	03/04/2019 às 07:00 à 06/04/2019 às 07:00	262,6	1,28	336,1
VILA DO CONDE (00148011)	02/09/2012 às 07:00 à 05/09/2012 às 07:00	323,3	1,36	**439,7**

Fonte: autoria própria.

Tabela 13 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 5 dias para Barcarena/PA

Estação Pluviom.	Período Evento Chuvoso (UTC -3)	P (mm)	γ_1 máx	$PMP_{5\ dias}$ (mm)
VILA DO CONDE (00148011)	30/03/2014 às 07:00 à 04/04/2014 às 07:00	329,8	1,33	438,6
VILA DO CONDE (00148011)	01/09/2012 às 07:00 à 06/09/2012 às 07:00	337,7	1,36	**459,3**

Fonte: autoria própria.

Tabela 14 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 10 dias para Barcarena/PA

Estação Pluviom.	Período Evento Chuvoso (UTC -3)	P (mm)	γ_1 máx	$PMP_{10\ dias}$ (mm)
VILA DO CONDE (00148011)	30/03/2014 às 07:00 à 09/04/2014 às 07:00	551,6	1,33	**733,6**

Fonte: autoria própria.

Tabela 15 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 15 dias para Barcarena/PA

Estação Pluviom.	Período Evento Chuvoso (UTC -3)	P (mm)	γ_1 máx	$PMP_{15\ dias}$ (mm)
VILA DO CONDE (00148011)	30/03/2014 às 07:00 à 14/04/2014 às 07:00	755,8	1,33	**1.005,2**

Fonte: autoria própria.

Tabela 16 – Cálculo da PMP Hidrometeorológica pontual de 30 dias para Barcarena/PA

Estação Pluviom.	Período Evento Chuvoso (UTC -3)	P (mm)	γ_1 máx	$PMP_{30\ dias}$ (mm)
VILA DO CONDE (00148011)	25/03/2014 às 07:00 à 24/04/2014 às 07:00	1.126,3	1,33	**1.498,0**

Fonte: autoria própria.

Portanto, as máximas PMP_s pontuais calculadas pelo Método Hidrometeorológico para as durações acima de 24 horas estão apresentadas, resumidamente, na Tabela 17.

Tabela 17 – Resumo das estimativas das PMP_s pontuais Hidrometeorológicas para durações superiores a 24 horas em Barcarena/PA

Duração	3 dias	5 dias	10 dias	15 dias	30 dias
PMP (mm)	439,7	459,3	733,6	1.005,2	1.498,0

Fonte: autoria própria.

É citado pela WMO (2009) que, o Método Hidrometeorológico é apropriado para bacias hidrográficas com até 50.000 km² em regiões não-orográficas e 13.000 km² em regiões com efeitos orográficos, sendo que se utiliza esse método para durações de chuva de até 3 dias. Desse modo, os resultados encontrados na Tabela 17 para durações de 5 a 30 dias devem ser avaliados com atenção, apesar de que, as pesquisas de Pinheiro (2011) e Carvalho (2000) motivaram a presente dissertação a avaliar também durações superiores a 3 dias, já que eles implementaram em seus respectivos estudos. Em resumo, adotou-se o mesmo critério de pesquisadores anteriores.

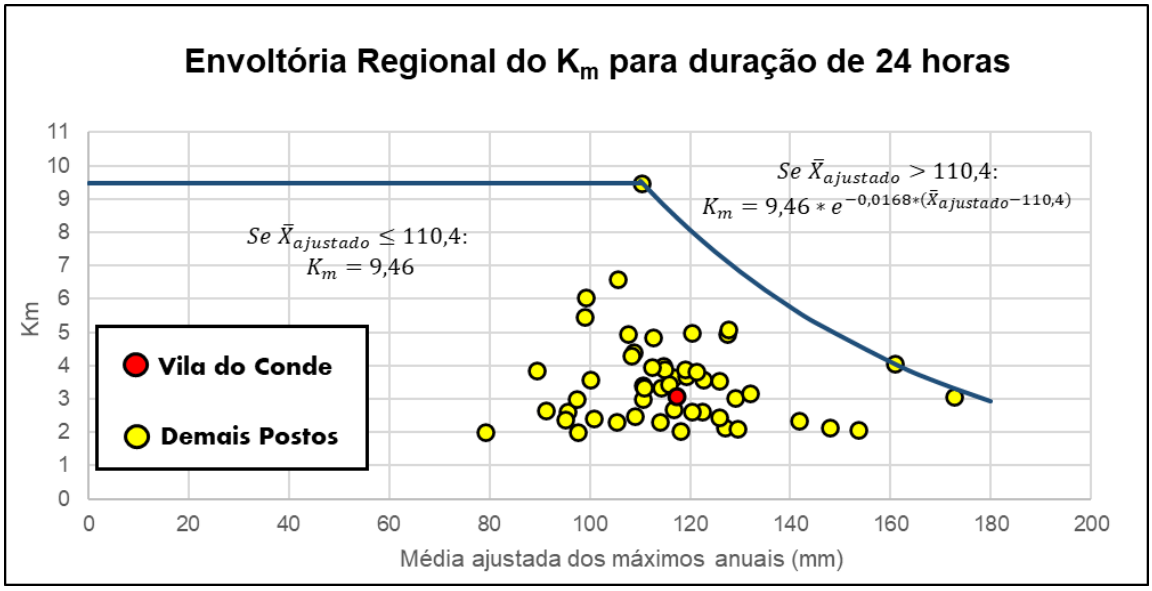
Presume-se que, esse ponto de atenção da WMO (2009) está ligado ao fato de que os estudos de referência inseridos no manual não avançaram nessas questões, deixando uma lacuna científica a ser explorada. Portanto, a mensagem interpretada é que, pode não ser uma imposição científica bem fundamentada, mas sim uma fronteira ainda não bem examinada.

Em suma, medita-se que, por mais que se tenha um sentido físico no método, como também equações e premissas que regem os fenômenos atmosféricos, ainda sim tornam-se incipientes as estimativas frente a necessidade de ocorrer um maior número de eventos extremos que possam ser majorados, ficando o usuário à mercê do que foi monitorado e registrado. A reverificação das estimativas deve ser feita sempre que possível, dadas as constatações de Dooge (1986) e Berod *et al.* (1992) quanto aos registros de precipitação que superaram os valores até então estimados para a PMP.

6.2 Método Estatístico e Envoltória Regionalizada

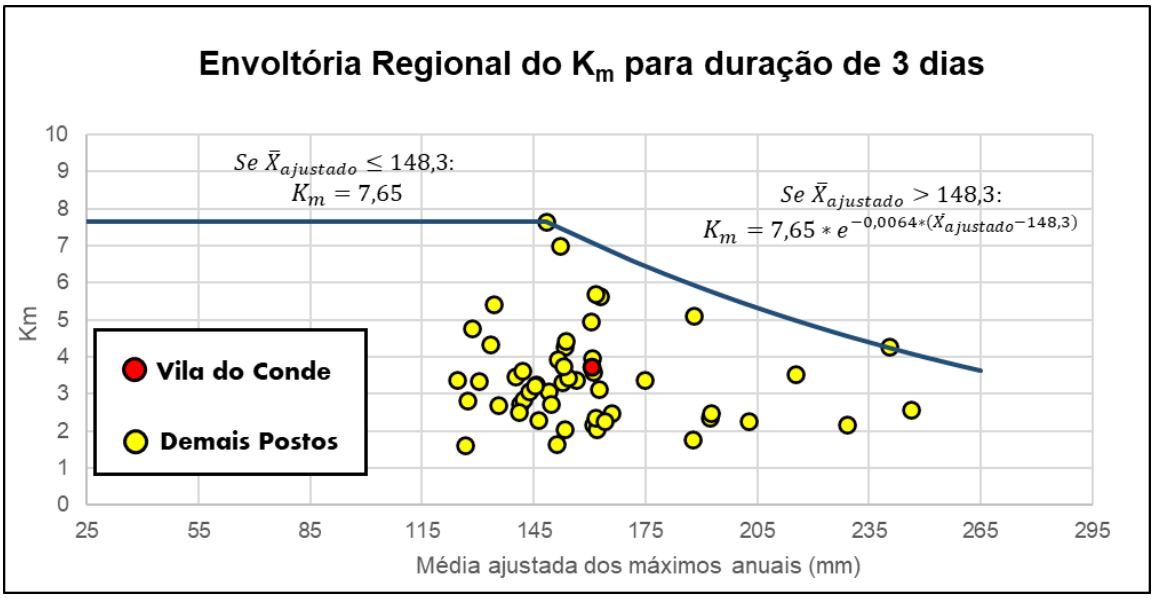
A partir das 52 estações pluviométricas selecionadas, foram obtidas Envoltórias Regionais dos fatores de frequência locais, conforme atualizações recomendadas por Sarkar e Maity (2020). Entre a Figura 60 e Figura 65 são apresentadas as Envoltórias Regionais de 24 horas, 3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias.

Figura 60 – Envoltória Regional do K_m em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 24 horas



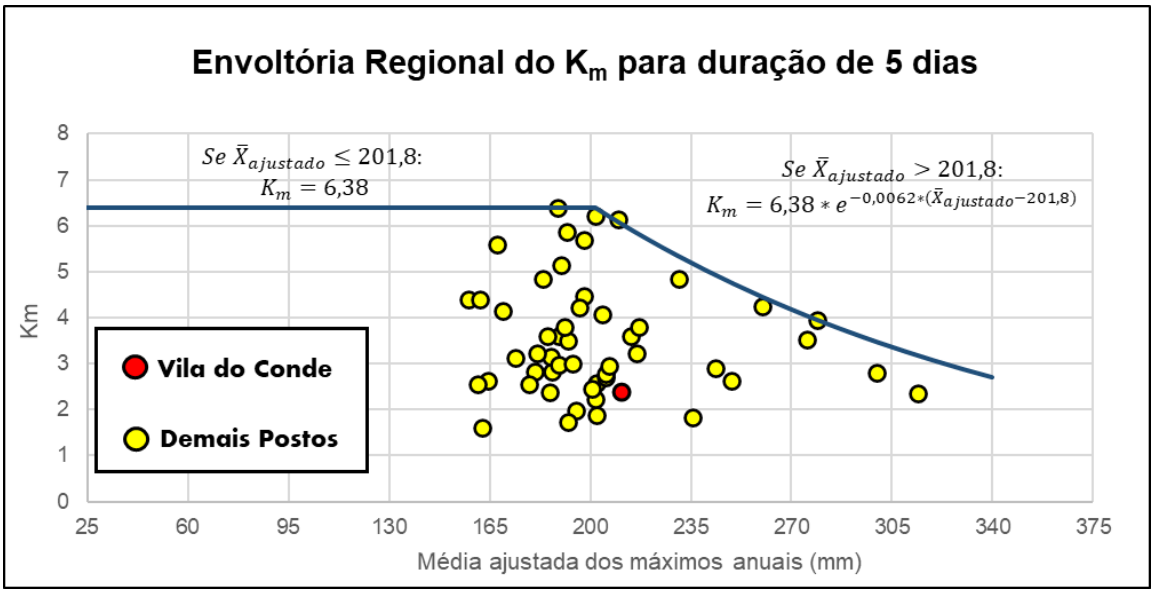
Fonte: autoria própria.

Figura 61 – Envoltória Regional do K_m em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 3 dias



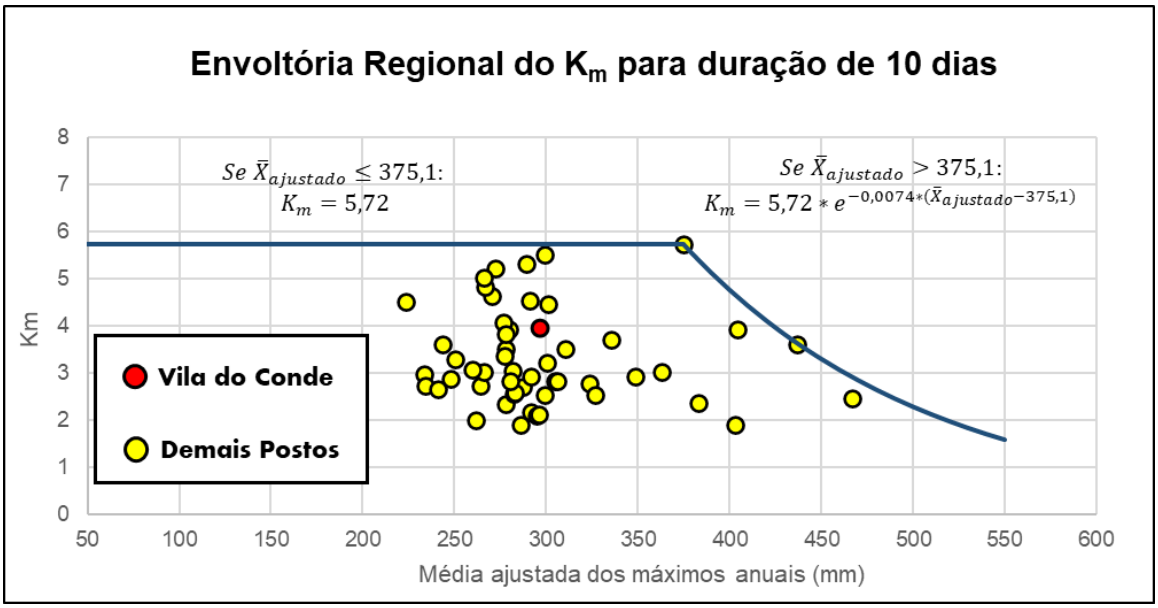
Fonte: autoria própria.

Figura 62 – Envoltória Regional do K_m em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 5 dias



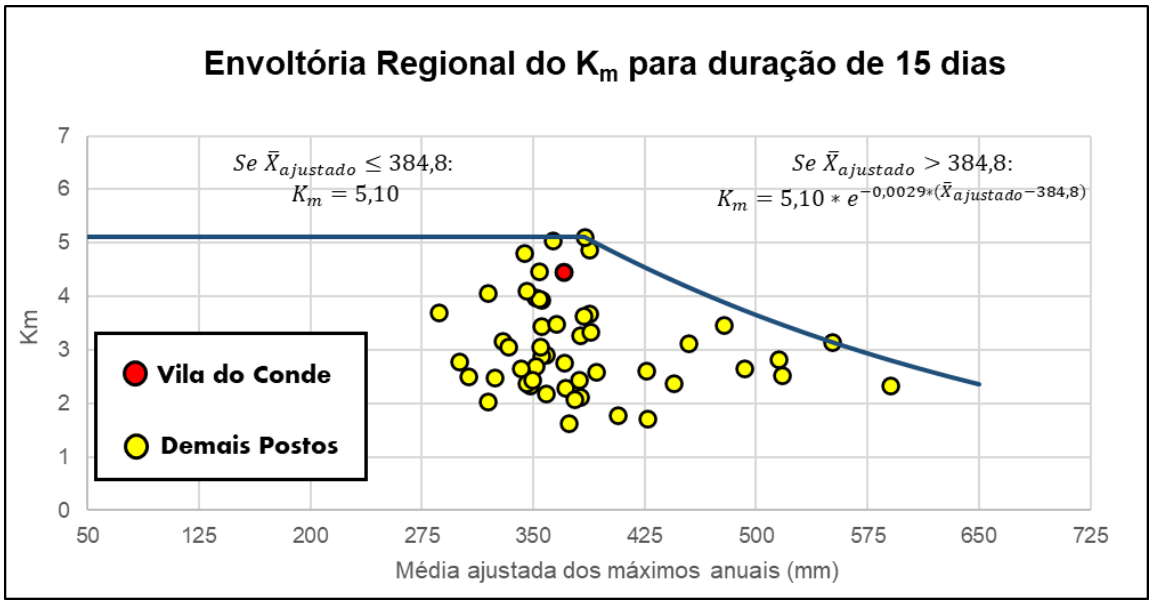
Fonte: autoria própria.

Figura 63 – Envoltória Regional do K_m em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 10 dias



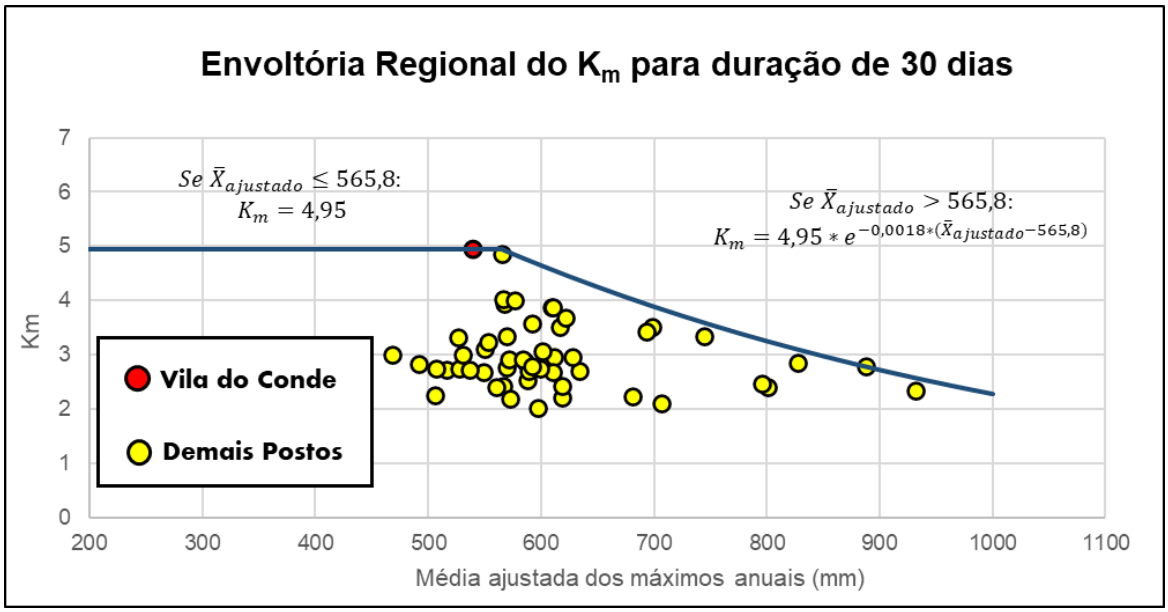
Fonte: autoria própria.

Figura 64 – Envoltória Regional do K_m em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 15 dias



Fonte: autoria própria.

Figura 65 – Envoltória Regional do K_m em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 30 dias



Fonte: autoria própria.

Observa-se, entre a Figura 60 e Figura 65, que os máximos fatores de frequência das Envoltórias Regionalizadas decrescem à medida que se aumenta a duração da chuva, conforme similarmente verificado no trabalho de Burger (2014).

Na Tabela 18 é apresentado o resultado da PMP pontual Estatística obtida utilizando a Envoltória Regionalizada de 24 horas para Barcarena/PA, e o fator de frequência associado. O **APÊNDICE F** expõe os resultados estatísticos da PMP de todas as 52 estações pluviométricas para todas as durações analisadas (segundo o Método Original de Hershfield, Método da Envoltória Regional e Simulação Sintética).

Tabela 18 – Cálculo da PMP Estatística pontual com Envoltória Regional de 24 horas para Barcarena/PA

Estação Pluviom.	$\bar{X}_{ajustado}$	$\sigma_{ajustado}$	K_m	$PMP_{24\ horas}$ (mm)
VILA DO CONDE (00148011)	117,35	43,13	8,42	**480,4**

Fonte: autoria própria.

Entende-se que, as estações dentro da região de estudo devem preservar a associação das médias ajustadas com o *K* oriundo dos Ábacos Regionais, devido às condições climatológicas promovidas por células convectivas (proveniente da circulação geral da atmosfera, ZCIT dentre outros fenômenos). Isto é, as células convectivas promovem precipitações convectivas que impactam pequenas áreas com

muita intensidade, delimitando assim, um padrão espacial de chuvas na região de Barcarena/PA e redondezas (vide classificação climatológica do IBGE, classificação de Koppen-Geiger, isoietas de PMA da CPRM dentre outros).

Envoltórias Regionais, basicamente, são fotografias da relação entre os fatores de frequência com as médias das séries de máximos de cada região. Logo, a adoção de um único *K* para todas as 52 estações pluviométricas envolvidas não indica ter embasamento sólido, quando se comparado ao trabalho basilar de Chow (1951), e da própria concepção matemática de Hershfield, de respeitar uma relação algébrica das médias e desvios padrões dos máximos anuais com os fatores de frequência. Além disso, o caso em questão é alicerçado na predominância de fenômenos convectivos que impõe uma atuação mais localizada e peculiar para cada ponto territorial, por mais que a seleção dos postos pluviométricos respeitasse uma certa homogeneidade regional climatológica no que diz respeito ao tipo das tormentas extremas.

Na sequência, são apresentados, na Tabela 19, os resultados das PMPs Pontuais Estatísticas com Envoltória Regionalizada para 3 dias a 30 dias, bem como os fatores de frequência associados à Barcarena/PA.

Tabela 19 – Cálculo da PMP Estatística pontual com Envoltória Regional de 3 dias para Barcarena/PA

Estação Pluviom.	Duração	$\bar{X}_{ajustado}$	$\sigma_{ajustado}$	K_m	$PMP_{3\ dias}$ (mm)
VILA DO CONDE (00148011)	3 dias	160,45	52,92	7,08	**535,0**
	5 dias	210,56	66,01	6,04	**609,5**
	10 dias	296,04	78,78	5,72	**746,7**
	15 dias	370,39	104,80	5,10	**904,9**
	30 dias	539,66	143,48	4,95	**1249,9**

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 20 é apresentado o resumo das PMPs Pontuais Estatísticas considerando a Envoltória Regionalizada, conforme trabalho de Sarkar e Maity (2020), para todas as durações analisadas em Barcarena/PA.

Tabela 20 – Resumo das estimativas das PMP_s pontuais Estatísticas para Barcarena/PA, para as durações de 24 horas, 3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias, com base nas Envoltórias Regionais idealizadas por Sarkar e Maity (2020).

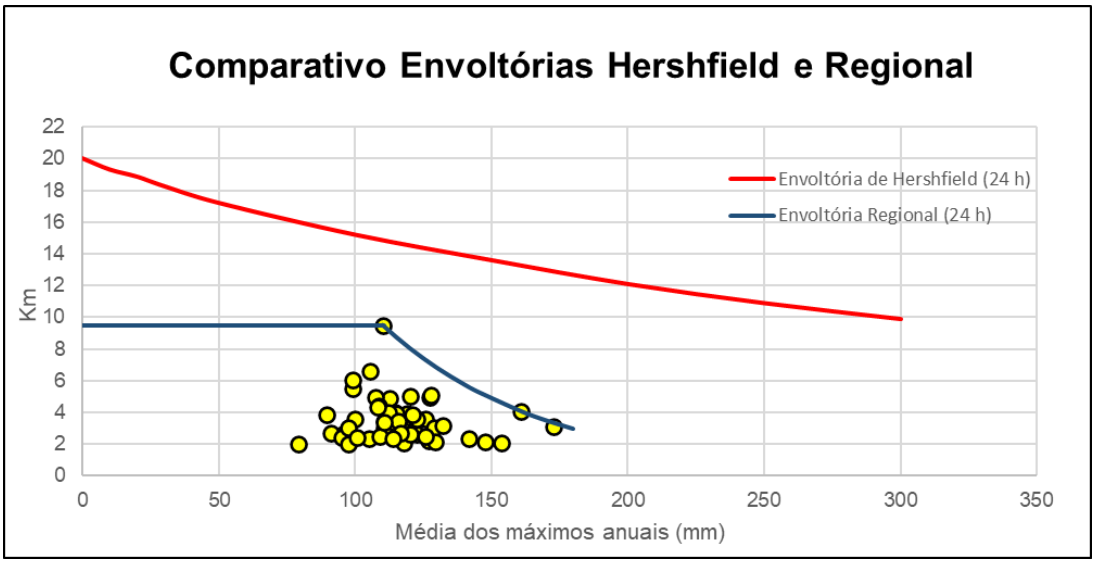
Duração	24 horas	3 dias	5 dias	10 dias	15 dias	30 dias
K	8,42	7,08	6,04	5,72	5,10	4,95
PMP (mm)	480,4	535,0	609,5	746,7	904,9	1249,9

Fonte: autoria própria.

Alimentando a discussão científica, caso fosse adotada a Envoltória Original de Hershfield (Figura 15), o posto pluviométrico VILA DO CONDE (00148011) teria um K_m igual a 14,94 e PMP Pontual Estatística de 24 horas de 761,5 mm. Os resultados indicam que uma envoltória delimitada por estações majoritariamente dos Estados Unidos, de clima temperado e frio localizado no hemisfério norte (KOTTEK *et al.*, 2006 apud NASCIMENTO, 2017), é diferente da envoltória ajustada para um clima equatorial, quente e úmido verificado no Norte do Brasil, devido aos diversos fenômenos meterológicos distintos de formação de chuva, reguladores climáticos e posicionamento geográfico, conforme foi apresentado no item 4.5. Além do mais, a Envoltória Original de Hershfield foi elaborada com dados até início da década de 60, não contemplando registros mais recentes de precipitação no globo. Autores como Barbosa *et al.* (2023), Silva Neto *et al.* (2020), Conceição e Fontes (2019), Cavalcanti *et al.* (2018), Burger (2014) e Sugai (1989) demonstraram magnitudes de fatores de frequência no Brasil bem diferentes daqueles encontrados na Envoltória Original de Hershfield.

A Figura 66 apresenta um comparativo visual entre o Ábaco Original de Hershfield e o Ábaco Regional construído. Nota-se uma grande diferença nas magnitudes dos K_S, que incide diretamente na qualidade das estimativas da PMP Estatística.

Figura 66 – Comparativo das Envoltórias de Hershfield e Regional para a duração de 24 horas



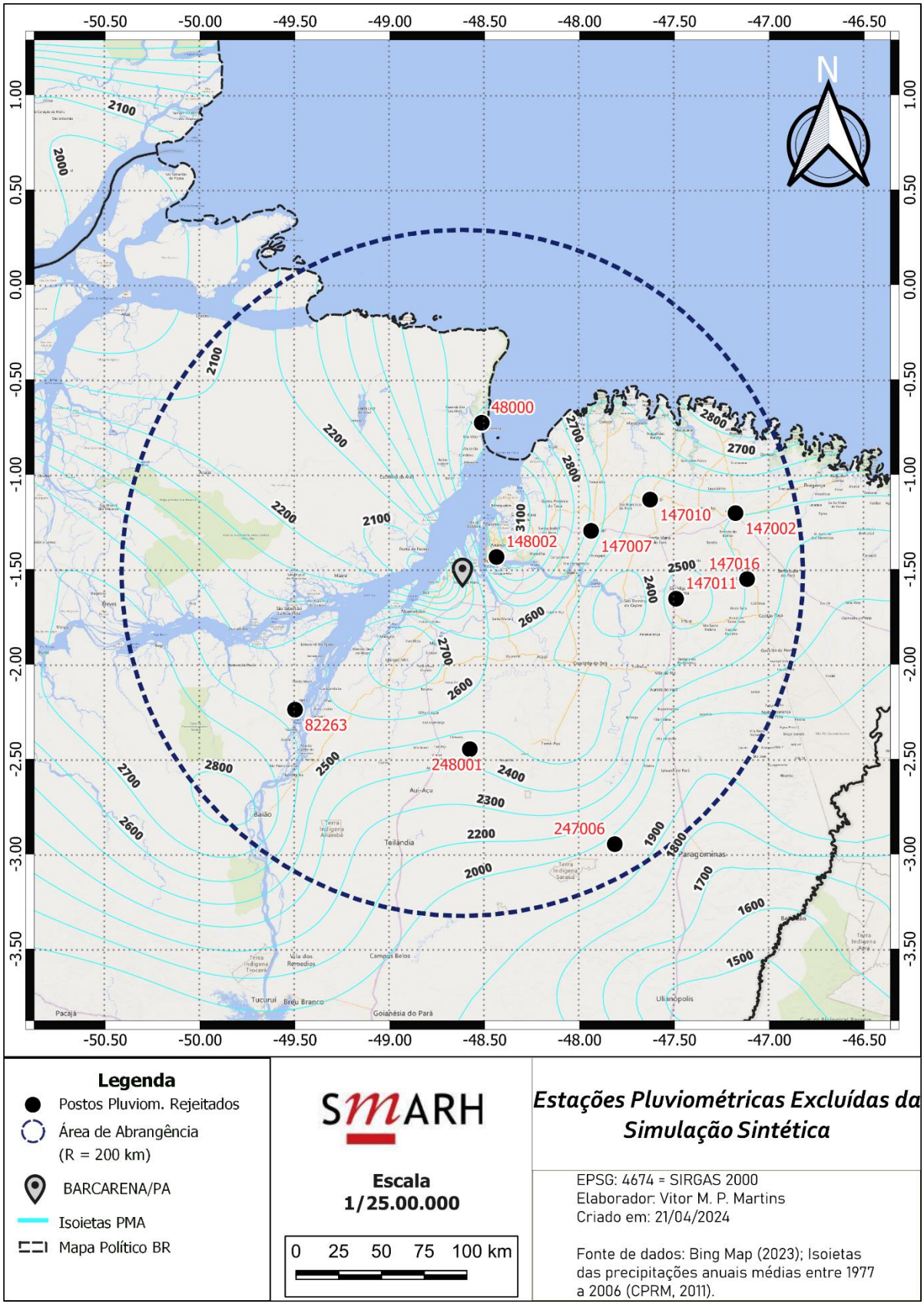
Fonte: autoria própria.

Neste estudo de caso, por contas das estimativas das PMP serem pontuais, não foi necessário requerer curvas de duração-área-altura (“*DAD curves*”).

6.3 Simulação Sintética dos fatores de frequência e constatações

Após a consolidação e determinação dos máximos anuais por duração em cada uma das 52 estações pluviométricas (encontra-se as estatísticas descritivas das estações pluviométricas, por duração, no APÊNDICE C), foram aplicados testes não-paramétricos de Independência, Homogeneidade Aleatoriedade e Estacionariedade, com os p-valores apresentado no **APÊNDICE D.** Por fim, das 52 estações pluviométricas disponíveis, apenas 42 passaram nos testes não-paramétricos de Independência, Homogeneidade e Aleatoriedade, ou seja, 10 postos pluviométricos foram excluídos da simulação sintética dos fatores de frequência, sendo eles de código: 48000, 82263, 147002, 147007, 147010, 147011, 147016, 148002, 247006 e 248001. A Figura 67 especializa os 10 postos pluviométricos excluídos da simulação sintética, sendo que a maioria estava mais próximo do litoral e no sentido nordeste.

Figura 67 - Espacialização dos 10 postos pluviométricos excluídos da simulação sintética



Fonte: autoria própria.

Pondera-se que, máximos anuais de precipitações são tipicamente considerados como independentes, levando a crer que nenhuma observação na amostra influencia a ocorrência de observações subsequentes. A presunção de dados históricos independentes sugere a utilização de simulações sintéticas baseadas em distribuições de extremos geradas por números pseudoaleatórios (CHATFIELD, 2001; METCALFE e COWPERTWAIT, 2009). Burger (2014) não observou esse fato e optou por utilizar modelos autorregressivos que promovem correlação entre os pontos amostrais.

Desse modo, foram ajustadas distribuições probabilísticas às séries históricas diárias dos 42 postos pluviométricos selecionados para a simulação sintética, por meio do teste não-paramétrico Kolmogorov-Smirnov, além do RMSE entre o quantil empírico e o teórico, como também pelo ajuste visual. Adicionalmente, aplicou-se o teste não-paramétrico Kolmogorov-Smirnov envolvendo as distribuições probabilísticas escolhidas para cada um dos 42 postos pluviométricos frente às séries históricas das demais durações (3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias) e constatou-se que a *Hipótese Nula* não foi rejeitada.

A Tabela 21 expõe a quantidade de estações pluviométricas associadas a cada distribuição de probabilidade considerada no presente trabalho. Há um destaque para as distribuições Pearson-III, GEV, Log-Normal-3P e Gumbel, ajustando um total de 31 dos 42 postos pluviométricos (74% do todo).

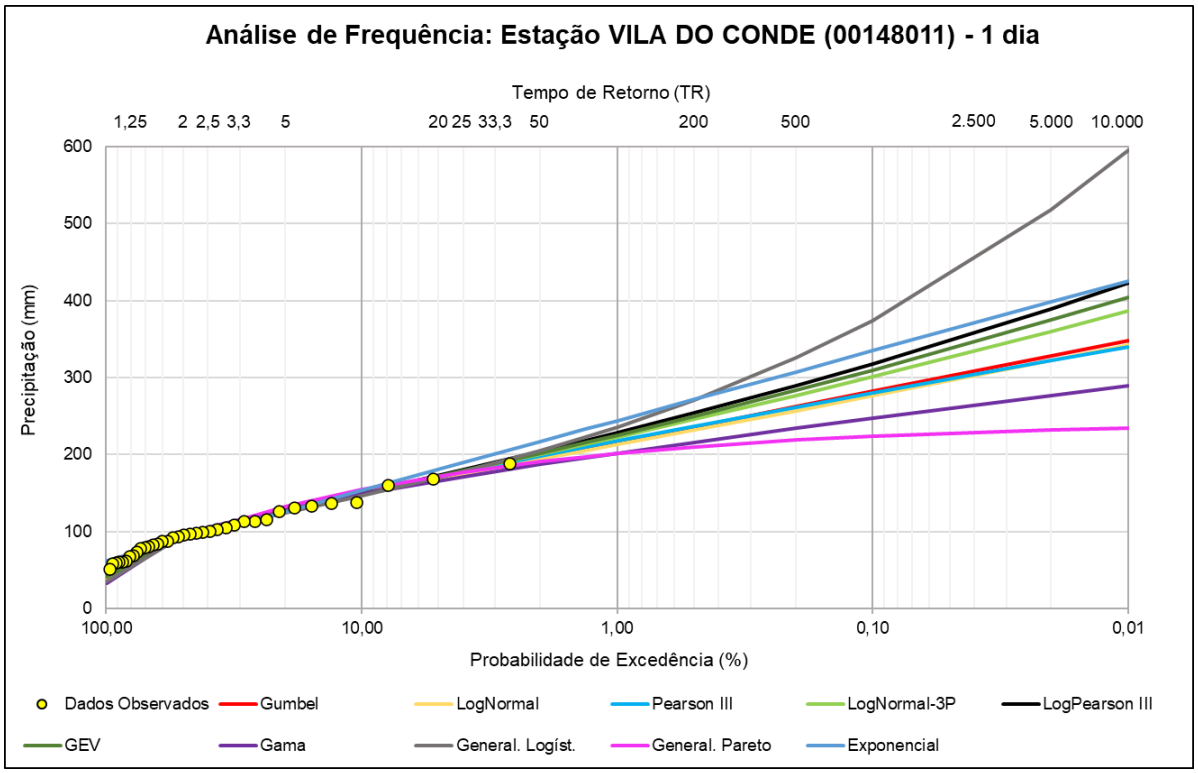
Tabela 21 – Quantidade de postos pluviométricos associados a cada uma das distribuições probabilísticas inseridas no estudo

Distribuições	pe3	gev	*ln*3	gum	gam	lp3	glo	gpa	*ln*2	exp	Total
Qtd. Postos	10	9	7	5	3	3	3	1	1	0	42

Fonte: autoria própria.

A Figura 68 apresenta um exemplo de ajuste visual comparativo feito para a estação VILA DO CONDE (00148011), onde a distribuição estatística de Gumbel, com parâmetros estimados pelo método dos momentos-L, foi a escolhida para esse posto.

Figura 68 – Ajuste das distribuições probabilísticas a série temporal de máximos de 1 dia do posto pluviométrico VILA DO CONDE (00148011). Foi escolhida a distribuição probabilística de Gumbel



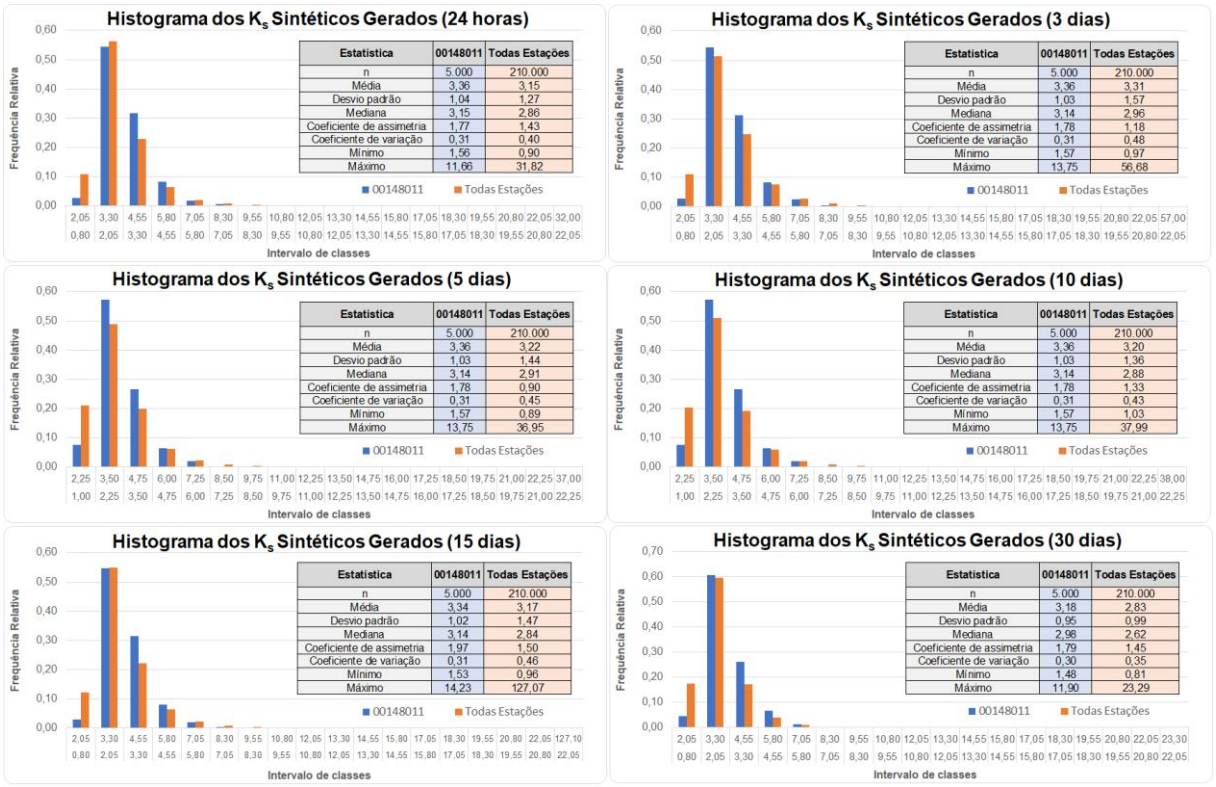
Fonte: autoria própria.

O **APÊNDICE F** apresenta, detalhadamente, todas as distribuições delimitadas para cada um dos 42 postos pluviométricos aptos para a simulação sintética. Além disso, foram expostos, para as durações de 24 horas, 3 dias, 5 dias, 10 dias, 15 dias e 30 dias, todos os resultados estatísticos de fatores de frequência e PMP_S (Método Original de Hershfield, Método da Envoltória Regional e Simulação Sintética) para todas as 52 estações pluviométricas, sendo que, como já informado, as séries históricas de 10 estações pluviométricas foram consideradas inaptas para a simulação sintética.

Nota-se, na Figura 69, uma conformação dos histogramas gerados dos K_S sintéticos da estação pluviométrica VILA DO CONDE (00148011), e todas as 42 estações pluviométricas aptas para a simulação sintética, similar ao visto em distribuições probabilísticas extremas para máximos, corroborado com as estatísticas expostas que apontam uma assimetria positiva dos fatos analisados. Não é coincidência o verificado se atentarmos ao uso, justamente, de funções extremas de probabilidades para simular as diversas trajetórias seriais que geraram os K_S sintéticos através da Equação

(22) que envolvem o máximo valor da série, médias e desvios padrões das variáveis aleatórias.

Figura 69 – Histogramas dos fatores de frequência sintéticos gerados para o posto pluviométrico VILA DO CONDE (00148011) e para todas as 42 estações pluviométricas aptas para a simulação sintética



Fonte: autoria própria.

A Tabela 22 apresenta o resumo das estimativas de fatores de frequência e PMP, seguindo o Método Estatístico com Envoltória Regionalizada, Método de Simulação Sintética com percentil de 95% e Método de Simulação Sintética com percentil de 99% como também o Método Hidrometeorológico, para a estação VILA DO CONDE (00148011).

Tabela 22 – Resumo dos resultados das metodologias Hidrometeorológica, Estatística com Envoltória Regionalizada, Estatística com Simulação Sintética com percentil de 95% e Estatística com Simulação Sintética com percentil de 99%, em mm, para a estação VILA DO CONDE (00148011)

Duração	Hidrom.	Estatís. Envolt. Regional		Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
	PMP	K	PMP	K	PMP	K	PMP
24 horas	306	8,42	480	5,33	347	6,92	416
3 dias	440	7,08	535	5,28	440	6,90	526
5 dias	459	6,04	609	5,34	563	7,16	683
10 dias	734	5,72	747	5,29	713	6,82	834
15 dias	1.005	5,10	905	5,27	923	6,74	1.077
30 dias	1.498	4,95	1.250	5,04	1.263	6,32	1.446

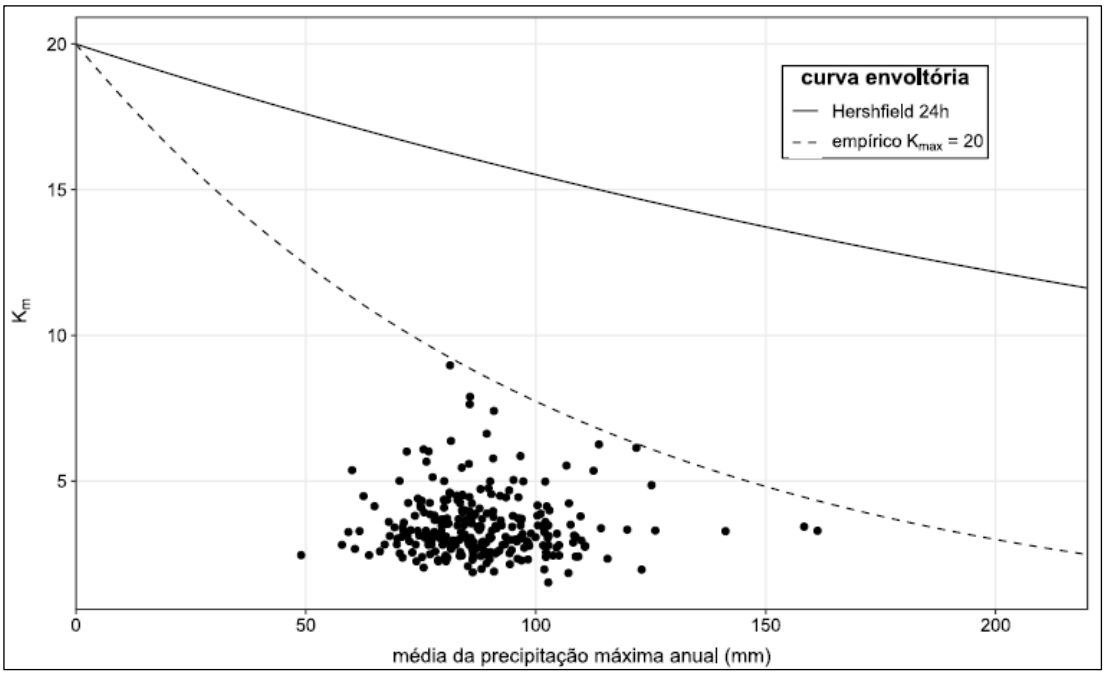
Fonte: autoria própria.

Comparando com os dois trabalhos brasileiros apresentados na revisão bibliográfica acerca do Método Hidrometeorológico, Sugai (1989) no Sul do Brasil e Pinheiro (2011) em Minas Gerais, ambos estão alocados em zonas subtropicais úmidas, segundo a classificação climatológica de Koppen-Geiger (Figura 49). Pinheiro (2011) apresentou, sem considerar efeitos orográficos, valores acima das estimativas hidrometeorológicas do presente estudo nas durações de 24 horas, 3 dias, 5 dias e 10 dias, e menores em 15 dias e 30 dias. Ressalta-se que, devido à gênese das tormentas em MG está associado, em sua maioria, ao fenômeno de ZCAS, que espacializa a chuva em uma grande área, houve a necessidade do autor de buscar mais postos de referência dentro do território mineiro e considerar uma estimativa global para esse estado. Com isso, é natural que haja uma maior probabilidade de estimativas mais intensas em determinadas durações. Sugai (1989) apresentou estimativas das PMP_S Hidrometeorológicas para diversas cidades sulistas, e as estimativas de 1 dia não apresentaram um padrão bem delimitado frente às estimativas de 24 horas do presente trabalho.

Tanto as estimativas da PMP Hidrometeorológica de 24 horas do presente trabalho, quanto as estimativas, de mesma duração, dos trabalhos de Sugai (1989) e Pinheiro (2011) apresentaram valores bem acima do trabalho de Alfazi-Gorouh *et al.* (2018) no Irã, que é caracterizado como um país de clima árido, típico de deserto. Ou seja, era esperado que regiões mais úmidas produzam PMP_S mais conservadoras do que regiões secas.

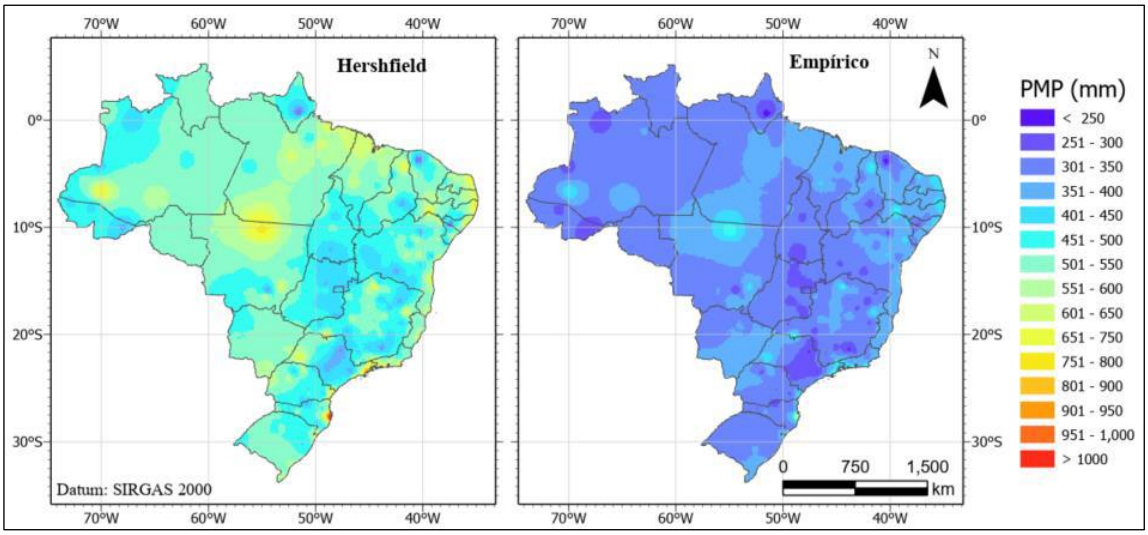
Quanto ao Método Estatístico com Envoltória Regional, observando inicialmente o trabalho de Barbosa *et al*. (2023), a região de Barcarena/PA se enquadrou na faixa da PMP de 24 horas de 351-400 mm (ver repetição da Figura 18 na sequência), abaixo da estimativa do presente estudo de 480 mm (Tabela 22). Estima-se que, o fator de frequência para VILA DO CONDE (00148011), utilizando a Figura 17 produzida por Barbosa *et al*. (2023), estaria em torno de 6,5 a 7,0, diferente do encontrado no presente estudo que foi igual a 8,42. Investigando ainda mais a Figura 17 (ver repetição dessa figura na sequência) elaborada por Barbosa *et al*. (2023), percebe-se um fator de frequência local máximo em torno de 9,6, bem próximo do encontrado na Figura 60 para a região estudada no Norte do Brasil (9,46). O Quadro 6, presente na revisão bibliográfica, apresenta as contribuições de diversos autores dentro e fora do país acerca da estimativa do fator de frequência, e nota-se que o trabalho atual alcançou um fator de frequência local máximo (9,46) na mesma ordem de grandeza a diversos trabalhos como o de Sugai (1989), no sul do Brasil, com o *K* máximo local igual a 9,0 (clima subtropical úmido) e Desa *et al.* (2001), em Selangor/Malásia, com *K* máximo local igual a 8,7 (clima equatorial/tropical quente e úmido e Af para a classificação de Koppen-Geiger).

Figura 17 (Repetição) - Fator de frequência (K_m) em função da duração da chuva e da média das precipitações máximas anuais de 24 horas do Brasil, segundo Barbosa *et al.* (2023)



Fonte: Barbosa *et al.* (2023).

Figura 18 (Repetição) - Espacialização da PMP de 24 horas de duração obtida pelo método empírico de Hershfield (1961a, 1961b e 1965) e pelo método empírico, para todo o Brasil, segundo Barbosa *et al.* (2023)



Fonte: adaptado de Barbosa *et al.* (2023)

Comparando as estimativas da PMP sintética de 24 horas para VILA DO CONDE (00148011) com o trabalho de Barbosa *et al*. (2023), nota-se que os quantis da PMP chegaram próximos ao intervalo de 351-400 mm. E, além disso, o *K* associado ao percentil de 95% se enquadrou na faixa de 6,5-7,0. Logo, a simulação sintética dos fatores de frequência apresentou um alinhamento maior com a referência citada em comparação a metodologia estatística da Envoltória Regionalizada.

As simulações sintéticas de 24 horas, tanto para os percentis de 99% e de 95%, tiveram um *K* máximo, considerando todas as 42 estações pluviométricas aptas para a simulação, iguais a 12,64 e 8,40, respectivamente. Burger (2014) simulou sinteticamente os fatores de frequência com um percentil de 99,9% e obteve, para uma simulação com estações automáticas no Paraná, um *K* máximo geral de 24 horas igual a 89,14. Já considerando simulações sintéticas com 30 e 40 anos de dados das estações convencionais paranaenses, a autora obteve K_S máximos gerais diários iguais a 21,64 e 15,46.

Simulações sintéticas utilizando um percentil de 95% e 99%, através de distribuições de extremos e não acoplando o mesmo com modelos autorregressivos presumem-se resultados menos extremos. E mais, a obtenção de dados mais extensos apontam para conclusões menos conservadoras.

Analisando ainda a Tabela 22, a PMP com Simulação Sintética do *K* com percentil de 99% apresentou valores, na mesma faixa de grandeza da PMP Estatística Regionalizada entre as durações de 24 horas e 5 dias e, entre 10 e 30 dias, a semelhança se deu, em algum grau, com a PMP Hidrometeorológica. Com relação a PMP com Simulação Sintética do *K* com percentil de 95% o raciocínio é o oposto, ou seja, os valores entre a duração de 24 horas e 5 dias foram na mesma ordem de grandeza da PMP Hidrometeorológica e, entre 10 e 30 dias, a similaridade se deu com a PMP Estatística Regionalizada. A duração de 5 dias, se torna, portanto, um ponto de inflexão nessa análise.

Nota-se também que os K_S do Método Estatístico da Envoltória Regional apresenta um decaimento na sua magnitude à medida que a duração da chuva aumenta (isso também foi verificado no trabalho de Burger (2014)). Em contrapartida, as duas simulações sintéticas apresentaram fatores de frequência sem comportamento de acréscimo ou decréscimo perene (consultar **APÊNDICE F**). Constata-se uma geração aleatória de K_S sintéticos com valores apresentando uma menor amplitude de variação. Apesar disso, se mostra uma alternativa frente à carência de monitoramento hidrométrico no país, pois oportuniza o sorteio de variáveis aleatórias de altura de chuva que possibilitam a estimativa dos fatores de frequência, minorando a influência negativa de séries que tenham uma curta duração temporal.

E mais, a simulação sintética se mostra como uma possibilidade para estimar a Precipitação Máxima Provável em locais que carecem de dados meteorológicos, como também em localidades com baixo número de postos pluviométricos com boa qualidade e grande extensão temporal, pois, o emprego do método de Monte Carlo possibilita a extração de informações que extrapolam os dados históricos.

Na sequência, foram transformadas todas as estimativas da PMP da VILA DO CONDE (00148011) em TR_S, com base na distribuição probabilística de Gumbel pelo método dos momentos-L. Inseriu-se essas informações na Tabela 23 juntamente com os quantis decamilenares para comparação

Tabela 23 – Associação de TR_s às estimativas das PMP_s segundo os Métodos Hidrometeorológico, Estatística com Envoltória Regionalizada, Estatística com Simulação Sintética com percentil de 95% e Estatística com Simulação Sintética com percentil de 99%, utilizando a distribuição de Gumbel (método dos momentos-L), para a estação VILA DO CONDE (00148011)

Duração	Hidrom.	Estatís. Envolt. Regional	Estatís. Simul. Sint. 95%	Estatís. Simul. Sint. 99%	TR 10.000 anos
	PMP / TR	PMP / TR	PMP / TR	PMP / TR	Quantis
24 horas	306 mm / 620 anos	480 mm / 131.706 anos	347 mm / 2.192 anos	416 mm / 18.348 anos	396
3 dias	440 mm / 1.637 anos	535 mm / 16.426 anos	440 mm / 1.637 anos	526 mm / 13.202 anos	515
5 dias	459 mm / 310 anos	609 mm / 6.595 anos	563 mm / 2.580 anos	683 mm / 29.847 anos	629
10 dias	734 mm / 1.950 anos	747 mm / 2.396 anos	713 mm / 1.399 anos	834 mm / 9.500 anos	837
15 dias	1.005 mm / 3.723 anos	905 mm / 1.123 anos	923 mm / 1.394 anos	1.077 mm / 8.822 anos	1.087
30 dias	1.498 mm / 5.974 anos	1.250 mm / 738 anos	1.263 mm / 824 anos	1.446 mm / 3.853 anos	1.559
Média TR / Mediana TR (anos)	2.370 / 1.794	26.497 / 4.496	1.671 / 1.518	13.929 / 11.351	10.000 / 10.000

Fonte: autoria própria.

NRC (1994) calculou TR_s de PMP_s nos EUA, e estes variaram entre 10^5 *e* 10^9 anos. A única estimativa do presente trabalho que entrou nesse limiar foi a de 24 horas da PMP Estatística com Envoltória Regional de Barcarena/PA (480 mm), com $K = 8{,}42$, as demais ficaram abaixo.

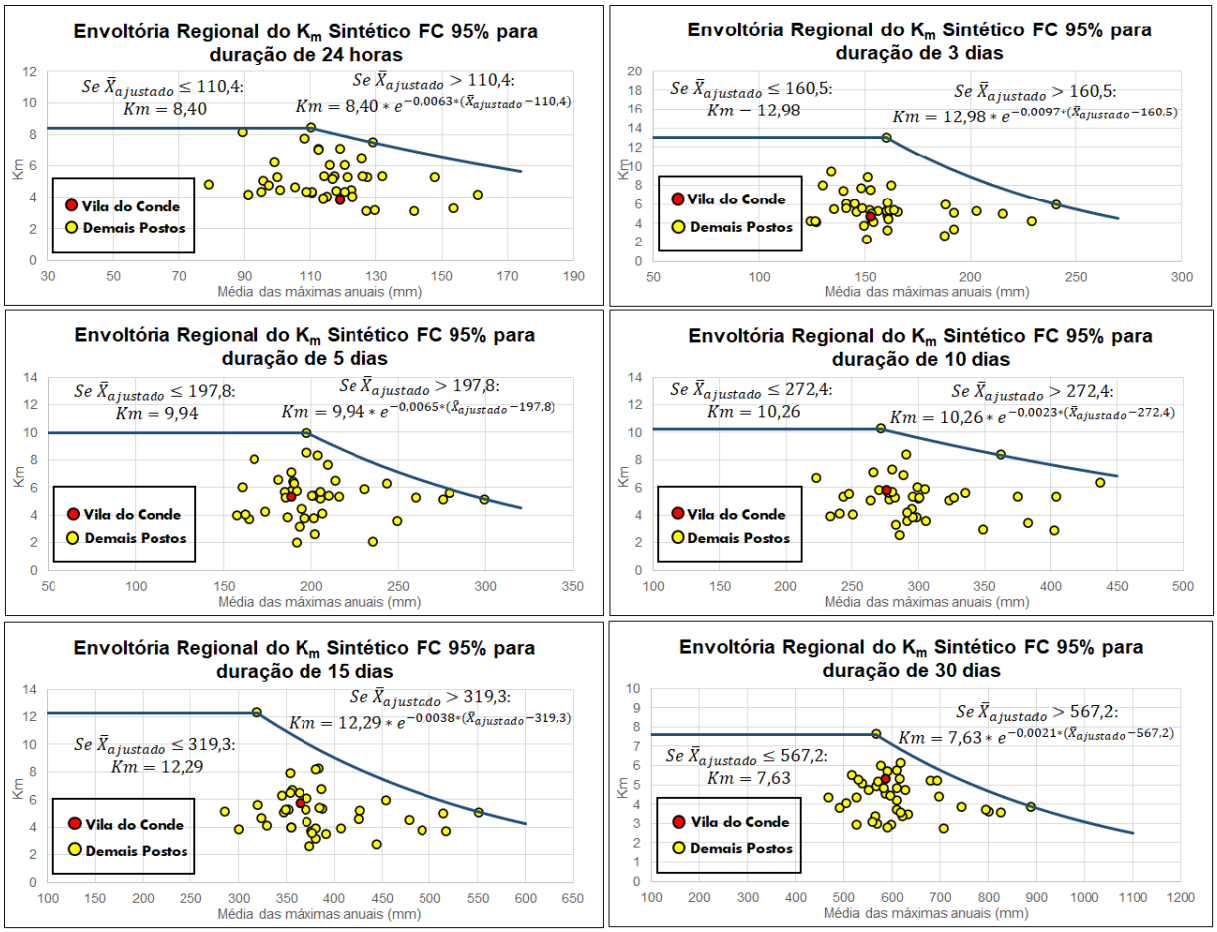
Agora se analisarmos referências mais recentes, como Nathan e Weinnmann (2001, *apud* FERNANDES, 2009) que delimitaram TR_s de PMP_s em torno de 10^4 e 10^7 anos, já se insere as estimativas de 24 horas e 3 dias da PMP Estatística com Envoltória Regional de Barcarena/PA (480 mm e 535 mm, respectivamente), bem como as estimativas de 24 horas, 3 dias e 5 dias da PMP Estatística com Simulação Sintética com percentil de 99% (416 mm, 526 mm, e 683 mm, respectivamente). Considerando Ball *et al.* (2019), que imputam TR_s de PMP_s iguais ou superiores a 2.000 anos, um pouco mais que a metade das estimativas respeitam o citado critério.

Nota-se que a Simulação Sintética com percentil de 99% produziu fatores de frequência que condicionaram alturas de chuvas em torno do TR 10.000 anos.

Pondera-se, portanto, que não há uma definição precisa de um intervalo restrito para o caso em questão, pois os TRs das estimativas variaram entre limites amplos de 10^2 *a* 10^6. Não deve ser esquecido o fato que a distribuição utilizada influi nos resultados alcançados, inserindo, assim, as conformações estatísticas da função acumulada de probabilidades especificada.

Por fim, promoveu-se uma última investida no entendimento dos K_s sintéticos, elaborando Envoltórias Regionais, conforme moldes de Sarkar e Maity (2020), através das médias ajustadas e fatores de frequências sintéticos com percentil de 95% dos 42 postos pluviométricos aptos para a simulação estocástica. A Figura 70 apresenta as envoltórias citadas.

Figura 70 – Envoltórias Regionais dos K_{ms} Sintéticos com FC/percentil de 95% em função da média ajustada das precipitações máximas anuais de 24 horas a 30 dias



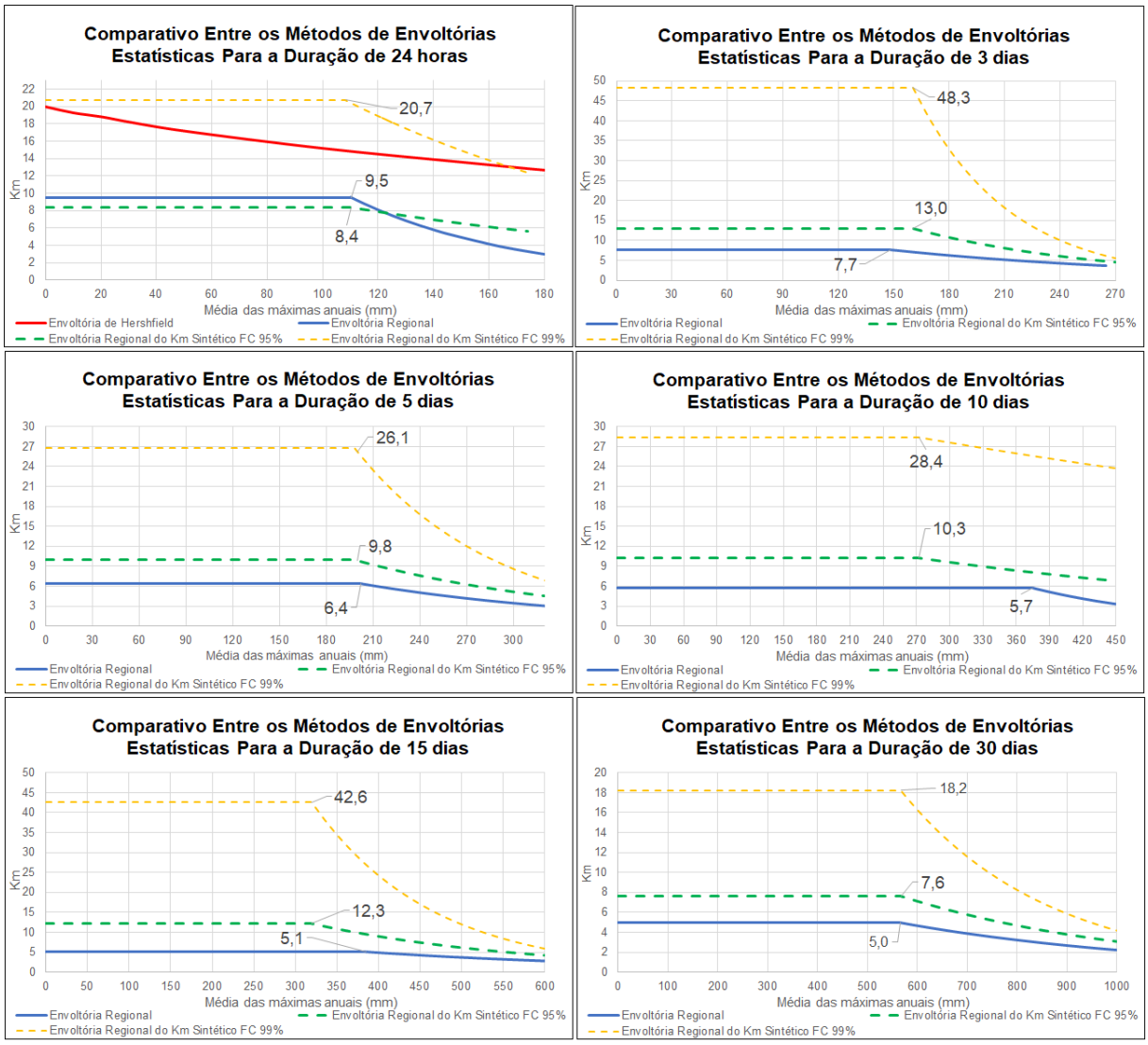
Fonte: autoria própria.

Não há um padrão claro quando se compara a magnitude dos *K* sintéticos com as durações das chuvas, pelo contrário, o que se verifica é uma aleatoriedade, até que

esperada, dada a fundamentação teórica de uma simulação de Monte Carlo, associado a um sorteio aleatório de probabilidades que geram quantis através de uma distribuição estatística. Ao fim, fornecem diversas amostras seriais, para então definir um K associado ao limite superior de um intervalo de confiança. O mesmo fenômeno foi apurado quando se utilizou K_S sintéticos com percentil de 99% (vide Figura 71).

A Figura 71 compara, graficamente, para as durações entre 24 horas e 30 dias, as metodologias Estatísticas da curva original de Hershfield, Envoltória Regionalizada conforme Sarkar e Maity (2020), Envoltória Regional do *K* com FC/percentil de 95% e a Envoltória Regional do *K* com FC/percentil de 99%. No gráfico para 24 horas, o método de Hershfield só não é mais conservador, no geral, do que a Envoltória Regional do *K* com FC/percentil de 99%, sendo este último o mais conservador também nas durações superiores a 24 horas.

Figura 71 – Comparação entre os métodos Estatísticos de construção de Envoltórias para as durações de 24 horas a 30 dias: curva original de Hershfield, Envoltória Regionalizada conforme Sarkar e Maity (2020), Envoltória Regional do *K* com FC/percentil de 95% e a Envoltória Regional do *K* com FC/percentil de 99%



Fonte: autoria própria.

Por hora, é incipiente inferir mais sobre as estimativas extraídas dessas Envoltórias Regionais de base sintética, pois não se observa um decaimento da magnitude dos fatores de frequência à medida que a duração da chuva avança temporalmente, tal qual fora observado em outros trabalhos da área, como Burger (2014) e as Envoltórias Regionais com base no *K* local apresentadas no item 6.2. Contudo, frisa-se que não há negação desse presente trabalho sobre a simulação sintética dos fatores de frequência e as suas estimativas de PMP associadas **(Tabela 22 e APÊNDICE F)**, pelo contrário, estimula-se o seu uso pois é possível associar percentis e extrapolar os dados históricos que são escassos no Brasil.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo investigar o fator de frequência hidrológico do Método Estatístico da PMP, através do emprego do método de Monte Carlo (MMC) para o sorteio de variaveis aleatórias de alturas de chuva, em uma região equatorial, quente e úmida no Norte do Brasil, para diversas durações. Desse modo, foram discutidos os resultados dos fatores de frequência sintéticos, e as suas estimativas de PMP, frente aos demais métodos utilizados na literatura: Método Original de Hershfield (1961a, 1961b e 1965), Método Estatístico com Envoltória Regionalizada, com base no trabalho de Sarkar e Maity (2020), e Método Hidrometeorológico.

Um das motivações da pesquisa é o questionamento da validade do Ábaco de Hershfield para todo o globo, já que a condição climática que se encontravam os postos pluviométricos utilizados estavam, majoritariamente, em zonas temperadas e frias, diferentes da caracterização climatológica de regiões tropicais, como o Norte do Brasil, que contém altos índices de umidade e incidência solar, além de ser quente. Além disso, há ainda o fato de que a base de dados de Hershfield se limitava a eventos pluviométricos registrados até a década de 60.

Logo, foi vital para a pesquisa o entendimento climatológico da região Norte do Brasil para a seleção dos postos pluviométricos e climatológicos, pois a estimação dos K_S e PMP_S perpassam por inventariar dados dentro de regiões climatologicamente homogêneas. É sabido que o Norte do país detém uma baixa densidade de monitoramento pluviométrico e, com base nisso, houve a necessidade de ajustar premissas recomendadas pela WMO (2009) quanto a quantidade de postos e extensão temporal.

Assim sendo, foram selecionados 52 postos pluviométricos, sendo que o epicentro da área de estudo foi a cidade de Barcarena/PA, no entanto, apenas 42 estações estavam aptas para integrar a simulação sintética, que constituia um processo de Monte Carlo com geração aleatória de 5.000 trajetórias seriais através de distribuições de extremos.

Os resultados do Método Estatístico com Envoltória Regionalizada, com base no trabalho de Sarkar e Maity (2020), apresentaram um K de 24 horas, associado a

Estação VILA DO CONDE (00148011) que representava a cidade de Barcarena/PA, igual a 8,42, já a simulação sintética com percentis de 99% e 95% expuseram K_S iguais a 6,92 e 5,33, respectivamente. O que se pode concluir é que essas estimativas de fatores de frequência foram muito menores do que o *K* obtido pela Envoltória Original de Hershfield, que promoveria um fator de 14,94.

Sugere-se, portanto, que adotar Métodos Estatísticos alternativos ante a aplicação direta do cálculo de Hershfield, aparenta subordinar melhor as estimativas aos efeitos climatológicos locais em regiões tropicais. Isso foi visto não somente para a Estação VILA DO CONDE (00148011), mas também para as demais estações analisadas no trabalho **(APÊNDICE F).**

Outro ponto interessante notado é que, a magnitude dos fatores de frequência das Envoltórias Regionais decrescem à medida que a duração da precipitação se incrementa. Já os K_S sintéticos não apresentaram esse fenômeno, mas sim um padrão de caráter randômico.

Apesar disso, a simulação sintética dos fatores de frequência dão a oportunidade de estimar, estocasticamente, os fatores de frequência das estações pluviométricas, vinculando-os a percentis. Através de “m” variáveis aleatórias que geram uma amostra de “m” K_S para cada posto pluviométrico, é possível se esquivar de estimativas determinísticas, principalmente de séries amostrais curtas, como é atestada pela baixa densidade de monitoramento hidrometeorológico do país e da região Norte do Brasil. Dessa forma, minora-se a influência negativa de séries que tenham uma curta duração temporal ou baixa qualidade dos dados.

Frisa-se, também, que K_S sintéticos gerados apresentaram, em linhas gerais, histogramas característicos das distribuições probabilísticas extremas para máximos, motivada pela própria forma de geração das variáveis aleatórias (através das mesmas distribuições extremas).

O método Hidrometeorológico tem sim suas limitações técnicas, assumindo atmosfera pseudo-adiabática, perdas sendo desconsideradas, simplificações quanto à razão de mistura e aplicabilidade maior em zonas temperadas do globo terrestre. Contudo, ela

se mostra mais sólida com respeito aos princípios físicos do que a PMP Estatística. Todavia, há a necessidade de dados climatológicos consistentes, pois estes são primordiais para uma boa estimativa. No caso estudado, em Barcarena/PA, houve sim simplificações para permitir a sua estimativa.

Ainda que a aplicação do Método Hidromeoteorológico pareça simples, o entendimento do processo físico é complexo, necessitando de uma carga de conceitos meteorológicos/pluviométricos para a aplicação do método, além da observância de certas premissas climatológicas.

Quanto a Estação Vila do Conde (00148011), foram observadas algumas similaridades nas magnitudes das estimativas da PMP dos Métodos Hidrometeorológico, Estatístico com Envoltória Regionalizada, Estatístico com Simulação Sintética com percentil de 95% e Estatístico com Simulação Sintética com percentil de 99%. Contudo, não se pode afirmar, categoricamente, alguma hipótese propriamente dita de correlação, sendo necessário, em estudos futuros, uma corroboração científica maior e verificações do fato em outras regiões climatológicas.

Por mais que se tenha gerado Envoltórias Regionais de base sintética dos K_s, estes resultados ainda são preambulares para alguma conclusão mais assertiva, indicando a necessidade de mais pesquisas sobre o tema.

Nem as constatações dos intervalos dos TR_s de PMP_s da National Research Council – NRC (1994), Nathan e Weinnmann (2001, *apud* FERNANDES, 2009) ou Ball *et al.* (2019) se entrelaçaram totalmente com as estimativas da PMP delimitada para Barcarena/PA. No geral, as estimativas estavam entre 10^2 *a* 10^6 anos, limites bem amplos, trazendo à tona a particularidade de cada método e região a ser analisada, bem como a distribuição probabilística escolhida para determinar as probabilidades de excedência. Logo, era esperado esse comportamento singular para o presente trabalho.

Consultando o **APÊNDICE D,** frisou-se aqueles postos que apresentaram não-estacionariedade nas durações analisadas e, além disso, todos estes apresentaram tendências positivas. Por mais que exista a possibilidade do cometimento do *erro do*

tipo I, não se descarta os possíveis efeitos de alterações significativas nas alturas de chuvas históricas mediante os efeitos das mudanças climáticas.

Por fim, estimativas de PMP merecem atualizações a todo momento, pois é considerado um cenário com base nos registros disponibilizados até então e nas incertezas associadas aos métodos empregados, sem contemplar possíveis alterações nos quantis advindos das mudanças climáticas. Contudo, diante de todo o exposto, promover estimativas de PMP confiáveis possibilitam uma maior segurança para as estruturas de reservação, como também dá ciência de possíveis limites atmosféricos ao poder público, de forma que se possa planejar melhor a sociedade frente à eventos extremos. Portanto, não somente o meio acadêmico, mas a sociedade, no geral, se beneficia de contribuições científicas como essa.

A seguir, sugere-se algumas recomendações para estudos futuros:

- Aplicar esse tipo de estudo em outras regiões do Brasil, em contextos meteorológicos distintos, comparando as questões climatológicas e a qualidade dos dados hidroclimáticos para as estimativas de PMP;
- Especialmente para as simulações sintéticas, ajustar distribuições específicas para cada duração, em cada estação pluviométrica. Além disso, ajustar uma distribuição de frequência a amostra de K_S de cada posto, de forma a selecionar valores dos fatores de frequência associados a alguma probabilidade de não excedência igual ou superior a 95%;
- Quanto a seleção dos postos de monitoramento, avaliar a compatibilidade entre as classificações climatológicas existentes na literatura com a identificação estatística de regiões homogêneas de Hosking e Wallis (1997), contemplando as medidas de discordância e heterogeneidade.

REFERÊNCIAS

ADDOR, N.; NEARING, G.; PRIETO, G.; NEWMAN, A. J.; LE VINE, N.; CLARK, M. P. A Ranking of Hydrological Signatures Based on Their Predictability in Space. **Water Resources Research**, v. 54, n. 11, p. 8792–8812, nov. 2018.

AFZALI-GOROUH, Z.; BAKHTIARI, B.; QADERI, K. Probable maximum precipitation estimation in a humid climate. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 18, n. 11, p. 3109–3119, 2018.

AHRENS, C. D. **Essentials of Meteorology** – An Invitation to the Atmosphere. 3ª ed. 454p, 2007.

AHRENS, C. D. **Essentials of Meteorology** – An Invitation to the Atmosphere. 5ª ed. 485p, 2008.

AHRENS, C. D. **Essentials of Meteorology** – An Invitation to the Atmosphere. 8ª ed. 509p, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. (2015). **Resolução ANEEL nº 696, de 15 de dezembro de 2015.** Estabelece critérios para classificação, formulação do Plano de Segurança e realização da Revisão Periódica de Segurança em barragens fiscalizadas pela ANEEL de acordo com o que determina a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, Ministério de Minas e Energia.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. (2022). **Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022.** Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília, DF, Ministério de Minas e Energia.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. SIGBM Público | Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/Sigbm/publico>. Acesso em: 29 out. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. (2016). **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens – Volume V: Diretrizes para a**

Elaboração de Projeto de Barragens. Brasília, DF, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. Rios. Institucional. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/a01764d3-4742-4f7d-b867-01bf544dde6d>. Acesso em: 30 out. 2023.

ALVAREZ, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: **Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos.** Rio de Janeiro, p. 16. 2017.

BALL J.; BABISTER M.; NATHAN R.; WEEKS W.; WEINMANN E.; RETALLICK M.; TESTONI I.; (Editors) **Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation**, Commonwealth of Australia (Geoscience Australia), 2019

BARBOSA, A. G.; DA SILVA, A. F. R.; COSTA, V. A. F. Estimativa espacial da Precipitação Máxima Provável com duração de 24 horas para o território brasileiro. **XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos,** p. 10, 2023.

BEROD, D.; DEVRED, D.; LAGLAINE, V. ; CHAIX, O.; ALTINAKAR, M.; DELLEY, P. Calcul des crues extrèmes par dés methodes deterministes du type pluie maximale probable (PMP)/crue maximale probable (PMF): application au cas de la Suisse. Lausanne, 1992.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E. Precipitação, em: **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, Ed. UFRG/ABRH/EDUSP, p.177-241, 1993.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G.M. **Time-Series Analysis, Forecasting and Control**. 1ª ed. San Francisco: Holden-Day, 1970.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G.M; REINSEL, G.C. **Time Series Analysis, Forecasting and Control**, 3ª ed. Englew ood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1994.

BROCKWELL, P. J.; DAVIS, R. A. **Introduction to time series and forecasting**. 2ª ed. New York: Springer, 2002.

BURGER, L, C. **Adaptação e análise do método de Hershfield para estimativa da precipitação máxima provável (PMP).** Dissertação – Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 100 p, 2014.

FERNANDES, W. S.; **Método para a estimação de quantis de enchentes extremas como o emprego conjunto de análise bayesiana, de informações não sistemáticas e de distribuições limitadas superiormente**. Tese - Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, 185 p. 2009.

CAMPOS, T.L.O.B.; MOTA, M.A.S.; SANTOS, S.R.Q. Eventos extremos de precipitação em Belém-PA: uma revisão de notícias históricas de jornais. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 10, n. 1, p. 182-194, mar. 2015.

CARVALHO, M.C.L. **Análise Regional da Precipitação Máxima Provável no Estado do Paraná.** 2000. 150 p. Dissertação – Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CAVALCANTI, I. F. A. Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case study for the first decade of the 21st century. **Atmospheric Research**, v. 118, p.27-40, 2012.

CAVALCANTI, R. L. C.; SILVA, C. H. D. S.; JESUS, E. S. D.; FILHO, M. C.; STOŠIĆ, T. Estudo da Precipitação Máxima Provável e tempo de retorno em Recife (PE). **III Congresso Internacional das Ciências Agrárias** - COINTER. João Pessoa - PB: PDVAgro 2018.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. – ELETROBRAS**. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas.** Rio de janeiro: Eletrobrás, 2003.

CHATFIELD, C. **Time-series forecasting**. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2001.

CHOW, V. T. A general formula for hydrologic frequency analysis. Trans. Am. **Geophys**. Union 32, 231-237, 1951.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied Hydrology**. McGraw-Hill, 1988. 572p.

CLARK, R. A.; H. E. SCHLOELLAR.: Problems of Inflow Design Flood Determination in the Tropics. American Society of Civil Engineers, **National Water Resources Engineering Meeting**, p. 26–30, 1970, Meeting Preprint 1117.

COELHO, M.S.; GAN, M. A.; CONFORTE, J. C. Estudo da Variabilidade da posição e da nebulosidade associada à ZCIT no Atlântico, durante a estação chuvosa de 1998 e 1999 no Nordeste do Brasil, 2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 1, p. 23-34, 2004.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientai**s. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p.

COLLISCHONN, W; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. IPH-UFRGS, 2010.

COMPANHIA DOCAS DO PARÁ – CDP. **Diagnóstico ambiental do Porto de Vila do Conde**. Companhia Docas do Pará, pp. 17-19, 2016.

COMPANHIA DOCAS DO PARÁ - CDP. **Porto de Vila do Conde** – Portal CDP., 2023. Disponível em: <https://www.cdp.com.br/porto-de-vila-do-conde/>. Acesso em: 29 out. 2023

CONCEIÇÃO, M. P. DA S.; FONTES, A. S. Risco hidrológico associado à Precipitação Máxima Provável em Barragens do semiárido baiano. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2019.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS - CNRH. (2022). **Resolução CNRH nº 143, de 10 de julho de 2012.** Estabelece critérios gerais de classificação de

barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7° da Lei n° 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional.

CONVÊNIO CETESB / ASCETESB. **Drenagem Urbana - Manual de Projetos**, 1986.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Levantamento da geodiversidade: projeto atlas pluviométrico do Brasil: isoietas anuais médias: período 1977 a 2006**, 2011.

DESA M, M. N.; NORIAH, A. B.; RAKHECHA, P. R. Probable maximum precipitation for 24 h duration over southeast Asian monsoon region—Selangor, Malaysia. **Atmospheric Research**, v. 58, n. 1, p. 41–54, 2001.

DESA M., M. N.; RAKHECHA, P. R. Probable maximum precipitation for 24-h duration over an equatorial region: Part 2-Johor, Malaysia. **Atmospheric Research**, v. 84, n. 1, p. 84–90, 2007.

DING, R., NNAMCHI, H.C.; YU, JY. et al. North Atlantic oscillation controls multidecadal changes in the North Tropical Atlantic−Pacific connection. **Nat Commun** 14, 862, 2023. https://doi.org/10.1038/s41467-023-36564-3.

DOOGE, James C. L. Looking for hydrologic laws. **Water Resources Research**, v. 22, n. 9S, p. 46S-58S, 1986.

ELETROBRAS, Eletrobras Centrais Elétricas Brasileiras SA (1987). **Guia para Cálculo de Cheia de Projeto de Vertedores**. Manual. Rio de Janeiro: Diretoria de Planejamento e Engenharia, 294.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Porto de Barcarena/Vila do Conde (PA) - Portal Embrapa**. Órgão Governamental. Disponível em: <https://www.embrapa.br/macrologistica/exportacao/porto_vila-do-conde>. Acesso em: 29 out. 2023.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. D. S. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no Clima da Região. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S.l.], v. 1, dez. 2005.

GRUBBS, F. E. Sample criteria for testing outlying observations. **Annals of Mathematical Statistics**, 21(1), pp. 27-58, 1950.

GRUBBS, F. E. Procedures for detecting outlying observations in samples. **Technometrics**, 11(1), pp. 1-21, 1969.

GRUBBS F. E.; BECK G. Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations. **Technometrics**, 14(4), pp. 847-854, 1972.

HAINES, Roger W. Jr. HVAC Systems and Equipment. 2016 Edition. **American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers**, Inc., 2016.

HART, T.L.: Survey of Probable Maximum Precipitation Studies Using the Synoptic Method of Storm Transposition and Maximization. Proceedings of the Workshop on Spillway Design, 7–9 October 1981, Conference Series No. 6, **Australian Water Resources Council, Australian Department of National Development and Energy, Canberra, Australian Government Publishing Service**. 1982.

HERSHFIELD, D. M. Technical Paper N. 40: Rainfall Frequency Atlas of the United States, Department of Commerce. **Weather Bureau**, Washington, DC, 1961a.

HERSHFIELD, D. M. Technical Estimating the probable maximum precipitation. Journal of Hydraulics Division: **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, 87: 99–106, 1961b.

HERSHFIELD, D. M. Method for estimating probable maximum rainfall. **American Water Works Association**, p. 965-972, 1965.

HIPEL, K.W.; MCLEOD, A.I. Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. New York: **Elsevier Science,** 1994).

HORTON, R. E. Hydrologic conditions as affecting the results of the application of methods of frequency analysis to flood records. U.S. Geological Survey Water-Supply Papers, n. 771, p. 433–449, 1936.

HYDRO. **Alunorte**. Institucional. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/barcarena/alunorte/>. Acesso em: 29 out. 2023a.

HYDRO. **Depósitos de Resíduos Sólidos. Institucional**. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/barcarena/alunorte/deposito-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 29 out. 2023b.

HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis - an approach based on L-moments**. Cambridge University Press, P.224, 1997.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Improving tailings dam safety: critical aspects of management, design, operation and closure. **Bulletin 139**. 2011.

INPE. **El Niño e La Niña - CPTEC/INPE**, Brasil, 2023. Governamental. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 27 jan. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil: 1991-2010.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília: INMET, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Clima do Brasil**, Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Unidades de Relevo do Brasil**, Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil**, Escala 1:50.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil**, Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa Político do Brasil** versão 2021, Escala 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

KENDALL, M. G., **Rank Correlation Measures**. Ed. Charles Griffin. London, 1975.

KENDALL, M. G., GIBBONS, J. D., **Rank Correlation Methods**. 5ª ed. Ed. Griffin. London, 1990.

KOUTSOYIANNIS, D. A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation. In: **Water Resources Research**, vol 35, N., 4 p. 1313-1322, Abril, 1999.

LIBISELLER, C.; GRIMVALL, A. Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. **Environmetrics** 13, 71–84, http://dx.doi.org/10.1002/env.507, 2002.

LAN, P.; LIN, B.; ZHANG, Y.; CHEN, H. Probable Maximum Precipitation Estimation Using the Revised K m-Value Method in Hong Kong. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 22, n. 8, p. 05017008, 2017.

LIN, B. Z. Application of the Step-Duration Orographic Intensification Factors Method to estimation of PMP for mountainous regions. **Journal of Hohai University**, p. 40-51. 1988.

LIBISELLER, C. e GRIMVALL, A., (2002), Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. **Environmetrics** 13, 71–84, http://dx.doi.org/10.1002/env.507.

LIBERTO, TOM DI. **The Walker Circulation: ENSO's atmospheric buddy**. NOAA - Climate, 2014. Disponível em: https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/walker-circulation-ensos-atmospheric-buddy. Acesso em: 13 dez. 2022.

LYRA, M. J. A; FEDEROVA, N.; LEVIT, V.; FREITAS, I. G. F. Características dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. spe, p. 727–734, dez. 2020.

MACHADO, L. A. T., R. L.; GUEDES, J. M. B.; SILVEIRA, R. C.; WALTZ M. A. S.; ALVES: Ciclo de vida de sistemas convectivos. **VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia,** SBMET, Anais, 2, 323-326, 1994.

MADDOX, R.A. Mesoscale Convective Complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 61, n. 11, p. 1374-1387, 1980.

MANN, H. B., Non-parametric tests against trend. **Econometrica** 13, 245-259, 1945.

MANN, H. B. e WHITNEY, D. R. On the test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Annals of Mathematical Statistics**, 18, pp. 50-60, 1947.

MANTUA, N. J. e HARE, S. R. The Pacific decadal oscillation. **Journal of Oceanography** (Japan), 58, 35–44, 2002.

MARTINS, V. M. P.; SILVA, F. E. O. Regionalização de assinaturas hidrológicas por intermédio da técnica *Random Forest*. **XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos,** 10 p., 2023.

MASTER/USP. **Zona de Convergência Intertropical. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas**. Universidade de São Paulo, 15 ago. 2010. Disponível em: <http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula15/>. Acesso em: 14 dez. 2022.

MCMILLAN, H. Linking hydrologic signatures to hydrologic processes: A review. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 6, p. 1393–1409, 15 mar. 2020.

MCMILLAN, H. K. A review of hydrologic signatures and their applications. **WIREs Water**, v. 8, n. 1, jan. 2021.

MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

METCALFE, A. V.; COWPERTWAIT, P. S. P. **Introductory Time Series with R**. 1ª ed. New York, NY: Springer New York, 2009.

MILLER, J.F.; HANSER E.M.; FENN D.D.; SCHREINER L.C; JENSEN D.T.. Probable Maximum Precipitation Estimates – United States Between the Continental Divide and the 103rd Meridian (HMR No. 55). **National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Department of Commerce**, Washington, DC. 1984.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. DE A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NASCIMENTO, D.; OLIVEIRA, I.; LUIZ, G. Panorama dos sistemas de classificação climática e as diferentes tipologias climáticas referentes ao estado de Goiás e ao Distrito Federal/Brasil. **Élisée - Revista de Geografia da UEG**, v. 5, n. 2, p. 59-86, 17 fev. 2017.

NASCIMENTO, J. G. **Regionalization of hydrological variables for the Paraná state, Brazil**. Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 15 jan. 2021.

NATHAN, R. J.; WEINMANN, P. E. Estimation of large and extreme floods for medium and large catchments: book VI. In: **Australian rainfall and runoff – a guide to flood estimation**, The Institution of Engineers, Australia, 4° ed., 2001.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC. Estimating Bounds on Extreme Precipitation Events – A Brief Assessment, Report of the Committee on Meteorological Analysis, Prediction and Research. **National Academy Press.** Washington, DC., 1994. 28 p.

NERC. Flood Studies Report, Vol. 1. London: **National Environmental Research Council**, 1975.

NETO, N. N.; GALERA, V. O que são os fenômenos El Niño e La Niña - **Revista Globo Rural | Tempo**. Jornalístico, 01 out. 2018. Disponível em: <https://globorural.globo.com/Noticias/Tempo/noticia/2018/10/o-que-sao-os-fenomenos-el-nino-e-la-nina.html>. Acesso em: 30 jan. 2023.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989.

PAPALEXIOU, S.M.; KOUTSOYIANNIS, D. A probabilistic approach to the concept of Probable Maximum Precipitation. **Adv. Geosci**., 7, 51–54, https://doi.org/10.5194/adgeo-7-51-2006. 2006.

PEEL, M. C. et al. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2007.

PINHEIRO, M. C. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. 1ª Edição, 2011. 171p.

PINTO, E. J. A. Abordagem probabilística da estimativa da precipitação máxima provável pelo método de Hershfield. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos do Países de Língua Portuguesa, 2001, Aracaju. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos do Países de Língua Portuguesa**, 2001.

QUEIROZ, A. C.; ARAGÃO, G. A. S.; SCHAPER, D. DO V. Critérios de fechamento para barragens: panorama da legislação brasileira versus diretrizes internacionais. **Seminário Nacional de Grandes Barragens**, n. XXXI, 2017.

RAKHECHA, P. R.; KENNEDY, M. R. A generalized technique for the estimation of probable maximum precipitation in India. **Journal of Hydrology**, 78: p. 345–359.1985

RAUDKIVI, A. J. (1979) Hydrology; an advanced introduction to hydrological processes and modelling. New York, **Pergamon**, 479p.

REBOITA, Michelle Simões *et al*. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.

ROCHE, M. (1963) Hydrologie de Surface. Paris, Gautiers-Villars, 429p.

SALAS, J. D.; GAVILÁN, G.; SALAS, F. R.; JULIEN, P. Y.; ABDULLAH, J. Uncertainty of the PMP and PMF. **Handbook of engineering hydrology**, 2, 575-603. 2014.

SALIO, P., NICOLINI, M.; ZIPSER, J. Mesoscale convective systems over southeastern South American low-level jet. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 1290-1309, 2007.

SANTOS, D. F.; REIBOTA, M. S. Jatos de Baixos Níveis a Leste dos Andes: Comparação entre duas reanálises. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.22, 425-445, Jun. 2018.

SARKAR, S.; MAITY, R. Estimation of Probable Maximum Precipitation in the context of climate change. **MethodsX**. v. 7, p. 100904, 2020.

SCHREINER, L.C.; RIEDEL J.T. Probable Maximum Precipitation Estimates, United States East of the 105th Meridian (HMR No. 51). **National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Department of Commerce**, Washington, DC. 1978.

SCHWARZ, F. K. **Probable Maximum Precipitation in the Hawaiian Islands (HMR No. 39)**. Weather Bureau, United States Department of Commerce, Washington, DC. 1963.

SILVA NETO, V. L.; VIOLA, M.; MELLO, C. R. DE; SILVA, D. D.; GIONGO, M. V. Precipitação Máxima Provável no estado do Tocantins: primeira aproximação pelo método estatístico de Hershfield. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, 2020.

SUGAI, M. R. VON B., **Tempo de Recorrência associado a Precipitação Máxima Provável na Região Sul do Brasil**, Dissertação de Mestrado, CEHPAR/UFPR, Curitiba, 1989.

SUGAI, M. R. VON. B.; II. D. FILL, Uma Fórmula para a Altura de Água Precipitável e sua Utilização na Estimativa da PMP, **Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 2, p.71-85,1991.

SZYMANSKI, M. B.; DAVIES, M. P. Tailings dams design criteria and safety evaluations at closure. **British Columbia Mine Reclamation Symposium**, 2004. DOI: 10.14288/1.0042456.

TABIOS III, G.Q.; J. D. SALAS, A Comparative Analysis of Techniques for Spatial Interpolation of Precipitation, **Water Resources Bulletin - American Water Resources Association**, v. 21, n. 3, p. 365-380, 1985.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação (Org.)**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS: ABRH, 2009. 943 p.

UNITED STATES WEATHER BUREAU. Probable Maximum Precipitation, Mekong River Basin, HMR No. 46, Environmental Science Services Administration, **United States Department of Commerce**, Washington, DC. 1970.

USGS Double-Mass Curves. **Manual of Hydrology: Part I**. General Surface-Water Techniques, by James K. Searcy and Clayton H. Hardison, United States Department of the Interior, 1966.

VECCHIA, Francisco Arthur da Silva; TECH, Adriano Rogério Bruno; NEVES, Gustavo Zen de Figueiredo. **Climatologia dinâmica: conceitos, técnicas e aplicações**. [S.l: s.n.], 2020. DOI: 10.11606/9786599048814.

WALD, A.; WOLFOWITZ, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. **Annals of Mathematical Statistics**, 14, pp. 78-388, 1943.

WMO. **Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP)**. Third revised edition ed. Geneva (Switzerland): World Meteorological Organization, No. 1045, 2009. 257 p.

ZANATTA, Igor Fernando Santini; DOMINGOS, Thiago Augusto; GARCIA, Valquíria Pires; DE JESUS, Lílian Gavioli. **Climatologia**. Londrina-PR: Educacional S.A, 2016. 222 p.

ANEXO A – Tabela de água precipitável segundo a WMO (2009)

Tabela A.1 – Água precipitável em uma coluna de ar acima da altura especificada, em função de uma temperatura de ponto de orvalho representativa a 1.000 hPa

TABLE A.1.3. Precipitable water (mm) in column of air above specified heights (m) as a function of the 1 000 hPa temperature (°C) (revised May 1981)

Height above MSL (m)	Temperature (°C)																				
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
0 (1000 hPa)	8.1	8.7	9.2	9.7	10.3	10.8	11.4	11.9	12.5	13.1	13.7	14.3	15.0	15.7	16.4	17.0	17.7	18.4	19.2	20.0	21.0
100	7.5	8.1	8.6	9.2	9.8	10.3	10.8	11.4	11.9	12.5	13.1	13.7	14.3	14.9	15.5	16.1	16.8	17.4	18.2	19.0	20.0
200	7.0	7.5	8.1	8.6	9.2	9.8	10.3	10.8	11.3	11.9	12.4	13.0	13.6	14.1	14.7	15.3	15.9	16.6	17.3	18.1	19.1
300	6.5	7.0	7.5	8.0	8.6	9.2	9.7	10.2	10.7	11.3	11.8	12.3	12.9	13.4	14.0	14.5	15.1	15.8	16.5	17.3	18.2
400	6.1	6.5	7.0	7.5	8.1	8.6	9.1	9.6	10.1	10.7	11.2	11.7	12.3	12.8	13.3	13.8	14.4	15.0	15.7	16.5	17.3
500	5.7	6.1	6.5	7.0	7.6	8.1	8.6	9.1	9.6	10.1	10.6	11.1	11.7	12.2	12.7	13.2	13.8	14.4	15.0	15.7	16.5
600	5.3	5.7	6.1	6.6	7.1	7.6	8.1	8.6	9.1	9.6	10.0	10.5	11.1	11.6	12.1	12.6	13.2	13.7	14.3	15.0	15.8
700	4.9	5.3	5.7	6.2	6.7	7.2	7.7	8.2	8.6	9.1	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.7	14.4	15.1
800	4.5	4.9	5.3	5.8	6.3	6.8	7.2	7.7	8.1	8.6	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.1	13.8	14.5
900	4.2	4.6	4.9	5.4	5.9	6.4	6.8	7.2	7.6	8.1	8.5	9.0	9.4	9.9	10.4	10.9	11.4	11.9	12.5	13.1	13.8
1 000	3.9	4.3	4.6	5.0	5.5	5.9	6.3	6.8	7.2	7.6	8.0	8.5	8.9	9.4	9.9	10.3	10.8	11.3	11.8	12.4	13.0
1 100	3.6	4.0	4.3	4.7	5.1	5.5	5.9	6.4	6.8	7.2	7.6	8.0	8.4	8.9	9.4	9.8	10.3	10.8	11.3	11.8	12.4
1 200	3.4	3.7	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0	6.4	6.7	7.1	7.6	8.0	8.4	8.9	9.3	9.8	10.2	10.7	11.3	11.9
1 300	3.1	3.4	3.7	4.2	4.5	4.9	5.2	5.6	6.0	6.3	6.7	7.1	7.5	8.0	8.4	8.8	9.3	9.7	10.2	10.8	11.3
1 400	2.9	3.2	3.5	3.9	4.3	4.6	4.9	5.3	5.7	6.0	6.3	6.7	7.1	7.5	8.0	8.4	8.8	9.2	9.7	10.2	10.7
1 500	2.7	3.0	3.3	3.7	4.0	4.3	4.6	4.9	5.3	5.7	6.0	6.3	6.7	7.1	7.5	7.9	8.3	8.7	9.1	9.6	10.2
1 600	2.5	2.8	3.1	3.4	3.7	4.0	4.3	4.6	5.0	5.4	5.7	6.0	6.4	6.7	7.1	7.5	7.9	8.3	8.7	9.2	9.7
1 700	2.3	2.6	2.9	3.2	3.4	3.7	4.0	4.3	4.7	5.0	5.3	5.6	6.0	6.3	6.7	7.0	7.4	7.8	8.2	8.7	9.2
1 800	2.1	2.4	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	5.6	6.0	6.3	6.6	7.0	7.4	7.8	8.2	8.7
1 900	1.9	2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	5.7	6.0	6.3	6.6	7.0	7.4	7.8	8.2
2 000	1.7	1.9	2.2	2.4	2.7	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	5.6	5.9	6.2	6.5	6.9	7.3	7.7
2 100	1.5	1.7	1.9	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	5.6	5.9	6.2	6.5	6.9	7.3
2 200	1.4	1.6	1.7	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5.0	5.3	5.6	5.9	6.2	6.5	6.9
2 300	1.3	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.9	5.2	5.5	5.9	6.2	6.6
2 400	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.8	4.0	4.3	4.6	4.9	5.2	5.5	5.8	6.2

Fonte: WMO (2009).

Tabela A.1 (Continuação) – Água precipitável em uma coluna de ar acima da altura especificada, em função de uma temperatura de ponto de orvalho representativa a 1.000 hPa

TABLE A.1.3. (Continued)

Height above MSL (m)	Temperature (°C)																			
	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0
0 (1000 hPa)	22.1	23.3	24.6	25.9	27.2	28.5	29.8	31.2	32.6	34.1	35.6	37.2	38.8	40.5	42.3	44.2	46.2	48.3	50.4	52.6
100	21.1	22.3	23.5	24.8	26.0	27.2	28.5	29.8	31.2	32.7	34.1	35.6	37.2	38.9	40.7	42.6	44.6	46.6	48.7	50.8
200	20.1	21.2	22.4	23.6	24.8	26.0	27.3	28.5	29.8	31.3	32.7	34.1	35.6	37.3	39.1	41.0	43.0	44.9	46.9	49.1
300	19.1	20.2	21.4	22.5	23.7	24.9	26.2	27.4	28.6	29.9	31.3	32.7	34.3	35.9	37.6	39.5	41.4	43.3	45.3	47.4
400	18.2	19.3	20.4	21.5	22.7	23.9	25.1	26.2	27.4	28.7	30.0	31.4	32.9	34.5	36.1	38.0	39.8	41.7	43.7	45.7
500	17.4	18.5	19.5	20.6	21.8	23.0	24.1	25.2	26.3	27.5	28.9	30.3	31.7	33.2	34.8	36.6	38.3	40.2	42.2	44.1
600	16.7	17.7	18.7	19.7	20.9	22.0	23.1	24.2	25.3	26.4	27.7	29.1	30.4	31.9	33.5	35.3	37.0	38.8	40.7	42.6
700	15.9	16.8	17.8	18.8	19.9	21.1	22.2	23.3	24.4	25.4	26.6	27.9	29.2	30.8	32.4	34.0	35.7	37.5	39.3	41.1
800	15.2	16.0	16.9	17.9	19.0	20.1	21.2	22.3	23.4	24.5	25.6	26.8	28.1	29.5	31.1	32.7	34.3	36.1	37.9	39.7
900	14.5	15.3	16.1	17.1	18.1	19.2	20.3	21.4	22.5	23.6	24.7	25.8	27.1	28.5	30.0	31.5	33.1	34.9	36.6	38.3
1 000	13.8	14.5	15.3	16.3	17.3	18.3	19.4	20.4	21.5	22.5	23.6	24.7	26.0	27.4	28.9	30.3	31.8	33.6	35.3	37.0
1 100	13.1	13.8	14.6	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.6	23.7	25.0	26.4	27.8	29.2	30.6	32.3	33.9	35.6
1 200	12.5	13.2	13.9	14.8	15.7	16.7	17.6	18.6	19.6	20.6	21.7	22.7	23.9	25.2	26.6	28.0	29.5	31.1	32.6	34.3
1 300	11.9	12.6	13.3	14.1	14.9	15.8	16.8	17.7	18.7	19.7	20.8	21.8	23.0	24.2	25.6	26.9	28.4	29.9	31.3	33.1
1 400	11.3	12.0	12.7	13.4	14.2	15.1	16.0	16.9	17.8	18.8	19.8	20.8	21.9	23.2	24.6	25.9	27.4	28.8	30.1	31.9
1 500	10.8	11.4	12.0	12.7	13.5	14.3	15.2	16.1	17.0	17.9	18.9	20.0	21.0	22.3	23.6	24.9	26.3	27.7	29.1	30.7
1 600	10.2	10.8	11.4	12.0	12.8	13.6	14.5	15.4	16.3	17.1	18.0	19.1	20.2	21.4	22.7	24.0	25.3	26.7	28.1	29.6
1 700	9.7	10.2	10.8	11.4	12.2	13.0	13.8	14.7	15.6	16.4	17.3	18.3	19.4	20.4	21.6	22.9	24.2	25.6	27.0	28.5
1 800	9.2	9.7	10.3	10.9	11.6	12.4	13.2	14.0	14.9	15.7	16.5	17.5	18.5	19.5	20.7	21.9	23.2	24.6	26.0	27.4
1 900	8.7	9.2	9.8	10.4	11.1	12.9	12.6	13.4	14.2	15.0	15.8	16.7	17.6	18.7	19.8	21.1	22.3	23.7	25.0	26.4
2 000	8.2	8.7	9.3	9.9	10.6	11.4	12.1	12.8	13.5	14.3	15.1	16.0	17.0	18.0	19.1	20.4	21.5	22.7	24.0	25.4
2 100	7.8	8.3	8.8	9.4	10.1	10.8	11.5	12.2	12.9	13.7	14.5	15.3	16.3	17.3	18.4	19.6	21.7	21.9	23.1	24.5
2 200	7.4	7.9	8.4	9.0	9.6	10.3	11.0	11.7	12.4	13.1	13.8	14.6	15.6	16.6	17.7	18.8	19.9	21.1	22.3	23.6
2 300	7.0	7.5	8.0	8.6	9.2	9.9	10.5	11.2	11.9	12.5	13.2	14.0	14.8	15.8	16.8	17.9	19.0	20.2	21.4	22.7
2 400	6.6	7.1	7.6	8.2	8.8	9.5	10.1	10.7	11.4	12.0	12.7	13.5	14.3	15.1	16.0	17.0	18.1	19.3	20.5	21.8

Fonte: WMO (2009).

Tabela A.1 (Continuação) – Água precipitável em uma coluna de ar acima da altura especificada, em função de uma temperatura de ponto de orvalho representativa a 1.000 hPa

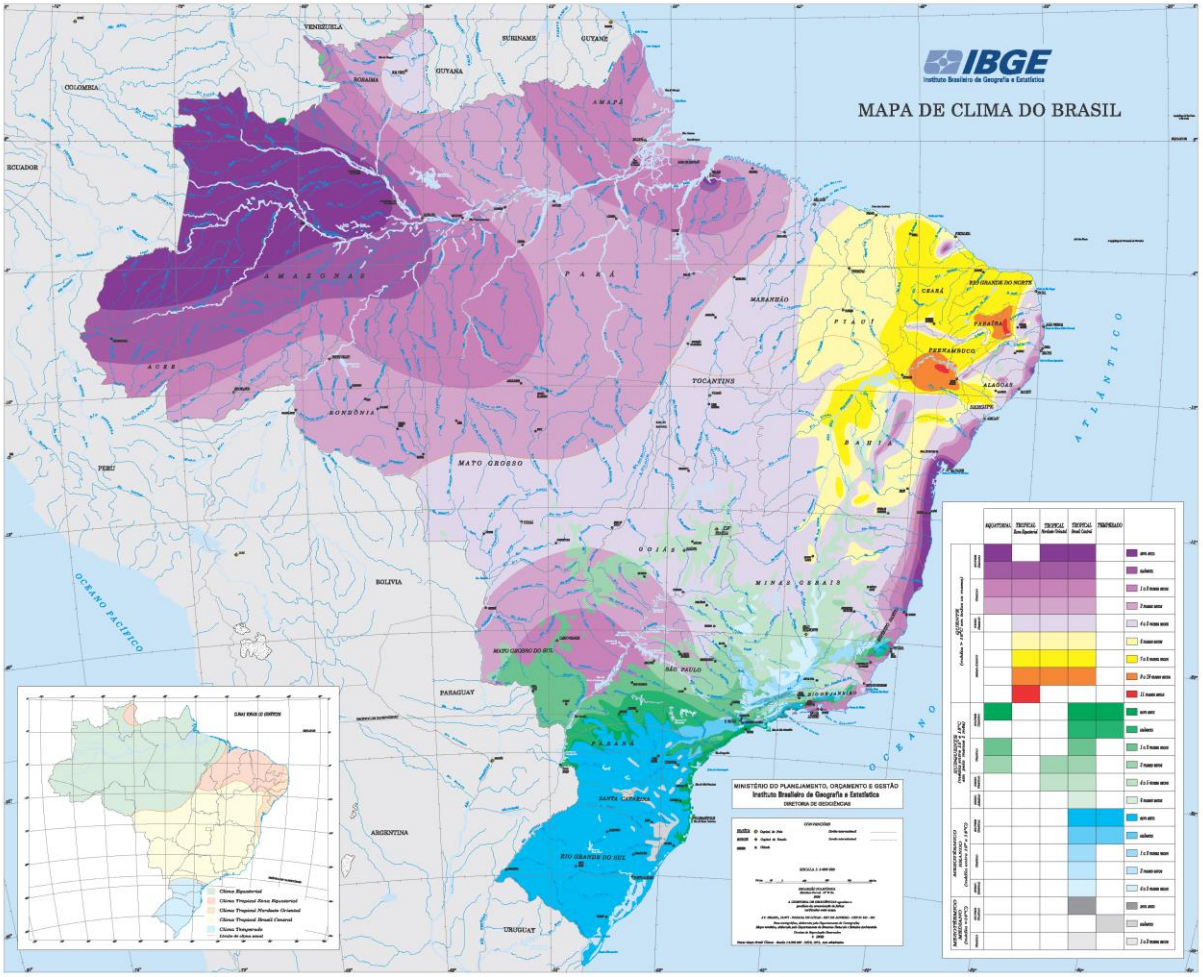
TABLE A.1.3. (Continued)

Height above MSL (m)	Temperature (°C)																			
	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0
0 (1000 hPa)	54.8	57.1	59.5	62.1	64.9	67.9	71.0	74.3	77.5	80.8	84.3	88.0	91.9	95.9	100.	104.5	109.1	113.9	118.9	124.2
100	52.9	55.3	57.6	60.2	62.9	65.9	68.8	72.0	75.2	78.6	82.0	85.6	89.4	93.4	97.5	101.8	106.3	111.1	115.8	121.0
200	51.2	53.5	55.8	58.3	61.0	63.8	66.7	69.8	72.9	76.3	79.7	83.2	86.9	90.9	94.9	99.2	103.6	108.2	112.7	117.8
300	49.5	51.7	54.1	56.5	59.1	61.9	64.7	67.7	70.7	74.4	77.5	80.9	84.6	88.5	92.5	96.7	100.9	105.3	109.9	114.9
400	47.8	50.0	52.4	54.8	57.3	60.0	62.7	65.7	68.7	72.0	75.3	78.7	82.3	86.2	90.1	94.2	98.4	102.7	107.2	112.1
500	46.2	48.4	50.8	53.1	55.5	58.1	60.8	63.7	66.6	69.9	73.2	76.6	80.1	84.0	87.8	91.8	95.9	100.1	104.6	109.4
600	44.7	46.8	49.1	51.4	53.8	56.3	58.9	61.8	64.7	68.0	71.3	74.6	78.1	81.9	85.6	89.4	93.4	97.6	102.0	106.7
700	43.1	45.2	47.6	49.8	52.1	54.6	57.1	60.0	62.9	66.1	69.3	72.6	76.0	79.7	83.3	87.0	91.0	95.1	99.6	104.1
800	41.6	43.7	46.0	48.2	50.5	52.9	55.3	58.1	61.0	64.2	67.4	70.7	74.1	77.5	81.0	84.6	88.6	92.7	97.2	101.5
900	40.2	42.3	44.5	46.6	48.8	51.2	53.6	56.3	59.1	62.3	65.5	68.8	72.0	75.3	78.7	82.3	86.2	90.2	94.7	99.0
1 000	38.8	40.8	43.0	45.1	47.3	49.5	51.8	54.5	57.3	60.4	63.6	66.9	70.0	73.1	76.4	80.0	83.8	87.9	92.4	96.5
1 100	37.4	39.3	41.4	43.6	45.7	47.9	50.1	52.7	55.4	58.5	61.8	65.1	68.1	71.0	74.3	77.8	81.7	85.7	90.2	94.1
1 200	36.0	37.9	39.9	42.2	44.3	46.4	48.4	51.0	53.7	56.7	60.0	63.2	66.3	69.0	72.2	75.7	79.5	83.5	88.0	91.7
1 300	34.8	36.6	38.6	40.8	42.8	44.9	46.9	49.4	52.0	55.0	58.1	61.3	64.3	67.0	70.2	73.6	77.2	81.3	85.7	89.4
1 400	33.6	35.3	37.3	39.5	41.5	43.4	45.3	47.8	50.4	53.4	56.4	59.5	62.4	65.1	68.2	71.5	75.1	79.1	83.5	87.2
1 500	32.2	34.0	36.0	38.1	40.0	41.9	43.8	46.2	48.7	51.8	54.8	57.8	60.7	63.3	66.3	69.5	73.1	77.0	81.3	84.9
1 600	31.1	32.8	34.6	36.7	38.6	40.4	42.3	44.7	47.2	50.3	53.2	56.2	59.0	61.6	64.5	67.6	71.2	75.0	79.2	82.7
1 700	30.0	31.6	33.4	35.4	37.3	39.1	41.0	43.3	45.7	48.7	51.6	54.5	57.3	59.9	62.7	65.8	69.3	73.0	77.0	80.4
1 800	28.9	30.5	32.2	34.2	36.1	37.9	39.7	42.0	44.4	47.2	50.0	52.8	55.6	58.2	61.0	64.1	67.5	71.1	75.0	78.2
1 900	27.9	29.5	31.2	33.1	34.9	36.7	38.5	40.7	43.0	45.8	48.5	51.2	53.9	56.6	59.4	62.5	65.8	69.2	72.8	76.0
2 000	26.8	28.4	30.1	32.0	33.8	35.5	37.3	39.5	41.8	44.4	47.0	49.6	52.3	55.0	57.8	60.9	64.1	67.5	70.9	73.8
2 100	25.9	27.5	29.0	30.8	32.5	34.4	36.2	38.3	40.5	43.0	45.5	48.1	50.7	53.5	56.3	59.3	62.5	65.7	69.0	71.9
2 200	25.0	26.5	27.9	29.6	31.3	33.2	35.0	37.1	39.3	41.8	44.2	46.6	49.2	51.8	54.7	57.7	60.8	63.9	67.2	70.1
2 300	24.0	25.5	26.9	28.6	30.2	32.1	34.0	36.0	37.2	40.0	42.6	45.2	47.8	50.5	53.2	56.1	59.1	62.2	65.4	68.4
2 400	23.1	24.5	26.0	27.6	29.3	31.1	33.0	35.0	37.1	39.3	41.6	44.0	46.5	49.1	51.8	54.6	57.5	60.5	63.6	66.8

Fonte: WMO (2009).

ANEXO B – MAPA DE CLIMA DO BRASIL (IBGE, 2002)

Figura B.1 – Mapa de clima do Brasil conforme IBGE (2002)



Fonte: IBGE (2002).

Para mais informações acessar: https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15817-clima.html

APÊNDICE C – Estatística Descritiva dos Postos Pluviométricos e Teste para Detecção e Identificação de Pontos Atípicos (*outliers*)

Tabela C.1 - Estatísticas descritivas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 24 horas

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00047002	39	157,94	32,20	265,30	98,30	1.036,95	0,204	0,853	4,719	157,94	17,54	0,085	0,203
00047003	34	138,17	31,44	205,30	88,70	988,27	0,228	0,062	2,352	138,17	18,04	-0,015	0,075
00047004	39	123,72	24,21	172,10	79,70	585,90	0,196	0,060	2,083	123,72	14,04	0,019	0,046
00047005	29	143,07	49,58	238,70	87,30	2.457,91	0,347	0,626	1,980	143,07	27,89	0,219	-0,004
00047006	31	149,45	38,00	221,40	83,20	1.444,15	0,254	0,145	2,041	149,45	22,09	0,037	0,038
00047007	25	116,35	34,92	220,40	68,40	1.219,39	0,300	1,235	4,433	116,35	18,70	0,253	0,234
00048000	33	169,03	40,53	276,60	102,80	1.642,75	0,240	0,679	3,088	169,03	22,77	0,154	0,155
00048006	39	112,63	33,44	209,40	28,50	1.117,94	0,297	0,420	4,214	112,63	18,20	0,104	0,228
00049009	23	104,77	25,55	159,40	68,10	653,03	0,244	0,529	2,680	104,77	14,51	0,107	0,136
00049011	23	107,10	28,48	177,30	63,40	810,92	0,266	0,523	2,912	107,10	16,33	0,098	0,124
82191	58	107,85	30,04	218,80	55,10	902,13	0,278	1,319	5,660	107,85	15,85	0,187	0,232
82263	50	128,17	39,18	287,50	81,60	1.535,20	0,306	2,006	7,899	128,17	19,44	0,316	0,261
00146011	27	92,89	31,09	164,00	55,90	966,75	0,335	0,625	2,246	92,89	17,69	0,197	0,009
00147002	55	114,92	41,78	259,60	45,40	1.745,70	0,364	1,263	4,865	114,92	22,12	0,238	0,223
00147006	16	95,73	23,55	155,50	65,00	554,69	0,246	0,826	3,617	95,73	13,30	0,144	0,150
00147007	47	116,11	45,44	260,60	51,50	2.064,94	0,391	1,104	3,987	116,11	24,78	0,235	0,148
00147008	45	89,43	23,16	145,70	45,90	536,21	0,259	0,221	2,798	89,43	13,15	0,058	0,132
00147010	39	108,02	33,13	224,90	61,10	1.097,67	0,307	1,607	5,932	108,02	17,00	0,280	0,260
00147011	40	105,53	31,48	246,40	56,70	991,01	0,298	2,205	11,176	105,53	15,52	0,188	0,256
00147016	31	98,99	33,16	225,20	61,30	1.099,73	0,335	1,811	7,762	98,99	17,08	0,247	0,199
00147017	31	112,53	23,03	184,10	75,80	530,23	0,205	0,750	4,260	112,53	12,78	0,073	0,152
00147018	29	100,27	47,27	285,10	56,80	2.234,28	0,471	2,662	10,361	100,27	21,01	0,402	0,365
00147019	26	91,12	19,11	131,40	56,00	365,06	0,210	0,257	2,425	91,12	10,99	0,051	0,074
00148001	28	109,94	28,52	209,00	70,90	813,15	0,259	1,606	6,393	109,94	14,92	0,256	0,232
00148002	67	107,14	29,06	228,90	56,50	844,23	0,271	1,393	6,383	107,14	15,48	0,195	0,155
00148003	49	114,10	63,86	467,40	51,10	4.078,37	0,560	3,596	20,252	114,10	27,88	0,338	0,294
00148009	40	119,72	25,27	179,70	73,00	638,42	0,211	0,509	2,621	119,72	14,40	0,126	0,096
00148010	39	109,19	32,92	206,10	50,40	1.083,80	0,302	0,315	3,570	109,19	18,43	0,013	0,154
00148011	38	115,98	40,77	227,00	58,70	1.662,60	0,352	0,966	3,540	115,98	22,51	0,204	0,157
00148012	39	124,67	43,27	255,90	69,90	1.871,93	0,347	1,248	4,570	124,67	23,22	0,220	0,189
00148017	28	76,17	20,23	113,10	44,70	409,35	0,266	0,292	1,822	76,17	11,75	0,097	-0,010
00148018	25	116,51	35,65	218,90	56,50	1.270,88	0,306	0,632	4,076	116,51	19,84	0,059	0,203
00149003	38	118,04	31,86	193,60	68,20	1.015,29	0,270	0,791	2,867	118,04	17,61	0,204	0,164
00149004	25	102,91	44,91	194,70	47,50	2.016,53	0,436	0,291	2,014	102,91	25,94	0,091	-0,019
00149005	18	112,15	34,57	173,30	57,20	1.195,13	0,308	0,216	2,348	112,15	19,95	0,040	0,133
00149006	17	124,95	44,11	227,80	76,00	1.945,76	0,353	1,190	3,582	124,95	23,98	0,301	0,183
00247000	47	110,70	26,95	201,70	62,90	726,07	0,243	0,978	4,483	110,70	14,65	0,172	0,197
00247003	37	96,52	37,35	195,20	51,80	1.394,73	0,387	0,746	3,175	96,52	20,80	0,156	0,068
00247004	35	113,98	30,00	201,20	69,30	900,01	0,263	0,970	3,610	113,98	16,51	0,210	0,166

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00247006	31	95,36	31,88	153,90	45,00	1.016,05	0,334	0,086	2,067	95,36	18,52	0,019	0,049
00247008	21	112,54	28,48	176,10	70,80	811,25	0,253	0,671	3,188	112,54	15,26	0,132	0,306
00248001	38	108,93	27,02	186,70	68,40	729,86	0,248	1,173	4,201	108,93	14,56	0,229	0,195
00248003	36	110,80	20,83	154,70	67,90	433,95	0,188	-0,205	2,762	110,80	11,84	-0,056	0,162
00248006	32	119,97	24,49	192,30	81,90	599,68	0,204	0,876	3,850	119,97	13,54	0,157	0,187
00249001	23	127,24	28,15	199,50	94,60	792,17	0,221	0,970	3,057	127,24	15,61	0,272	0,093
00249002	41	119,29	28,13	210,20	73,00	791,58	0,236	0,990	4,057	119,29	15,43	0,199	0,154
00249003	34	126,25	35,74	258,10	79,00	1.277,70	0,283	1,533	6,592	126,25	18,71	0,204	0,152
00249004	27	124,23	28,72	178,90	78,20	824,92	0,231	0,134	2,064	124,23	16,71	0,026	0,045
00348001	35	123,31	35,62	202,60	67,70	1.268,78	0,289	0,446	2,334	123,31	20,40	0,121	0,085
00348002	26	119,47	44,12	272,10	39,40	1.946,47	0,369	1,408	6,704	119,47	23,14	0,165	0,222
A201	20	96,54	20,42	138,30	68,70	417,17	0,212	0,529	2,548	96,54	11,67	0,131	0,133
A202	20	88,84	34,58	185,90	41,20	1.195,98	0,389	1,375	4,427	88,84	18,13	0,332	0,270

Fonte: autoria própria.

Tabela C.2 – Estatísticas descritivas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 3 dias

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00047002	39	237,15	57,84	437,10	152,50	3.345,85	0,244	1,527	6,144	237,15	29,94	0,211	0,261
00047003	34	198,09	54,09	310,00	127,30	2.926,24	0,273	0,652	2,185	198,09	30,65	0,206	0,030
00047004	39	182,73	40,38	250,00	91,40	1.630,49	0,221	-0,181	2,159	182,73	23,28	-0,040	0,043
00047005	29	208,92	53,69	363,90	123,80	2.882,86	0,257	0,933	3,814	208,92	29,71	0,183	0,184
00047006	31	223,75	67,72	357,30	108,90	4.585,57	0,303	0,351	2,027	223,75	39,21	0,111	0,028
00047007	25	184,90	46,72	282,20	104,10	2.182,87	0,253	0,161	2,313	184,90	27,19	0,038	0,096
00048000	33	240,63	61,55	382,10	144,10	3.788,97	0,256	0,283	2,285	240,63	35,70	0,062	0,057
00048006	39	161,88	55,93	392,40	68,60	3.128,32	0,346	1,805	8,643	161,88	28,46	0,201	0,272
00049009	23	135,43	30,87	219,70	100,00	952,90	0,228	1,122	3,566	135,43	16,81	0,290	0,144
00049011	23	153,74	30,33	212,10	86,30	920,04	0,197	-0,052	2,947	153,74	17,27	-0,008	0,161
82191	58	151,87	38,79	280,60	94,30	1.504,44	0,255	1,172	4,951	151,87	21,04	0,178	0,136
82263	50	173,76	42,90	303,00	115,10	1.840,63	0,247	1,302	4,301	173,76	22,69	0,281	0,209
00146011	27	130,76	34,58	211,60	88,30	1.195,93	0,264	0,774	2,578	130,76	19,46	0,217	0,084
00147002	55	153,83	55,08	430,00	77,50	3.033,85	0,358	2,409	12,784	153,83	27,04	0,202	0,232
00147006	16	137,23	24,61	184,20	101,10	605,57	0,179	0,202	1,973	137,23	14,50	0,053	0,014
00147007	47	160,24	51,40	304,20	85,60	2.641,76	0,321	0,800	3,255	160,24	28,61	0,171	0,139
00147008	45	124,67	29,43	199,80	72,20	865,93	0,236	0,581	2,939	124,67	16,63	0,127	0,131
00147010	39	141,51	40,58	251,60	75,60	1.646,61	0,287	0,608	3,126	141,51	22,91	0,114	0,140
00147011	40	143,11	36,29	246,10	81,70	1.316,89	0,254	0,828	3,755	143,11	20,09	0,142	0,187
00147016	31	127,44	36,32	255,90	77,80	1.318,83	0,285	1,635	6,467	127,44	18,73	0,262	0,259
00147017	31	149,30	39,94	274,90	103,30	1.595,09	0,268	1,570	4,919	149,30	20,28	0,350	0,256
00147018	29	132,44	42,51	290,40	75,10	1.806,83	0,321	2,261	8,556	132,44	19,85	0,369	0,378
00147019	26	120,62	20,93	152,20	84,60	438,16	0,174	0,063	1,719	120,62	12,17	0,023	-0,027
00148001	28	136,17	31,50	210,80	93,80	992,11	0,231	0,773	2,704	136,17	17,67	0,206	0,127
00148002	67	140,26	30,02	220,30	95,00	901,19	0,214	0,625	2,821	140,26	16,98	0,136	0,099
00148003	49	148,91	52,28	414,70	92,80	2.733,58	0,351	2,916	14,942	148,91	24,15	0,308	0,304

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00148009	40	157,84	33,48	268,40	97,80	1.120,78	0,212	0,980	4,547	157,84	18,32	0,154	0,190
00148010	39	150,78	47,58	288,10	88,10	2.263,87	0,316	1,155	4,218	150,78	25,82	0,221	0,160
00148011	38	158,92	52,33	323,30	89,60	2.738,46	0,329	1,093	4,228	158,92	28,55	0,201	0,169
00148012	39	162,27	49,95	367,40	98,50	2.494,66	0,308	1,964	8,477	162,27	25,31	0,279	0,225
00148017	28	119,87	24,13	187,00	73,50	582,45	0,201	0,601	3,718	119,87	13,47	0,104	0,202
00148018	25	150,16	46,00	295,00	87,20	2.115,69	0,306	1,089	5,004	150,16	25,00	0,128	0,174
00149003	38	153,67	37,51	262,80	77,80	1.406,93	0,244	0,998	4,506	153,67	20,08	0,171	0,253
00149004	25	148,49	54,13	248,30	60,50	2.930,49	0,365	0,318	2,209	148,49	31,31	0,093	0,087
00149005	18	152,38	31,93	209,20	91,80	1.019,29	0,210	-0,009	2,254	152,38	18,62	0,010	0,098
00149006	17	160,41	70,11	372,00	102,50	4.915,97	0,437	1,884	5,987	160,41	34,45	0,479	0,298
00247000	47	145,85	30,85	231,20	81,30	951,44	0,211	0,459	3,766	145,85	16,80	0,092	0,256
00247003	37	138,25	37,22	223,30	81,70	1.385,04	0,269	0,783	2,636	138,25	20,83	0,222	0,077
00247004	35	157,84	36,45	267,80	106,60	1.328,28	0,231	1,139	4,324	157,84	19,73	0,215	0,206
00247006	31	132,79	46,27	287,50	73,90	2.141,10	0,348	1,569	5,644	132,79	24,01	0,297	0,230
00247008	21	158,97	33,74	230,00	101,10	1.138,13	0,212	0,039	2,843	158,97	19,10	-0,011	0,207
00248001	38	139,32	30,68	233,30	95,00	941,43	0,220	1,000	3,914	139,32	16,86	0,196	0,169
00248003	36	145,66	25,19	207,10	93,30	634,35	0,173	-0,007	3,041	145,66	14,22	-0,015	0,172
00248006	32	150,66	32,21	260,50	89,90	1.037,80	0,214	1,132	5,489	150,66	17,38	0,158	0,185
00249001	23	143,81	25,20	182,20	89,90	635,25	0,175	-0,088	2,223	143,81	14,66	-0,001	0,052
00249002	41	157,59	31,94	226,80	102,60	1.019,86	0,203	0,458	2,524	157,59	18,27	0,111	0,098
00249003	34	188,02	64,68	431,00	101,30	4.183,86	0,344	1,731	7,004	188,02	33,37	0,278	0,207
00249004	27	186,46	59,56	316,90	104,30	3.547,11	0,319	0,930	2,874	186,46	32,56	0,257	0,169
00348001	35	160,08	40,84	244,30	73,20	1.668,14	0,255	0,066	2,381	160,08	23,61	0,026	0,090
00348002	26	149,44	39,13	257,80	77,70	1.530,82	0,262	0,458	3,587	149,44	21,96	0,032	0,127
A201	20	139,31	25,70	204,20	109,20	660,47	0,184	1,304	4,255	139,31	13,72	0,269	0,234
A202	20	128,25	46,36	248,40	74,40	2.149,16	0,361	1,165	3,496	128,25	25,14	0,327	0,164

Fonte: autoria própria.

Tabela C.3 – Estatísticas descritivas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 5 dias

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00047002	39	292,94	64,08	454,00	201,40	4.106,66	0,219	0,850	3,397	292,94	35,52	0,162	0,161
00047003	34	256,16	64,36	472,00	168,70	4.141,94	0,251	1,172	4,837	256,16	35,19	0,199	0,125
00047004	39	229,41	50,68	316,50	116,90	2.568,68	0,221	-0,498	2,522	229,41	28,96	-0,125	0,089
00047005	29	272,32	79,28	519,00	169,70	6.285,58	0,291	1,209	4,502	272,32	42,77	0,237	0,203
00047006	31	271,32	78,29	499,00	154,90	6.129,61	0,289	0,896	3,746	271,32	43,61	0,166	0,142
00047007	25	239,71	54,70	363,10	133,80	2.991,63	0,228	0,335	2,856	239,71	31,16	0,060	0,155
00048000	33	306,76	83,40	485,10	191,20	6.954,93	0,272	0,378	2,042	306,76	48,21	0,109	0,020
00048006	39	200,95	57,50	449,00	104,20	3.306,53	0,286	2,006	10,132	200,95	28,58	0,191	0,272
00049009	23	177,63	29,06	258,60	142,90	844,49	0,164	1,137	4,190	177,63	15,78	0,206	0,161
00049011	23	192,38	34,66	251,40	115,10	1.201,34	0,180	-0,390	2,463	192,38	19,95	-0,088	0,074
82191	58	197,87	56,29	451,10	123,60	3.168,87	0,284	2,023	9,092	197,87	28,28	0,259	0,241
82263	50	215,79	49,62	379,60	127,40	2.462,59	0,230	1,399	5,425	215,79	25,96	0,234	0,231
00146011	27	167,73	36,17	262,20	101,80	1.308,24	0,216	0,616	3,479	167,73	20,28	0,102	0,171

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00147002	55	192,73	59,85	464,50	109,40	3.582,59	0,311	1,730	8,918	192,73	31,19	0,157	0,170
00147006	16	174,83	33,00	239,60	124,80	1.089,20	0,189	0,387	2,267	174,83	19,25	0,111	0,095
00147007	47	199,02	65,49	354,80	102,70	4.289,26	0,329	0,587	2,428	199,02	37,23	0,153	0,074
00147008	45	155,17	35,32	283,20	79,30	1.247,54	0,228	0,918	5,411	155,17	19,17	0,101	0,202
00147010	39	177,33	45,28	292,10	106,30	2.050,07	0,255	0,710	3,306	177,33	25,19	0,139	0,190
00147011	40	181,87	51,89	377,80	115,80	2.692,59	0,285	1,522	6,239	181,87	27,40	0,253	0,171
00147016	31	159,76	43,27	305,40	98,30	1.872,71	0,271	1,386	5,417	159,76	22,92	0,236	0,216
00147017	31	187,76	37,73	297,10	123,50	1.423,85	0,201	1,013	4,075	187,76	20,68	0,198	0,190
00147018	29	163,46	38,36	308,20	124,40	1.471,21	0,235	2,115	8,363	163,46	18,96	0,330	0,266
00147019	26	154,41	23,39	189,30	98,10	546,88	0,151	-0,554	2,776	154,41	13,36	-0,123	0,132
00148001	28	179,64	38,75	273,90	115,30	1.501,44	0,216	0,447	2,986	179,64	22,07	0,078	0,154
00148002	67	184,17	39,31	298,60	122,20	1.545,06	0,213	0,714	3,289	184,17	21,96	0,136	0,144
00148003	49	187,80	53,16	434,80	119,30	2.825,59	0,283	2,231	10,768	187,80	26,45	0,261	0,211
00148009	40	201,34	50,01	323,80	106,20	2.501,48	0,248	0,820	3,337	201,34	27,50	0,201	0,170
00148010	39	186,13	49,87	338,90	123,00	2.487,28	0,268	1,262	4,696	186,13	26,84	0,231	0,167
00148011	38	206,27	59,78	337,70	107,60	3.573,53	0,290	0,523	2,625	206,27	33,97	0,117	0,091
00148012	39	209,23	61,34	472,70	131,50	3.762,26	0,293	2,135	9,811	209,23	30,79	0,261	0,206
00148017	28	158,36	36,37	242,20	94,10	1.322,85	0,230	0,289	2,592	158,36	20,94	0,048	0,092
00148018	25	183,78	56,02	323,40	100,60	3.137,99	0,305	0,903	3,547	183,78	31,17	0,179	0,176
00149003	38	201,28	50,18	326,30	111,30	2.518,05	0,249	0,885	3,595	201,28	27,43	0,187	0,199
00149004	25	188,75	70,49	314,90	60,50	4.969,09	0,373	0,030	2,211	188,75	41,08	0,005	0,094
00149005	18	204,76	50,57	337,80	132,00	2.557,70	0,247	0,916	3,700	204,76	28,18	0,190	0,155
00149006	17	193,85	68,70	392,50	122,00	4.719,85	0,354	1,546	5,134	193,85	36,24	0,349	0,220
00247000	47	187,14	38,39	342,60	101,30	1.474,05	0,205	1,307	7,551	187,14	19,68	0,139	0,302
00247003	37	178,40	49,08	315,40	106,70	2.408,96	0,275	1,306	4,115	178,40	25,83	0,309	0,218
00247004	35	201,94	60,69	401,30	113,00	3.683,67	0,301	1,477	5,212	201,94	31,67	0,293	0,244
00247006	31	168,39	55,14	347,20	90,70	3.040,26	0,327	1,512	5,287	168,39	28,58	0,309	0,253
00247008	21	208,85	48,92	333,70	128,10	2.393,06	0,234	0,719	3,307	208,85	27,51	0,155	0,154
00248001	38	174,28	34,19	253,20	117,50	1.168,67	0,196	0,562	2,668	174,28	19,42	0,129	0,117
00248003	36	196,06	33,76	265,20	122,20	1.139,50	0,172	0,018	2,400	196,06	19,50	0,016	0,089
00248006	32	192,80	43,92	337,80	109,50	1.928,53	0,228	0,843	5,129	192,80	23,77	0,073	0,236
00249001	23	183,20	37,10	242,00	109,50	1.376,50	0,203	-0,213	2,222	183,20	21,44	-0,061	0,102
00249002	41	202,37	43,76	317,40	122,50	1.914,88	0,216	0,501	3,027	202,37	24,77	0,088	0,141
00249003	34	229,16	68,92	480,70	144,00	4.749,36	0,301	1,584	6,351	229,16	36,15	0,268	0,155
00249004	27	236,72	75,15	422,60	137,00	5.647,46	0,317	0,845	2,890	236,72	42,13	0,219	0,114
00348001	35	195,93	50,03	307,00	108,00	2.503,01	0,255	0,413	2,497	195,93	28,70	0,101	0,110
00348002	26	186,82	42,47	293,50	106,30	1.803,77	0,227	0,370	3,029	186,82	24,22	0,051	0,128
A201	20	184,12	37,68	289,20	142,00	1.419,96	0,205	1,254	4,250	184,12	20,49	0,278	0,173
A202	20	155,80	46,35	254,80	97,40	2.148,32	0,297	0,733	2,427	155,80	26,20	0,220	0,094

Fonte: autoria própria.

Tabela C.4 – Estatísticas descritivas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 10 dias

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
47002	39	429,37	99,89	736,10	277,40	9.977,77	0,233	1,151	4,205	429,37	54,19	0,235	0,167
00047002	34	372,12	100,59	774,00	203,50	10.119,23	0,270	1,857	8,676	372,12	51,09	0,205	0,244
00047003	39	341,60	79,33	547,40	195,40	6.293,76	0,232	0,136	2,722	341,60	45,45	-0,001	0,095
00047004	29	393,39	105,46	718,80	249,10	11.122,12	0,268	1,048	4,157	393,39	58,14	0,206	0,094
00047005	31	392,02	106,08	578,00	227,90	11.252,81	0,271	-0,042	1,795	392,02	61,95	-0,013	-0,008
00047006	25	367,84	88,48	551,80	209,60	7.829,50	0,241	0,181	2,288	367,84	51,49	0,045	0,092
00047007	33	456,57	125,91	734,20	286,00	15.852,56	0,276	0,721	2,645	456,57	71,09	0,183	0,097
00048000	39	296,74	70,24	547,10	177,90	4.934,26	0,237	1,242	5,885	296,74	37,35	0,144	0,237
00048006	23	252,40	41,60	348,30	195,60	1.730,40	0,165	0,629	2,541	252,40	23,86	0,168	0,071
00049009	23	278,50	49,38	373,30	186,30	2.438,80	0,177	0,062	2,586	278,50	28,40	0,035	0,151
00049011	58	289,88	74,85	577,00	196,10	5.602,84	0,258	1,512	6,268	289,88	39,38	0,215	0,167
82191	50	307,53	59,35	491,60	195,50	3.522,03	0,193	0,835	3,814	307,53	32,88	0,149	0,146
82263	27	240,34	40,97	351,00	160,70	1.678,35	0,170	0,476	3,593	240,34	23,00	0,076	0,197
00146011	55	280,34	86,94	521,30	162,40	7.558,60	0,310	0,825	3,062	280,34	48,50	0,196	0,054
00147002	16	261,08	46,59	350,80	188,20	2.170,80	0,178	0,143	2,109	261,08	27,44	0,029	0,058
00147006	47	282,80	90,71	506,60	149,80	8.228,20	0,321	0,701	2,713	282,80	51,00	0,176	0,117
00147007	45	228,51	42,08	341,20	112,90	1.770,71	0,184	0,292	3,757	228,51	23,28	0,103	0,174
00147008	39	260,87	59,90	420,50	156,10	3.587,54	0,230	0,349	2,858	260,87	34,18	0,064	0,115
00147010	40	264,00	69,89	527,30	175,70	4.884,33	0,265	1,708	6,865	264,00	36,11	0,256	0,199
00147011	31	228,06	47,60	342,00	152,70	2.266,17	0,209	0,562	3,062	228,06	26,92	0,101	0,159
00147016	31	272,44	60,78	459,60	168,20	3.694,10	0,223	1,095	4,475	272,44	33,07	0,205	0,197
00147017	29	238,65	52,92	369,60	161,20	2.800,97	0,222	0,793	3,078	238,65	29,67	0,188	0,124
00147018	26	230,45	38,79	319,40	171,10	1.504,29	0,168	0,333	2,811	230,45	22,11	0,047	0,149
00147019	28	260,92	47,60	422,50	187,90	2.265,60	0,182	1,435	6,055	260,92	25,11	0,198	0,253
00148001	67	274,84	52,91	443,30	191,00	2.799,30	0,193	0,622	3,230	274,84	29,87	0,111	0,106
00148002	49	275,89	70,78	513,80	191,90	5.009,49	0,257	1,629	6,097	275,89	36,60	0,268	0,213
00148003	40	295,11	73,51	501,90	170,20	5.403,04	0,249	1,011	4,020	295,11	39,98	0,192	0,201
00148009	39	273,02	70,05	476,00	160,00	4.906,47	0,257	1,033	3,733	273,02	38,39	0,230	0,149
00148010	38	292,03	79,22	551,60	183,60	6.276,50	0,271	0,966	4,258	292,03	43,77	0,157	0,106
00148011	39	295,84	68,20	571,80	187,80	4.650,59	0,231	1,696	7,979	295,84	35,43	0,199	0,195
00148012	28	236,56	61,12	414,20	146,80	3.735,62	0,258	0,891	3,780	236,56	34,13	0,165	0,145
00148017	25	270,73	82,85	524,60	175,70	6.863,51	0,306	1,198	4,683	270,73	45,09	0,209	0,153
00148018	38	292,09	64,30	440,20	146,80	4.134,83	0,220	0,309	2,906	292,09	36,54	0,078	0,116
00149003	25	285,82	104,37	481,20	90,50	10.892,93	0,365	0,031	2,453	285,82	60,32	0,007	0,138
00149004	18	305,68	60,62	440,90	218,90	3.674,60	0,198	0,422	2,487	305,68	35,14	0,097	0,072
00149005	17	268,66	97,73	569,40	171,10	9.551,60	0,364	1,894	6,422	268,66	48,82	0,387	0,335
00149006	47	284,93	60,77	535,70	175,50	3.692,52	0,213	1,564	7,693	284,93	31,48	0,166	0,249
00247000	37	264,16	72,48	539,30	166,50	5.252,85	0,274	1,907	7,124	264,16	35,59	0,362	0,302
00247003	35	299,28	82,16	503,60	188,40	6.750,72	0,275	0,789	2,806	299,28	46,08	0,201	0,115
00247004	31	255,53	78,82	462,20	155,40	6.212,76	0,308	1,218	3,408	255,53	41,36	0,340	0,192
00247006	21	313,99	70,92	466,00	182,10	5.029,45	0,226	0,085	2,586	313,99	41,05	0,000	0,136
00247008	38	254,62	46,34	340,70	161,00	2.147,44	0,182	0,196	2,246	254,62	26,64	0,069	0,085

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00248001	36	287,57	49,33	383,50	161,20	2.433,44	0,172	-0,410	2,891	287,57	28,10	-0,082	0,120
00248003	32	284,26	59,16	434,00	185,60	3.500,09	0,208	0,417	2,871	284,26	33,80	0,077	0,136
00248006	23	272,92	56,90	369,80	185,60	3.237,19	0,208	0,125	1,756	272,92	33,30	0,042	-0,007
00249001	41	299,38	62,73	458,60	184,00	3.934,90	0,210	0,254	2,690	299,38	35,80	0,029	0,112
00249002	34	329,26	79,00	570,50	227,00	6.241,76	0,240	1,059	3,859	329,26	43,47	0,227	0,128
00249003	27	353,54	119,21	656,00	223,10	14.211,22	0,337	1,146	3,493	353,54	64,74	0,301	0,123
00249004	35	276,46	71,97	442,10	159,40	5.180,16	0,260	0,439	2,788	276,46	40,73	0,093	0,158
00348001	26	272,26	62,59	412,00	172,30	3.917,48	0,230	0,473	2,553	272,26	35,65	0,114	0,133
00348002	20	267,28	39,19	357,80	202,60	1.535,53	0,147	0,942	3,279	267,28	21,10	0,239	0,267
A201	20	220,60	72,11	440,60	125,60	5.199,77	0,327	1,426	5,435	220,60	38,26	0,259	0,261

Fonte: autoria própria.

Tabela C.5 – Estatísticas descritivas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 15 dias

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00047002	39	540,33	120,56	873,50	342,60	14.533,77	0,223	0,810	3,574	540,33	66,66	0,150	0,194
00047003	34	469,27	110,29	792,00	311,70	12.163,72	0,235	0,773	3,548	469,27	61,80	0,133	0,125
00047004	39	434,59	103,17	659,60	230,90	10.644,95	0,237	-0,040	2,635	434,59	58,92	-0,021	0,147
00047005	29	496,48	118,58	786,70	344,60	14.061,38	0,239	0,591	2,353	496,48	67,07	0,179	0,001
00047006	31	506,02	140,83	823,10	304,90	19.833,70	0,278	0,264	2,110	506,02	81,53	0,067	0,011
00047007	25	474,25	116,96	741,50	280,00	13.678,99	0,247	0,315	2,360	474,25	67,79	0,070	0,057
00048000	33	576,43	149,69	893,30	374,30	22.408,10	0,260	0,682	2,539	576,43	84,41	0,169	0,075
00048006	39	379,54	86,00	713,30	246,30	7.395,48	0,227	1,283	6,945	379,54	45,63	0,087	0,174
00049009	23	331,60	57,86	449,90	255,60	3.348,32	0,174	0,544	2,262	331,60	33,25	0,163	0,048
00049011	23	358,60	63,23	482,50	230,40	3.997,96	0,176	0,106	2,910	358,60	35,70	0,051	0,197
82191	58	377,74	83,48	625,20	248,20	6.969,00	0,221	0,972	3,834	377,74	45,77	0,183	0,162
82263	50	383,79	66,55	581,50	259,30	4.429,29	0,173	0,747	3,281	383,79	37,15	0,164	0,122
00146011	27	316,87	59,85	474,60	201,40	3.581,82	0,189	0,540	3,723	316,87	33,09	0,097	0,242
00147002	55	354,63	98,14	558,40	194,90	9.631,54	0,277	0,437	2,087	354,63	56,30	0,127	0,034
00147006	16	330,93	58,71	456,60	210,60	3.447,04	0,177	-0,036	3,282	330,93	33,30	-0,026	0,258
00147007	47	352,85	108,15	638,80	179,20	11.696,96	0,307	0,782	3,065	352,85	60,46	0,181	0,131
00147008	45	293,44	52,45	425,90	140,80	2.750,93	0,179	0,350	4,463	293,44	28,26	0,114	0,227
00147010	39	334,05	71,41	505,20	212,90	5.098,82	0,214	0,266	2,732	334,05	40,81	0,044	0,125
00147011	40	339,40	78,25	633,40	229,70	6.122,36	0,231	1,583	6,481	339,40	40,92	0,238	0,210
00147016	31	298,04	57,89	427,10	197,00	3.351,14	0,194	0,362	2,617	298,04	33,01	0,088	0,154
00147017	31	347,62	82,91	608,90	203,50	6.873,40	0,238	1,284	4,917	347,62	43,96	0,250	0,233
00147018	29	311,29	65,27	455,60	207,40	4.260,66	0,210	0,449	2,315	311,29	37,28	0,128	0,084
00147019	26	304,07	48,44	393,60	201,10	2.346,37	0,159	-0,234	2,431	304,07	28,04	-0,057	0,109
00148001	28	340,55	52,62	488,80	259,40	2.768,63	0,155	0,638	3,544	340,55	29,56	0,085	0,129
00148002	67	350,56	65,68	527,60	235,20	4.313,62	0,187	0,557	3,008	350,56	37,04	0,105	0,134
00148003	49	349,46	77,89	612,90	239,90	6.067,18	0,223	1,245	4,611	349,46	41,94	0,238	0,170
00148009	40	381,77	92,89	671,70	233,90	8.628,39	0,243	1,394	5,655	381,77	48,29	0,204	0,269
00148010	39	346,11	84,79	626,00	205,20	7.189,13	0,245	1,158	4,694	346,11	45,95	0,204	0,185
00148011	38	367,10	109,50	755,80	225,70	11.990,46	0,298	1,461	5,776	367,10	57,84	0,232	0,213

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00148012	39	381,33	79,40	680,80	269,00	6.304,52	0,208	1,503	6,356	381,33	42,06	0,232	0,171
00148017	28	310,71	79,60	560,80	188,50	6.336,20	0,256	1,067	4,525	310,71	43,81	0,182	0,124
00148018	25	355,06	99,62	631,80	226,70	9.925,10	0,281	0,998	3,774	355,06	55,24	0,206	0,162
00149003	38	371,43	77,19	544,00	200,70	5.958,38	0,208	0,106	3,024	371,43	43,63	0,022	0,181
00149004	25	359,96	126,93	617,10	109,10	16.111,45	0,353	0,051	2,595	359,96	73,01	0,014	0,157
00149005	18	380,16	58,29	472,80	282,90	3.398,26	0,153	-0,019	1,891	380,16	34,03	0,005	0,023
00149006	17	344,83	111,87	668,60	210,60	12.514,52	0,324	1,518	5,252	344,83	58,23	0,317	0,298
00247000	47	357,71	73,97	653,60	247,60	5.471,96	0,207	1,424	6,961	357,71	38,79	0,151	0,237
00247003	37	339,20	74,47	587,80	236,30	5.545,17	0,220	1,486	5,268	339,20	38,88	0,298	0,230
00247004	35	378,03	103,98	693,20	235,00	10.811,23	0,275	1,335	4,552	378,03	54,70	0,280	0,249
00247006	31	326,89	91,04	565,80	202,20	8.288,39	0,279	1,088	3,338	326,89	48,85	0,273	0,197
00247008	21	406,78	84,32	538,80	253,80	7.109,18	0,207	-0,194	2,039	406,78	49,51	-0,054	0,054
00248001	38	336,65	67,42	483,00	196,00	4.545,33	0,200	0,007	2,265	336,65	38,78	0,000	0,050
00248003	36	370,60	65,44	499,20	207,30	4.282,39	0,177	-0,307	2,907	370,60	37,18	-0,066	0,154
00248006	32	366,12	68,91	498,40	258,30	4.748,67	0,188	0,044	1,943	366,12	40,09	0,011	0,025
00249001	23	356,37	72,80	465,30	258,30	5.299,46	0,204	0,135	1,607	356,37	42,40	0,050	-0,076
00249002	41	383,12	79,83	571,90	264,80	6.373,40	0,208	0,150	2,013	383,12	46,09	0,021	-0,015
00249003	34	415,61	93,03	632,90	272,80	8.655,21	0,224	0,632	2,853	415,61	52,72	0,135	0,117
00249004	27	441,89	136,90	798,90	260,20	18.741,72	0,310	0,859	3,072	441,89	76,68	0,212	0,099
00348001	35	341,45	88,18	536,60	194,80	7.774,91	0,258	0,516	2,757	341,45	50,11	0,113	0,132
00348002	26	342,10	75,38	534,50	211,40	5.682,14	0,220	0,533	3,255	342,10	42,57	0,084	0,172
A201	20	352,70	46,44	458,00	293,60	2.156,53	0,132	1,091	3,009	352,70	24,74	0,312	0,213
A202	20	279,20	79,21	497,20	142,40	6.274,31	0,284	0,917	4,212	279,20	43,39	0,175	0,258

Fonte: autoria própria.

Tabela C.6 – Estatísticas descritivas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 30 dias

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00047002	39	869,54	204,32	1.380,20	489,80	41.747,51	0,235	0,329	2,845	869,54	115,77	0,060	0,161
00047003	34	727,46	147,33	1.145,00	468,50	21.706,56	0,203	0,496	3,207	727,46	83,68	0,068	0,097
00047004	39	689,25	153,08	989,30	359,50	23.434,46	0,222	-0,148	2,372	689,25	87,97	-0,027	0,084
00047005	29	770,32	185,94	1.168,30	454,20	34.574,53	0,241	0,181	2,148	770,32	107,99	0,040	0,049
00047006	31	811,81	236,93	1.399,30	448,20	56.137,41	0,292	0,341	2,534	811,81	136,24	0,057	0,062
00047007	25	765,06	182,78	1.158,40	439,70	33.408,52	0,239	0,368	2,649	765,06	105,06	0,074	0,117
00048000	33	909,17	234,26	1.405,00	536,30	54.878,56	0,258	0,552	2,332	909,17	133,74	0,153	0,080
00048006	39	603,88	123,27	974,10	331,90	15.196,47	0,204	0,429	3,928	603,88	68,58	0,035	0,180
00049009	23	543,27	82,05	788,10	462,90	6.732,29	0,151	1,279	4,377	543,27	44,09	0,302	0,107
00049011	23	584,63	94,95	816,00	391,80	9.015,99	0,162	0,448	3,485	584,63	53,00	0,099	0,250
82191	58	610,03	118,37	879,70	422,00	14.012,26	0,194	0,433	2,485	610,03	67,65	0,098	0,085
82263	50	593,44	90,41	844,10	419,00	8.173,90	0,152	0,465	3,000	593,44	51,30	0,085	0,124
00146011	27	506,12	96,34	768,50	310,40	9.281,16	0,190	0,193	3,810	506,12	53,27	-0,040	0,213
00147002	55	563,96	143,04	929,50	298,90	20.460,15	0,254	0,351	2,403	563,96	81,85	0,087	0,071
00147006	16	540,60	113,89	797,40	329,70	12.970,62	0,211	0,305	3,112	540,60	64,80	0,055	0,217
00147007	47	561,48	173,75	1.239,20	265,70	30.189,60	0,309	1,501	6,806	561,48	90,49	0,188	0,248

Estação	N	$\bar{X}_n$ (mm)	S_n (mm)	$X_{máx}$ (mm)	X_{min} (mm)	S_n^2 (mm²)	CV	g_n	k_n	l_1 (mm)	l_2 (mm)	t_3	t_4
00147008	45	480,29	85,10	699,00	160,80	7.241,36	0,177	-0,295	7,262	480,29	42,79	0,059	0,300
00147010	39	535,40	100,44	777,60	349,00	10.088,71	0,188	0,285	2,679	535,40	57,56	0,053	0,121
00147011	40	539,05	114,71	854,00	340,20	13.159,39	0,213	1,232	4,440	539,05	60,21	0,220	0,244
00147016	31	492,43	81,02	687,70	307,60	6.563,51	0,165	0,173	3,260	492,43	45,59	0,020	0,194
00147017	31	566,42	131,70	985,20	342,40	17.344,87	0,233	1,155	4,754	566,42	70,86	0,214	0,211
00147018	29	506,58	100,77	746,50	304,90	10.155,38	0,199	0,384	2,693	506,58	57,58	0,104	0,107
00147019	26	482,42	74,96	632,40	352,90	5.618,74	0,155	0,271	2,447	482,42	43,16	0,056	0,130
00148001	28	545,89	83,30	775,30	385,40	6.939,32	0,153	0,331	3,470	545,89	47,00	0,001	0,129
00148002	67	577,36	107,03	864,30	385,50	11.456,45	0,185	0,499	2,779	577,36	60,81	0,100	0,100
00148003	49	574,56	119,43	853,70	351,80	14.263,15	0,208	0,461	2,778	574,56	67,76	0,101	0,127
00148009	40	600,05	143,02	1.065,00	377,40	20.455,83	0,238	1,472	6,241	600,05	73,20	0,170	0,292
00148010	39	558,34	124,79	966,20	356,40	15.572,38	0,224	1,054	4,670	558,34	68,05	0,162	0,194
00148011	38	535,53	155,89	1.126,30	319,20	24.301,75	0,291	1,471	6,712	535,53	82,18	0,177	0,223
00148012	39	598,83	117,44	978,00	378,00	13.792,47	0,196	1,089	4,998	598,83	62,73	0,143	0,237
00148017	28	496,47	107,29	749,20	292,40	11.511,45	0,216	0,618	2,840	496,47	60,21	0,176	0,134
00148018	25	568,46	150,66	916,80	356,50	22.697,02	0,265	0,702	2,749	568,46	85,06	0,173	0,115
00149003	38	609,78	130,08	1.013,80	316,20	16.920,83	0,213	0,494	4,484	609,78	70,38	0,041	0,270
00149004	25	577,19	207,20	954,40	161,10	42.932,96	0,359	-0,188	2,454	577,19	118,93	-0,064	0,138
00149005	18	591,81	63,90	732,10	471,90	4.083,13	0,108	0,222	3,011	591,81	35,94	0,043	0,262
00149006	17	537,43	136,02	811,40	308,90	18.500,39	0,253	0,086	2,493	537,43	78,74	0,014	0,157
00247000	47	570,26	104,28	846,50	349,70	10.875,00	0,183	0,417	3,460	570,26	58,38	0,056	0,171
00247003	37	539,17	91,05	793,90	381,90	8.289,74	0,169	0,805	3,608	539,17	50,27	0,151	0,201
00247004	35	581,89	148,21	1.026,00	341,40	21.964,84	0,255	1,168	4,626	581,89	77,74	0,209	0,307
00247006	31	524,45	132,93	841,50	336,70	17.670,19	0,253	0,853	2,822	524,45	73,97	0,229	0,123
00247008	21	651,85	139,23	921,90	400,80	19.385,81	0,214	0,037	2,248	651,85	81,32	0,004	0,096
00248001	38	556,78	92,98	744,80	342,40	8.644,52	0,167	-0,213	2,646	556,78	53,21	-0,047	0,139
00248003	36	593,61	95,89	823,70	398,20	9.194,76	0,162	0,230	3,032	593,61	53,92	0,068	0,188
00248006	32	581,96	103,37	831,10	410,40	10.685,18	0,178	0,123	2,431	581,96	59,47	-0,005	0,059
00249001	23	567,74	112,60	831,10	410,40	12.679,73	0,198	0,380	2,413	567,74	64,89	0,073	0,031
00249002	41	603,97	125,51	862,10	408,60	15.752,79	0,208	0,110	1,808	603,97	72,73	0,032	-0,015
00249003	34	684,53	155,14	1.141,90	435,30	24.066,89	0,227	0,750	3,760	684,53	86,30	0,112	0,164
00249004	27	673,63	183,75	1.186,20	376,00	33.763,54	0,273	0,833	3,707	673,63	102,30	0,160	0,195
00348001	35	520,96	142,77	895,40	220,50	20.383,05	0,274	0,317	3,201	520,96	80,11	0,035	0,166
00348002	26	537,88	120,64	794,10	325,60	14.553,79	0,224	0,288	2,614	537,88	69,42	0,049	0,114
A201	20	597,35	76,24	779,00	476,60	5.813,28	0,128	0,632	3,036	597,35	42,81	0,149	0,202
A202	20	452,05	112,61	723,20	258,00	12.681,20	0,249	0,450	3,213	452,05	63,69	0,100	0,205

Fonte: autoria própria.

Uma das ferramentas utilizadas para a consolidação dos dados de precipitação foi o teste para detecção e identificação de *outliers de* Grubbs e Beck (GRUBBS, 1950, 1969; GRUBBS e BECK, 1972). Esse teste será descrito a seguir.

É definido os limites inferiores e superiores, x_i *e* x_s, respectivamente, para detecção de possíveis *outliers* conforme a Equação (27). Observações eventualmente acima do x_s ou abaixo do x_i são candidatos a serem considerados como pontos atípicos.

$$x_i = \exp\left(ln(\bar{x}) - k_{N,\alpha=10\%} * ln(s_X)\right)$$
$$x_s = \exp\left(ln(\bar{x}) + k_{N,\alpha=10\%} * ln(s_X)\right)$$
$$k_{N,\alpha=10\%} = -3.62201 + 6.28446 * N^{1/4} - 2.49835 * N^{1/2} + 0.491436 * N^{3/4} - 0.037911 * N \quad (27)$$

Onde:

x_i: limite inferior dos *outliers*;

x_s: limite superior dos *outliers*;

$\bar{x}$: média aritmética da amostra;

s_X: desvio padrão da amostra;

N: tamanho da amostra;

$k_{N,\alpha=10\%}$: valor crítico da estatística de Grubbs e Beck, para um nível de significância $\alpha = 10\%$.

APÊNDICE D – Testes não-paramétricos e os p-valores associados

Expõe, a seguir, a construção dos testes não paramétricos de Aleatoriedade, Independência, Homogeneidade e Estacionariedade.

- Aleatoriedade → NERC (1975).

Delimitando "p" como o número de inflexões em uma série temporal de $N > 30$, considera-se as seguintes condições para a rejeição, ou não, da hipótese de aleatoriedade, conforme a (28):

$$E[p] = \frac{2 * (N-2)}{3}$$
$$Var[p] = \frac{16N - 29}{90}$$
$$T = \frac{p - E[p]}{\sqrt{Var[p]}} \quad (28)$$

Rejeita-se a hipótese nula se $|T| > z_{1-\frac{\alpha}{2}}$

Onde:

p: número de inflexões, que podem ser picos ou vales;

$E[p]$: média do número de inflexões;

$Var[p]$: variância do número de inflexões;

N: tamanho da amostra;

T: estatística de teste "*T*";

$z_{1-\frac{\alpha}{2}}$: variável da distribuição normal associada a probabilidade $1 - \frac{\alpha}{2}$, sendo α o nível de significância do teste.

- Independência → Wald e Wolfowitz (1943).

Considerando uma amostra de tamanho *N* $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, calcula-se as diferenças $\{X'_1, X'_2, \dots, X'_N\}$ subtraindo X_i e a média amostral $\bar{X}$. Apresenta-se o seguinte procedimento para determinação ou não da independência (Equação (29)):

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X'_i * X'_{i+I} + X'_1 * X'_N$$

$$E[R] = -\frac{s_2}{N-1}$$

$$Var[R] = \frac{s_2^2 - s_4^2}{N-1} + \frac{s_2^2 - 2 * s_4}{(N-1) * (N-2)} - \frac{s_2^2}{(N-1)^2} \quad (29)$$

"r" denotando a ordem dos momentos amostrais, temos que:

$$m'_r = \frac{\sum_{i=1}^{N} (X'_i)^r}{N} \text{ e } s_r = N * m'_r$$

$$T = \frac{R - E[R]}{\sqrt{Var[R]}}$$

Rejeita-se a hipótese nula se $|T| > z_{1-\frac{\alpha}{2}}$

Onde:

R: estatística "R" de Wald e Wolfowitz;

$E[R]$: média da estatística "R" de Wald e Wolfowitz;

$Var[R]$: variância da estatística "R" de Wald e Wolfowitz;

N: tamanho da amostra;

$s_r \; e \; m'_r$: momentos amostrais de ordem "*r*" em relação a origem;

T: estatística de teste "*T*";

$z_{1-\frac{\alpha}{2}}$: variável independente da distribuição normal associada a probabilidade $1 - \frac{\alpha}{2}$, sendo α o nível de significância do teste.

- Homogeneidade → Mann e Whitney (1947).

Considerando uma amostra de tamanho *N* $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, deve-se separar a amostra em duas, ou seja, $\{X_1, X_2, \dots, X_{N+1}\}$ para subamostra de tamanho N_1 e $\{X_{N_1+1}, X_{N_1+2}, \dots, X_N\}$ para a subamostra de tamanho N_2, de tal forma que $N_1 + N_2 = N$, $N_1 < N_2$ e N_1 *e* $N_2 > 20$. Classificando a amostra em ordem crescente, associe a ordem de classificação "*m*" a cada observação e se ela provem da primeira ou segunda subamostra. Após isso, deve-se obedecer ao seguinte equacionamento para determinar a homogeneidade ou não:

$$V_1 = N_1 * N_2 + \frac{N_1 * (N_1 + 1)}{2} - R_1$$

$$V_2 = N_1 * N_2 - V_1$$

$$E[V] = \frac{N_1 * N_2}{2}$$

$$Var[V] = \frac{N_1 * N_2 * (N_1 + N_2 + 1)}{12} \quad (30)$$

$$T = \frac{V - E[V]}{\sqrt{Var[V]}}$$

Rejeita-se a hipótese nula se $|T| > z_{1-\frac{\alpha}{2}}$

Onde:

V: estatística "V" de Wald e Wolfowitz;

$E[V]$: média da estatística "V" de Mann-Whitney;

$Var[V]$: variância da estatística "V" de Mann-Whitney;

N: tamanho da amostra;

R_1: soma das ordens "*m*" de classificação dos elementos da primeira subamostra;

T: estatística de teste "T";

$z_{1-\frac{\alpha}{2}}$: variável independente da distribuição normal associada a probabilidade $1-\frac{\alpha}{2}$, sendo α o nível de significância do teste.

- Estacionariedade → Mann (1945), Kendall (1975) e Kendall e Gibbons (1990)

Segue-os procedimentos para o a determinação da Estacionariedade, ou não, de uma amostra de tamanho *N* $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, que deve ser classificado em ordem crescente e associada a cada observação a ordem "*m*". Note que o termo do somatório que está na definição da $Var[S]$ serve apenas de correção caso ocorra empates na classificação das ordens de valores.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(m_j - m_i)$$

$$E[S] = 0$$

$$Var[S] = \frac{N*(N-1)*(2N+5) - \sum_{j=1}^{p} t_j * (t_j - 1) * (2*t_j + 5)}{18} \quad (31)$$

$$T = \frac{S}{\sqrt{Var[S]}}$$

Rejeita-se a hipótese nula se $|T| > z_{1-\frac{\alpha}{2}}$

Onde:

S: estatística "S" de Mann Kendall;

sgn: função sinal, onde $sgn(x) = 1\ para\ x > 0$; $sgn(x) = 0\ para\ x = 0$; $e\ sgn(x) = -1\ para\ x < 0$;

m_i: ordem "i" de classificação crescente das amostras;

$E[S]$: média da estatística "S" de Mann-Whitney;

$Var[S]$: variância da estatística "S" de Mann-Whitney;

N: tamanho da amostra;

p: número de conjuntos empatados na classificação da amostra;

t_j: número de observações empatadas no j-ésimo conjunto;

T: estatística de teste "*T*";

$z_{1-\frac{\alpha}{2}}$: variável independente da distribuição normal associada a probabilidade $1-\frac{\alpha}{2}$, sendo α o nível de significância do teste.

Para todos os quatro testes não-paramétricos bilaterais empregados a cada uma das durações, de cada posto pluviométrico, foi considerado um nível de significância de 5%, logo, delimitou-se $z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1{,}96$, que nada mais é do que o $p_{valor-limite}$ de $0{,}05/2 = 0{,}025$.

O teste de Homogeneidade, necessita que a amostra de tamanho N seja repartida em duas, com $N_1 < N_2$, e N_1 *e* $N_2 > 20$, tal que $N_1 + N_2 = N$. Portanto, a amostra deve ter minimamente $N \geq 42$ elementos e $p_{valor} < p_{valor-limite}$ para que a estação fosse excluída totalmente.

O teste de aleatoriedade precisa que a amostra contenha $N > 30$ e $p_{valor} < p_{valor-limite}$ para que a estação seja excluída totalmente.

Já o teste de Estacionariedade não foi considerado limitações quanto ao tamanho da amostra.

Frisa-se que, por mais que se tenha aplicado o teste de Independência, julgou-se que os máximos anuais possuam independência entre si, devido à seleção estar englobando períodos chuvosos e não-chuvosos. Logo, nenhuma estação foi excluída mediante esse critério, todavia careceu sim de uma reavaliação, com mais atenção na sua consolidação de dados.

Nota-se que, alguns postos apresentaram não-estacionariedade em algumas das 6 durações analisadas. E mais, todas as rejeições da H_0 do teste de Mann-Kendall

apresentaram tendências positivas sinalizadas com "(+)" na Tabela D.1 a Tabela D.3 (onde estão apresentados os resultados dos testes não-paramétricos quanto aos $p_{valores}$ de todos os 52 postos pluviométricos). É claro que o *erro do tipo I* pode ter sido cometido mediante algum vício de consolidação, ou até mesmo da falta de uma amostragem histórica maior daquela estação, todavia, não pode ser desprezado possíveis efeitos das mudanças climáticas, principalmente no que tange o aumento da temperatura média do planeta Terra, que porventura venham a alterar a dinâmica das alturas de chuvas históricas.

Tabela D.1 – $p_{valores}$ das 52 estações pluviométricas quanto aos testes de Estacionariedade, Independência, Homogeneidade e Aleatoriedade, para as durações de 24 horas e 3 dias

Estação	N	24 horas				3 dias			
		Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.	Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.
00047002	39	0,811	0,275	0,778	0,602	0,932	0,187	0,893	0,182
00047003	34	0,459	0,695	0,359	0,390	0,576	0,310	0,500	0,243
00047004	39	0,969	0,708	0,948	0,302	0,414	0,132	0,316	0,302
00047005	29	0,041	0,000	0,006	0,819	0,320	0,094	0,024	0,819
00047006	31	0,581	0,155	0,870	0,232	0,373	0,214	0,841	0,121
00047007	25	0,819	0,008	0,533	0,371	0,837	0,374	0,840	0,206
00048000	33	0,039	0,031	0,015	0,078	0,010 (+)	0,117	0,001	0,760
00048006	39	0,859	0,340	0,913	0,850	0,623	0,617	0,792	0,097
00049009	23	0,112	0,352	0,155	0,005	0,366	0,032	0,536	0,303
00049011	23	0,089	0,090	0,207	0,020	0,710	0,006	0,882	0,303
82191	58	0,463	0,027	0,390	0,299	0,220	0,056	0,258	0,542
82263	50	0,470	0,546	0,823	0,500	0,865	0,179	0,987	0,753
00146011	27	0,631	0,766	0,349	0,135	0,558	0,390	0,547	0,135
00147002	55	0,094	0,064	0,035	0,294	0,038	0,036	0,025	0,117
00147006	16	0,326	0,671	0,663	0,337	0,104	0,874	0,164	0,047
00147007	47	0,584	0,643	0,347	0,240	0,406	0,865	0,625	0,039
00147008	45	0,442	0,060	0,572	0,315	0,461	0,838	0,636	0,114
00147010	39	0,955	0,254	0,990	0,602	0,791	0,033	0,978	0,742
00147011	40	0,472	0,879	0,197	0,696	0,883	0,454	0,868	0,153
00147016	31	0,142	0,905	0,492	0,232	0,270	0,877	0,283	0,121
00147017	31	0,276	0,064	0,446	0,385	0,077	0,236	0,187	0,385
00147018	29	0,013 (+)	0,321	0,109	0,011	0,095	0,189	0,326	0,034
00147019	26	0,126	0,656	0,119	0,008	0,387	0,808	0,619	0,074
00148001	28	0,609	0,958	0,455	0,000	0,182	0,518	0,241	0,015
00148002	67	0,009 (+)	0,825	0,018	0,085	0,011 (+)	0,421	0,019	0,217
00148003	49	0,514	0,754	0,401	0,409	0,632	0,869	0,492	0,282
00148009	40	0,898	0,319	0,979	0,399	0,372	0,022	0,527	0,551
00148010	39	0,004 (+)	0,004	0,091	0,602	0,008 (+)	0,051	0,198	0,602
00148011	38	0,425	0,041	0,431	0,024	0,054	0,018	0,072	0,118
00148012	39	0,870	0,216	0,908	0,097	0,845	0,259	0,930	0,448

Estação	N	24 horas				3 dias			
		Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.	Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.
00148017	28	0,999	0,002	0,998	0,045	0,999	0,037	1,000	0,045
00148018	25	0,042	0,644	0,068	0,095	0,280	0,612	0,200	0,565
00149003	38	0,821	0,181	0,740	0,500	0,353	0,868	0,374	0,118
00149004	25	1,000	0,000	0,999	0,371	0,999	0,002	0,985	0,206
00149005	18	0,032	0,307	0,031	0,422	0,022 (+)	0,127	0,025	0,084
00149006	17	0,745	0,038	0,882	0,112	0,402	0,022	0,629	0,034
00247000	47	0,406	0,704	0,107	0,500	0,816	0,336	0,834	0,362
00247003	37	1,000	0,000	1,000	0,703	1,000	0,002	1,000	0,909
00247004	35	0,660	0,851	0,729	0,795	0,540	0,637	0,658	0,340
00247006	31	0,829	0,004	0,862	0,721	0,838	0,168	0,838	0,232
00247008	21	0,572	0,342	0,327	0,036	0,747	0,849	0,514	0,036
00248001	38	0,500	0,031	0,570	0,057	0,321	0,304	0,580	0,001
00248003	36	0,765	0,559	0,716	0,088	0,489	0,327	0,358	0,750
00248006	32	0,011 (+)	0,025	0,028	0,806	0,028	0,233	0,040	0,333
00249001	23	0,808	0,911	0,775	0,061	0,290	0,547	0,440	0,303
00249002	41	0,261	0,525	0,613	0,224	0,580	0,137	0,834	0,352
00249003	34	0,904	0,001	0,993	0,555	0,901	0,029	0,978	0,835
00249004	27	0,095	0,349	0,110	0,006	0,013 (+)	0,415	0,010	0,135
00348001	35	0,943	0,485	0,892	0,660	0,725	0,317	0,610	0,340
00348002	26	0,064	0,251	0,036	0,002	0,021 (+)	0,070	0,020	0,002
A201	20	0,269	0,428	0,273	0,500	0,513	0,044	0,367	0,289
A202	20	0,850	0,092	0,544	0,289	0,698	0,260	0,485	0,003

Fonte: autoria própria.

Tabela D.2 – $p_{valores}$ das 52 estações pluviométricas quanto aos testes de Estacionariedade, Independência, Homogeneidade e Aleatoriedade, para as durações de 5 dias e 10 dias

Estação	N	5 dias				10 dias			
		Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.	Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.
00047002	39	0,856	0,260	0,928	0,302	0,619	0,202	0,677	0,850
00047003	34	0,688	0,222	0,671	0,835	0,565	0,312	0,527	0,835
00047004	39	0,723	0,132	0,677	0,602	0,699	0,115	0,794	0,097
00047005	29	0,194	0,241	0,020	0,500	0,250	0,457	0,117	0,181
00047006	31	0,276	0,152	0,727	0,558	0,373	0,063	0,777	0,558
00047007	25	0,825	0,338	0,865	0,206	0,519	0,213	0,907	0,744
00048000	33	0,041	0,127	0,003	0,444	0,073	0,133	0,015	0,012
00048006	39	0,500	0,267	0,800	0,602	0,395	0,270	0,621	0,448
00049009	23	0,152	0,230	0,536	0,303	0,054	0,100	0,243	0,303
00049011	23	0,594	0,012	0,870	0,061	0,098	0,244	0,512	0,061
82191	58	0,027	0,112	0,036	0,770	0,032	0,022	0,039	0,915
82263	50	0,686	0,414	0,935	0,847	0,840	0,598	0,929	0,044
00146011	27	0,699	0,437	0,622	0,135	0,754	0,648	0,771	0,006
00147002	55	0,048	0,067	0,034	0,294	0,020 (+)	0,038	0,022	0,294
00147006	16	0,104	0,820	0,117	0,002	0,359	0,994	0,520	0,010
00147007	47	0,626	0,723	0,852	0,079	0,424	0,650	0,780	0,039

Estação	N	5 dias				10 dias			
		Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.	Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.
00147008	45	0,663	0,470	0,862	0,200	0,931	0,115	0,951	0,595
00147010	39	0,836	0,084	0,984	0,602	0,875	0,028	0,992	0,182
00147011	40	0,858	0,098	0,801	0,037	0,992	0,111	0,986	0,015
00147016	31	0,299	0,976	0,477	0,020	0,127	0,910	0,223	0,385
00147017	31	0,079	0,022	0,492	0,928	0,053	0,061	0,286	0,721
00147018	29	0,184	0,088	0,626	0,181	0,156	0,153	0,457	0,675
00147019	26	0,150	0,770	0,401	0,008	0,037	0,977	0,224	0,027
00148001	28	0,192	0,789	0,256	0,379	0,103	0,640	0,188	0,108
00148002	67	0,017 (+)	0,343	0,021	0,539	0,020 (+)	0,517	0,065	0,652
00148003	49	0,863	0,774	0,788	0,282	0,865	0,629	0,808	0,179
00148009	40	0,355	0,051	0,452	0,261	0,028	0,038	0,127	0,399
00148010	39	0,021 (+)	0,117	0,241	0,602	0,106	0,275	0,385	0,046
00148011	38	0,048	0,031	0,051	0,500	0,026	0,116	0,066	0,215
00148012	39	0,743	0,846	0,922	0,046	0,833	0,559	0,884	0,602
00148017	28	0,988	0,063	0,980	0,045	0,959	0,121	0,958	0,045
00148018	25	0,187	0,672	0,203	0,011	0,187	0,871	0,188	0,011
00149003	38	0,241	0,903	0,187	0,347	0,043	0,602	0,051	0,215
00149004	25	0,998	0,004	0,981	0,206	0,993	0,003	0,966	0,206
00149005	18	0,034	0,316	0,072	0,653	0,038	0,847	0,057	0,025
00149006	17	0,371	0,009	0,760	0,500	0,467	0,098	0,729	0,112
00247000	47	0,980	0,092	0,914	0,638	0,982	0,040	0,815	0,362
00247003	37	1,000	0,002	0,999	0,703	1,000	0,117	0,998	0,253
00247004	35	0,157	0,267	0,241	0,205	0,140	0,058	0,209	0,980
00247006	31	0,886	0,227	0,859	0,232	0,652	0,221	0,753	0,006
00247008	21	0,464	0,734	0,209	0,103	0,114	0,515	0,057	0,103
00248001	38	0,111	0,761	0,322	0,057	0,102	0,408	0,272	0,215
00248003	36	0,816	0,390	0,822	0,446	0,761	0,151	0,769	0,172
00248006	32	0,092	0,067	0,119	0,667	0,013 (+)	0,545	0,021	0,194
00249001	23	0,238	0,587	0,536	0,151	0,054	0,509	0,225	0,151
00249002	41	0,364	0,179	0,734	0,352	0,420	0,351	0,805	0,352
00249003	34	0,817	0,029	0,964	0,835	0,594	0,026	0,913	0,835
00249004	27	0,032	0,236	0,058	0,785	0,095	0,516	0,151	0,135
00348001	35	0,822	0,222	0,748	0,108	0,914	0,232	0,869	0,660
00348002	26	0,005 (+)	0,012	0,014	0,027	0,008 (+)	0,018	0,010	0,315
A201	20	0,218	0,035	0,218	0,289	0,258	0,008	0,289	0,289
A202	20	0,552	0,348	0,264	0,003	0,552	0,290	0,370	0,003

Fonte: autoria própria.

Tabela D.3 – $p_{valores}$ das 52 estações pluviométricas quanto aos testes de Estacionariedade, Independência, Homogeneidade e Aleatoriedade, para as durações de 15 dias e 30 dias

Estação	N	15 dias				30 dias			
		Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.	Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.
00047002	39	0,534	0,522	0,646	0,097	0,261	0,658	0,396	0,182
00047003	34	0,633	0,432	0,514	0,835	0,459	0,409	0,406	0,835

Estação	N	15 dias				30 dias			
		Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.	Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.
00047004	39	0,739	0,284	0,716	0,302	0,543	0,204	0,667	0,742
00047005	29	0,368	0,214	0,101	0,086	0,382	0,471	0,145	0,086
00047006	31	0,335	0,088	0,714	0,847	0,480	0,110	0,810	0,847
00047007	25	0,296	0,178	0,707	0,744	0,187	0,199	0,713	0,744
00048000	33	0,332	0,384	0,090	0,012	0,438	0,422	0,172	0,001
00048006	39	0,301	0,178	0,528	0,602	0,390	0,492	0,561	0,602
00049009	23	0,107	0,137	0,173	0,697	0,479	0,067	0,788	0,697
00049011	23	0,290	0,224	0,737	0,500	0,594	0,045	0,925	0,303
82191	58	0,016 (+)	0,029	0,060	0,770	0,014 (+)	0,026	0,056	0,854
82263	50	0,450	0,509	0,650	0,086	0,417	0,859	0,744	0,020
00146011	27	0,891	0,518	0,871	0,006	0,905	0,237	0,958	0,006
00147002	55	0,047	0,354	0,034	0,776	0,032	0,344	0,050	0,543
00147006	16	0,394	0,983	0,561	0,010	0,589	0,986	0,700	0,000
00147007	47	0,504	0,662	0,842	0,017	0,680	0,922	0,936	0,017
00147008	45	0,880	0,199	0,971	0,595	0,824	0,176	0,879	0,114
00147010	39	0,922	0,009	0,996	0,448	0,739	0,319	0,921	0,002
00147011	40	0,970	0,031	0,960	0,080	0,986	0,090	0,962	0,261
00147016	31	0,184	0,989	0,190	0,020	0,232	0,954	0,260	0,020
00147017	31	0,127	0,100	0,461	0,721	0,158	0,064	0,600	0,928
00147018	29	0,210	0,097	0,431	0,181	0,274	0,193	0,474	0,086
00147019	26	0,025	0,843	0,069	0,167	0,034	0,921	0,056	0,002
00148001	28	0,226	0,675	0,256	0,108	0,304	0,611	0,402	0,220
00148002	67	0,005 (+)	0,468	0,050	0,422	0,008 (+)	0,262	0,054	0,422
00148003	49	0,796	0,696	0,643	0,546	0,727	0,945	0,679	0,546
00148009	40	0,059	0,018	0,207	0,153	0,017 (+)	0,031	0,013	0,153
00148010	39	0,113	0,118	0,264	0,448	0,123	0,245	0,307	0,182
00148011	38	0,036	0,131	0,025	0,057	0,021 (+)	0,255	0,010	0,500
00148012	39	0,600	0,627	0,716	0,097	0,223	0,241	0,396	0,182
00148017	28	0,838	0,355	0,886	0,045	0,668	0,086	0,744	0,004
00148018	25	0,337	0,865	0,344	0,011	0,417	0,890	0,522	0,095
00149003	38	0,028	0,499	0,041	0,215	0,052	0,147	0,048	0,785
00149004	25	0,999	0,012	0,992	0,035	0,998	0,005	0,991	0,035
00149005	18	0,027	0,731	0,039	0,216	0,010 (+)	0,849	0,047	0,216
00149006	17	0,565	0,049	0,815	0,112	0,340	0,021	0,593	0,112
00247000	47	0,902	0,067	0,588	0,638	0,942	0,298	0,747	0,240
00247003	37	0,991	0,260	0,982	0,553	0,939	0,849	0,972	0,071
00247004	35	0,080	0,131	0,103	0,980	0,024 (+)	0,047	0,051	0,795
00247006	31	0,718	0,508	0,917	0,054	0,547	0,440	0,868	0,054
00247008	21	0,102	0,385	0,026	0,103	0,167	0,666	0,066	0,036
00248001	38	0,170	0,441	0,251	0,215	0,196	0,344	0,347	0,500
00248003	36	0,457	0,085	0,469	0,294	0,874	0,272	0,739	0,039
00248006	32	0,007 (+)	0,556	0,013	0,333	0,036	0,732	0,045	0,333
00249001	23	0,027	0,390	0,118	0,303	0,081	0,492	0,347	0,697

Estação	N	15 dias				30 dias			
		Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.	Estacion.	Independ.	Homogen.	Aleator.
00249002	41	0,760	0,050	0,956	0,128	0,784	0,046	0,963	0,128
00249003	34	0,594	0,024	0,947	0,555	0,860	0,025	0,954	0,835
00249004	27	0,126	0,345	0,151	0,437	0,139	0,245	0,122	0,785
00348001	35	0,889	0,393	0,873	0,340	0,617	0,282	0,769	0,795
00348002	26	0,041	0,072	0,017	0,074	0,015 (+)	0,063	0,008	0,008
A201	20	0,014 (+)	0,001	0,007	0,711	0,019 (+)	0,001	0,022	0,952
A202	20	0,526	0,234	0,370	0,003	0,474	0,072	0,515	0,003

Fonte: autoria própria.

A estação VILA DO CONDE (00148011) apresentou um $p_{valor} = 0{,}024$ para o teste de Aleatoriedade para a duração de 24 horas, que, devido a sua proximidade com o $p_{valor-limite}$, foi mantida na análise. Para a duração de 30 dias, o $p - valor$ da VILA do CONDE (00148011) no teste de Homogeneidade foi de $p_{valor} = 0{,}010$, e, retirando o máximo anual de 30 dias para o ano de 2014, 1.126,3 mm (25/03/2014 a 23/04/2014), a amostra apresentou um p_{valor} superior ao $p_{valor-limite}$, indicando uma possível correção necessária na consolidação amostral. Contudo, avaliando a exclusão ou não desse máximo da amostra, foi visto que ocorreram chuvas sequenciais, que não passaram de 87,3 mm/dia, incorporando uma altura de chuva expressiva em 30 dias e passível de ocorrer, já que não houve registros de erros de medição na plataforma HIDRO 1.4 da ANA. Assim sendo, manteve-se o máximo anual de 30 dias de 2014 de 1.126,3 mm e a estação VILA DO CONDE (00148011) não foi excluída do estudo.

Por fim, apenas 10 estações pluviométricas de código 48000, 82263, 147002, 147007, 147010, 147011, 147016, 148002, 247006 e 248001 foram excluídas da simulação sintética dos fatores de frequência.

APÊNDICE E – Teste de Aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) e a distribuições probabilísticas utilizadas

- Teste de Aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS)

Esse teste não paramétrico tem como base a diferença máxima entre as funções probabilísticas acumuladas teóricas e empíricas. Considerando uma amostra de tamanho *N* $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, deve-se ordenar os dados de forma crescente $\{x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_N\}$, de tal forma que "*m*" denota a ordem de classificação de $1 \leq m \leq N$. Dessa forma, expõe-se o seguinte procedimento na (Equação (32)):

$$F_N(x_m) = \frac{m}{N}$$
$$D_N = máx|F_N(x) - F_X(x)| \quad (32)$$
Rejeita-se a hipótese nula se $D_N > D_{N,\alpha}$

Onde:

$F_N(x)$: função acumulada de probabilidade empírica;

m: ordem de classificação das amostras de forma crescente;

N: tamanho da amostra;

D_N: estatística de teste que representa a maior diferença entre a probabilidade acumulada empírica e teórica;

$F_X(x)$: função acumulada de probabilidade teórica (da distribuição candidata para o ajuste);

$D_{N,\alpha}$: valores críticos da estatística de teste que é associada a um nível de significância α e ao tamanho *N*.

Apresenta-se, na Tabela E.1, os valores críticos da estatística de teste, $D_{N,\alpha}$, que é associada ao α e *N*. Esses valores foram concebidos para as distribuições Exponencial, Gama, Normal e Gumbel, contudo, por falta de informações para as outras distribuições, considerou estes valores críticos para todas as distribuições.

Tabela E.1 - Valores críticos da estatística $D_{N,\alpha}$ do teste de aderência KS

N	$D_{N,0,10}$	$D_{N,0,05}$	$D_{N,0,02}$	$D_{N,0,01}$	N	$D_{N,0,10}$	$D_{N,0,05}$	$D_{N,0,02}$	$D_{N,0,01}$
10	0,369	0,409	0,457	0,489	26	0,233	0,259	0,29	0,311
11	0,352	0,391	0,437	0,468	27	0,229	0,254	0,284	0,305
12	0,338	0,375	0,419	0,449	28	0,225	0,25	0,279	0,3
13	0,325	0,361	0,404	0,432	29	0,221	0,246	0,275	0,295
14	0,314	0,349	0,39	0,418	30	0,218	0,242	0,27	0,29
15	0,304	0,338	0,377	0,404	31	0,214	0,238	0,266	0,285
16	0,295	0,327	0,366	0,392	32	0,211	0,234	0,262	0,281
17	0,286	0,318	0,355	0,381	33	0,208	0,231	0,258	0,277
18	0,279	0,309	0,346	0,371	34	0,205	0,227	0,254	0,273
19	0,271	0,301	0,337	0,361	35	0,202	0,224	0,251	0,269
20	0,265	0,294	0,329	0,352	36	0,199	0,221	0,247	0,265
21	0,259	0,287	0,321	0,344	37	0,196	0,218	0,244	0,262
22	0,253	0,281	0,314	0,337	38	0,194	0,215	0,241	0,258
23	0,247	0,275	0,307	0,33	39	0,191	0,213	0,238	0,255
24	0,242	0,269	0,301	0,323	40	0,189	0,21	0,235	0,252
25	0,238	0,264	0,295	0,317	> 40	$1{,}22/\sqrt{N}$	$1{,}36/\sqrt{N}$	$1{,}52/\sqrt{N}$	$1{,}63/\sqrt{N}$

Na sequência, será apresentado as distribuições probabilísticas utilizadas no presente estudo, com os estimadores dos parâmetros baseados no método dos momentos-L:

- Distribuição Exponencial

$$FDP: f_X(x) = \frac{1}{\theta} * exp\left(-\frac{x}{\theta}\right),\ para\ x > 0$$
$$Inversa\ FAP: x(F) = -\theta * ln\ (1 - F) \quad (33)$$
$$\theta = l_1$$

Onde:

$f_X(x)$: função densidade de probabilidade da variável aleatória X;

$x(F)$: inversa da função acumulada de probabilidade da variável aleatória X;

θ: parâmetro de escala;

l_1: momento-L amostral de ordem 1.

- Distribuição Log-Normal (2 parâmetros)

Delimitando os parâmetros de escala e posição da distribuição como μ_Y e $\sigma_Y, com\ Y = ln\ (X)$, temos que:

$$FDP: f_X(x) = \frac{1}{x * \sigma_{ln\ (X)}\sqrt{2\pi}} * exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{ln(x) - \mu_{ln(X)}}{\sigma}\right)^2\right], para\ x > 0$$

$$\sigma_{ln(X)} = \sigma_Y = 2 * erf^{-1}(t)$$

$$\mu_{ln(X)} = \mu_Y = ln(l_1) - \frac{\sigma_Y^2}{2} \quad (34)$$

$$erf(w) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \int_0^w e^{-u^2} du\ .\ A\ inversa\ erf^{-1}(t)\ \text{é}\ igual\ a\ \frac{u}{\sqrt{2}}, com\ u$$

$$= \Phi\left[\frac{t+1}{2}\right]$$

Onde:

$f_X(x)$: função densidade de probabilidade da variável aleatória X;

Y: variável de transformação do logaritmo natural da variável X;

μ_Y: parâmetro de posição da variável Y;

$\sigma_{ln\ (X)}$: parâmetro de escala da variável Y;

l_1: momento-L amostral de ordem 1;

$t\ ou\ t_1$: quociente de momentos-L amostral de ordem 1, dado por $\frac{l_2}{l_1}$;

l_2: momento-L amostral de ordem 2;

Φ: função acumulada de probabilidades da distribuição Normal Padrão.

- Distribuição Log-Normal (3 parâmetros)

Considerando $\xi, \alpha\ e\ \kappa$ como os parâmetros de posição, escala e forma, respectivamente, define-se a Distribuição Log-Normal de 3 parâmetros na (35). Caso

$\kappa > 0 \rightarrow -\infty < x \leq \xi + \frac{\alpha}{\kappa}$, já se $\kappa = 0 \rightarrow -\infty < x < \infty$. Todavia, se $\kappa < 0 \rightarrow \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \leq x < \infty$.

$$FDP: f_X(x) = \frac{exp\left(\kappa * y - \frac{y^2}{2}\right)}{\alpha * \sqrt{2\pi}},$$

$$sendo\ que\ y = \begin{cases} -\frac{1}{k} * log\left[1 - \frac{\kappa}{\alpha} * (x - \xi)\right], se\ \kappa \neq 0 \\ \frac{x - \xi}{\alpha}, se\ \kappa = 0 \end{cases} \quad (35)$$

$$FAP: F_X(x) = \Phi(y)$$

$$l_1 = \xi + \frac{\alpha}{\kappa} * [1 - \exp\left({\kappa^2}/{2}\right)]$$

$$l_2 = \frac{\alpha}{\kappa} * \exp\left({\kappa^2}/{2}\right) * \{1 - 2 * \Phi({-\kappa}/{\sqrt{2}})\}$$

Onde:

$f_X(x)$: função densidade de probabilidade da variável aleatória X;

$F_X(x)$: função acumulada de probabilidade da variável aleatória X;

ξ: parâmetro de posição;

α: parâmetro de escala;

κ: parâmetro de forma;

y: função genérica "*y*";

l_1: momento-L amostral de ordem 1;

l_2: momento-L amostral de ordem 2;

Φ: função cumulativa de probabilidades da distribuição Normal Padrão.

- Distribuição Gama

$$FDP: f_X(x) = \frac{(x/\theta)^{\eta-1} * exp\,(-x/\theta)}{\theta * \Gamma(\eta)}, para\ x, \theta\ e\ \eta > 0$$

$$\Gamma(\eta) = \int_0^{\infty} x^{\eta-1} * exp(-x)\,dx \tag{36}$$

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{\Gamma(\eta + 0{,}5)}{\sqrt{\pi} * \Gamma(\eta + 1)}$$

$$\theta = \frac{l_1}{\eta}$$

Onde:

$f_X(x)$: função densidade de probabilidade da variável aleatória X;

θ: parâmetro de escala;

η: parâmetro de forma;

$\Gamma(.)$: função *Gama*;

l_1: momento-L amostral de ordem 1;

l_2: momento-L amostral de ordem 2.

- Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) e caso particular da Distribuição de Gumbel (Máximos)

A função GEV é delimitada por 3 parâmetros, $\alpha, \beta\ e\ \kappa$, os quais significam são, respectivamente, os parâmetros de escala, posição e forma. Na Equação (37) apresenta-se as equações que envolvem a função GEV, bem como o caso especial da função Gumbel quando $\kappa = 0$.

$$FDP: f_X(x) = \frac{1}{\alpha} * \left[1 - \kappa\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]^{1/\kappa - 1} * exp\left\{-\left[1 - \kappa * \left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]^{1/k}\right\}, se\ \kappa \neq 0 \tag{37}$$

$$FAP: F_X(x) = exp\{-[1 - \kappa * (\frac{x-\beta}{\alpha})]^{1/k}\}, se\ k \neq 0$$

$$Inversa\ FAP: x(F) = \beta + \frac{\alpha}{\kappa} * [1 - (-ln(F))^{\kappa}], se\ \kappa \neq 0$$

$$FDP: f_X(x) = \frac{1}{\alpha} * exp\left[-\frac{x-\beta}{\alpha} - exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right], se\ \kappa = 0$$

$$FAP: F_X(x) = exp\left[-exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right], se\ k = 0, -\infty < x, \beta < \infty\ e\ \alpha > 0$$

$$Inversa\ FAP: x(F) = \beta - \alpha * ln[-ln(F)], se\ \kappa = 0$$

Considerando $\kappa \neq 0$, os estimadores dos parâmetros pelo método dos momentos-L são:

$$\kappa = 7{,}8590 * C + 2{,}9554 * C^2, onde\ C = \frac{2}{(3+t^3)} - \frac{ln\,2}{ln\,3}$$

$$\alpha = \frac{l_2 * \kappa}{\Gamma(1+\kappa) * (1-2^{-\kappa})}$$

$$\beta = l_1 - \frac{\alpha}{\kappa} * [1 - \Gamma(1+\kappa)]$$

Considerando $\kappa = 0$, ou seja, especificamente para a função Gumbel, os estimadores dos parâmetros pelo método dos momentos-L são:

$$\alpha = \frac{l_2}{ln\,2}$$

$$\beta = l_1 - 0{,}5772 * \alpha$$

Onde:

$f_X(x)$: função densidade de probabilidade da variável aleatória X;

$F_X(x)$: função acumulada de probabilidade da variável aleatória X;

$x(F)$: inversa da função acumulada de probabilidade da variável aleatória X;

α: parâmetro de escala;

β: parâmetro de posição;

κ: parâmetro de forma;

$\Gamma(.)$: função *Gama*;

C: função genérica "C";

l_1: momento-L amostral de ordem 1;

l_2: momento-L amostral de ordem 2;

t_3: quociente de momentos-L amostral de ordem 3, dado por $\frac{l_3}{l_2}$;

l_3: momento-L amostral de ordem 3.

- Distribuição Pearson Tipo III e Log-Pearson Tipo III

A Distribuição Pearson-III é definida por três parâmetros, sendo eles o parâmetro de escala α, de forma β e posição γ. Caso $\gamma = 0$ torna-se a distribuição de probabilidades Gama. A Equação (38) apresenta o equacionamento da distribuição probabilística Pearson Tipo III.

$$FDP: f_X(x) = \frac{1}{\alpha * \Gamma(\beta)} * \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} * exp\left(-\frac{-x-\gamma}{\alpha}\right), para\ \gamma < x < \infty$$

$$Para\ t_3 \geq \frac{1}{3}\ e\ com\ t_m = 1 - t_3, \beta = \frac{0{,}36067 * t_m - 0{,}5967 * t_m^2 + 0{,}25361 * t_m^3}{1 - 2{,}78861 * t_m + 2{,}566096 * t_m^2 - 0{,}77045 * t_m^3} \quad (38)$$

$$Para\ t_3 < \frac{1}{3}\ e\ com\ t_m = 3\pi t_3^2, \beta = \frac{1 + 0{,}2906 * t_m}{t_m + 0{,}1882 * t_m^2 + 0{,}0442 * t_m^3}$$

$$\alpha = \sqrt{\pi} * l_2 * \frac{\Gamma(\beta)}{\Gamma(\beta + 0{,}5)}$$

$$\gamma = l_1 - \alpha * \beta$$

Onde:

$f_X(x)$: função densidade de probabilidade da variável aleatória X;

α: parâmetro de escala;

β: parâmetro de forma;

γ: parâmetro de posição;

$\Gamma(.)$: função *Gama*;

l_1: momento-L amostral de ordem 1;

l_2: momento-L amostral de ordem 2.

t_m: função genérica "t_m";

t_3: quociente de momentos-L amostral de ordem 3, dado por $\frac{l_3}{l_2}$;

l_3: momento-L amostral de ordem 3.

Quanto a Distribuição Log-Pearson Tipo III, basicamente, aplica-se a transformação logarítmica da variável aleatória X, ou seja $Z = ln(X)$, e utiliza-se todo o equacionamento já apresentado da Distribuição Pearson Tipo III, sendo respeitado a premissa de $\gamma < x < \infty$. A Equação (39) dispõe sobre a função densidade de probabilidades da variável aleatório Z:

$$FDP: f_Z(z) = \frac{1}{\alpha * \Gamma(\beta)} * \left(\frac{z-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} * exp\left(-\frac{-z-\gamma}{\alpha}\right) \quad (39)$$

Onde:

$f_Z(z)$: função densidade de probabilidades da variável aleatória Z;

Quanto as estimativas dos parâmetros via método dos momentos-L da Distribuição Log-Pearson Tipo III, deve-se prosseguir de forma idêntica ao apresentado para a distribuição Pearson-III, mantendo a transformação $Z = ln(X)$.

- Distribuição Generalizada de Pareto

A Distribuição Generalizada de Pareto é definida por três parâmetros, sendo eles o parâmetro de posição ξ, escala α e forma κ. Respeita-se a seguinte condição para x: $\xi \leq x \leq \xi + \frac{\alpha}{\kappa}$, se $\kappa > 0$; $\xi \leq x < \infty$, se $\kappa \leq 0$. Caso $\kappa = 0$, recai-se na particularidade da Distribuição Exponencial, por outro lado, caso $\kappa = 1$, a função se torna a

Distribuição Uniforme com $\xi \leq x \leq \xi + \alpha$. A Equação (40) apresenta o equacionamento da distribuição probabilística Generalizada de Pareto.

$$FDP: f_X(x) = \frac{1}{\alpha} * exp\,[-(1-\kappa) * y],$$

$$sendo\ que\ y = \begin{cases} -\frac{1}{k} * log\left[1 - \frac{\kappa}{\alpha} * (x-\xi)\right], se\ \kappa \neq 0 \\ \frac{x-\xi}{\alpha}, se\ \kappa = 0 \end{cases}$$

$$FAP: F_X(x) = 1 - exp\,(-y)$$

$$Inversa\ FAP: x(F) = \begin{cases} \xi + \frac{\alpha}{\kappa} * [1-(1-F)^{\kappa}], se\ \kappa \neq 0 \\ \xi - \alpha * log\,(1-F), se\ \kappa = 0 \end{cases}$$

$$Os\ momentos - L\ são\ definidos\ para\ \kappa > -1:$$

$$l_1 = \xi + \frac{\alpha}{(1+\kappa)} \quad (40)$$

$$l_2 = \frac{\alpha}{(1+\kappa) * (2+\kappa)}$$

$$t_3 = \frac{(1-\kappa)}{(3+\kappa)}$$

$$t_4 = \frac{(1-\kappa) * (2-\kappa)}{(3+\kappa) * (4+\kappa)}$$

$$Há\ ainda\ uma\ relação\ entre\ t_3\ e\ t_4\ dado\ por:$$

$$t_4 = \frac{t_3(1+5*t_3)}{(5+t_3)}$$

Onde:

$f_X(x)$: função densidade de probabilidade da variável aleatória X;

$F_X(x)$: função acumulada de probabilidade da variável aleatória X;

$x(F)$: inversa da função acumulada de probabilidade da variável aleatória X;

ξ: parâmetro de posição;

α: parâmetro de escala;

κ: parâmetro de forma;

y: função genérica “*y*”;

l_1: momento-L amostral de ordem 1;

l_2: momento-L amostral de ordem 2;

t_3: quociente de momentos-L amostral de ordem 3, dado por $\frac{l_3}{l_2}$;

l_3: momento-L amostral de ordem 3;

t_4: quociente de momentos-L amostral de ordem 4, dado por $\frac{l_4}{l_2}$;

l_4: momento-L amostral de ordem 4.

- Distribuição Generalizada Logística

A Distribuição Generalizada Logística é definida por três parâmetros, sendo eles o parâmetro de posição ξ, escala α e forma κ. Respeita-se a seguinte condição para x: $-\infty < x \leq \xi + \frac{\alpha}{\kappa}$, se $\kappa > 0$; $-\infty < x < \infty, se\ \kappa = 0$; $\xi + \frac{\alpha}{\kappa} \leq x < \infty$, se $\kappa \leq 0$. Caso $\kappa = 0$, recai-se na particularidade da Distribuição Logística. A Equação (41) apresenta o equacionamento da distribuição probabilística Generalizada Logística.

$$FDP: f_X(x) = \frac{1}{\alpha} * \frac{exp\,[-(1-\kappa) * y]}{(1+\exp(-y))^2},$$

$$sendo\ que\ y = \begin{cases} -\frac{1}{k} * log\left[1 - \frac{\kappa}{\alpha} * (x-\xi)\right], se\ \kappa \neq 0 \\ \frac{x-\xi}{\alpha}, se\ \kappa = 0 \end{cases}$$

$$FAP: F_X(x) = \frac{1}{(1+e(-y))} \tag{41}$$

$$Inversa\ FAP: x(F) = \begin{cases} \xi + \frac{\alpha}{\kappa} * [1 - \left(\frac{1-F}{F}\right)^{\kappa}], se\ \kappa \neq 0 \\ \xi - \alpha * log\,(\frac{1-F}{F}), se\ \kappa = 0 \end{cases}$$

$$Os\ momentos - L\ são\ definidos\ para - 1 < \kappa < 1:$$

$$l_1 = \xi + \alpha * (\frac{1}{\kappa} - \frac{\pi}{\sin(\kappa\pi)})$$

$$l_2 = \frac{\alpha * \kappa * \pi}{\sin(\kappa\pi)}$$

$$t_3 = -\kappa$$

$$t_4 = \frac{1 + 5\kappa^2}{6}$$

Onde:

$f_X(x)$: função densidade de probabilidade da variável aleatória X;

$F_X(x)$: função acumulada de probabilidade da variável aleatória X;

$x(F)$: inversa da função acumulada de probabilidade da variável aleatória X;

ξ: parâmetro de posição;

α: parâmetro de escala;

κ: parâmetro de forma;

y: função genérica "*y*";

l_1: momento-L amostral de ordem 1;

l_2: momento-L amostral de ordem 2;

t_3: quociente de momentos-L amostral de ordem 3, dado por $\frac{l_3}{l_2}$;

l_3: momento-L amostral de ordem 3;

t_4: quociente de momentos-L amostral de ordem 4, dado por $\frac{l_4}{l_2}$;

l_4: momento-L amostral de ordem 4.

APÊNDICE F – Resultados Estatísticos Gerais: K e PMP

Tabela F.1 - Fatores de frequências e PMP_s Estatísticas associadas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 24 horas

Estação	$\overline{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Hershfield		Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)	K	PMP (mm)		K	PMP (mm)	K	PMP (mm)
00047002	161,01	31,92	13,59	594,6	4,04	290,0	*ln*3	4,16	293,9	5,18	326,4
00047003	141,86	34,91	14,16	636,3	5,58	336,5	pe3	3,10	249,9	3,75	272,8
00047004	127,11	27,09	14,62	523,2	7,15	320,6	gev	3,10	211,2	3,53	222,8
00047005	147,99	58,03	13,98	959,1	5,03	440,0	pe3	5,29	455,0	6,95	551,5
00047006	153,65	43,10	13,81	748,7	4,57	350,8	gev	3,31	296,3	3,82	318,4
00047007	119,15	35,09	14,88	641,3	8,17	405,7	gev	7,04	366,1	9,70	459,4
00048000	172,79	42,87	13,24	740,6	3,32	315,0	-	-	-	-	-
00048006	114,26	34,84	15,04	638,2	8,87	423,2	gum	5,32	299,8	6,84	352,4
00049009	109,02	29,22	15,21	553,4	9,46	385,4	*ln*3	4,32	235,2	5,59	272,3
00049011	110,75	31,04	15,15	581,1	9,41	402,7	pe3	4,26	243,0	5,17	271,2
82191	108,31	29,70	15,23	560,7	9,46	389,3	glo	7,73	337,8	11,82	459,2
82263	127,75	36,06	14,60	654,3	7,07	382,6	-	-	-	-	-
00146011	95,71	35,13	15,66	645,7	9,46	428,1	pe3	5,01	271,8	6,66	329,8
00147002	114,79	41,82	15,02	742,9	8,79	482,3	-	-	-	-	-
00147006	100,19	23,82	15,50	469,4	9,46	325,5	gum	5,26	225,4	6,98	266,4
00147007	116,91	47,13	14,95	821,6	8,48	516,6	-	-	-	-	-
00147008	91,26	25,37	15,81	492,3	9,46	331,3	gam	4,11	195,5	4,88	215,1
00147010	108,93	31,98	15,21	595,5	9,46	411,5	-	-	-	-	-
00147011	105,72	25,63	15,32	498,3	9,46	348,2	-	-	-	-	-
00147016	99,03	28,45	15,54	541,2	9,46	368,1	-	-	-	-	-
00147017	115,08	22,79	15,01	457,2	8,74	314,4	*ln*3	4,00	206,2	4,97	228,3
00147018	99,27	39,36	15,53	710,8	9,46	471,6	*ln*3	6,24	344,8	9,28	464,5
00147019	95,12	22,00	15,68	440,0	9,46	303,2	*ln*2	4,31	189,9	5,46	215,3
00148001	112,72	26,47	15,09	512,1	9,10	353,5	gev	7,02	298,6	10,39	387,8
00148002	107,69	28,17	15,25	537,4	9,46	374,2	-	-	-	-	-
00148003	110,42	44,26	15,16	781,5	9,46	528,9	lp3	8,40	482,4	11,74	630,0
00148009	122,60	27,59	14,77	530,0	7,71	335,2	pe3	4,45	245,3	5,56	276,1
00148010	110,69	34,14	15,15	628,0	9,41	432,0	pe3	4,32	258,2	5,16	286,9
00148011	117,35	43,13	14,94	761,5	8,42	480,4	gum	5,33	347,3	6,92	415,8
00148012	125,82	44,44	14,66	777,5	7,30	450,3	gev	6,44	411,9	8,34	496,5
00148017	79,34	23,91	16,22	467,1	9,46	305,5	lp3	4,78	193,6	6,12	225,5
00148018	119,39	36,61	14,87	663,8	8,13	417,1	*ln*3	3,82	259,1	4,76	293,7
00149003	120,49	34,74	14,84	635,9	7,98	397,9	gev	6,03	330,0	8,11	402,3
00149004	105,40	52,03	15,33	903,0	9,46	597,6	gam	4,64	346,9	5,97	416,2
00149005	118,07	41,51	14,91	737,1	8,32	463,3	glo	4,39	300,1	5,94	364,5
00149006	129,18	47,75	14,56	824,4	6,90	458,7	*ln*3	7,47	486,0	11,37	671,9
00247000	112,52	27,42	15,09	526,5	9,13	362,9	glo	6,98	303,9	10,28	394,5
00247003	97,48	39,74	15,59	717,3	9,46	473,5	pe3	4,72	285,0	6,05	337,8
00247004	116,00	30,94	14,98	579,5	8,61	382,4	gev	6,05	303,2	8,53	379,9

Estação	$\overline{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Hershfield		Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)	K	PMP (mm)		K	PMP (mm)	K	PMP (mm)
00247006	97,61	36,31	15,59	663,7	9,46	441,1	-	-	-	-	-
00247008	116,82	31,99	14,95	595,1	8,49	388,5	gum	5,17	282,1	7,11	344,3
00248001	110,97	28,14	15,15	537,1	9,37	374,6	-	-	-	-	-
00248003	113,97	23,16	15,05	462,4	8,91	320,3	gam	3,87	203,6	4,64	221,3
00248006	122,81	24,90	14,76	490,4	7,68	314,1	gev	3,99	222,3	4,87	244,2
00249001	132,11	30,15	14,47	568,3	6,57	330,2	gpa	5,33	292,9	6,54	329,5
00249002	121,32	28,46	14,81	542,8	7,87	345,4	pe3	5,26	271,0	6,65	310,6
00249003	127,39	32,51	14,62	602,5	7,11	358,6	pe3	5,28	299,1	6,74	346,5
00249004	129,64	33,74	14,54	620,3	6,85	360,6	gev	3,21	237,8	3,77	257,0
00348001	125,96	39,26	14,66	701,5	7,28	411,9	gum	5,32	335,0	7,01	401,2
00348002	120,48	39,94	14,84	713,0	7,99	439,4	lp3	4,30	292,2	5,26	330,4
A201	100,91	23,55	15,48	465,5	9,46	323,7	pe3	4,44	205,4	5,77	236,8
A202	89,57	34,19	15,87	631,9	9,46	413,0	*ln*3	8,09	366,3	12,64	521,7

Fonte: autoria própria.

Tabela F.2 - Fatores de frequências e PMP_s Estatísticas associadas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 3 dias

Estação	$\overline{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP (mm)	K	PMP (mm)
00047002	240,70	56,40	4,23	479,5	*ln*3	5,96	576,9	7,95	689,2
00047003	202,89	60,38	5,39	528,6	pe3	5,24	519,2	6,60	601,5
00047004	187,84	46,01	5,94	461,1	gev	2,60	307,4	2,91	321,7
00047005	215,52	56,33	4,98	495,8	pe3	5,00	496,9	6,57	585,4
00047006	229,14	76,35	4,56	577,3	gev	4,21	550,9	5,14	621,5
00047007	192,36	53,91	5,77	503,4	gev	3,29	369,9	3,88	401,7
00048000	246,36	67,46	4,08	521,9	-	-	-	-	-
00048006	161,73	48,75	7,02	504,0	gum	5,36	422,8	6,70	488,3
00049009	140,27	32,08	7,65	385,7	*ln*3	7,39	377,4	10,86	488,7
00049011	161,03	35,58	7,05	411,9	pe3	3,22	275,6	3,93	300,9
82191	153,00	39,55	7,42	446,6	glo	7,48	448,7	11,16	594,2
82263	175,00	44,03	6,45	458,9	-	-	-	-	-
00146011	135,52	38,85	7,65	432,7	pe3	5,40	345,1	7,07	410,1
00147002	152,08	45,20	7,47	489,6	-	-	-	-	-
00147006	146,40	29,06	7,65	368,8	gum	5,17	296,6	7,35	359,9
00147007	162,60	55,01	6,98	546,6	-	-	-	-	-
00147008	127,30	31,97	7,65	371,9	gam	4,09	258,1	4,83	281,6
00147010	143,88	43,03	7,65	473,1	-	-	-	-	-
00147011	145,72	38,12	7,65	437,3	-	-	-	-	-
00147016	128,68	33,19	7,65	382,6	-	-	-	-	-
00147017	151,62	39,29	7,49	445,9	*ln*3	8,81	497,6	14,58	724,6
00147018	134,38	37,55	7,65	421,6	*ln*3	9,43	488,5	14,26	669,8

Estação	$\overline{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP (mm)	K	PMP (mm)
00147019	126,82	25,39	7,65	321,1	*ln*2	4,17	232,6	4,99	253,5
00148001	141,49	35,31	7,65	411,6	gev	5,99	353,1	8,67	447,5
00148002	142,20	32,23	7,65	388,8	-	-	-	-	-
00148003	148,34	41,15	7,65	463,1	lp3	7,69	464,9	10,58	583,7
00148009	160,80	33,45	7,06	397,0	pe3	4,77	320,3	5,88	357,3
00148010	152,75	49,63	7,43	521,7	pe3	5,39	420,2	6,87	493,7
00148011	160,45	52,92	7,08	535,0	gum	5,28	440,1	6,90	525,8
00148012	162,83	43,67	6,97	467,2	gev	7,96	510,2	12,38	703,3
00148017	124,50	25,62	7,65	320,5	lp3	4,15	230,8	5,25	259,0
00148018	153,31	44,51	7,41	483,1	*ln*3	4,62	359,0	6,08	423,7
00149003	156,56	38,94	7,26	439,1	gev	5,20	359,1	6,69	417,2
00149004	153,52	64,00	7,40	627,0	gam	4,39	434,5	5,63	514,0
00149005	162,08	38,28	7,00	430,2	glo	5,21	361,4	8,12	472,8
00149006	160,51	59,80	7,08	583,6	*ln*3	12,98	936,6	23,78	1.582,4
00247000	149,03	33,10	7,61	401,0	glo	5,49	330,7	7,59	400,1
00247003	141,26	40,83	7,65	453,6	pe3	5,52	366,8	7,02	427,9
00247004	160,97	37,09	7,05	422,6	gev	6,15	389,2	8,75	485,3
00247006	133,36	43,97	7,65	469,7	-	-	-	-	-
00247008	166,01	38,61	6,83	429,7	gum	5,14	364,5	6,92	433,3
00248001	142,08	31,32	7,65	381,7	-	-	-	-	-
00248003	149,71	27,28	7,58	356,5	gam	3,75	252,0	4,54	273,6
00248006	153,58	30,45	7,40	378,8	gev	4,96	304,6	6,48	351,0
00249001	151,41	30,71	7,50	381,7	gpa	2,29	221,7	2,70	234,2
00249002	161,60	35,40	7,03	410,3	pe3	4,34	315,3	5,40	352,7
00249003	188,25	58,02	5,92	532,0	pe3	5,97	534,4	7,93	648,3
00249004	192,63	68,03	5,76	584,5	gev	5,05	536,0	6,90	662,3
00348001	164,09	45,58	6,91	479,2	gum	5,34	407,7	6,73	470,7
00348002	154,20	41,20	7,37	457,7	lp3	4,10	323,3	5,03	361,2
A201	145,35	27,20	7,65	353,5	pe3	6,00	308,4	8,40	373,8
A202	130,42	48,35	7,65	500,3	*ln*3	7,97	515,7	12,67	742,9

Fonte: autoria própria.

Tabela F.3 - Fatores de frequências e PMP_s Estatísticas associadas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 5 dias

Estação	$\overline{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP	K	PMP
00047002	299,68	69,14	3,48	540,1	*ln*3	5,12	653,9	6,51	750,0
00047003	260,11	62,17	4,44	536,4	pe3	5,23	585,3	6,57	668,8
00047004	235,75	57,60	5,17	533,5	gev	2,06	354,2	2,26	366,0
00047005	279,23	80,14	3,95	595,6	pe3	5,57	726,0	7,27	861,7
00047006	275,56	79,86	4,04	598,1	gev	5,09	682,4	6,70	810,7

Estação	$\overline{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP	K	PMP
00047007	249,50	61,84	4,75	543,0	gev	3,54	468,7	4,32	516,9
00048000	314,14	92,65	3,18	608,7	-	-	-	-	-
00048006	201,81	48,05	6,38	508,4	gum	5,35	458,9	6,68	522,7
00049009	185,39	29,85	6,38	375,9	*ln*3	5,62	353,2	7,78	417,6
00049011	202,17	41,58	6,37	466,8	pe3	2,58	309,6	3,05	328,8
82191	197,81	51,03	6,38	523,4	glo	9,94	705,3	14,83	954,9
82263	217,27	49,69	5,80	505,3	-	-	-	-	-
00146011	174,20	39,21	6,38	424,3	pe3	4,19	338,3	5,24	379,6
00147002	191,95	53,07	6,38	530,6	-	-	-	-	-
00147006	186,16	38,59	6,38	432,4	gum	5,26	389,1	7,16	462,5
00147007	202,46	72,13	6,35	660,7	-	-	-	-	-
00147008	157,63	34,73	6,38	379,2	gam	3,95	294,7	4,78	323,7
00147010	180,93	48,77	6,38	492,1	-	-	-	-	-
00147011	183,45	48,54	6,38	493,1	-	-	-	-	-
00147016	161,86	40,95	6,38	423,1	-	-	-	-	-
00147017	192,38	38,54	6,38	438,3	*ln*3	5,72	412,7	7,71	489,4
00147018	167,73	33,33	6,38	380,4	*ln*3	8,04	435,8	12,15	572,7
00147019	162,59	28,40	6,38	343,8	*ln*2	4,02	276,8	5,05	306,1
00148001	186,83	43,11	6,38	461,9	gev	3,81	351,1	4,51	381,2
00148002	186,57	41,69	6,38	452,6	-	-	-	-	-
00148003	188,98	45,84	6,38	481,5	lp3	7,10	514,6	9,27	614,1
00148009	205,60	54,31	6,23	544,0	pe3	5,20	487,8	6,94	582,4
00148010	189,03	51,05	6,38	514,8	pe3	5,71	480,7	7,38	565,9
00148011	210,56	66,01	6,04	609,5	gum	5,34	563,2	7,16	683,3
00148012	209,97	51,48	6,06	522,2	gev	7,60	601,4	11,10	781,3
00148017	164,67	41,07	6,38	426,7	lp3	3,69	316,0	4,41	345,6
00148018	189,30	61,33	6,38	580,6	*ln*3	5,27	512,4	7,15	628,0
00149003	205,57	54,18	6,23	543,3	gev	5,62	510,1	7,48	610,9
00149004	195,18	83,75	6,38	729,5	gam	4,43	566,2	5,54	659,3
00149005	214,21	51,11	5,91	516,1	glo	6,45	543,9	10,16	733,5
00149006	197,79	62,13	6,38	594,2	*ln*3	8,52	726,9	13,39	1.029,5
00247000	190,18	36,06	6,38	420,3	glo	6,37	420,0	9,08	517,6
00247003	181,49	51,47	6,38	509,9	pe3	6,56	519,4	8,56	622,0
00247004	204,14	59,54	6,29	578,6	gev	8,28	697,1	13,01	979,0
00247006	169,71	53,35	6,38	510,1	-	-	-	-	-
00247008	216,43	51,87	5,83	518,7	gum	5,32	492,5	7,34	597,3
00248001	178,81	37,45	6,38	417,7	-	-	-	-	-
00248003	201,91	37,68	6,38	442,2	gam	3,77	343,8	4,57	374,0
00248006	196,39	42,32	6,38	466,4	gev	3,75	355,0	4,36	380,7
00249001	192,40	44,98	6,38	479,4	gpa	1,99	281,9	2,28	295,0
00249002	206,84	46,92	6,18	497,0	pe3	4,11	399,7	4,97	440,2
00249003	230,84	63,16	5,33	567,4	pe3	5,88	602,4	7,94	732,5

Estação	$\overline{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP	K	PMP
00249004	243,72	83,01	4,92	652,1	gev	6,28	765,2	9,03	993,0
00348001	200,59	55,17	6,38	552,6	gum	5,36	496,4	7,06	590,2
00348002	193,98	46,53	6,38	490,9	lp3	3,11	338,7	3,60	361,6
A201	191,02	37,43	6,38	429,8	pe3	6,24	424,7	8,09	494,0
A202	161,07	52,71	6,38	497,4	*ln*3	5,96	475,4	8,56	612,4

Fonte: autoria própria.

Tabela F.4 - Fatores de frequências e PMP_s Estatísticas associadas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 10 dias

Estação	$\overline{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP	K	PMP
00047002	437,31	102,17	3,61	806,1	*ln*3	6,35	1.086,4	8,53	1.308,8
00047003	375,06	85,45	5,72	863,9	pe3	5,33	830,5	6,87	962,5
00047004	348,97	85,02	5,72	835,3	gev	2,91	596,1	3,29	628,4
00047005	404,54	107,09	4,60	897,2	pe3	5,28	970,1	6,85	1.138,3
00047006	403,14	121,53	4,65	968,0	gev	2,86	751,3	3,22	793,9
00047007	383,10	102,14	5,39	933,7	gev	3,39	729,5	4,13	804,6
00048000	467,15	139,10	2,89	869,8	-	-	-	-	-
00048006	301,18	67,45	5,72	687,0	gum	5,26	655,9	7,10	780,3
00049009	264,35	46,48	5,72	530,2	*ln*3	5,05	499,2	6,95	587,4
00049011	292,23	57,95	5,72	623,7	pe3	3,54	497,5	4,34	543,7
82191	291,30	73,05	5,72	709,1	glo	8,35	901,5	13,09	1.247,3
82263	310,66	60,47	5,72	656,5	-	-	-	-	-
00146011	250,62	43,83	5,72	501,3	pe3	4,00	426,1	4,87	464,1
00147002	282,13	91,58	5,72	806,0	-	-	-	-	-
00147006	278,50	54,86	5,72	592,3	gum	5,10	558,5	7,03	663,9
00147007	287,65	99,35	5,72	855,9	-	-	-	-	-
00147008	233,93	45,31	5,72	493,1	gam	3,85	408,2	4,65	444,8
00147010	266,43	63,79	5,72	631,3	-	-	-	-	-
00147011	266,86	65,46	5,72	641,3	-	-	-	-	-
00147016	234,33	51,67	5,72	529,9	-	-	-	-	-
00147017	278,15	60,43	5,72	623,8	*ln*3	5,60	616,5	7,58	736,1
00147018	247,92	58,69	5,72	583,6	*ln*3	5,48	569,6	7,46	685,6
00147019	241,09	43,73	5,72	491,2	*ln*2	4,09	419,8	5,12	465,1
00148001	270,40	45,03	5,72	528,0	gev	5,78	530,7	7,93	627,5
00148002	278,47	55,27	5,72	594,6	-	-	-	-	-
00148003	280,34	72,34	5,72	694,1	lp3	7,26	805,4	10,23	1.020,2
00148009	300,64	77,39	5,72	743,3	pe3	5,20	703,1	6,60	811,7
00148010	277,85	72,97	5,72	695,2	pe3	5,61	686,9	7,27	808,3
00148011	296,04	78,78	5,72	746,7	gum	5,29	712,8	6,82	833,6
00148012	299,54	60,34	5,72	644,7	gev	6,01	662,0	8,31	800,9

Estação	$\bar{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP	K	PMP
00148017	243,92	63,61	5,72	607,8	lp3	5,31	581,7	7,14	698,0
00148018	276,73	81,75	5,72	744,3	*ln*3	5,73	744,8	8,11	939,5
00149003	299,25	70,47	5,72	702,3	gev	3,81	568,0	4,50	616,5
00149004	295,36	123,06	5,72	999,3	gam	4,41	838,6	5,72	999,5
00149005	323,79	67,42	5,72	709,4	glo	5,06	664,6	6,81	782,8
00149006	272,42	80,81	5,72	734,6	*ln*3	10,26	1.101,4	16,63	1.616,6
00247000	289,24	56,44	5,72	612,1	glo	6,89	678,0	10,00	853,5
00247003	266,63	66,13	5,72	644,9	pe3	7,10	736,1	9,63	903,6
00247004	305,34	88,56	5,72	811,9	gev	5,83	821,4	7,89	1.003,9
00247006	259,79	83,43	5,72	737,0	-	-	-	-	-
00247008	327,30	80,72	5,72	789,0	gum	5,26	751,6	6,86	880,9
00248001	262,07	52,30	5,72	561,2	-	-	-	-	-
00248003	296,32	55,45	5,72	613,5	gam	3,78	506,1	4,50	545,6
00248006	291,71	63,35	5,72	654,1	gev	4,18	556,2	5,15	617,9
00249001	286,17	68,25	5,72	676,6	gpa	2,55	460,4	2,93	485,8
00249002	306,28	67,74	5,72	693,8	pe3	3,52	544,4	4,19	589,9
00249003	335,49	79,77	5,72	791,8	pe3	5,56	779,1	6,97	891,3
00249004	363,00	130,57	5,72	1.109,9	gev	8,36	1.455,1	13,20	2.086,6
00348001	282,76	78,85	5,72	733,8	gum	5,22	694,4	6,92	828,0
00348002	283,37	71,08	5,72	689,9	lp3	3,28	516,7	3,88	558,9
A201	280,78	43,27	5,72	528,3	pe3	5,65	525,2	7,87	621,2
A202	223,59	66,12	5,72	601,8	*ln*3	6,66	664,0	9,36	842,1

Fonte: autoria própria.

Tabela F.5 - Fatores de frequências e PMP_s Estatísticas associadas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 15 dias

Estação	$\bar{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP	K	PMP
00047002	551,77	127,25	3,14	951,6	*ln*3	5,06	1.195,8	6,50	1.379,1
00047003	478,81	113,21	3,88	918,4	pe3	4,51	989,5	5,68	1.121,5
00047004	444,97	114,11	4,28	933,8	gev	2,75	759,3	3,06	793,6
00047005	515,10	131,92	3,50	976,2	pe3	4,98	1.171,8	6,38	1.356,5
00047006	517,68	155,02	3,47	1.055,4	gev	3,67	1.086,7	4,32	1.187,0
00047007	492,59	131,74	3,73	984,1	gev	3,71	981,7	4,43	1.075,9
00047002	590,88	166,58	2,81	1.058,2	-	-	-	-	-
00047003	384,85	78,48	5,10	785,0	gum	5,37	806,4	6,86	923,1
00047004	347,68	66,94	5,10	689,1	*ln*3	5,02	683,5	6,54	785,7
00047005	376,19	73,87	5,10	752,9	pe3	3,65	645,5	4,66	720,8
00047006	381,87	87,26	5,10	826,9	glo	8,15	1.093,4	11,85	1.415,7
00047007	388,37	68,52	5,05	734,2	-	-	-	-	-
00048000	329,95	64,65	5,10	659,7	pe3	4,07	593,2	5,19	665,3

Estação	$\overline{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP	K	PMP
00048006	358,81	107,24	5,10	905,7	-	-	-	-	-
00049009	352,16	66,17	5,10	689,6	gum	5,23	697,9	7,18	827,0
00049011	358,74	117,08	5,10	955,8	-	-	-	-	-
82191	300,68	57,10	5,10	591,9	gam	3,82	519,1	4,60	563,2
82263	342,08	77,76	5,10	738,6	-	-	-	-	-
00146011	344,27	73,41	5,10	718,6	-	-	-	-	-
00147002	306,93	63,85	5,10	632,6	-	-	-	-	-
00147006	354,12	81,48	5,10	769,6	*ln*3	6,45	879,5	9,12	1.097,3
00147007	324,38	74,48	5,10	704,2	*ln*3	4,61	667,8	5,89	763,0
00147008	319,30	57,21	5,10	611,1	*ln*2	12,29	1.022,3	24,00	1.692,6
00147010	355,36	55,54	5,10	638,6	gev	3,92	573,3	4,75	619,2
00147011	355,77	70,42	5,10	714,9	-	-	-	-	-
00147016	355,91	79,46	5,10	761,1	lp3	6,68	886,4	9,43	1.105,2
00147017	388,33	94,78	5,05	866,8	pe3	5,28	888,6	6,88	1.040,6
00147018	351,62	84,39	5,10	782,0	pe3	5,23	792,8	6,87	931,5
00147019	370,39	104,80	5,10	904,9	gum	5,27	922,7	6,74	1.076,6
00148001	387,65	73,83	5,06	761,1	gev	6,72	883,8	9,68	1.102,4
00148002	319,73	79,44	5,10	724,9	lp3	5,56	761,3	7,51	916,3
00148003	365,41	104,11	5,10	896,4	*ln*3	5,66	954,8	7,66	1.162,9
00148009	380,98	85,02	5,10	814,6	gev	3,15	649,0	3,55	682,7
00148010	371,49	147,36	5,10	1.123,0	gam	4,37	1.015,7	5,38	1.163,8
00148011	407,45	71,60	4,78	749,4	glo	3,90	686,6	5,23	781,7
00148012	353,83	101,06	5,10	869,2	*ln*3	7,89	1.151,6	11,85	1.551,0
00148017	363,54	69,95	5,10	720,3	glo	6,47	816,2	9,81	1.049,9
00148018	345,41	73,13	5,10	718,4	pe3	6,25	802,5	8,45	963,2
00149003	383,93	105,62	5,10	922,6	gev	8,22	1.251,6	11,94	1.644,8
00149004	333,24	96,34	5,10	824,6	-	-	-	-	-
00149005	427,47	102,80	4,51	890,7	gum	5,15	957,4	7,08	1.155,3
00149006	345,58	74,60	5,10	726,0	-	-	-	-	-
00247000	381,72	73,46	5,10	756,4	gam	3,85	664,6	4,50	712,2
00247003	377,76	77,92	5,10	775,2	gev	3,52	652,4	4,19	704,2
00247004	374,52	88,90	5,10	827,9	gpa	2,60	605,4	3,01	642,0
00247006	392,34	87,33	4,99	828,1	pe3	3,50	697,6	4,16	755,2
00247008	426,24	101,62	4,52	885,8	pe3	4,57	890,6	5,68	1.003,4
00248001	454,56	148,48	4,17	1.073,1	gev	5,89	1.329,4	8,64	1.738,1
00248003	349,53	97,29	5,10	845,7	gum	5,25	859,8	6,53	984,3
00248006	355,35	82,11	5,10	774,1	lp3	3,92	677,0	4,78	748,2
00249001	371,30	51,67	5,10	634,8	pe3	6,06	684,6	8,63	817,1
00249002	286,38	79,45	5,10	691,6	*ln*3	5,07	689,6	7,00	842,3

Fonte: autoria própria.

Tabela F.6 - Fatores de frequências e PMP_s Estatísticas associadas das 52 estações pluviométricas utilizadas para a duração de 30 dias

Estação	$\bar{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP	K	PMP
00047002	888,66	220,71	2,77	1.499,6	*ln*3	3,86	1.741,1	4,75	1.937,7
00047003	744,87	152,93	3,59	1.293,3	pe3	3,86	1.334,5	4,66	1.458,1
00047004	707,27	171,69	3,84	1.366,1	gev	2,71	1.171,8	2,99	1.220,4
00047005	801,17	213,63	3,24	1.493,4	pe3	3,58	1.566,3	4,33	1.726,5
00047006	827,78	254,86	3,09	1.615,0	gev	3,55	1.731,3	4,09	1.869,6
00047007	796,32	209,24	3,27	1.480,3	gev	3,71	1.571,7	4,60	1.758,1
00048000	932,09	260,70	2,56	1.599,5	-	-	-	-	-
00048006	616,73	127,02	4,52	1.190,4	gum	5,32	1.292,1	6,88	1.490,7
00049009	567,16	80,62	4,94	965,2	*ln*3	7,63	1.182,0	11,44	1.489,7
00049011	611,87	103,99	4,56	1.085,7	pe3	4,16	1.044,1	5,27	1.159,5
82191	619,03	128,47	4,50	1.196,8	glo	6,12	1.405,7	8,23	1.676,6
82263	601,67	94,46	4,64	1.040,0	-	-	-	-	-
00146011	526,59	102,72	4,95	1.035,0	pe3	2,90	824,2	3,50	885,8
00147002	569,83	152,62	4,91	1.319,8	-	-	-	-	-
00147006	571,59	124,92	4,90	1.183,5	gum	5,17	1.217,0	7,33	1.487,5
00147007	565,83	166,52	4,95	1.390,1	-	-	-	-	-
00147008	492,10	92,35	4,95	949,3	gam	3,77	840,1	4,58	915,5
00147010	549,15	109,25	4,95	1.090,0	-	-	-	-	-
00147011	550,82	121,53	4,95	1.152,4	-	-	-	-	-
00147016	507,74	87,79	4,95	942,3	-	-	-	-	-
00147017	577,24	128,82	4,85	1.201,9	*ln*3	5,96	1.345,2	8,11	1.622,4
00147018	527,70	112,96	4,95	1.086,8	*ln*3	4,35	1.018,8	5,50	1.149,1
00147019	506,24	87,27	4,95	938,2	*ln*2	4,06	860,3	5,02	944,2
00148001	569,95	88,79	4,91	1.006,2	gev	2,95	831,6	3,44	875,0
00148002	586,01	114,84	4,77	1.134,2	-	-	-	-	-
00148003	588,50	131,66	4,75	1.214,1	lp3	4,52	1.183,0	5,36	1.294,3
00148009	610,11	143,79	4,57	1.267,3	pe3	5,74	1.435,7	7,36	1.668,6
00148010	568,42	124,71	4,93	1.182,8	pe3	4,89	1.178,2	5,98	1.314,7
00148011	539,66	143,48	4,95	1.249,9	gum	5,04	1.262,6	6,32	1.446,0
00148012	611,24	117,94	4,56	1.149,2	gev	4,81	1.178,2	6,11	1.331,7
00148017	516,63	120,46	4,95	1.112,9	lp3	5,50	1.179,4	7,10	1.372,0
00148018	589,21	169,10	4,75	1.391,7	*ln*3	5,28	1.482,5	6,91	1.757,6
00149003	622,05	132,11	4,47	1.213,0	gev	3,35	1.064,9	3,85	1.130,3
00149004	597,22	245,49	4,68	1.745,6	gam	4,42	1.682,6	5,58	1.966,6
00149005	634,54	71,56	4,37	947,5	glo	3,45	881,4	4,53	958,6
00149006	566,94	157,38	4,94	1.344,4	*ln*3	3,37	1.096,7	4,17	1.223,3
00247000	583,98	112,85	4,79	1.124,6	glo	4,81	1.127,3	6,26	1.290,9
00247003	553,11	95,42	4,95	1.025,5	pe3	4,72	1.003,3	6,01	1.126,2
00247004	592,23	151,20	4,72	1.305,9	gev	5,67	1.449,2	7,57	1.737,5
00247006	536,94	144,41	4,95	1.251,8	-	-	-	-	-
00247008	681,89	162,95	4,02	1.336,4	gum	5,22	1.532,2	7,01	1.823,6

Estação	$\bar{X}_{ajustado}$ (mm)	$\sigma_{ajustado}$ (mm)	Estatís. Envolt. Regional		Distrib. Probab.	Estatís. Simul. Sint. 95%		Estatís. Simul. Sint. 99%	
			K	PMP (mm)		K	PMP	K	PMP
00248001	573,07	103,89	4,89	1.080,6	-	-	-	-	-
00248003	610,71	104,20	4,57	1.086,5	gam	3,71	997,5	4,40	1.068,9
00248006	599,14	112,07	4,66	1.121,6	gev	2,90	924,5	3,32	971,4
00249001	592,34	125,21	4,72	1.183,2	gpa	2,76	937,3	3,20	993,1
00249002	619,53	140,07	4,49	1.249,0	pe3	3,55	1.117,2	4,24	1.212,9
00249003	698,88	158,80	3,90	1.317,5	pe3	4,37	1.392,4	5,35	1.547,8
00249004	694,22	193,89	3,93	1.455,9	gev	5,19	1.700,4	6,56	1.966,0
00348001	530,93	151,88	4,95	1.282,7	gum	5,25	1.328,0	6,79	1.561,8
00348002	560,67	138,68	4,95	1.247,1	lp3	3,07	986,5	3,59	1.058,9
A201	628,67	83,07	4,42	995,9	pe3	4,74	1.022,0	6,25	1.147,7
A202	468,26	122,09	4,95	1.072,6	*ln*3	4,33	997,3	5,34	1.120,6

Fonte: autoria própria.