



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA  
E DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO  
PARAGUAÇU - BA**

TAILAN SANTOS DE SOUZA

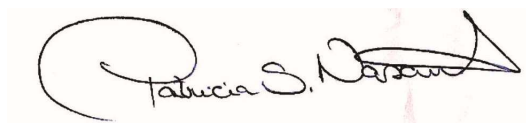
FEIRA DE SANTANA  
MARÇO/2021

VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E  
DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO  
PARAGUAÇU - BA

Tailan Santos de Souza


DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Banca Examinadora:



---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Patricia dos Santos Nascimento (Orientadora)  
(Universidade Estadual de Feira de Santana)



---

Prof.<sup>a</sup> Dr. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva  
(Universidade Estadual de Feira de Santana)



---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Valéria Peixoto Borges  
(Universidade Federal da Paraíba)

FEIRA DE SANTANA

MARÇO/2021

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

S719 Souza, Tailan Santos de  
Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluviométrica e do balanço hídrico climatológico na região hidrográfica do Paraguaçu - Ba / Tailan Santos de Souza. – 2021.  
103 f.: il.

Orientadora: Patricia dos Santos Nascimento.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Feira de Santana, 2021.

1. Disponibilidade hídrica. 2. Precipitação pluviométrica. 3. Balanço hídrico climatológico (BHC). 4. Geoestatística. 5. Estatística multivariada. 6. Análise de tendência. 7. Região hidrográfica do Paraguaçu, Bahia.  
I. Título. II. Nascimento, Patricia dos Santos, orient. III. Universidade Estadual de Feira de Santana.

CDU: 556.51:551.577(814.22)

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, responsável pelo dom da vida e por me apresentar o rumo certo a ser seguido. Sem ele, nada disso seria possível.

Agradeço aos meus pais, Tânia e Percílio, que nunca mediram esforços para incentivar minha educação e sempre apoiaram todas as minhas decisões, comemorando minhas conquistas e dando suporte nos momentos difíceis. Ao meu irmão, Gustavo, agradeço pelo apoio constante através de sua amizade fraterna.

Agradeço a Jamille, a mulher que me acompanhou desde a graduação, sempre me dando carinho, apoio, companheirismo e muito amor.

Devo um agradecimento muito especial a minha orientadora Patricia, responsável pelo meu desenvolvimento profissional acadêmico. Obrigado pelos conhecimentos compartilhados, pela disponibilidade, pela incansável dedicação e por toda confiança em mim depositada.

Gostaria de agradecer ao PPGECEA como um todo, do corpo docente, até a secretaria e coordenação. Profissionais inteiramente capacitados e dedicados para que o programa se torne o orgulho de cada egresso.

Agradeço também a todos os amigos que o PPGECEA me fez conhecer ou conhecer ainda mais, que direta ou indiretamente trilharam esse caminho comigo: Alana, Andréa, Henrique, Kaline, Laís, Luan, Monique, Paulo, Renan, Samuel, Tamires e Yasmim. Todos vocês foram fundamentais na minha formação, seja nos momentos de estudos ou nos momentos descontraídos, sempre prestando uma amizade verdadeira.

Sou grato ainda aos meus colegas de profissão da nD Engenharia, cuja compreensão foi essencial para que eu me afastasse das atividades e pudesse trilhar esse caminho do mestrado. Diego, Felipe e Marcos, vocês são pessoas imprescindíveis na minha vida pessoal e profissional.

Graças ao apoio de todos vocês, consegui realizar esse projeto e alcancei o sonho de me tornar Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAÇU - BA

Tailan Santos de Souza

Março/2021

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Patricia dos Santos Nascimento

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

As mudanças climáticas eminentes podem afetar a disponibilidade hídrica de uma região, gerando impactos socioeconômicos. A avaliação do regime pluviométrico e do balanço hídrico constituem ferramentas indispensáveis para gerenciar os recursos hídricos adequadamente. Este trabalho objetivou a análise do mapeamento espaço-temporal e das tendências da precipitação pluviométrica e do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) na região hidrográfica do Paraguaçu - BA. A primeira etapa considerou a avaliação espacial e temporal das chuvas e de índices pluviométricos, além de uma análise de agrupamentos para os dados de precipitação. A segunda etapa contemplou a avaliação do BHC sequencial, a susceptibilidade à desertificação e a análise de componentes principais para as variáveis envolvidas. Por fim, foram realizadas análises de tendência nos dados de precipitação, deficiência e excedente hídrico do BHC. Os resultados indicaram que os maiores índices pluviométricos anuais ocorreram no alto e no baixo Paraguaçu, enquanto os menores no médio Paraguaçu, afetado pelo semiárido. A análise dos índices pluviométricos apontou para alta possibilidade de ocorrência de eventos extremos de seca e de precipitações concentradas. Foram identificados três agrupamentos homogêneos em relação à pluviosidade. Houve predominância da deficiência hídrica em toda região hidrográfica, com indicação de alta susceptibilidade à desertificação em quase 23 % de sua área. Duas componentes principais foram suficientes na explicação da variância dos parâmetros de BHC. De maneira geral, foram verificadas tendências negativas na precipitação e no excedente, bem como positivas nos déficits hídricos. Com um padrão de tendências ligeiramente inverso, as estações secas foram consideradas determinantes para mudanças benéficas.

**Palavras-chave:** Recursos Hídricos, Disponibilidade Hídrica, Geoestatística, Estatística Multivariada, Análise de Tendência

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF PLUVIOMETRIC PRECIPITATION AND  
CLIMATIC WATER BALANCE IN THE HYDROGRAPHIC REGION OF PARAGUAÇU - BA

Tailan Santos de Souza

March/2021

Advisor: Prof.<sup>a</sup> Dra. Patricia dos Santos Nascimento

Department: Civil and Environment Engineering

Eminent climate changes can affect a region's water availability, generating socioeconomic impacts. The evaluation of the pluviometric regime and the water balance are indispensable tools to manage water resources properly. This work aimed to analyze the spatio-temporal mapping and the trends of rainfall and the Climatic Water Balance (CWB) in the hydrographic region of Paraguaçu - BA. The first stage considered the spatial and temporal assessment of precipitation and rainfall indices, besides a cluster analysis for rainfall data. The second stage included the assessment of the sequential CWB, the susceptibility to desertification and the principal components analysis for the variables involved. In the last stage, trend analysis was performed under the data rainfall, deficit and water surplus of CWB. The results indicated that the highest annual rainfall indexes occurred in the upper and lower Paraguaçu, while the lowest in the middle Paraguaçu, most affected by the semiarid. The analysis of the rainfall indices pointed to a high possibility of occurrence of extreme events of drought and concentrated precipitations. Three homogeneous clusters were identified in relation to rainfall. There was a predominance of water deficit in the entire hydrographic region, with an indication of high susceptibility to desertification in almost 23 % of its area. Two principal components were sufficient to explain the variance of the CWB parameters. In general, negative trends were observed in precipitation and surplus, as well as positive in water deficit. With a slightly reversed pattern of trends, dry seasons were considered determinants for beneficial changes.

**Keywords:** Water Resources, Water Availability, Geostatistics, Multivariate Statistics, Trend Analysis

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização, divisão, hidrografia e escala de elevação da área de estudo, junto à distribuição geográfica dos postos (Autor, 2020).....	27
Figura 2 - Boxplot das chuvas anuais para as divisões da região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020).....	33
Figura 3 - Variação da série média anual de chuvas para as divisões da região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020) .....	34
Figura 4 - Variação da série média mensal de chuvas para as divisões da região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020) .....	34
Figura 5 - Variação da série média anual do IAC para a região hidrográfica do Paraguaçu (a) e frequência relativa por categoria de intensidade (b) (Autor, 2020).....	35
Figura 6 - Variação da série média anual do ICP para a região hidrográfica do Paraguaçu (a) e frequência relativa por categoria de distribuição (b) (Autor, 2020) .....	36
Figura 7 - Distribuição espacial da precipitação média anual (a), do IAC (b) e do ICP anual (c) (Autor, 2020).....	37
Figura 8 - Distribuição espacial, por meio de krigagem, do ICP sazonal para a região hidrográfica do Paraguaçu, considerando as estações: verão (a); outono (b); inverno (c); e primavera (d) (Autor, 2020).....	38
Figura 9 - Dendrograma baseado na distância euclidiana para as estações do Paraguaçu (Autor, 2020).....	39
Figura 10 - Zonas homogêneas de precipitação mensal na região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020).....	40
Figura 11 - Localização, divisões, hidrografia e escala de elevação da área de estudo, identificando as estações pluviométricas e climáticas (Autor, 2020) .....	52
Figura 12 - Interpolação da temperatura média anual (de 1989 a 2018), pelo método IDP, para a região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020).....	57
Figura 13 - Precipitações e temperaturas médias mensais para cada divisão da região hidrográfica do Paraguaçu (1989 a 2018). As barras verticais indicam a precipitação mensal, enquanto as linhas representam a temperatura média (Autor, 2020) .....	58
Figura 14 - Variação interanual dos excessos e déficits acumulados, decorrentes do BHC sequencial para alto (a), médio (b) e baixo (c) Paraguaçu (Autor, 2020) .....	59
Figura 15 - Variação mensal dos excessos e déficits acumulados, decorrentes do BHC sequencial para alto (a), médio (b) e baixo (c) Paraguaçu (Autor, 2020).....	60
Figura 16 - Distribuição espacial das médias anuais (entre 1989 e 2018) de precipitação P (a), evapotranspiração potencial ETP (b), diferença P - ETP (c) e armazenamento de	

água ARM (d), que fazem parte do BHC na região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020) .....	61
Figura 17 - Distribuição espacial e sazonal do excedente hídrico acumulado para a região hidrográfica do Paraguaçu, considerando as estações: verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d) (Autor, 2020) .....	62
Figura 18 - Distribuição espacial e sazonal do déficit hídrico acumulado para a região hidrográfica do Paraguaçu, considerando as estações: verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d) (Autor, 2020) .....	63
Figura 19 - Mapeamento do Índice de Aridez (IA) médio na região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020).....	64
Figura 20 - Scree plot com a variância explicada pelos diferentes componentes principais do BHC (Autor, 2020) .....	65
Figura 21 - Fatores de carregamento de CP1 e CP2 da ACP para o BHC da região hidrográfica do Paraguaçu. Notas: Precipitação (P); Evapotranspiração Potencial (ETP); Capacidade de Água Disponível (CAD); diferença entre Precipitação e Evapotranspiração Potencial (P-ETP); Negativo Acumulado (NEG.AC); Armazenamento de água no solo (ARM); Alteração de umidade do solo (ALT); Evapotranspiração Real (ETR); Déficit (DEF); e Excedente (EXC) (Autor, 2020) .....	66
Figura 22 - Carregamentos CP1 versus CP2 da ACP para o BHC da região hidrográfica do Paraguaçu. Notas: Precipitação (P); Evapotranspiração Potencial (ETP); Capacidade de Água Disponível (CAD); diferença entre Precipitação e Evapotranspiração Potencial (P-ETP); Negativo Acumulado (NEG.AC); Armazenamento de água no solo (ARM); Alteração de umidade do solo (ALT); Evapotranspiração Real (ETR); Déficit (DEF); e Excedente (EXC) (Autor, 2020) .....	67
Figura 23 - Localização, divisões, hidrografia e escala de elevação da área de estudo, identificando as estações pluviométricas e climáticas (Autor, 2020) .....	77
Figura 24 - Resultados da detecção de tendências nos dados anuais de precipitação pluviométrica, déficit hídrico e excedente hídrico, utilizando o teste de Mann-Kendall e estimador de declividade de Sen, na região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020)	84
Figura 25 - Resultados da detecção de tendência nos dados sazonais de precipitação pluviométrica, usando o teste de Mann-Kendall e o estimador de inclinação de Sen, considerando as estações: verão (a); outono (b); inverno (c); e primavera (d) (Autor, 2020) .....	85
Figura 26 - Resultados da detecção de tendência nos dados sazonais de deficiência hídrica, usando o teste de Mann-Kendall e o estimador de inclinação de Sen,	

considerando as estações: verão (a); outono (b); inverno (c); e primavera (d) (Autor, 2020) .....	86
Figura 27 - Resultados da detecção de tendência nos dados sazonais de excedente hídrico, usando o teste de Mann-Kendall e o estimador de inclinação de Sen, considerando as estações: verão (a); outono (b); inverno (c); e primavera (d) (Autor, 2020) .....	88
Figura 28 - Frequência relativa das tendências (período 1989-2018) de precipitação pluviométrica (a), déficit hídrico (b) e excedente hídrico (c) nas diferentes escalas temporais, de acordo com a direção (positiva / negativa / nula) e a significância estatística (significativo / não significativo) (Autor, 2020) .....	89
Figura 29 - Resultados da ATI em escala anual para a precipitação pluviométrica nas sub-regiões do Paraguaçu: alto (a); médio (b); e baixo (c) (Autor, 2020) .....	91
Figura 30 - Resultados da ATI em escala anual para a deficiência hídrica nas sub-regiões do Paraguaçu: alto (a); médio (b); e baixo (c) (Autor, 2020) .....	92
Figura 31 - Resultados da ATI em escala anual para o excedente hídrico nas sub-regiões do Paraguaçu: alto (a); médio (b); e baixo (c) (Autor, 2020).....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados dos 50 postos situados dentro e ao redor da região hidrográfica do Paraguaçu .....	29
Tabela 2 - Classificação da intensidade dos anos secos e chuvosos do IAC.....	30
Tabela 3 - Classificação da regularidade das chuvas de acordo com o ICP .....	31
Tabela 4 - Validação de desempenho da krigagem ordinária com modelo exponencial .....	37
Tabela 5 - Parâmetros físicos e hidráulicos de solos de acordo com sua classificação de textura .....	54
Tabela 6 - Classificação de suscetibilidade à desertificação com base no IA .....	55
Tabela 7 - Dados das 27 estações situadas na região hidrográfica do Paraguaçu .....	78
Tabela 8 - Valores de $Z_{MK}$ para o teste de MK, considerando a precipitação anual (An) e sazonal do verão (Ve), outono (Ou), inverno (In) e primavera (Pr). Nota: * Tendência significativa no nível de 5 %.....	83
Tabela 9 - Valores de $Z_{MK}$ para o teste de MK, considerando a deficiência e o excedente hídrico anual (An) e sazonal do verão (Ve), outono (Ou), inverno (In) e primavera (Pr). Nota: * Tendência significativa no nível de 5 %.....	83
Tabela 10 - Resultados do teste de Mann-Kendall e da Análise de Tendência Inovadora, considerando a média anual das variáveis em cada sub-região do Paraguaçu. Nota: * Tendência significativa no nível de 5 % .....	90

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ACP	Análise de Componentes Principais
AI	<i>Aridity Index</i>
ALT	Alteração de Água no Solo
ANA	Agência Nacional de Águas
ARM	Armazenamento de Água no Solo
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ATI	Análise de Tendência Inovadora
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
BHC	Balanço Hídrico Climatológico
CAD	Capacidade de Água Disponível
CC	Capacidade de Campo
CP	Componente Principal
CWB	<i>Climatic Water Balance</i>
DEF	Deficiência Hídrica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETR	Evapotranspiração Real
EXC	Excedente Hídrico
IA	Índice de Aridez
IAC	Índice de Anomalia de Chuva
ICP	Índice de Concentração de Precipitação
IDE	Índice de Dependência Espacial
IDP	Inverso da Distância Ponderada
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPP	Índice de Precipitação Padronizada
ITA	<i>Innovative Trend Analysis</i>
MK	Mann-Kendall
NEB	Nordeste do Brasil
NEG.AC	Negativo Acumulado
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PCI	<i>Precipitation Concentration Index</i>
PMP	Ponto de Murcha Permanente
RAI	<i>Rainfall Anomaly Index</i>
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio

RPGA	Região de Planejamento e Gestão de Águas
SEI	Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia
SIG	Sistemas de Informações Geográficas

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo Geral .....	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	19
1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	19
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 2 - VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAÇU – BA.....</b>	<b>23</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
<b>2 METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
2.1 ÁREA DE ESTUDO .....	26
2.2 CONJUNTO DE DADOS .....	28
2.3 ÍNDICES PLUVIOMÉTRICOS.....	30
2.4 ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS.....	32
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>32</b>
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>
<b>CAPÍTULO 3 - BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO SEQUENCIAL APLICADO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAÇU – BA.....</b>	<b>47</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>2 METODOLOGIA.....</b>	<b>51</b>
2.1 ÁREA DE ESTUDO .....	51
2.2 CONJUNTO DE DADOS .....	51
2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	53
2.4 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO .....	54
2.5 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	55
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>
<b>CAPÍTULO 4 - TENDÊNCIAS DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAÇU - BA .....</b>	<b>73</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>75</b>
<b>2 METODOLOGIA.....</b>	<b>77</b>

2.1 ÁREA DE ESTUDO .....	77
2.2 CONJUNTO DE DADOS .....	78
2.3 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO .....	79
2.4 TESTE DE MANN-KENDALL.....	79
2.5 ESTIMADOR DE INCLINAÇÃO DE SEN.....	80
2.6 ANÁLISE DE TENDÊNCIA INOVADORA .....	81
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>82</b>
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>94</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>94</b>
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>99</b>

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

---

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

---

A urbanização desenfreada e o crescimento populacional têm potencializado a carga sobre a demanda de recursos hídricos dos seres humanos, ao ponto que as águas disponíveis para consumo não estão sendo capazes de suprir integralmente toda população. Tucci (2017) trata como significativos os impactos gerados pela crescente demanda do uso humano da água, que comprometem a sustentabilidade de toda população. Esse aumento coloca em risco algumas fontes hídricas, não só pela elevação do consumo em si, mas também pela maior devolução de águas residuais, que normalmente não passam por um processo de tratamento.

A recorrência de ações antrópicas, como desmatamento e poluição, tem gerado grandes impactos ao meio ambiente, que podem acarretar em mudanças climáticas, afetando a disponibilidade hídrica. Essas modificações representam significativas alterações, em escala global ou regional, de algumas variáveis do clima, como temperatura, nebulosidade e umidade do ar, em relação às suas médias históricas. Segundo Berlato e Cordeiro (2017), observações ao redor do mundo têm evidenciado os reflexos das mudanças climáticas ocasionadas pelas atividades humanas, através do aumento da ocorrência de eventos climáticos extremos.

As mudanças climáticas são capazes de afetar o ciclo hidrológico, através da alteração dos padrões de precipitação, evapotranspiração, volume de água no solo, armazenamento subterrâneo e escoamento superficial, elementos intimamente relacionados ao balanço hídrico. Gleick (2010) indicou que os recursos hídricos ficam mais vulneráveis quando as mudanças climáticas aceleram. Por exemplo, uma vez que modificações nos padrões térmicos terrestres aumentam a demanda evaporativa, o padrão das chuvas é alterado e, conseqüentemente, das outras etapas do ciclo da água.

Inferências e previsões acerca dos fenômenos de precipitação e evapotranspiração, respectivos processos principais de entrada e saída de água no ciclo hidrológico, são de fundamental importância para avaliar a disponibilidade hídrica de uma região. Estudos que consideram essa temática constituem uma ferramenta essencial, que atua como fonte de informações a respeito da evolução da variabilidade climática e de seus impactos quantitativos nos mananciais (ANDRADE et al., 2019). Segundo Montañó e Souza (2016), esses efeitos refletem em princípios do planejamento territorial, ao ponto que as atividades econômicas podem passar a ser alocadas conforme as aptidões hídricas apresentadas.

Uma condição que pesa ainda mais na importância dos estudos hidroclimáticos é o fato dos fenômenos envolvidos possuírem comportamento de natureza complexa, que dependem de outros elementos, como o movimento das massas de ar, a temperatura e o relevo. O desconhecimento das variáveis atuantes no balanço hídrico e a consequente impossibilidade de previsões mais concretas são limitantes para o gerenciamento dos recursos hídricos e para a adaptação frente aos efeitos adversos causados por eventos extremos (NÓBREGA; SANTIAGO, 2016).

A gestão da demanda e da oferta de água para usos múltiplos deve considerar a avaliação temporal e espacial das condições climáticas, da precipitação pluviométrica e do balanço hídrico, requisitos básicos para garantir a preservação desse recurso natural. Esse gerenciamento deve ser pautado no histórico dos eventos climáticos e na aplicação da modelagem hidrológica, que atenda a unidade territorial básica de planejamento, a bacia hidrográfica ou a Região de Planejamento e Gestão de Águas – RPGA (MELLO; OLIVEIRA, 2016; LOPES et al., 2017).

A partir disso, os órgãos competentes pelos recursos hídricos podem propor novos modelos, medidas e técnicas, que resultem na garantia do abastecimento de água nos períodos de estiagem prolongada, que tanto comprometem a segurança hídrica da população. Surge então a oportunidade da readequação da política de outorgas, uma vez que o potencial hídrico pode ser explorado com menores imprecisões. Porém, como já indicavam Cavalcanti e Marques (2016), essas alterações no paradigma organizacional da gestão hídrica também deve englobar a integração entre os vários atores sociais atingidos, através da realização de processos mais democráticos, que fortaleçam as responsabilidades coletivas frente aos problemas ambientais.

A compreensão da variabilidade dos fenômenos hidroclimáticos tem sido auxiliada por metodologias e modelos de cálculo que traduzem muito bem os dados históricos em informações espaço-temporais, sendo possível a caracterização das variações e a projeção das mesmas para o futuro. A geoestatística, por exemplo, consegue associar dados aparentemente aleatórios, oriundos das ciências naturais, a padrões espaciais de distribuição estatística (LANDIM, 2010). A maior parte dos *softwares* para confecção de mapas ou de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) já incorporam modelos geoestatísticos (GUNDOGDU, 2017).

O modelo geoestatístico da krigagem, segundo Gundogdu (2017), apresentou o melhor desempenho estatístico, quando comparados a diferentes interpoladores na construção de mapas da distribuição da precipitação pluviométrica na Turquia. Para Castro et al. (2010), além da precipitação, a krigagem também apresentou o melhor desempenho nas estimativas do balanço hídrico e da evapotranspiração.

Embora a maioria dos autores assumam que a krigagem é a metodologia mais indicada para análise da distribuição espacial e temporal da precipitação, Ferreira Filho et al. (2019) observaram que o desempenho de diferentes métodos é influenciado pela maior ou menor homogeneidade da distribuição espacial de chuvas em cada localidade.

Segundo Andrade et al. (2018), a krigagem ainda pode ser considerada para identificação e mapeamento de padrões espaciais da superfície terrestre, atuando de forma funcional na setorização da intensidade das chuvas, além de detectar irregularidades e escassez da precipitação pluviométrica em áreas pertencentes ao semiárido nordestino.

Outra técnica da estatística bem aplicada no ramo das geociências é a análise multivariada, quando o tratamento dos fenômenos está associado a mais de uma variável. São várias as funções desse segmento estatístico, como compreender a interação entre diferentes variáveis (ALMEIDA; GUIMARÃES, 2016), promover o agrupamento de populações com características semelhantes (JOSÉ et al., 2013) e reduzir a dimensão do conjunto de dados e facilitar a sua interpretação (GEBERT et al., 2018).

Fritzsos et al. (2011) e Gebert et al. (2018) utilizaram a estatística multivariada para determinação de regiões homogêneas quanto à pluviosidade, uma técnica de delimitação capaz de representar o comportamento pluviométrico local e a dinâmica desse fenômeno meteorológico.

Souza et al. (2012) reproduziram as condições climatológicas e fisiográficas do estado do Mato Grosso do Sul, através do procedimento de determinação das zonas homogêneas de precipitação e temperatura, realizado com o auxílio do método hierárquico e multivariado da análise de agrupamentos.

Baseados na análise de componentes principais, Prado et al. (2016) identificaram os períodos do ano mais associados às componentes que representam climas úmidos ou secos, sendo eficazes na caracterização climática temporal. Esse modelo, segundo Manandhar et al. (2018), ainda permite uma análise sistemática do clima, através da verificação da correlação entre variáveis meteorológicas distintas.

As tendências, dentro de uma série de dados temporais, representam qualquer possibilidade de mudança sistemática e contínua no comportamento de uma variável. As mudanças climáticas estão fortemente relacionadas à existência de tendências nos fenômenos meteorológicos. No campo da hidrologia, as tendências de aumento ou diminuição da precipitação, da evapotranspiração ou do balanço hídrico afetam diretamente a disponibilidade hídrica, podendo comprometer a dinâmica social local (GOMES et al., 2015; ANDRADE et al., 2018; SILVA et al., 2018).

Mrad et al. (2018) utilizaram os métodos estatísticos de Mann-Kendall (MK) e a inclinação de Sen para detectar as tendências da precipitação e suas magnitudes na Argélia. Ficou constatada a tendência da redução das chuvas de norte a sul do país, como resultado dos impactos das atividades antropogênicas na área de estudo.

No estudo de Menezes e Fernandes (2016), localizado no estado do Pará, não foi constatada uma tendência típica ao longo de todo território, sendo que menos de 10 % das estações pluviométricas analisadas apresentaram algum tipo de tendência significativa. A aplicação dos métodos de MK e Spearman Rho apresentou desempenho semelhante.

Os testes MK, Sen e Spearman Rho são bastante recorrentes em estudos de tendência. Gedefaw et al. (2018) analisaram as tendências da precipitação pluviométrica na Etiópia, utilizando o método de Análise de Tendência Inovadora (ATI). Comparando os resultados com os testes de MK e Sen, foi verificada uma boa conformidade entre os resultados obtidos.

A susceptibilidade da população da região do Paraguaçu a eventos extremos, tanto de secas prolongadas quanto de chuvas intensas, constitui uma problemática local, que tem uma de suas porções inseridas no semiárido. É justamente nessa área que os índices pluviométricos são os mais escassos, devido à presença de serras que se interpõem às massas de ar úmido, comprometendo o acesso à água (SANTO; CARELLI, 2016). Além disso, boa parte do semiárido brasileiro é muito susceptível ao fenômeno da desertificação e os esforços para combater esse cenário são mínimos (TAVARES et al., 2019).

Dessa forma, esse estudo objetivou uma avaliação espaço-temporal dos mapas e das tendências referente aos dados de precipitação pluviométrica e balanço hídrico climatológico na região hidrográfica do Paraguaçu, afim de gerar informações acerca da disponibilidade hídrica local, que fomentem novas políticas de preservação e gestão das águas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o mapeamento espaço-temporal e as tendências da precipitação pluviométrica e do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) na região hidrográfica do Paraguaçu - BA.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar índices pluviométricos de seca e concentração no Paraguaçu;
- Delimitar zonas homogêneas de precipitação pluviométrica no Paraguaçu, através da análise de agrupamentos;
- Identificar as variações espaciais e sazonais do BHC no Paraguaçu;
- Investigar a susceptibilidade à desertificação no Paraguaçu;
- Explorar a variância dos dados coletadas e estimados do BHC do Paraguaçu, a partir da análise de componentes principais;
- Verificar a presença de tendência sobre as séries históricas de precipitação e BHC no Paraguaçu.

## 1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho foi dividido em 5 (cinco) capítulos. O presente capítulo faz uma introdução geral a respeito do tema, abordando o contexto geral de mudanças climáticas, os desdobramentos possíveis desse tipo de estudo, as principais ferramentas utilizadas, o conhecimento do Estado da Arte, além de um breve cenário da região de estudo, buscando suprir uma base teórica que justifique a escolha dos objetivos gerais e específicos.

O capítulo 2, apresentado em formato de artigo, enfoca na variabilidade da precipitação pluviométrica na região do Paraguaçu, preocupando-se em caracterizar os padrões de chuva local, em explorar índices pluviométricos de seca e de concentração, e em dividir a região em zonas homogêneas de precipitação.

O capítulo 3, também apresentado em formato de artigo, tem como foco a variabilidade do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) sequencial na região do Paraguaçu, preocupando-se com a avaliação espacial e temporal das variáveis climáticas associadas ao BHC, com a investigação da susceptibilidade à desertificação, e com a redução da dimensionalidade dos dados coletados e estimados.

O capítulo 4, último em formato de artigo, enfoca na análise de tendências anuais e sazonais da precipitação pluviométrica e do balanço hídrico climatológico na região hidrográfica do Paraguaçu.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, acrescidas de possíveis linhas de pesquisa para trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. S.; GUIMARÃES, E. C. Geoestatística e análise fatorial exploratória para representação espacial de atributos químicos do solo, na cafeicultura. **Coffee Science**, v. 11, n. 2, p. 195-203, 2016.
- ANDRADE, A. R. S.; GODOY NETO, A. H.; CRUZ, A. F. S.; ANDRADE, E. K. P.; SANTOS, V. F.; SILVA, T. N. P. Geoestatística aplicada à variabilidade espacial e padrões nas séries temporais da precipitação no Agreste pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 03, n. 01, p. 126-145, 2018.
- ANDRADE, A. R.; LIMA, P. R. C.; OLIVEIRA, J. V. P.; LUCENA, D. B. Análise da relação entre precipitação e volume nas sub-bacias contribuintes para o açude Epitácio Pessoa. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 719-736, 2019.
- BERLATO, M. A.; CORDEIRO, A. P. A. Sinais de mudanças climáticas globais e regionais, projeções para o século XXI e as tendências observadas no Rio Grande do Sul: uma revisão. **Agrometeoros**, v. 25, n. 2, p. 273-302, 2017.
- CAVALCANTI, B. S.; MARQUES, G. R. G. Recursos hídricos e gestão de conflitos: A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir da crise hídrica de 2014-2015. **Revista de Gestão dos Países de Língua Portuguesa**, v. 15, n. 1, p. 4-16, 2016.
- CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 871-880, 2010.
- FERREIRA FILHO, D. F.; BEZERRA, P. E. S.; SILVA, M. N. A.; RODRIGUES, R. S. S.; FIGUEIREDO, N. M. Aplicação de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas da região hidrográfica Calha Norte, Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 277-299, 2019.
- FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L. E.; WREGGE, M. S.; CHAVES NETO, A. Análise da pluviometria para definição de zonas homogêneas no Estado do Paraná. **Ra'e Ga - Espaço Geográfico em Análise**, v. 23, p. 555-572, 2011.
- GEBERT, D. M. P.; KIST, A.; VIRGENS FILHO, J. S. Determinação de regiões homogêneas de precipitação pluviométrica no estado do Paraná por meio de técnicas de análise multivariada e geoestatística. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 374-388, 2018.
- GEDEFW, M.; YAN, D.; WANG, H.; QIN, T.; GIRMA, A.; ABIYU, A.; BATSUREN, D. Innovative Trend Analysis of Annual and Seasonal Rainfall Variability in Amhara Regional State, Ethiopia. **Atmosphere**, v. 9, n. 9, p. 326-335, 2018.

- GLEICK, P. H. Climate change, exponential curves, water resources, and unprecedented threats to humanity. **Climatic Change**, v. 100, n. 1, p. 125-129, 2010.
- GOMES, A. C. S.; COSTA, M. S.; COUTINHO, M. D. L.; VELE, R. S.; SANTOS, M. S.; SILVA, J. T.; FITZJARRALD, D. R. Análise estatística das tendências de elevação nas séries de temperatura média máxima na Amazônia Central: estudo de caso para a região do oeste do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 82-97, 2015.
- GUNDOGDU, I. B. Usage of multivariate geostatistics in interpolation processes for meteorological precipitation maps. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 127, n. 1-2, p. 81-86, 2017.
- JOSÉ, J. V.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; HONGYU, K.; PERBONI, A.; MARQUES, P. A. A.; DIAS, C. T. S.; COELHO, R. D. Análise multivariada e geoestatística de variáveis físico-hídricas de diferentes solos. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 3, p. 121-129, 2013.
- LANDIM, P. M. B. **Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados**. Rio Claro, SP: UNESP, 2010. 229 p.
- LOPES, I.; GUIMARÃES, M. J. M.; MELO, J. M. M.; RAMOS, C. M. C. Balanço hídrico em função de regimes pluviométricos na região de Petrolina-PE. **Irriga**, v. 22, n. 3, p. 443-457, 2017.
- MANANDHAR, S.; DEV, S.; LEE, Y. H.; WINKLER, S.; MENG, Y. S. Systematic study of weather variables for rainfall detection. In: **IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IEEE, p. 3027-3030, 2018.
- MELLO, Y. R.; OLIVEIRA, T. M. N. Análise Estatística e Geoestatística da Precipitação Média para o Município de Joinville (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 229-239, 2016.
- MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L. Análise de tendência e variabilidade da precipitação no estado do Pará. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 24, p. 1580-1591, 2016.
- MONTAÑO, M.; SOUZA, M. P. Integração entre planejamento do uso do solo e de recursos hídricos: a disponibilidade hídrica como critério para a localização de empreendimentos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 3, p. 489-495, 2016.

- MRAD, D.; DAIRI, S.; BOUKHARI, S.; DJEBBAR, Y. Applied multivariate analysis on annual rainfall in the northeast of Algeria. **Journal of Water and Climate Change**, 2019.
- NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G. A. C. F.; SOARES, D. B. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 276-292, 2016.
- PRADO, B. Q. M.; FERNANDES, H. R.; ARAÚJO, T. G.; LAIA, G. A.; BIASE, N. G. Avaliação de variáveis climatológicas da cidade de Uberlândia (MG) por meio da análise de componentes principais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 407-413, 2016.
- SANTO, S. M.; CARELLI, L. Bacia Hidrográfica do Paraguaçu: da Chapada Diamantina à Baía de Todos os Santos. In: LAMAS, I. R.; RITA, L. S.; MIRANDA, R. M. (Orgs.). **Semeando Águas no Paraguaçu**. Rio de Janeiro: Conservação Internacional, 2016. p. 12-33.
- SILVA, E. R. A. C.; GALVÍNCIO, J. D.; NASCIMENTO, K. R. P.; SANTANA, S. H. C.; SOUZA, W. M.; COSTA, V. S. O. Análise da tendência temporal da precipitação pluviométrica interanual e intra-anual no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 76-98, 2018.
- SOUZA, A.; FERNANDES, W. A.; ALBREZ, E. A.; GALVÍNCIO, J. D. Análise de agrupamento da precipitação e da temperatura no Mato Grosso do Sul. **ACTA Geográfica**, v. 6, n. 12, p. 109-124, 2012.
- TAVARES, V. C.; ARRUDA, I. R. P.; SILVA, D. G. Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. **Geosul**, v. 34, n. 70, p. 385-405, 2019.
- TUCCI, C. E. M. Indicador de sustentabilidade hídrica urbana. **Revista Gestão de Água da América Latina**, v. 14, n. 1, p. e7, 2017.

**CAPÍTULO 2 - VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO  
PLUVIOMÉTRICA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAÇU – BA**

---

## **CAPÍTULO 2 - VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAÇU – BA**

Aceito pela Revista Cerrados (Unimontes)

### **Resumo**

A avaliação do regime pluviométrico constitui uma ferramenta indispensável para planejar e gerir adequadamente os recursos hídricos. O objetivo deste trabalho foi analisar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluviométrica na região hidrográfica do Paraguaçu - BA. Baseado nos dados de precipitação pluviométrica de 50 postos pluviométricos inseridos e no entorno da região, datados de 1989 a 2018, foram elaborados gráficos e mapas para avaliação espaço-temporal da precipitação média, do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) e do Índice de Concentração de Precipitação (ICP). Ainda foram identificadas zonas de pluviosidades homogêneas, através da análise de agrupamentos. Os resultados revelaram que o período chuvoso é bem definido entre novembro e abril, os maiores índices de precipitação (acima dos 700 mm anuais) ocorreram nas extremidades leste e oeste e os menores (abaixo dos 400 mm anuais) nas porções influenciadas pelo semiárido. A tendência decrescente do IAC apontou alta possibilidade para ocorrência de eventos extremos de seca, enquanto a média histórica de 17,04 % para o ICP, que classifica a distribuição de chuvas como medianamente irregular, indicou a ocorrência de precipitações concentradas. Foram identificados três agrupamentos homogêneos em relação à variabilidade pluviométrica, cuja disposição geográfica guarda conformidade com a espacialização da precipitação anual.

**Palavras-chave:** Índices Pluviométricos, Interpolação, Geoestatística, Zonas Homogêneas

### **SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF PLUVIOMETRIC PRECIPITATION IN THE HYDROGRAPHIC REGION OF PARAGUAÇU - BA**

### **Abstract**

The evaluation of the pluviometric regime is an essential tool to plan and properly manage water resources. The objective of this work was to analyze the spatiotemporal variability of rainfall in the hydrographic region of Paraguaçu - BA. Based on precipitation data from 50 stations situated within and around the region, graphs and maps were prepared for spatiotemporal assessment of average precipitation, Rainfall Anomaly

Index (RAI) and Precipitation Concentration Index (PCI). Homogeneous rainfall zones were also identified through cluster analysis. The results revealed that the rainy period is well defined between November and April, the highest annual precipitation rates (above 700 mm) occurred in the eastern and western extremities and the lowest (below 400 mm) in the portions influenced by the semi-arid region. The downward trend of the RAI indicated a high possibility for the occurrence of extreme drought events, while the historical average of 17.04 % for the PCI, which classifies the distribution of rainfall as moderately irregular, indicated the occurrence of concentrated rainfall. Three homogeneous clusters were identified in relation to rainfall variability.

**Keywords:** Rainfall Indices, Interpolation, Geostatistics, Homogeneous Zones

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são ocasionadas por ciclos naturais de variabilidade na temperatura e na precipitação, mas estão sendo potencializadas por ações antrópicas, como alterações no uso do solo e emissões de gases de efeito estufa (ANDRADE et al., 2018; SCHMIDT et al., 2018). Essas mudanças podem ocasionar variação brusca nos padrões de precipitação pluviométrica, através da ocorrência de eventos extremos, como secas prolongadas ou chuvas intensas, que são acompanhadas de grandes prejuízos socioeconômicos para população (EBI; BOWEN, 2016; PERKINS-KIRKPATRICK; PITMAN, 2018).

Junto às oscilações climáticas, espera-se uma mudança de comportamento do ciclo hidrológico, devido à forte variabilidade e sazonalidade das precipitações (CALDERON; UHLENBROOK, 2016). No semiárido nordestino, clima marcante em parte da região do Paraguai, alterações nos regimes pluviométricos intensificam os problemas com relação ao acesso à água, principalmente o da competição por recursos hídricos, tendo em vista que as chuvas impactam diretamente a oferta hídrica de uma região (GOMES et al., 2019).

O estudo das escalas espaciais e temporais do regime pluviométrico é relevante na incorporação da variabilidade climática no planejamento e no gerenciamento de diferentes aplicações dos recursos hídricos, como na agricultura e em estruturas hidráulicas (ONYUTHA; WILLEMS, 2017). Segundo Gomes et al. (2019), a compreensão dessas variações espaço-temporais contribui significativamente para a prevenção de riscos ambientais, além de auxiliar na preservação dos recursos hídricos.

O monitoramento da variabilidade espaço-temporal das chuvas pode ser realizado através de alguns índices, que podem indicar mudanças nos padrões pluviométricos ou

concentração da distribuição ao longo do tempo (NÓBREGA; SANTIAGO, 2016). Goswami (2018) utilizou o Índice de Anomalia de Chuva (IAC), método acessível que classifica as magnitudes positivas e negativas de eventos pluviométricos. Sangüesa et al. (2018) utilizaram o Índice de Concentração de Precipitação (ICP), recomendado para informar sobre como os totais de precipitação são distribuídos no decorrer de um período.

Uma técnica que vem sendo empregada nas análises de variabilidade pluviométrica é a geoestatística, estatística associada às ciências naturais que estabelece inferências sobre uma variável distribuída no espaço ou no tempo (LANDIM, 2010). Gundogdu (2017) afirma que a maioria dos programas para confecção de mapas ou Sistemas de Informações Geográficas (SIG) já apresentam opções de aplicação dos métodos geoestatísticos. Tais métodos consistem principalmente de interpoladores, ferramentas tradicionais para espacialização de informações pontuais (HU et al., 2019).

Em meteorologia, é comum a associação de técnicas geoestatísticas com a análise multivariada. Uma aplicação bem recorrente é a determinação de regiões homogêneas quanto à pluviosidade, que consegue harmonizar o comportamento pluviométrico (SINGH et al., 2017; GEBERT et al., 2018). Essa delimitação é feita por meio da análise de agrupamentos, ferramenta multivariada que agrupa os pontos amostrais, de tal forma que os indivíduos do mesmo grupo são mais semelhantes entre si, quanto a pluviometria (MRAD et al., 2019; ALAM; PAUL, 2020).

No contexto da região hidrográfica do Paraguaçu, essa análise espaço-temporal da precipitação e de indicadores derivados, a curto prazo, deve contribuir positivamente para o gerenciamento dos estoques de água e para a determinação de períodos agricultáveis. A longo prazo, os órgãos competentes adquirem subsídios para a formulação de um planejamento hidrológico eficaz, que vise a preservação dos recursos hídricos e promova uma gestão que antecipe cenários adversos causados pela concentração ou pela escassez de eventos chuvosos.

O presente estudo tem como objetivo analisar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluviométrica na região hidrográfica do Paraguaçu, no estado da Bahia, através da avaliação espacial e temporal de índices pluviométricos e da determinação de zonas homogêneas de precipitação.

## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 ÁREA DE ESTUDO**

A região hidrográfica do Paraguaçu (13° 36' S a 11° 17' S, 42° 2' W a 38° 55' W), representada na Figura 1, está localizada na região centro-leste do estado da Bahia.

Sua área é de 54322 km<sup>2</sup>, abrangendo 86 municípios, dentre eles o de Feira de Santana, segundo maior do estado em termos de população. O principal curso d'água da região é o Rio Paraguaçu (porção inferior), genuinamente baiano, que nasce na Chapada Diamantina e possui o Rio Jacuípe (porção superior) como principal curso tributário (GENZ, 2006).

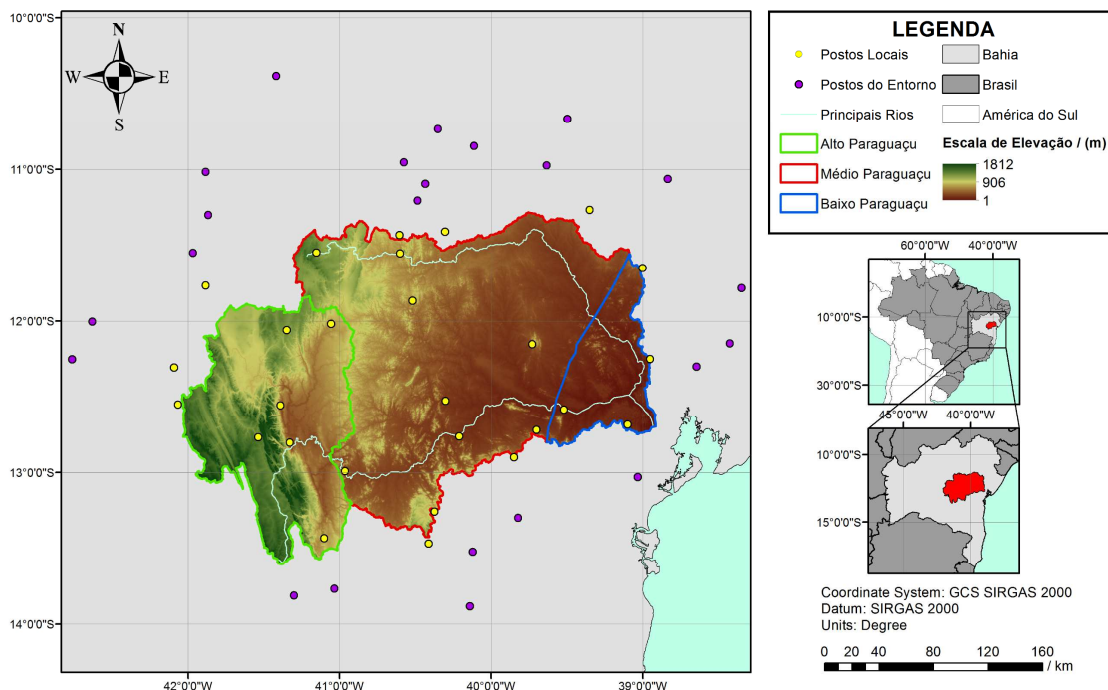


Figura 1 - Localização, divisão, hidrografia e escala de elevação da área de estudo, junto à distribuição geográfica dos postos (Autor, 2020)

A bacia apresenta três divisões geográficas. No alto Paraguaçu, região da Chapada Diamantina, predomina o clima subúmido a seco, verificando-se a ocorrência de campos rupestres. Nos locais mais altos da Chapada se configuram totais pluviométricos maiores que 1000 mm, enquanto nos planaltos de sua base esses índices anuais variam entre 800 mm e 1000 mm. No médio Paraguaçu o clima é semiárido, com predomínio da vegetação típica da caatinga. A pluviosidade dessa porção é mais baixa, variando de 500 mm a 600 mm, devido à presença de serras que se interpõem às massas de ar úmido. No baixo Paraguaçu, mais próximo do litoral, o clima é úmido a subúmido, apresentando vegetações remanescentes da Mata Atlântica. Nessa porção, as chuvas são abundantes durante todo o ano, com índices ultrapassando 1300 mm anuais (SOUSA et al., 2016; VALÉRIO, 2014).

O Paraguaçu possui o sistema fluvial mais importante da Bahia, por isso essa região foi escolhida como área piloto para aplicação do segundo Programa Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2004). As outorgas vigentes em relação à captação de águas superficiais são destinadas para irrigação (86 %), abastecimento humano (10 %) e

industrial (4 %), sendo que o Paraguaçu é o manancial responsável pelo abastecimento da capital Salvador e de sua região metropolitana (SILVA et al., 2017).

## 2.2 CONJUNTO DE DADOS

Os dados de precipitação pluviométrica foram coletados na plataforma online Hidroweb, da Agência Nacional de Águas (ANA). Tais informações compreendem séries históricas mensais coletadas por estações climáticas convencionais inseridas na região hidrográfica do Paraguaçu e no seu entorno. Foi adotado um período de estudo de 30 anos (de 1989 a 2018), referente a 50 municípios distintos, sendo que 27 pertencem à região hidrográfica. Os dados dos demais 23 municípios do entorno foram utilizados apenas com a finalidade de interpolação espacial das informações.

Para as séries com dados faltantes, o preenchimento das falhas foi realizado através da krigagem, técnica amplamente utilizada na hidrologia, inclusive para estimativa de dados de precipitação ausentes (TEEGAVARAPU et al., 2018). Esse método geoestatístico se apoia nas autocorrelações entre as variáveis preditas, com base nas funções de variação, os semivariogramas (HU et al., 2019). A limitação dessa metodologia é o ajuste do modelo ideal de variograma, essencial para a determinação dos parâmetros padrão: patamar, alcance e efeito pepita (ADHIKARY et al., 2016).

Para as séries históricas de cada município, os variogramas experimentais foram ajustados através da eliminação dos dados discrepantes, até a obtenção do modelo com maior Índice de Dependência Espacial (IDE). Tal índice é dado pela Equação 1 e adota alguns dos parâmetros padrão do semivariograma, onde  $C_0$  representa o efeito pepita, que corresponde ao valor da semivariância para a distância zero e  $C$  é a variância estrutural.

$$IDE = \left( \frac{C}{C_0 + C} \right) \times 100 \quad (1)$$

Esse índice foi ajustado para cada série até a classificação de forte dependência espacial, ou seja,  $IDE \geq 75\%$ , segundo Zimback (2001). A estimação por krigagem foi realizada com o auxílio do programa Surfer, versão 9, 2010. A Tabela 1 apresenta a relação de municípios dos postos pluviométricos utilizados e suas principais informações geográficas (altitude, latitude e longitude).

Tabela 1 - Dados dos 50 postos situados dentro e ao redor da região hidrográfica do Paraguai

<b>Município</b>	<b>Altitude / (m)</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
<b>Alto Paraguai</b>			
Andaraí	330	12° 48' 06" S	41° 19' 39" W
Bonito	962	12° 03' 36" S	41° 20' 51" W
Canarana	693	11° 46' 00" S	41° 53' 00" W
Ibitiara	1098	12° 33' 00" S	42° 04' 00" W
Lençóis	439	12° 33' 26" S	41° 23' 19" W
Mucugê	870	12° 45' 59" S	41° 32' 10" W
Seabra	1033	12° 18' 22" S	42° 05' 31" W
Utinga	511	12° 01' 10" S	41° 03' 17" W
<b>Médio Paraguai</b>			
Iaçu	237	12° 45' 44" S	40° 12' 39" W
Ipirá	350	12° 09' 16" S	39° 43' 38" W
Iramaia	590	13° 26' 00" S	41° 06' 00" W
Itaberaba	250	12° 31' 36" S	40° 17' 59" W
Itatim	260	12° 43' 10" S	39° 41' 57" W
Itaeté	299	12° 59' 24" S	40° 57' 48" W
Maracás	677	13° 28' 08" S	40° 24' 44" W
Miguel Calmon	562	11° 25' 57" S	40° 36' 16" W
Milagres	395	12° 54' 00" S	39° 51' 00" W
Morro do Chapéu	1003	11° 32' 51" S	41° 09' 05" W
Mundo Novo	515	11° 51' 56" S	40° 31' 04" W
Piritiba	508	11° 33' 12" S	40° 36' 00" W
Planaltino	723	13° 15' 27" S	40° 22' 21" W
Santaluz	349	11° 16' 00" S	39° 21' 00" W
Serrolândia	380	11° 24' 38" S	40° 18' 13" W
<b>Baixo Paraguai</b>			
Cruz das Almas	226	12° 41' 00" S	39° 06' 00" W
Feira de Santana	231	12° 15' 00" S	38° 57' 00" W
Rafael Jambeiro	159	12° 35' 06" S	39° 31' 06" W
Serrinha	360	11° 39' 00" S	39° 00' 00" W
<b>Arredores do Paraguai</b>			
Alagoinhas	131	12° 08' 56" S	38° 25' 27" W
Brotas de Macaúbas	837	12° 00' 13" S	42° 37' 42" W
Caém	500	11° 05' 39" S	40° 26' 06" W
Caldeirão Grande	348	10° 50' 40" S	40° 06' 42" W
Cansanção	359	10° 40' 00" S	39° 29' 48" W
Contendas do Sincorá	286	13° 46' 00" S	41° 02' 00" W
Ibititá	700	11° 33' 00" S	41° 58' 00" W
Inhambupe	158	11° 46' 58" S	38° 20' 53" W
Irecê	747	11° 18' 00" S	41° 52' 00" W
Itiruçu	756	13° 31' 21" S	40° 07' 15" W
Ituaçu	531	13° 48' 43" S	41° 18' 00" W
Jacobina	485	11° 12' 15" S	40° 29' 03" W
Jequié	199	13° 52' 56" S	40° 08' 25" W
Jussara	680	11° 01' 00" S	41° 53' 00" W
Mirangaba	930	10° 57' 14" S	40° 34' 31" W
Nazaré	35	13° 01' 51" S	39° 01' 56" W
Oliveira dos Brejinhos	440	12° 15' 07" S	42° 45' 46" W
Pindobaçu	600	10° 44' 00" S	40° 21' 00" W
Queimadas	279	10° 58' 27" S	39° 37' 58" W
Santa Inês	415	13° 17' 51" S	39° 49' 17" W
Sento Sé	950	10° 23' 00" S	41° 25' 00" W
Teodoro Sampaio	116	12° 18' 01" S	38° 38' 38" W
Tucano	153	11° 03' 47" S	38° 50' 07" W

Fonte: ANA, 2019. Organizado pelo autor, 2020

Para garantir uma melhor confiabilidade das informações, recorreu-se a um procedimento de homogeneização dos dados em todos postos pluviométricos. Para tanto, foi utilizado o pacote RHtest, programado em R e desenvolvido por Wang (2008a, 2008b), onde é possível verificar a homogeneidade das séries históricas mediante testes estatísticos que avaliam a significância dos pontos de mudança. As séries que apresentaram ruídos significativos foram ajustadas através da correspondência de quantis, responsável pela descontinuidade sazonal do novo conjunto de dados (SI et al., 2018).

### 2.3 ÍNDICES PLUVIOMÉTRICOS

Van Rooy (1965) desenvolveu o IAC, que indica a frequência de períodos secos e chuvosos em uma determinada área de estudo. Esse parâmetro serve como base para o estudo da severidade das secas, além de ser popular e amplamente aceito (RANGARAJAN et al., 2018). Para a região do Paraguaçu, foi calculado o IAC anual de cada município, a partir das Equações 2 e 3, que apresentam anomalias positivas e negativas, respectivamente.

$$IAC = 3 \times \left[ \frac{(N - \bar{N})}{(\bar{M} - \bar{N})} \right] \quad (2)$$

$$IAC = -3 \times \left[ \frac{(N - \bar{N})}{(\bar{X} - \bar{N})} \right] \quad (3)$$

O parâmetro  $N$  indica a precipitação anual em mm,  $\bar{N}$  a precipitação média da série histórica,  $\bar{M}$  a média das dez maiores precipitações anuais da série e  $\bar{X}$  a média das dez menores. Anomalias positivas indicam os anos cuja precipitação está acima da média, enquanto as anomalias negativas, aqueles abaixo. A classificação da intensidade de chuvas devido ao IAC é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação da intensidade dos anos secos e chuvosos do IAC

<b>Varição do IAC</b>	<b>Categoria da Intensidade</b>
Acima de 4	Extremamente Chuvoso (EC)
2 a 4	Muito Chuvoso (MC)
0 a 2	Chuvoso (C)
0 a -2	Seco (S)
-2 a -4	Muito Seco (MS)
Abaixo de -4	Extremamente Seco (ES)

Fonte: Van Rooy, 1965. Adaptado por Freitas, 2005

Outro indicador da precipitação utilizado foi o ICP, proposto por Oliver (1980) para determinação do grau de concentração das chuvas, ligado intimamente com o padrão de seca de uma localidade, que por sua vez é agravado quanto maior a heterogeneidade da distribuição das precipitações (THOMAS; PRASANNAKUMAR, 2016;

RANGARAJAN et al., 2018). Cada posto inserido no Paraguai teve seu índice estimado separadamente, usando a Equação 4 para dados anuais e a Equação 5 para dados sazonais, conforme descrito por De Luis et al. (2011).

$$ICP (anual) = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{12} pm_i^2}{(\sum_{i=1}^{12} pm_i)^2} \quad (4)$$

$$ICP (sazonal) = 25 \times \frac{\sum_{i=1}^3 pm_i^2}{(\sum_{i=1}^3 pm_i)^2} \quad (5)$$

Em ambas equações,  $pm_i$  representa a precipitação mensal no mês  $i$ . O cálculo anual contabiliza todos os meses do ano, enquanto o cálculo sazonal leva em consideração os meses correspondentes às estações do verão, outono, primavera e inverno. A classificação da regularidade das chuvas devido ao ICP é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da regularidade das chuvas de acordo com o ICP

<b>Varição do ICP</b>	<b>Distribuição da Precipitação</b>
Abaixo de 10 %	Regular (R)
11 % a 15 %	Baixa Irregularidade (BI)
16 % a 20 %	Média Irregularidade (MI)
Acima de 20 %	Alta Irregularidade (AI)

Fonte: Oliver, 1980

Visando a caracterização da distribuição espacial, foram elaborados mapas das médias anuais da precipitação pluviométrica e dos índices de anomalia e concentração de chuva. Os dados de entrada são as coordenadas geográficas dos postos pluviométricos e os respectivos valores das variáveis anuais. Para a espacialização desses dados foi utilizada a geoestatística, com auxílio do programa ArcGIS, versão 10.5, 2016.

A técnica de interpolação utilizada foi a krigagem ordinária com modelo exponencial, considerada a mais eficiente, dentre técnicas determinísticas e estocásticas, na estimativa da precipitação média anual, apresentando correlação satisfatória entre valores estimados e real (CASTRO et al., 2010). O modelo de semivariograma foi otimizado pelo programa para cada variável espacializada, inclusive desconsiderando a anisotropia, uma vez que essa condição pode ser assumida em dados de chuva, com o objetivo de simplificar procedimentos (CUNHA et al., 2013).

A validação do desempenho desse método de interpolação foi feita através do fator estatístico Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) (Equação 6), onde:  $N$  é o número de comparações,  $p_i$  é o valor estimado pelo modelo,  $o_i$  é o valor observado na série. A REQM é um critério de desempenho bastante adotado em estudos do gênero (CHEN et al., 2017; GUNDOGDU, 2017; TEEGAVARAPU et al., 2018), pois essa

métrica é de fácil entendimento, devido à manutenção da unidade de medida das grandezas previstas no modelo.

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2} \quad (6)$$

## 2.4 ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS

Sobre os dados de precipitação pluviométrica, realizou-se uma análise de agrupamentos (*Cluster Analysis*) através do método de Ward (1963), que forma grupos de indivíduos a partir da homogeneidade entre as variáveis. No presente estudo, o intuito é confirmar se os grupos formados guardam compatibilidade com a caracterização prévia da pluviosidade em cada divisão geográfica da região. Nesse caso, os indivíduos são os municípios inseridos no Paraguaçu, enquanto as variáveis são suas precipitações mensais na série de 30 anos e as altitudes locais, para um melhor alinhamento geográfico.

As similaridades entre os dados foram atribuídas por meio da distância euclidiana ( $d_{ij}$ ) entre dois objetos ( $i$  e  $j$ ) com valores para  $p$  variáveis normalizadas, seguindo a Equação 7. Como esse parâmetro é uma medida de dissimilaridade, quanto menor for a distância entre os dados, maior será a similaridade entre eles (SILVA et al., 2018).

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (7)$$

Os resultados da análise de agrupamentos serão apresentados de duas formas. Uma delas é o dendrograma, gráfico que dispõe o agrupamento entre os indivíduos similares em um eixo e a medida de similaridade entre as variáveis no outro, realizado com o auxílio do programa RStudio, versão 1.1.463, 2018. A outra é o mapa de zoneamento, no qual a região do Paraguaçu foi dividida entre os grupos homogêneos formados, através do modelo geoestatístico da krigagem, que possui boa precisão na espacialização dos *clusters*, segundo Moral et al. (2016). Para isso, foi utilizado o programa ArcGIS, versão 10.5, 2016.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta o boxplot da precipitação pluviométrica anual de cada divisão geográfica do Paraguaçu. Verifica-se que, no período de estudo, as médias anuais do baixo e do alto Paraguaçu foram equiparadas (756 mm e 789 mm, respectivamente),

sendo que a maior dispersão ocorreu nesse último, que possui o maior intervalo de amplitude no boxplot (500 mm e 1036 mm). Já o médio Paraguaçu, região caracterizada pelo semiárido, apresentou a menor média anual (588 mm) e a menor amplitude do intervalo interquartil (407 mm e 726 mm), configurando a menor dispersão dos índices pluviométricos, em relação às demais divisões.

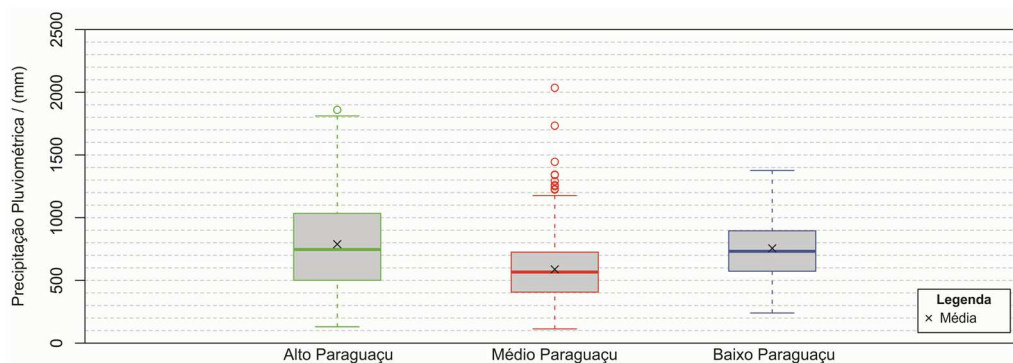


Figura 2 - Boxplot das chuvas anuais para as divisões da região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020)

No alto e no médio Paraguaçu, é possível observar a presença de *outliers* ou valores discrepantes dentro do conjunto de dados, comportamento que é habitual em séries históricas de dados pluviométricos, como verificado nos estudos de Wu e Qian (2017) e de Phuong et al. (2019). Esses *outliers* em séries temporais de chuva são muito comuns, pois as informações são provenientes da medição de um fenômeno natural e aleatório, existindo margem à ocorrência de eventos repentinos de grande escala (PAUL et al., 2017).

O gráfico da Figura 3 demonstra a oscilação interanual dos totais pluviométricos médios para a região do Paraguaçu e suas divisões geográficas, entre 1989 e 2018. Em termos gerais, a média pluviométrica do período foi de 673 mm, o ano de 1997 apresentou as maiores ocorrências de chuva (média de 966 mm) e o ano de 2012 as menores (média de 338 mm). Em exatamente 50 % do período, as médias anuais ficaram abaixo da média geral, especialmente após o ano de 2010.

Quanto às divisões geográficas, é notável que a precipitação pluviométrica é menor no médio Paraguaçu, enquanto as maiores precipitações alternam entre as partes alta e baixa da região hidrográfica. Em 80 % do período, os postos localizados no baixo Paraguaçu apresentaram médias anuais maiores que a média da região hidrográfica. Por outro lado, em 83 % do tempo, os índices anuais dos postos no médio Paraguaçu ficaram abaixo dessa média. Observa-se ainda que, embora possuam diferentes amplitudes, as linhas dos valores médios anuais, principalmente no baixo e no médio Paraguaçu, seguem um padrão de oscilação semelhante.

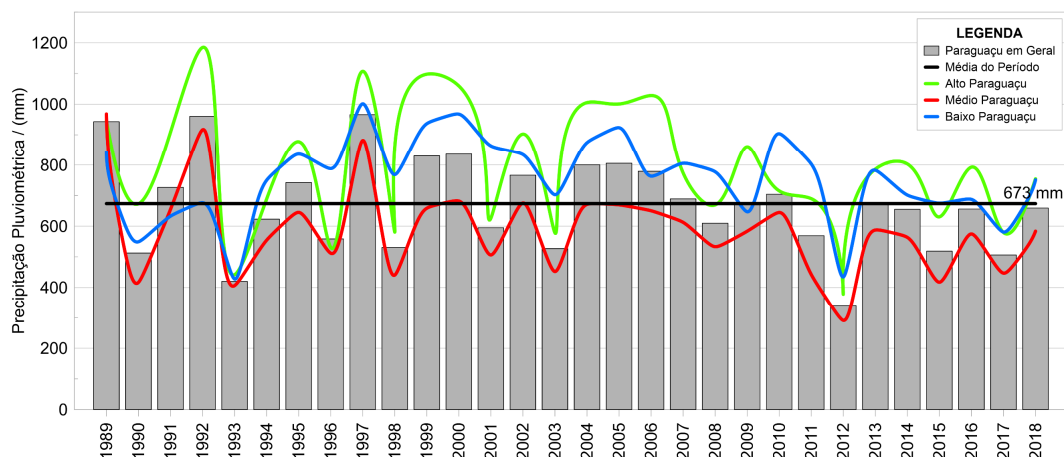


Figura 3 - Variação da série média anual de chuvas para as divisões da região hidrográfica do Paraguai (Autor, 2020)

A Figura 4 ilustra a variação mensal da precipitação pluviométrica e, no geral, o período chuvoso é entre novembro e abril. Os meses de julho (37 mm), agosto (31 mm), setembro (26 mm) e outubro (40 mm) apresentaram as menores médias pluviométricas do período, caracterizando o inverno como um período de poucas chuvas. Tal resultado é compatível com o estudo de Sousa et al. (2016), que encontraram entre novembro e março o período de maior volume precipitado, além de índices médios inferiores a 40 mm nos meses de agosto, setembro e outubro, para a mesma região hidrográfica.

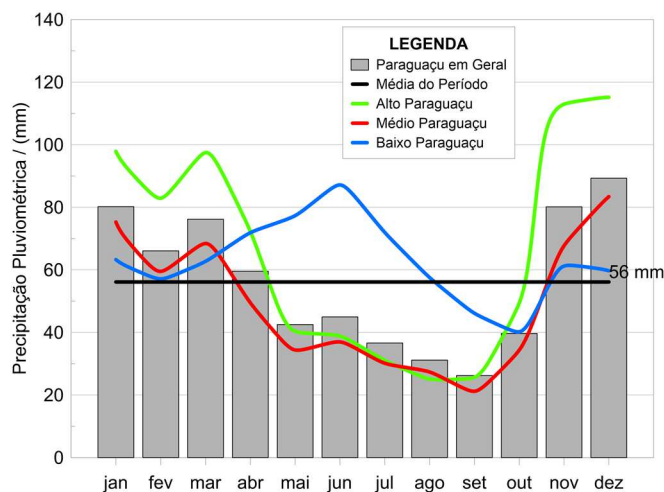


Figura 4 - Variação da série média mensal de chuvas para as divisões da região hidrográfica do Paraguai (Autor, 2020)

As precipitações mensais do alto e do médio Paraguai seguem a oscilação geral da região, com o período chuvoso bem definido, entre novembro e abril. Mas no baixo Paraguai ocorre uma divergência, uma vez que os picos de chuva se encontram entre abril e julho. Essa mesma divergência foi pontuada por Genz (2006), que comparou dados pluviométricos provenientes do estuário (porção baixa) e da nascente (porção alta) do rio Paraguai.

Os resultados associados ao IAC médio na região hidrográfica podem ser observados na Figura 5. De acordo com a Figura 5a, padrões secos e chuvosos são percebidos ao longo da série histórica. Dentro do período de estudo, o Paraguaçu apresentou a maior parte dos índices médios classificados como secos, muito ou extremamente secos. Os picos positivos do IAC aconteceram nos anos de 1989 (+3,7), 1997 (+3,4) e 1992 (+3,3), notados por índices pluviométricos anuais médios superiores a 940 mm.

Os maiores picos negativos foram nos anos de 2012 (-4,3) e 1993 (-3,1), marcados também pelos menores registros de precipitação média. Nesses mesmos anos, os máximos valores negativos do IAC foram encontrados por Costa e Rodrigues (2017) em uma bacia no Ceará, fato explicado pela ocorrência do fenômeno *El Niño* de intensidade forte, responsável pela escassez de chuvas no Nordeste Brasileiro (NEB).

A linha de tendência indica que, ao longo dos anos, ocorreu um decréscimo do IAC, inclusive todos os anos após 2010 apresentaram esse índice negativo, o que indica a tendência de redução do volume precipitado. O coeficiente de determinação do modelo de regressão é baixo e possui ordem de grandeza semelhante aos resultados obtidos por Surendran et al. (2019) em outra análise temporal de IAC. Isso se deve à alta variabilidade interanual das precipitações, segundo Asfaw et al. (2018).

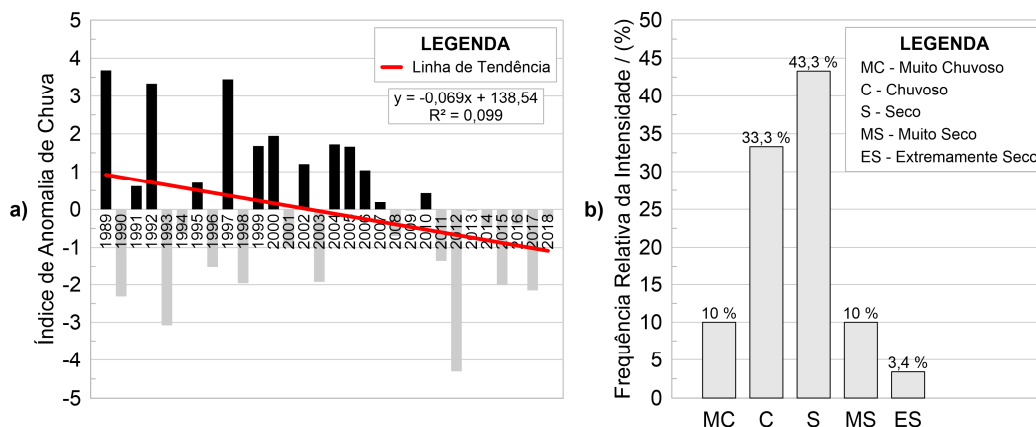


Figura 5 - Variação da série média anual do IAC para a região hidrográfica do Paraguaçu (a) e frequência relativa por categoria de intensidade (b) (Autor, 2020)

De acordo com a Figura 5b, os anos secos, muito e extremamente secos ocorreram com uma frequência relativa de 56,7 % dentro da série histórica analisada. Conforme Cerqueira et al. (2017), a partir desse percentual, é possível inferir que existe uma maior probabilidade de que eventos extremos de seca sejam observados na área de estudo.

De acordo com a Figura 6a, o ICP anual variou entre 26,95 % em 1989 e 12,60 % em 2018, assumindo a média histórica de 17,04 %, que classifica a distribuição de chuva na região como de média irregularidade. É possível verificar também, através da reta de

ajuste, uma leve tendência de redução do ICP no período, que não é significativa a ponto de prever eventos de chuva regulares a curto prazo.

Dos 30 anos avaliados, nenhum apresentou distribuição regular (ICP < 10 %) da precipitação ao longo dos meses. Isso pode estar associado ao fato de o ICP médio de uma região ser significativamente influenciado pela variabilidade espacial do clima. Sangüesa et al. (2018), por exemplo, atestaram que o ICP anual tende a diminuir até 30 %, quando parte de uma zona árida para uma zona úmida. Conforme a Figura 6b, a média e a alta irregularidade da distribuição somam uma frequência relativa de 60 %, dentro do período analisado.

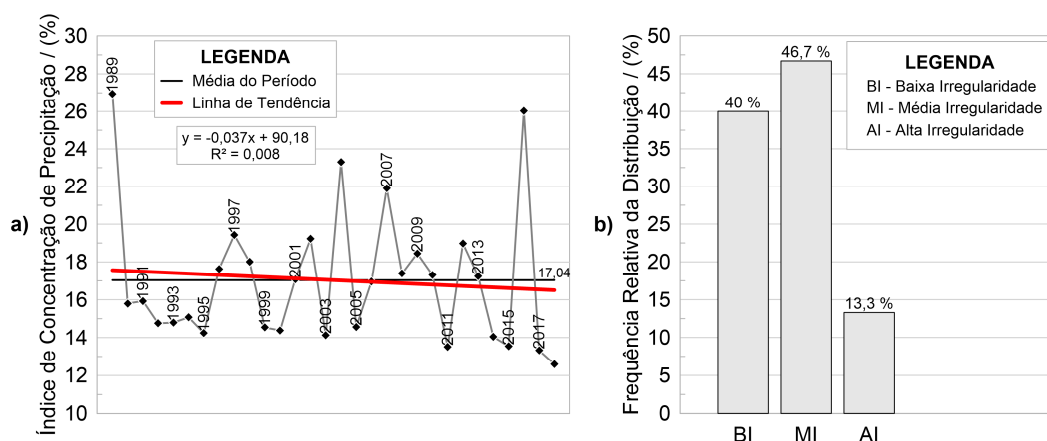


Figura 6 - Variação da série média anual do ICP para a região hidrográfica do Paraguaçu (a) e frequência relativa por categoria de distribuição (b) (Autor, 2020)

Essa alta frequência de valores elevados para o ICP, na região do Paraguaçu, aponta que uma maior parcela da precipitação anual aconteceu em algumas áreas muito chuvosas, o que representa um risco potencial para a ocorrência, tanto de inundações e enchentes nessas localidades, quanto fenômenos de secas extremas nas áreas de, naturalmente, menor precipitação. Segundo Coscarelli e Caloiero (2012), os valores altos do ICP implicam em impactos no solo e na vida humana, uma vez que as precipitações concentradas deixam os solos vulneráveis à erosão e as extremas secas aumentam a possibilidade de desertificação, riscos ambientais que afetam atividades econômicas, principalmente a produção agrícola.

A Figura 7a apresenta a espacialização da precipitação média, sendo possível verificar que os extremos leste e oeste, praticamente correspondentes ao baixo e alto Paraguaçu, apresentam os maiores índices de chuva, acima dos 700 mm anuais. Por outro lado, nota-se que as porções centro-sul e centro-norte, que envolvem a parcela semiárida, apresentam maior carência de volumes pluviométricos altos, com índices anuais menores que 400 mm. Sousa et al. (2016), na mesma região hidrográfica, encontrou resultados semelhantes, com precipitações mais elevadas próximo ao litoral e na Chapada Diamantina.

A espacialização do IAC (Figura 7b) denota que os pontos com maiores precipitações médias tendem a apresentar valores positivos, pelo fato do IAC ser uma grandeza que deriva diretamente do volume de chuvas. Os maiores índices (entre 0 e 0,18) ocorrem na extremidade leste e em alguns pontos distribuídos da área central ao oeste da região hidrográfica. Da mesma maneira, Costa e Rodrigues (2017) localizaram valores de IAC maiores em regiões de elevada pluviosidade. Por outro lado, os índices negativos mais críticos se encontram a leste do médio Paraguaçu, que sofre influência do clima mais seco.

A escala espacial anual do ICP (Figura 7c) pode ser descrita como altamente irregular (mais que 20 %) na porção sul e medianamente irregular (entre 15 % e 20 %) nas demais áreas da região hidrográfica. Podem ser notados alguns pontos de baixa irregularidade (entre 12,51 % e 15 %) no extremo leste, provavelmente devido à presença de um clima úmido (SANGÜESA et al., 2018). É importante salientar que esses padrões espaciais não seguem necessariamente os padrões de comportamento das chuvas, como pontuaram De Luis et al. (2011), pois locais com alta precipitação podem ter distribuições de chuva mais ou menos irregular.

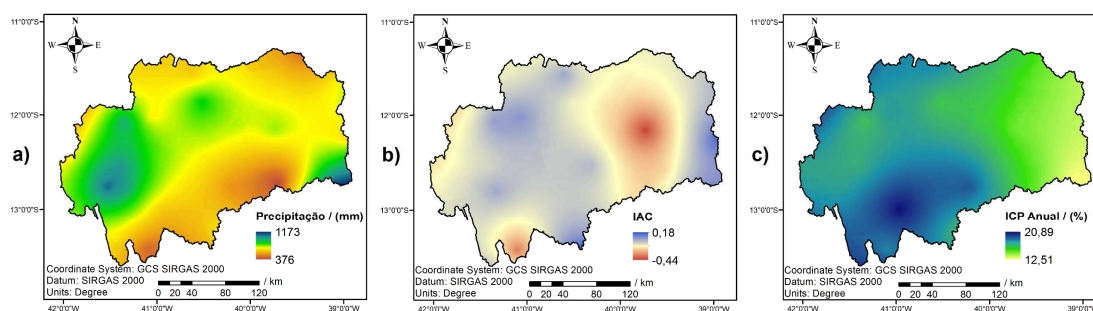


Figura 7 - Distribuição espacial da precipitação média anual (a), do IAC (b) e do ICP anual (c) (Autor, 2020)

Os resultados da avaliação de desempenho da distribuição espacial por krigagem ordinária com modelo exponencial são apresentados na Tabela 4. A REQM para a precipitação média anual ficou em torno de 193 mm, 80,8 % do desvio-padrão dos dados que foram distribuídos espacialmente, que foi igual a 239 mm. Kumari et al. (2016) avaliaram esse interpolador na distribuição da mesma variável e encontraram essa relação percentual semelhante, de 88,2 % para o REQM de 484 mm.

Tabela 4 - Validação de desempenho da krigagem ordinária com modelo exponencial

Variável	REQM
Precipitação	193,16 mm
IAC	0,13
ICP Anual	3,41 %

Fonte: Autor, 2020

Quanto ao IAC e ao ICP anual, a literatura não tem apresentado a performance dos modelos, sendo que a krigagem ordinária já é utilizada como ponto de partida da distribuição espacial (COSTA; RODRIGUES, 2017; SIQUEIRA; NERY, 2018). De forma análoga à precipitação anual média, os valores da REQM para os índices pluviométricos ficaram abaixo dos desvios-padrão dos dados iniciais, equivalentes a 0,14 para o IAC e 3,84 % para o ICP anual.

A espacialização do ICP sazonal, apresentada na Figura 8, leva em consideração a distribuição das chuvas no período de cada estação climática. Observa-se que existem poucos pontos da região hidrográfica que apresentaram irregularidade média ou alta (ICP > 15 %), configurando uma maior regularidade da distribuição intrasazonal em relação a distribuição anual das precipitações. Além disso, pode ser constatado que no verão (Figura 8a) e na primavera (Figura 8d), estações que coincidem com os meses de maior volume precipitado, as chuvas tendem a ser mais irregularmente distribuídas em praticamente toda região hidrográfica, quando comparadas às estações de outono (Figura 8b) e inverno (Figura 8c).

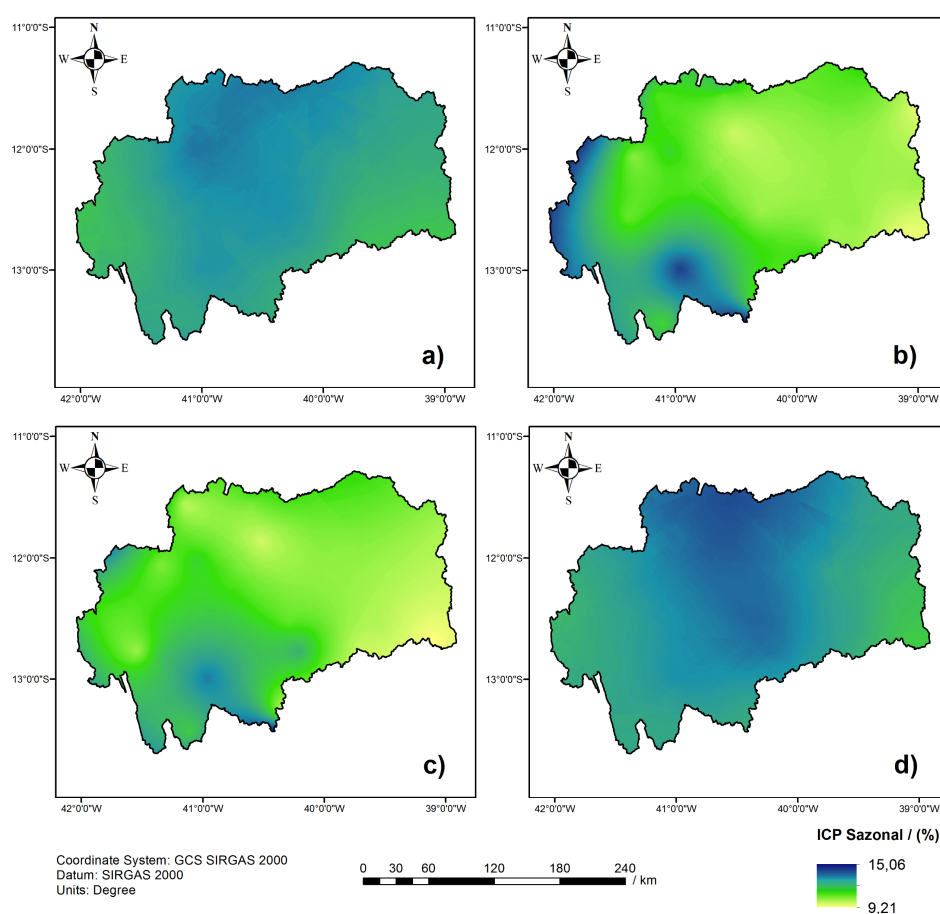


Figura 8 - Distribuição espacial, por meio de krigagem, do ICP sazonal para a região hidrográfica do Paraguaçu, considerando as estações: verão (a); outono (b); inverno (c); e primavera (d) (Autor, 2020)

De maneira análoga, De Luis et al. (2011) encontraram pontos com maior regularidade na distribuição da precipitação, a partir da avaliação do ICP sazonal, em detrimento do ICP anual. Os mesmos autores também verificaram que esse índice cresce com o aumento da concentração das chuvas, especialmente durante as estações chuvosas, enquanto começam a surgir indicativos de precipitação mais uniforme durante as estações secas.

A Figura 9 exibe o dendrograma representativo da similaridade existente entre as precipitações das estações efetivamente inseridas no Paraguaçu. Considerando que o nível de similaridade não aumenta significativamente para menor variação da distância euclidiana, adotou-se o critério de corte onde o número  $n$  de grupos formados resulta da maior amplitude com relação ao subsequente  $n + 1$ , mesmo critério adotado por Singh et al. (2017) e Gebert et al. (2018). Dessa forma, como a maior amplitude das distâncias euclidianas observa-se na migração de três para quatro grupos, três agrupamentos foi a quantidade adotada.

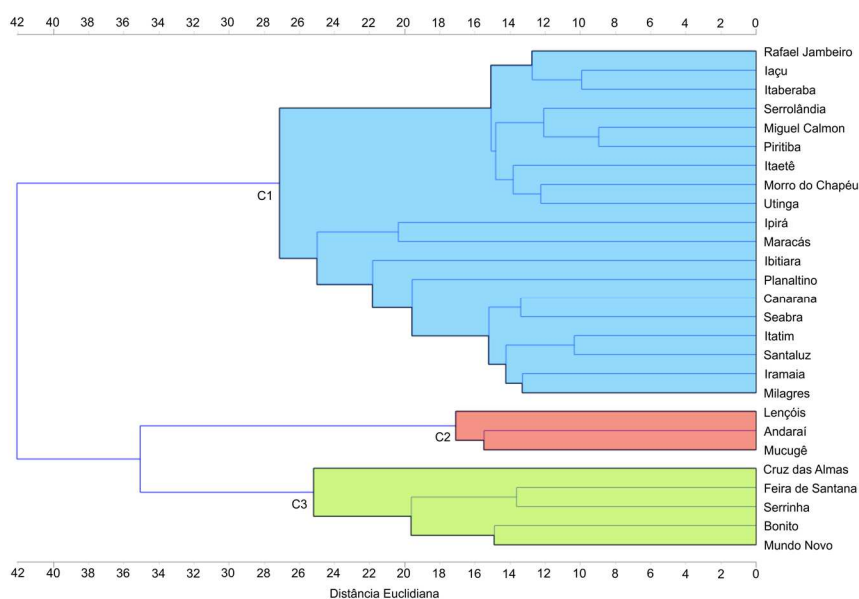


Figura 9 - Dendrograma baseado na distância euclidiana para as estações do Paraguaçu (Autor, 2020)

Baseado nos resultados do dendrograma, o mapa das zonas homogêneas é apresentado na Figura 10. É possível verificar que o primeiro grupo (C1) é o mais geral, abrange 19 estações espalhadas em toda área de estudo, localizadas principalmente no médio, no sudoeste do baixo e nas partes norte e sul do alto Paraguaçu. O segundo agrupamento (C2) tem 3 postos, localizados na porção central do alto Paraguaçu. O terceiro grupo (C3) abrange os outros 5 postos e está mais concentrado no baixo Paraguaçu, havendo dois pontos isolados nas porções média e alta da região hidrográfica.

É válido frisar que a distribuição geográfica das zonas homogêneas não foi totalmente compatível com a caracterização climática prevista pelas divisões geográficas da região, mas ainda se assemelha com a distribuição espacial das precipitações anuais. As áreas que apresentam precipitações reduzidas (< 650 mm) assemelham-se ao agrupamento C1. O nicho de maiores índices pluviométricos (> 890 mm), localizado a oeste, corresponde ao agrupamento C2. As áreas de precipitações altas ou intermediárias na porção leste e em pontos específicos ao norte da região hidrográfica, se harmonizam com o agrupamento C3. Essa concordância entre as zonas homogêneas e a distribuição anual das chuvas também foi obtida por outros autores. (DOURADO et al., 2013; GEBERT et al., 2018).

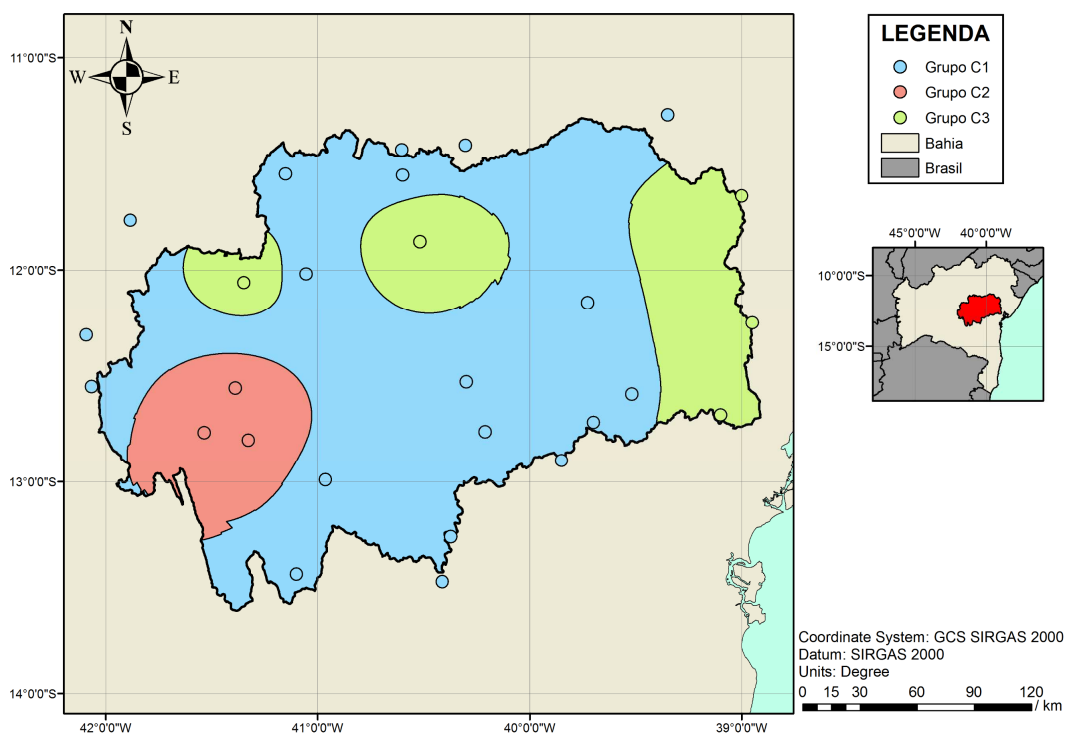


Figura 10 - Zonas homogêneas de precipitação mensal na região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020)

Dourado et al. (2013) identificaram zonas de pluviosidades homogêneas para todo estado da Bahia, utilizando um algoritmo diferente do de Ward (1963). Ainda assim, a demarcação da região hidrográfica do Paraguaçu abriga pontos de três agrupamentos distintos: um englobando os municípios chuvosos da costa litorânea do estado, outro com os municípios mais secos do semiárido e, por fim, outro da região de transição do semiárido para o cerrado do oeste baiano, com precipitações elevadas devido ao efeito orográfico.

## 4 CONCLUSÕES

A média histórica da precipitação pluviométrica anual na região hidrográfica do Paraguaçu foi de 673 mm, sendo que, em metade do período analisado, as médias anuais se encontram abaixo desse valor, especialmente nos últimos anos após 2010, fato que indica uma possível tendência de redução dos volumes pluviométricos anuais. O período chuvoso é bem delimitado, entre os meses de novembro a abril, com exceção do baixo Paraguaçu, que sofre a influência da maritimidade e apresenta picos de chuva entre abril e julho.

Os índices pluviométricos alertam para duas situações de extremos climáticos diferentes. O IAC classificou a maioria dos anos como secos, muito ou extremamente secos, além de apresentar uma tendência de decréscimo, indicando alta probabilidade de ocorrência de eventos extremos de seca. O ICP anual não foi classificado como regular em nenhum ano, indicando a possibilidade de ocorrência de eventos extremos de chuvas intensas, concentradas em curtos períodos de tempo. O ICP sazonal assinalou maior regularidade da distribuição de chuvas no outono e no inverno.

Geograficamente, as extremidades leste e oeste, que correspondem ao baixo e ao alto Paraguaçu, apresentam os maiores índices de precipitação pluviométrica, enquanto as porções centro-sul e centro-norte, influenciadas pelo semiárido, os menores. Através da análise de agrupamentos, a área de estudo foi dividida em três grupos homogêneos de precipitação mensal, sendo que a disposição geográfica dos grupos foi compatível com a distribuição espacial da precipitação anual.

Este estudo tem grande aplicabilidade local, pois existe uma preocupação com os extremos hidrológicos e seus impactos sociais e econômicos. A caracterização espaço-temporal da precipitação pluviométrica oferece um compilado de informações que funcionam como ferramentas de planejamento para ações voltadas para a gestão adequada dos recursos hídricos, que priorize um uso otimizado, adequando os sistemas de captação e armazenamento à variabilidade espaço-temporal das chuvas, reduzindo a escassez de água.

## REFERÊNCIAS

- ADHIKARY, S. K.; MUTTIL, N.; YILMAZ, A. G. Genetic programming-based ordinary kriging for spatial interpolation of rainfall. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 2, p. 04015062, 2016.
- ALAM, M. S.; PAUL, S. A comparative analysis of clustering algorithms to identify the homogeneous rainfall gauge stations of Bangladesh. **Journal of Applied Statistics**, v. 47, n. 8, p. 1460-1481, 2020.

- ANDRADE, A. R. S.; GODOY NETO, A. H.; CRUZ, A. F. S.; ANDRADE, E. K. P.; SANTOS, V. F.; SILVA, T. N. P. Geoestatística aplicada à variabilidade espacial e padrões nas séries temporais da precipitação no Agreste pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 1, p. 126-145, 2018.
- ASFAW, A.; SIMANE, B.; HASSEN, A.; BANTIDER, A. Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. **Weather and Climate Extremes**, v. 19, p. 29-41, 2018.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Relatório de Atividades do Programa Nacional do Meio Ambiente II - 2000 a 2004**. Brasília - DF, 2004. 70 p.
- CALDERON, H.; UHLENBROOK, S. Characterizing the climatic water balance dynamics and different runoff components in a poorly gauged tropical forested catchment, Nicaragua. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 14, p. 2465-2480, 2016.
- CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 871-880, 2010.
- CERQUEIRA, K. F.; SANTOS, F. A.; AQUINO, C. M. S. Análise das precipitações em trecho do médio curso da bacia hidrográfica do rio Poti (Piauí), a partir do índice de anomalia de chuva (IAC). **Ra'e Ga**, v. 45, n. 1, p. 110-122, 2018.
- CHEN, T.; REN, L.; YUAN, F.; YANG, X.; JIANG, S.; TANG, T.; LIU, X.; ZHAO, C.; ZHANG, L. Comparison of Spatial Interpolation Schemes for Rainfall Data and Application in Hydrological Modeling. **Water**, v. 9, n. 5, p. 342, 2017.
- COSCARELLI, R.; CALOIERO, T. Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria region). **Journal of Hydrology**, v. 416, p. 145-156, 2012.
- COSTA, J. A.; RODRIGUES, G. P. Space-time distribution of rainfall anomaly index (RAI) for the Salgado Basin, Ceará State - Brazil. **Ciência e Natura**, v. 39, n. 3, p. 627-634, 2017.
- CUNHA, A. M.; LANI, J. L.; SANTOS, G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; TRINDADE, F. S.; SOUZA, E. Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 9, p. 1179-1191, 2013.
- DE LUIS, M.; GONZALEZ-HIDALGO, J. C.; BRUNETTI, M.; LONGARES, L. A. Precipitation concentration changes in Spain 1946–2005. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1259-1265, 2011.
- DOURADO, C. S.; OLIVEIRA, S. R. M.; AVILA, A. M. H. Análise de zonas homogêneas em séries temporais de precipitação no Estado da Bahia. **Bragantia**, v. 72, n. 2, p. 192-198, 2013.

- EBI, K. L.; BOWEN, K. Extreme events as sources of health vulnerability: Drought as an example. **Weather and Climate Extremes**, v. 11, p. 95-102, 2016.
- FREITAS, M. A. S. Um Sistema de Suporte à Decisão para o Monitoramento de Secas Meteorológicas em Regiões Semiáridas. **Revista Tecnologia**, v. Suplem, p. 84-95, 2005.
- GEBERT, D. M. P.; KIST, A.; VIRGENS FILHO, J. S. Determinação de regiões homogêneas de precipitação pluviométrica no estado do Paraná por meio de técnicas de análise multivariada e geoestatística. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 374-388, 2018.
- GENZ, F. **Avaliação dos efeitos da barragem pedra do cavalo sobre a circulação estuarina do rio Paraguaçu e baía de Iguape**. Abril, 2006, 266 p. Tese (Doutorado) - Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal da Bahia.
- GOMES, D. J. C.; LIMA, A. M. M.; FERREIRA, N. S.; SERRÃO, E. A. O. Variabilidade espaço-temporal da precipitação: bacia hidrográfica do Rio Madeira. **Revista Geografia Acadêmica**, v. 13, n. 1, p. 90-104, 2019.
- GOSWAMI, A. Identifying the Frequency and Intensity of Dry and Wet Years over Sub-Himalayan West Bengal, India using Rainfall Anomaly Index. **Research Review International Journal of Multidisciplinary**, v. 3, n. 11, p. 461-465, 2018.
- GUNDOGDU, I. B. Usage of multivariate geostatistics in interpolation processes for meteorological precipitation maps. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 127, n. 1-2, p. 81-86, 2017.
- HU, Q.; LI, Z.; WANG, L.; HUANG, Y.; WANG, Y.; LI, L. Rainfall Spatial Estimations: A Review from Spatial Interpolation to Multi-Source Data Merging. **Water**, v. 11, n. 3, p. 579, 2019.
- KUMARI, M.; BASISTHA, A.; BAKIMCHANDRA, O.; SINGH, C. K. Comparison of Spatial Interpolation Methods for Mapping Rainfall in Indian Himalayas of Uttarakhand Region. In: RAJU, J. N. (Ed.). **Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment**. Springer International Publishing, 2016. p. 159-168.
- LANDIM, P. M. B. **Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados**. Rio Claro, SP: UNESP, 2010. 229 p.
- MORAL, F. J.; REBOLLO, F. J.; SIMÓN, L. L. P.; MARTÍN, A. G. A GIS-based multivariate clustering for characterization and ecoregion mapping from a viticultural perspective. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 3, p. e0206, 2016.

- MRAD, D.; DAIRI, S.; BOUKHARI, S.; DJEBBAR, Y. Applied multivariate analysis on annual rainfall in the northeast of Algeria. **Journal of Water and Climate Change**, 2019.
- NÓBREGA, R. S.; SANTIAGO, G. A. C. F. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista de Geografia Norte Grande**, v. 63, p. 9-26, 2016.
- OLIVER, J. E. Monthly precipitation distribution: A comparative index. **The Professional Geographer**, v. 32, n. 3, p. 300-309, 1980.
- ONYUTHA, C.; WILLEMS, P. Influence of Spatial and Temporal Scales on Statistical Analyses of Rainfall Variability in the River Nile Basin. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 77, p. 26-42, 2017.
- PAUL, A.; BHOWMIK, R.; CHOWDARY, V. M.; DUTTA, D.; SREEDHAR, U.; SANKAR, H. R. Trend analysis of time series rainfall data using robust statistics. **Journal of Water and Climate Change**, v. 8, n. 4, p. 691-700, 2017.
- PERKINS-KIRKPATRICK, S.; PITMAN, A. Extreme events in the context of climate change. **Public Health Research & Practice**, v. 28, p. e2841825, 2018.
- PHUONG, D. N. D.; LINH, V. T.; NHAT, T. T.; DUNG, H. M.; LOI, N. K. Spatiotemporal variability of annual and seasonal rainfall time series in Ho Chi Minh city, Vietnam. **Journal of Water and Climate Change**, v. 10, n. 3, p. 658-670, 2019.
- RANGARAJAN, S.; THATTAI, D.; YELLASIRI, S. R. R.; VYTILA, R.; TEDLA, N.; MANDALEMULA, B. Detecting changes in annual and seasonal rainfall patterns for Chennai, India. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 4, p. 05018001, 2018.
- SANGÜESA, C.; PIZARRO, R.; IBAÑEZ, A.; PINO, J.; RIVERA, D.; GARCÍA-CHEVESICH, P.; INGRAM, B. Spatial and Temporal Analysis of Rainfall Concentration Using the Gini Index and PCI Claudia. **Water**, v. 10, n. 2, p. 112, 2018.
- SCHMIDT, D. M.; LIMA, K. C.; JESUS, E. S. Variabilidade climática da disponibilidade hídrica na região semiárida do estado do Rio Grande do Norte. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 41, n. 3, p. 483-491, 2018.
- SI, P.; LUO, C.; LIANG, D. Homogenization of Tianjin monthly near-surface wind speed using RHtestsV4 for 1951–2014. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, n. 3-4, p. 1303-1320, 2018.
- SILVA, G. O. M.; MEDEIROS, Y. D. P.; FONTES, A. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Water permit integration in the Paraguaçu River Watershed (Bahia). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017.

- SILVA, M. J.; QUEIROZ, M. G.; JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, T. G. F. Gradientes pluviométricos do estado de Pernambuco: uma análise do litoral ao semiárido. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 3, p. 240-249, 2018.
- SINGH, S. K.; LO, E. Y. M.; QIN, X. Cluster Analysis of monthly precipitation over the western maritime continent under climate change. **Climate**, v. 5, n. 4, p. 84, 2017.
- SIQUEIRA, B.; NERY, J. T. Análise da distribuição e variabilidade da precipitação na bacia do rio Paraná, Brasil. **Geosp - Espaço e Tempo**, v. 22, n. 2, p. 380-393, 2018.
- SOUSA, F. A. S.; MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; SILVA, V. P. R. O Índice de Precipitação Padronizada (IPP) na identificação de extremos de chuvas e secas na bacia do rio Paraguaçu (BA). **Ambiência Guarapuava**, v. 12, n. 2, p. 707-719, 2016.
- SURENDRAN, U.; ANAGHA, B.; RAJA, P.; KUMAR, V.; RAJAN, K.; JAYAKUMAR, M. Analysis of drought from humid, semi-arid and arid regions of india using DrinC model with different drought indices. **Water Resources Management**, v. 33, n. 4, p. 1521-1540, 2019.
- TEEGAVARAPU, R. S. V.; ALY, A.; PATHAK, C. S.; AHLQUIST, J.; FUELBERG, H.; HOOD, J. Infilling missing precipitation records using variants of spatial interpolation and data-driven methods: use of optimal weighting parameters and nearest neighbour-based corrections. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 776-793, 2018.
- THOMAS, J.; PRASANNAKUMAR, V. Temporal analysis of rainfall (1871–2012) and drought characteristics over a tropical monsoon-dominated State (Kerala) of India. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 266-280, 2016.
- VALÉRIO, E. de L. S. **Avaliação dos efeitos de alterações na precipitação devido a mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, BA**. Maceió, 2014, 63 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas.
- VAN ROOY, M. P. V. **A Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space**. Notes, v.14, 1965.
- WANG, X. L. Accounting for autocorrelation in detecting mean-shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 47, n. 9, p. 2423-2444, 2008a.

- WANG, X. L. Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean shifts without trend-change. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 25, n. 3, p. 368-384, 2008b.
- WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, p. 236-244, 1963.
- WU, H.; QIAN, H. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2582-2592, 2017.
- ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. Botucatu, 2001, 114 p. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e Fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista.

**CAPÍTULO 3 - BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO SEQUENCIAL APLICADO  
NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAÇU – BA**

---

### **CAPÍTULO 3 - BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO SEQUENCIAL APLICADO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAÇU - BA**

---

Submetido ao periódico Sustainable Water Resources Management

#### **Resumo**

Alterações nos padrões climáticos atingem diretamente o regime hidrológico de uma região, podendo afetar a disponibilidade hídrica local, que gera inúmeros impactos socioambientais. O objetivo deste trabalho foi analisar a variabilidade espaço-temporal do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) na região hidrográfica do Paraguaçu - BA. Baseado em dados mensais de precipitação pluviométrica e temperatura, entre 1989 e 2018, foram elaborados gráficos e mapas para avaliação espaço-temporal dos principais parâmetros envolvidos no modelo de cálculo do BHC, seguidos da avaliação da susceptibilidade à desertificação através do Índice de Aridez (IA). As variáveis do balanço hídrico ainda foram avaliadas através da Análise de Componentes Principais (ACP). Os resultados demonstram que existe uma recorrência de deficiência hídrica em toda região hidrográfica, principalmente na sub-região afetada pelo semiárido. As extremidades leste e oeste possuem maiores excedentes, por terem maiores índices pluviométricos, enquanto a porção centro-sul apresenta os mais altos déficits, devido às maiores temperaturas e às menores estocagens de água no solo. O índice de aridez indica alta susceptibilidade à desertificação em cerca de 23 % da região hidrográfica. Duas componentes principais foram suficientes na explicação da variância dos parâmetros de BHC, sendo o primeiro associado ao clima úmido e o segundo representando o clima seco.

**Palavras-chave:** Recursos Hídricos, Geoestatística, Disponibilidade Hídrica, Índice de Aridez, Componentes Principais

#### **SEQUENTIAL CLIMATIC WATER BALANCE APPLIED IN THE HYDROGRAPHIC REGION OF PARAGUAÇU - BA**

#### **Abstract**

Changes in climatic patterns directly affect the hydrological regime of a region, which can affect the local water availability, generating numerous socio-environmental impacts. The objective of this work was to analyze the space-time variability of the Climatic Water Balance (CWB) in the hydrographic region of Paraguaçu - BA. Based on monthly rainfall and temperature data, between 1989 and 2018, graphs and maps were prepared for

spatiotemporal assessment of the main parameters involved in the CWB calculation model, followed by the assessment of susceptibility to desertification through the Aridity Index (AI). Water balance variables were also assessed through Principal Component Analysis (PCA). The results demonstrate that there is a recurrence of water deficit in the entire hydrographic region, mainly in the sub-region affected by the semiarid region. The eastern and western extremities have the highest surpluses as well as the highest rainfall, while the south-central portion has the highest deficits, due to the higher temperatures and the lower water stocks in the soil. The aridity index indicates high susceptibility to desertification in about 23 % of the hydrographic region. Two principal components were sufficient to explain the variance of the CWB parameters, the first being associated with the humid climate and the second representing the dry climate.

**Keywords:** Water Resources, Geostatistics, Water Availability, Aridity Index, Principal Components

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural imprescindível para a manutenção da qualidade de vida e indispensável na maioria das atividades humanas (AMAMRA; KHANCHOU, 2019). O que a torna um bem ainda mais precioso é sua natureza aleatória, com variações alternadas de disponibilidade entre períodos secos e úmidos (PEDRO-MONZONÍS et al., 2015). Porém, a acelerada urbanização aumenta a pressão sobre o equilíbrio entre oferta e demanda desse recurso (MAURYA et al., 2020). Concomitantemente, os recursos hídricos ainda são vulneráveis às constantes mudanças nos padrões climáticos e não devem ser utilizados sem restrições (GLEICK, 2010; ALAMANOS et al., 2019).

O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) é um dos indicadores utilizados para contabilizar e estimar a disponibilidade de água em uma região hidrográfica. Esse componente do sistema hidrológico consiste da contabilização de entradas e saídas de água no solo, através do princípio de conservação das massas (CASTRO et al., 2016; AL-SUDANI, 2019; LIAS et al., 2020). Essa abordagem engloba dados de precipitação pluviométrica e evapotranspiração para quantificar os estoques e avaliar os fluxos de água nas diferentes esferas do sistema terrestre (FASHAE et al., 2019; PRĂVĂLIE et al., 2019).

Na escala de região hidrográfica, a avaliação do BHC é muito relevante para a determinação do potencial hídrico local, sendo possível identificar a distribuição e a frequência dos excedentes e dos déficits (SCHMIDT et al., 2018). Portanto, essa

avaliação contribui para o controle dos recursos hídricos, principalmente aqueles destinados às atividades agrícolas, já que os períodos ideais para o plantio podem ser preditos, de forma que forneçam rendimentos otimizados (PALTINEANU et al., 2009; UMAR; YUSUF, 2019).

A dinâmica do balanço hídrico é um elemento primordial na formatação de planos para gerenciamento dos recursos hídricos em um contexto de mudanças climáticas severas (BANDOC; PRĂVĂLIE, 2015; CALDERON; UHLENBROOK, 2016). Essa abordagem se enquadra muito bem às necessidades da região do Paraguai, uma vez que, segundo Gomes et al. (2019), o clima semiárido em uma de suas porções e os baixos índices pluviométricos têm agravado os problemas relacionados ao acesso à água.

A gestão dos recursos hídricos, associada à prevenção de riscos ambientais, tem sido aperfeiçoada com o auxílio de técnicas geoestatísticas aplicadas às informações de monitoramento climático (SUBEDI et al., 2019). A interpolação espacial é um exemplo da aplicação dessas técnicas e serve para distribuir parâmetros pontuais sob uma área, que passa a ser caracterizada integralmente (CASTRO et al., 2016). Interpoladores geoestatísticos, como a krigagem e a cokrigagem, são frequentemente empregados nos estudos das ciências ambientais e apresentam desempenhos satisfatórios na espacialização de diferentes fenômenos do clima (BROWN; COMRIE, 2002; CHENG et al., 2017; SUBEDI et al., 2019).

O Sistema de Informações Geográficas (SIG), dispondo dos modelos geoestatísticos, é uma ferramenta de representação espacial que pode contribuir para a avaliação dinâmica do BHC. Bandoc e Prăvălie (2015), a partir da espacialização do BHC anual e sazonal, verificaram a tendência e a predominância de déficit hídrico em uma certa região da Romênia. Já Prăvălie et al. (2019), ao analisarem espacialmente o balanço hídrico em todo território desse país, verificaram um padrão bem mais abrangente das tendências à ocorrência de secas severas.

Séries climáticas ainda podem ser avaliadas mediante uso de técnicas multivariadas (RAZIEI, 2018). Segundo Verbois et al. (2018), o modelo multivariado da Análise de Componentes Principais (ACP) tem a função de reduzir a dimensionalidade dos dados para favorecer sua interpretação. Manandhar et al. (2018) apoiaram-se na ACP para realizar uma exploração sistemática de diferentes variáveis meteorológicas. Portanto, essa análise pode ser aplicável às várias grandezas interdependentes geradas na aplicação da metodologia tradicional do BHC (THORNTHWAITE; MATHER, 1955).

Diante do exposto, o presente estudo objetivou analisar a variabilidade espaço-temporal do balanço hídrico climatológico na região hidrográfica do Paraguaçu - BA, através da avaliação espacial e temporal das variáveis climáticas associadas ao BHC e da análise dos componentes principais.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é delimitada pela região hidrográfica do Paraguaçu (13° 36' S a 11° 17' S, 42° 2' W a 38° 55' W), localizada na porção centro-leste do estado da Bahia. Essa região hidrográfica é composta pelo território de 86 municípios e possui 54322 km<sup>2</sup> de área, que representa aproximadamente 9,6 % de todo estado. A Figura 11 indica a localização da região, a variação de altitude, suas três divisões geográficas e a localização dos postos pluviométricos e climáticos considerados nesse estudo.

A nascente do rio Paraguaçu localiza-se na porção mais alta, divisão de maiores altitudes e onde o clima é subúmido a seco, chegando a ocorrer eventos chuvosos maiores que 1000 mm por ano. O clima predominante da região hidrográfica é o semiárido, que caracteriza o médio Paraguaçu, cujos índices pluviométricos são normalmente inferiores a 700 mm. Na região da foz, terço baixo e mais próximo ao litoral da região, o clima é úmido a subúmido, com localidades atingindo os 1400 mm anuais (MACEDO, 2013; GONÇALVES, 2014). Segundo Macedo (2013), a temperatura média da região é maior que 25 °C, com a exceção de algumas ilhas mesotérmicas, a exemplo do município de Morro do Chapéu, que apresenta uma média de 21 °C, devido aos efeitos orográficos.

### 2.2 CONJUNTO DE DADOS

Nos pontos identificados como postos pluviométricos, foram coletados os dados de precipitação na plataforma online "Hidroweb", da Agência Nacional de Águas (ANA). Já nos pontos marcados como estações climáticas, além dos dados oriundos dos pluviômetros, foram também recolhidas as informações de temperatura, no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tanto os dados de precipitação, quando os de temperatura, tratam-se de registros históricos mensais desses fenômenos. O período de 1989 a 2018 (30 anos) foi considerado nesse estudo, referente a 50 municípios, com 27 deles efetivamente

pertencentes à região hidrográfica do Paraguaçu e com o restante se localizando no seu entorno, utilizados apenas com o propósito da interpolação espacial das informações.

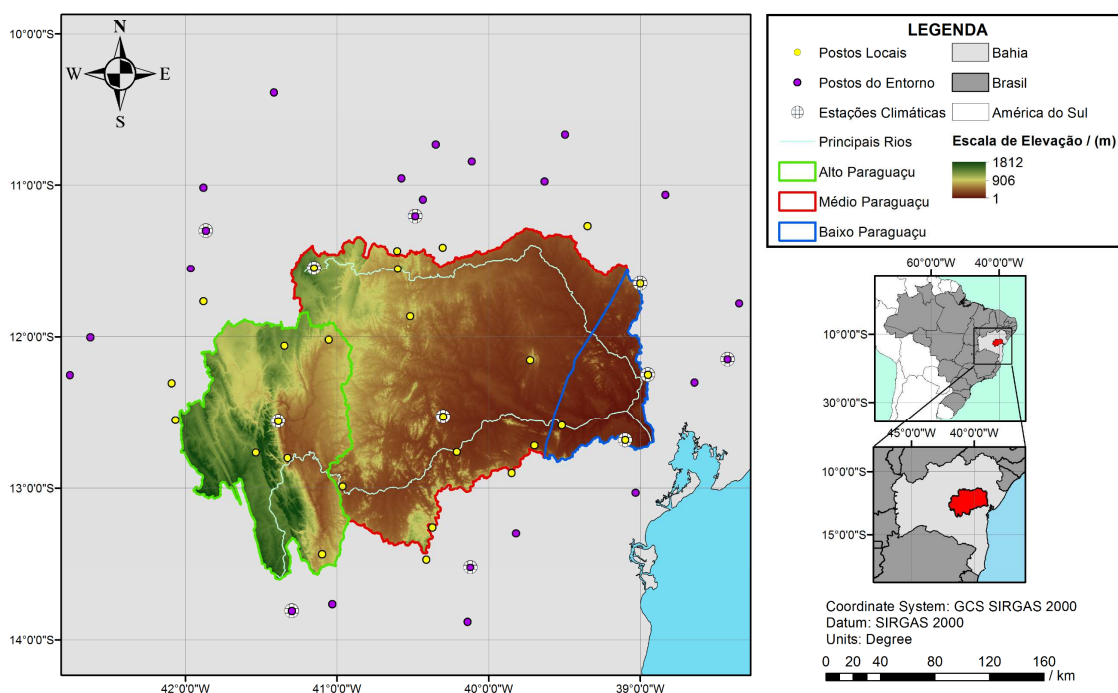


Figura 11 - Localização, divisões, hidrografia e escala de elevação da área de estudo, identificando as estações pluviométricas e climáticas (Autor, 2020)

Associado ao uso de séries temporais de dados meteorológicos, pode haver a necessidade do preenchimento de possíveis lacunas, para que elas possam ser utilizadas como dados de entrada em outros modelos (ZAPATA-SIERRA et al., 2019). Para ambas series históricas, de precipitação e de temperatura, o preenchimento das falhas foi feito com o auxílio da ferramenta geoestatística da krigagem, que considera a correlação espacial (MEDEIROS et al., 2019). A homogeneidade das séries pós-preenchimento das falhas também foi avaliada, com o auxílio do pacote RHtest, que usa a linguagem R e foi elaborado por Wang (2008a, 2008b), servindo para testar a significância dos pontos de mudança e harmonizar o conjunto de dados.

Como o BHC leva em consideração o fluxo da água no solo, foram coletados registros, a partir de amostragens locais, da textura predominante do solo nos municípios estudados ou em algum limítrofe, para aqueles com dados inexistentes. Essas informações estão disponibilizadas na plataforma online “SISolos” ou Sistema de Informação de Solos Brasileiros, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

### 2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A obtenção dos dados completos de temperatura para todos os municípios antecedeu os cálculos da evapotranspiração potencial. Baseado nas séries históricas das 11 estações climáticas, as temperaturas médias de cada mês do período foram interpoladas para as demais localidades desse estudo, com o auxílio do programa ArcGIS, versão 10.5, 2016.

Devido à baixa densidade de pontos de monitoramento térmico, métodos de interpolação determinísticos tendem a apresentar menores erros de estimativa (MARTINS et al., 2019). Portanto, foi adotado o método do Inverso da Distância Ponderada (IDP), que é amplamente utilizado para estimar dados ausentes no campo das ciências geográficas (CHEN et al., 2017).

A performance dessa interpolação foi avaliada a partir da Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), cuja expressão de cálculo está apresentada na Equação 8, onde:  $N$  é o número de comparações;  $p_i$  é o valor estimado; e  $o_i$  é o valor observado. A REQM é um fator estatístico que favorece a compreensão dos desvios obtidos através do modelo, sendo empregada em outros estudos para avaliar a performance da interpolação da temperatura (MUSASHI et al., 2018; XU et al., 2018).

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2} \quad (8)$$

A partir das séries históricas de temperatura média, foi adotada a metodologia de Thornthwaite (1948) para a estimativa da Evapotranspiração Potencial (ETP), visto que a mesma já é indicada para o cálculo do BHC (THORNTWHAITE; MATHER, 1955). Apesar de existirem métodos que melhor se adaptam a um clima específico, a intenção foi reduzir o erro associado a estimativa de muitas variáveis nos municípios que não possuem dados climáticos robustos.

O modelo proposto por Thornthwaite (1948) foi baseado no balanço hídrico através de medições diretas com lisímetros e lida apenas com a temperatura como variável de entrada. O cálculo da evapotranspiração potencial segue as Equações 9 e 10, onde:  $T_n$  é a temperatura média mensal, em °C;  $J$  é o índice de calor; e  $a$  é um parâmetro derivado do índice de calor.

$$ETP = 16 \times \left( \frac{10 \times T_n}{J} \right)^a \quad (9)$$

$$J = \sum_{n=1}^{12} \left( \frac{T_n}{5} \right)^{1,514} \quad (10)$$

## 2.4 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

Para estimar o BHC, adotou-se o método sugerido por Thornthwaite e Mather (1955), visando uma abordagem sequencial, que considera todos os meses do período estudado, em detrimento do uso de médias mensais que representem toda série histórica. Segundo Matos et al. (2020), nesse modelo, os ganhos hídricos do solo são representados pela precipitação e as perdas pela evapotranspiração. A quantidade que ultrapasse ou falte para atingir a capacidade do solo torna-se excedente ou deficiência hídrica, respectivamente.

A Capacidade de Água Disponível (CAD) de cada município foi estimada, a partir das características físicas do solo. Para tanto, utilizou-se a Equação 11, considerando que: *CC* é a capacidade de campo; *PMP* é o ponto de murcha permanente;  $\rho$  é a densidade; e *d* é a profundidade do solo. A Tabela 5 apresenta o valor desses parâmetros físico-hídricos a partir da classificação da textura do solo.

$$CAD = \frac{(CC - PMP) \times \rho \times d}{10} \quad (11)$$

Tabela 5 - Parâmetros físicos e hidráulicos de solos de acordo com sua classificação de textura

<b>Textura do Solo</b>	<b>Densidade do Solo</b>	<b>Capacidade de Campo</b>	<b>Ponto de Murcha Permanente</b>
	/ (g/cm <sup>3</sup> )	/ (%)	/ (%)
Arenoso	1,65	9	4
Franco Arenoso	1,50	14	6
Franco	1,40	22	10
Franco Argiloso	1,35	27	13
Silte Argiloso	1,30	31	15
Argiloso	1,25	35	17

Fonte: Adaptado de Vermeiren e Jobling, 1980

A profundidade do solo foi considerada a mesma em todos municípios, sendo equivalente à altura média do sistema radicular do cultivo mais comum da região hidrográfica, as hortaliças, que representam cerca de 55,5 % das áreas onde se pratica a agricultura irrigada, segundo Jesus e Moraes (2016). Contabilizando pequenos vegetais, raízes, tubérculos e legumes, a profundidade radicular média das hortaliças fica em torno de 66 cm, com base em um manual da Sociedade Americana de Engenheiros Civis - ASCE (JENSEN; ALLEN, 2016).

Baseado em três variáveis de entrada, que são a Precipitação (P), a Evapotranspiração Potencial (ETP) e a Capacidade de Água Disponível (CAD), a aplicação do método de Thornthwaite e Mather (1955) resulta em outras variáveis interdependentes, que são: a diferença entre Precipitação e Evapotranspiração Potencial (P-ETP); o Negativo Acumulado (NEG.AC); o Armazenamento de água no

solo (ARM); a Alteração de umidade do solo (ALT); a Evapotranspiração Real (ETR); a Deficiência Hídrica (DEF); e o Excedente Hídrico (EXC).

Para esse estudo, foram elaborados mapas das médias anuais para *P*, *ETP*, *P-ETP* e *ARM*, bem como das médias sazonais para *DEF* e *EXC*. A espacialização foi feita com o ArcGIS, versão 10.5, 2016, utilizando a Krigagem Exponencial, que apresenta melhor desempenho, dentre as técnicas geoestatísticas, na interpolação de parâmetros do BHC (CECÍLIO et al., 2012; CASTRO et al., 2016).

Considerou-se ainda o Índice de Aridez (IA), representado pela relação entre precipitação e evapotranspiração potencial (Equação 12). Esse índice serve para conjecturar anomalias climáticas e foi similarmente aplicado em outros estudos climatológicos (VIEIRA et al., 2015; TSIROS et al., 2020).

$$IA = \frac{P}{ETP} \quad (12)$$

A Tabela 6 apresenta a classificação do grau de susceptibilidade a desertificação a partir dos valores assumidos pelo Índice de Aridez. As médias do IA também foram mapeadas na área de estudo, assim como feito por Umar e Yusuf (2019). No Paraguaçu, a delimitação das áreas susceptíveis a desertificação é muito relevante, uma vez que os pontos críticos dessa anomalia no Brasil localizam-se no semiárido do Nordeste (VIEIRA et al., 2015).

Tabela 6 - Classificação de suscetibilidade à desertificação com base no IA

<b>Classe de Suscetibilidade</b>	<b>Tipologia Climática</b>	<b>Variação do IA</b>
Baixa	Úmida	Acima de 0,65
Moderada	Subúmida	0,50 a 0,65
Alta	Semiárida	0,20 a 0,50
Muito Alta	Árida	Abaixo de 0,20

Fonte: Adaptado de UNEP, 1992 e Vieira et al., 2015

## 2.5 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

As variáveis médias mensais de entrada e saída do BHC foram avaliadas por meio da ACP. Esse é um dos métodos de análise multivariada e tem como objetivo a transformação de *p* variáveis correlacionadas ( $X_1, X_2, \dots, X_p$ ) em outras *i* variáveis não correlacionadas, os componentes principais, que devem explicar a variância dos dados originais, sendo *p* igual a *i*. Os primeiros componentes principais já são suficientes para representar a maior variância, reduzindo assim a dimensionalidade do problema (PRADO et al., 2016).

Os componentes principais são combinações lineares das variáveis originais e podem ser definidos seguindo os passos elencados por Shaharudin et al. (2018): a

elaboração da matriz de correlação ( $R$ ) das variáveis de entrada; o cálculo dos autovetores de  $R$ , que definem os componentes principais; o cálculo dos autovalores de  $R$ , que definem a contribuição de cada componente; e a seleção e análise dos componentes mais importantes, com base na porcentagem acumulada da variância total, que deve indicar pelo menos 70 % da variabilidade dos dados (PRADO et al., 2016).

Os componentes principais devem ser ordenados de maneira decrescente de acordo com a contribuição para variância ( $CP_1, CP_2, \dots, CP_i$ ). Algebricamente eles podem ser representados pela Equação 13, onde a variação dos componentes são os autovetores e os pesos,  $a_{ij}$ , são os autovalores da matriz de correlação (OLSEN et al., 2012). O processamento dos dados para a ACP foi realizado com o auxílio do programa RStudio, versão 1.1.463, 2018.

$$CP_i = a_{i1} \cdot X_1 + a_{i2} \cdot X_2 + \dots + a_{ip} \cdot X_p = \sum_{j=1}^p a_{ij} \cdot X_j \quad (13)$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O interpolador determinístico IDP, na estimação da temperatura média anual, atingiu uma REQM média de 1,62 °C. Essa estimativa mostrou-se adequada para a região do Paraguaçu, visto que a REQM calculada assumiu um valor intermediário, em relação aos já encontrados por outros autores que utilizaram o mesmo método de espacialização: 0,56 °C, por Vicente-Serrano et al. (2003); 1,22 °C, por Musashi et al. (2018); e 2,64 °C, por Xu et al. (2018).

A Figura 12 apresenta a espacialização da temperatura anual média no Paraguaçu, após a estimativa para os pontos sem dados. Observa-se que a temperatura decresce no sentido Leste-Oeste, partindo de médias mais altas no baixo Paraguaçu para mais baixas no alto Paraguaçu, com destaque para um ponto que centraliza a mais baixa temperatura da região. Trata-se do município de Morro do Chapéu, com temperatura média de 20,65 °C no período de estudo. Como indica Macedo (2013), isso pode ser reflexo do relevo, uma vez que essa localidade possui altitude elevada, superior à 1000 m.

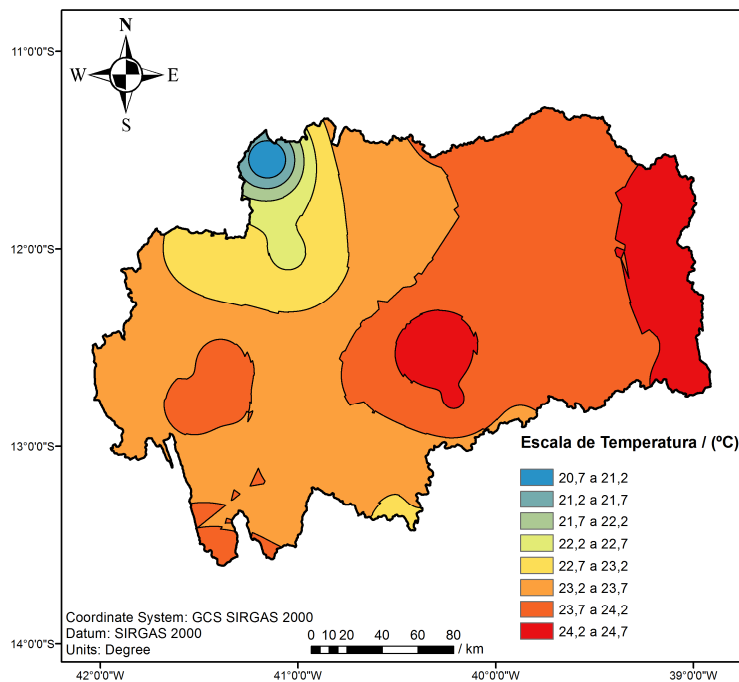


Figura 12 - Interpoção da temperatura média anual (de 1989 a 2018), pelo método IDP, para a região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020)

As precipitações e temperaturas médias mensais de cada divisão geográfica da região estão representadas na Figura 13. Quanto a distribuição das chuvas, o alto e o médio Paraguaçu apresentam um período chuvoso entre novembro e abril, abrangendo as estações da primavera e do verão. No baixo Paraguaçu, o comportamento é oposto, com o período chuvoso situado entre abril e julho, época que contempla o outono e parte do inverno. Esse comportamento já foi definido por Souza e Nascimento (2021, no prelo).

Ao contrário da precipitação, as temperaturas médias nas três divisões manifestaram o mesmo padrão de comportamento, sendo maiores na primavera e no verão e menores no outono e no inverno. A amplitude máxima entre os meses é bem semelhante: 3,8 °C no alto; 4,2 °C no médio; e 3,3 °C no baixo Paraguaçu. A temperatura média foi 23,4 °C, 23,5 °C e 24,3 °C no alto, médio e baixo Paraguaçu, respectivamente. Apesar de distintos, esses valores não caracterizam uma variação significativa, conforme afirmam Nugroho et al. (2019), que também encontraram diferenças termais de aproximadamente 1 °C entre regiões adjacentes de uma mesma bacia.

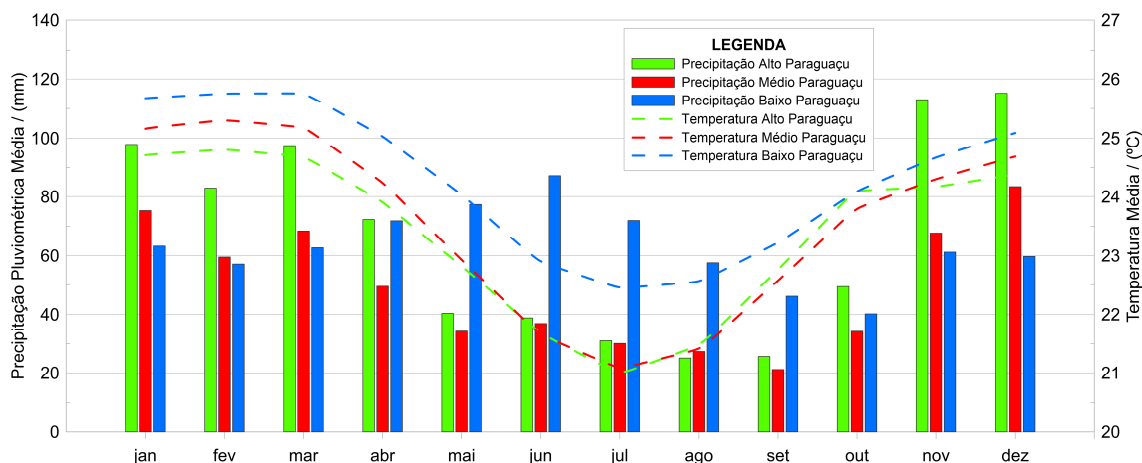


Figura 13 - Precipitações e temperaturas médias mensais para cada divisão da região hidrográfica do Paraguaçu (1989 a 2018). As barras verticais indicam a precipitação mensal, enquanto as linhas representam a temperatura média (Autor, 2020)

De acordo com a variação interanual do balanço hídrico sequencial (Figura 14), pode ser observado o predomínio da deficiência hídrica de maneira geral, uma vez que a região hidrográfica inteira apresenta um acumulado médio de 606 mm para os déficits e de 60 mm para os excedentes hídricos. É possível notar que as alterações de água no solo (reposições e retiradas) não foram expressivas, uma vez que suas médias não ultrapassaram os 20 mm nas três sub-regiões. Essas alterações supõem um equilíbrio, pois as médias positivas e negativas são próximas, como também pode ser observado nos resultados do BHC de Schmidt et al. (2018) e Medeiros et al. (2018).

No alto Paraguaçu (Figura 14a), o excedente médio chega a 100 mm, devido à alta pluviosidade combinada com temperaturas mais amenas em alguns pontos na Chapada Diamantina. A deficiência média chega a 500 mm, ficando abaixo da média da região hidrográfica. A situação mais crítica se encontra no médio Paraguaçu (Figura 14b), que apresenta excedente médio de 42 mm mal distribuídos, uma vez que os maiores excessos estão concentrados nos anos de 1989, 1992 e 1997. A deficiência nessa divisão é a mais alta, 668 mm, que pode ser reflexo do clima semiárido. O baixo Paraguaçu (Figura 14c) apresenta um BHC intermediário, com uma deficiência de 584 mm e um excedente de 50 mm, pois apesar de uma média pluviométrica alta, essa sub-região apresenta as mais altas temperaturas.

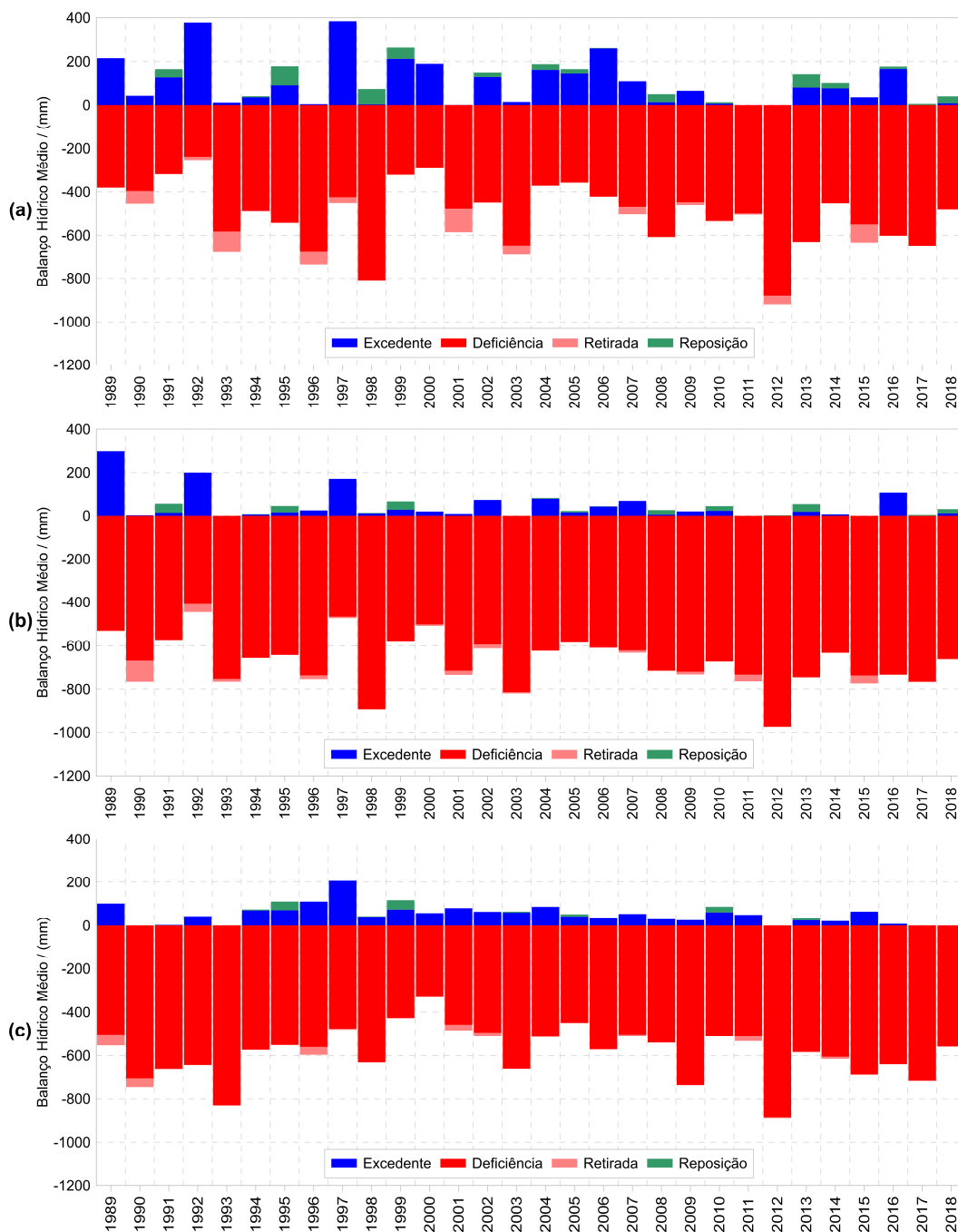


Figura 14 - Variação interanual dos excessos e déficits acumulados, decorrentes do BHC sequencial para alto (a), médio (b) e baixo (c) Paraguaçu (Autor, 2020)

Matos et al. (2020) avaliaram resultados semelhantes em outra região típica do Nordeste brasileiro, no ponto de vista do alerta para a deficiência hídrica média alta, recomendando-se certo grau de precaução com a gestão dos recursos hídricos, principalmente aqueles destinados à irrigação, uma vez que as áreas agricultáveis irão demandar, evidentemente, recursos suplementares aos providos naturalmente.

Os resultados do BHC mensal médio estão na Figura 15. No alto Paraguaçu (Figura 15a), o excedente médio fica em torno de 8 mm e se concentra mais no período

chuvoso, quando ocorre maior reposição de água no solo. A deficiência hídrica média é de 42 mm, sendo sutilmente elevada no período seco. O médio Paraguaçu (Figura 15b) quase não apresenta localidades com excesso hídrico significativo, sendo que, até nos períodos chuvosos, há uma ligeira concentração de déficit, cuja média é 56 mm. Em alguns meses no baixo Paraguaçu (Figura 15c), a redução dos déficits no período chuvoso é notável, mas os meses de menor pluviosidade e maior temperatura elevam o déficit hídrico médio para cerca de 49 mm.

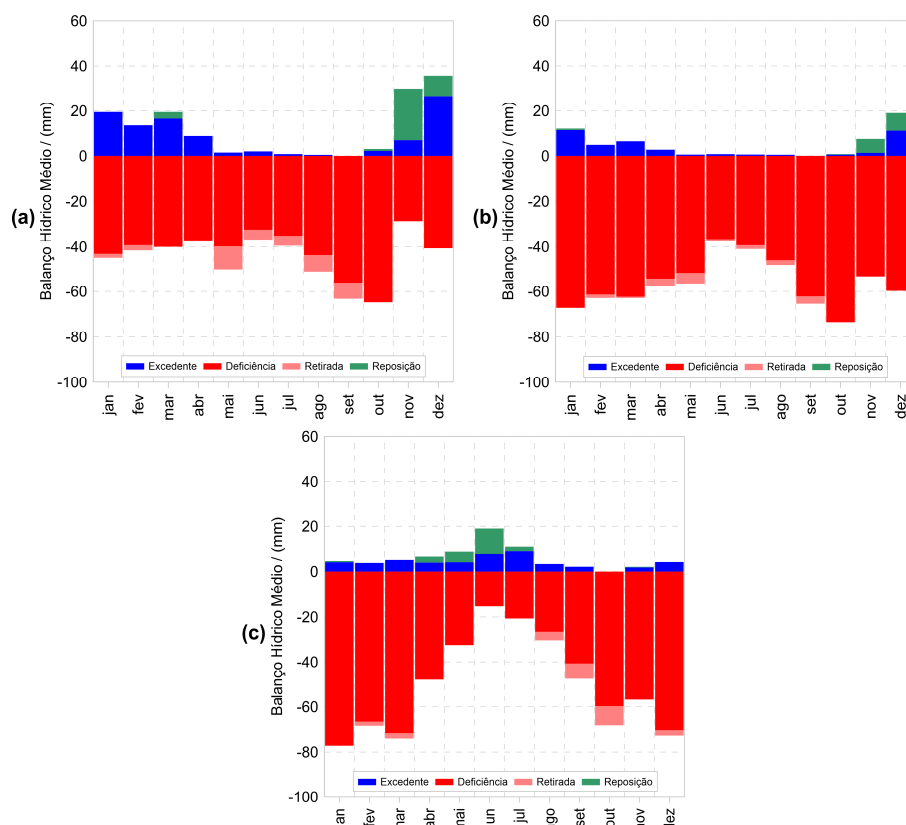


Figura 15 - Variação mensal dos excessos e déficits acumulados, decorrentes do BHC sequencial para alto (a), médio (b) e baixo (c) Paraguaçu (Autor, 2020)

A Figura 16a evidencia que as extremidades leste e oeste, a primeira mais próxima do oceano e a segunda de altitudes elevadas, apresentam os maiores índices de chuva anuais, acima de 700 mm. A parte central e semiárida é mais carente de chuvas, conforme já apontado por Souza e Nascimento (2021, no prelo). A evapotranspiração potencial (Figura 16b) atinge o pico máximo na porção central, onde localizam-se os pontos de maior temperatura do Paraguaçu. Alguns municípios do oeste, afastados do oceano e de altitude mais elevada, apresentam índices evapotranspirativos menores, comportamento também verificado por Cecílio et al. (2012), que atestaram a influência da maritimidade e do relevo sob a evapotranspiração.

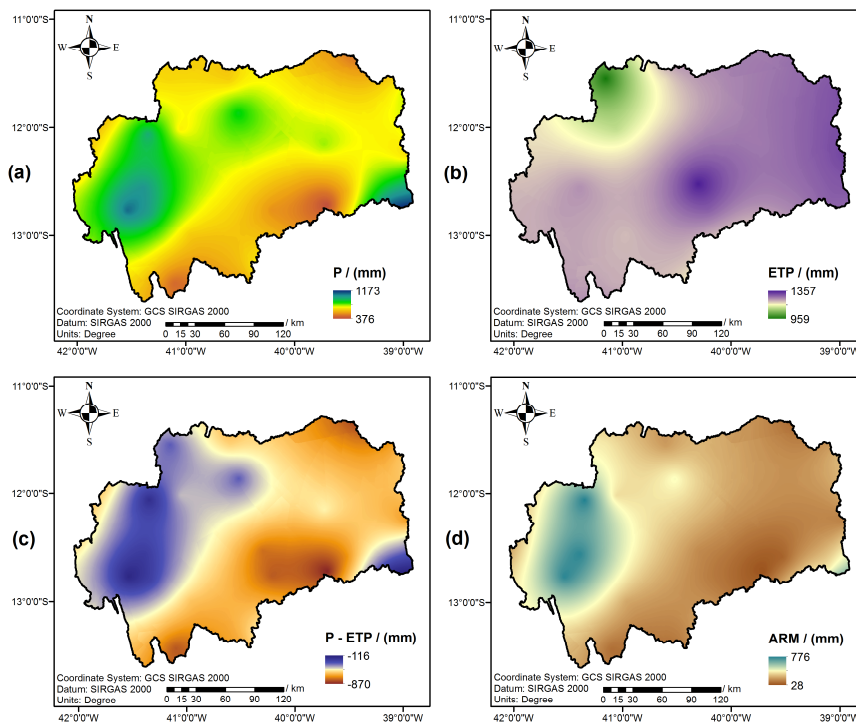


Figura 16 - Distribuição espacial das médias anuais (entre 1989 e 2018) de precipitação P (a), evapotranspiração potencial ETP (b), diferença P - ETP (c) e armazenamento de água ARM (d), que fazem parte do BHC na região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020)

O balanço anual entre precipitação e evapotranspiração (Figura 16c) não alcançou nenhum valor positivo, o que tende a prejudicar os excedentes e potencializar as deficiências hídricas. Esse índice é menor nos extremos do Paraguaçu, sendo que, a leste, a maior pluviosidade ameniza as altas temperaturas e, a oeste, as taxas pluviométricas elevadas se equilibram com menores taxas evapotranspirativas. A porção localizada no centro-sul chama mais atenção negativamente, pois altas temperaturas com baixos índices pluviométricos agravam a possibilidade de déficit hídrico, como já indicava a Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia - SEI (1999).

O armazenamento anual de água no solo (Figura 16d) é mais elevado no extremo oeste e a textura do solo exerce influência direta. O alto Paraguaçu (oeste) possui uma recorrência maior de solos argilosos, com maiores capacidades de armazenamento, enquanto o restante da região tem um armazenamento reduzido devido à maior presença de solos francos e arenosos. De maneira geral, esses resultados apresentaram coerência com os bancos de dados processados e mapeados, assim como no estudo de Prävãlie et al. (2019).

As Figuras 17 e 18 apresentam a espacialização sazonal dos excessos e das deficiências hídricas acumuladas no Paraguaçu. As Figuras 17a e 17d mostram um

verão e uma primavera com excedentes que superam a marca de 50 mm em pontos do alto Paraguaçu, sub-região onde essas estações são as mais chuvosas. Apesar da pluviosidade sazonal ser semelhante no médio Paraguaçu, as temperaturas elevadas e a distribuição irregular da chuva geram excedentes baixos ou nulos em quase todos os meses do ano, segundo a SEI (1999).

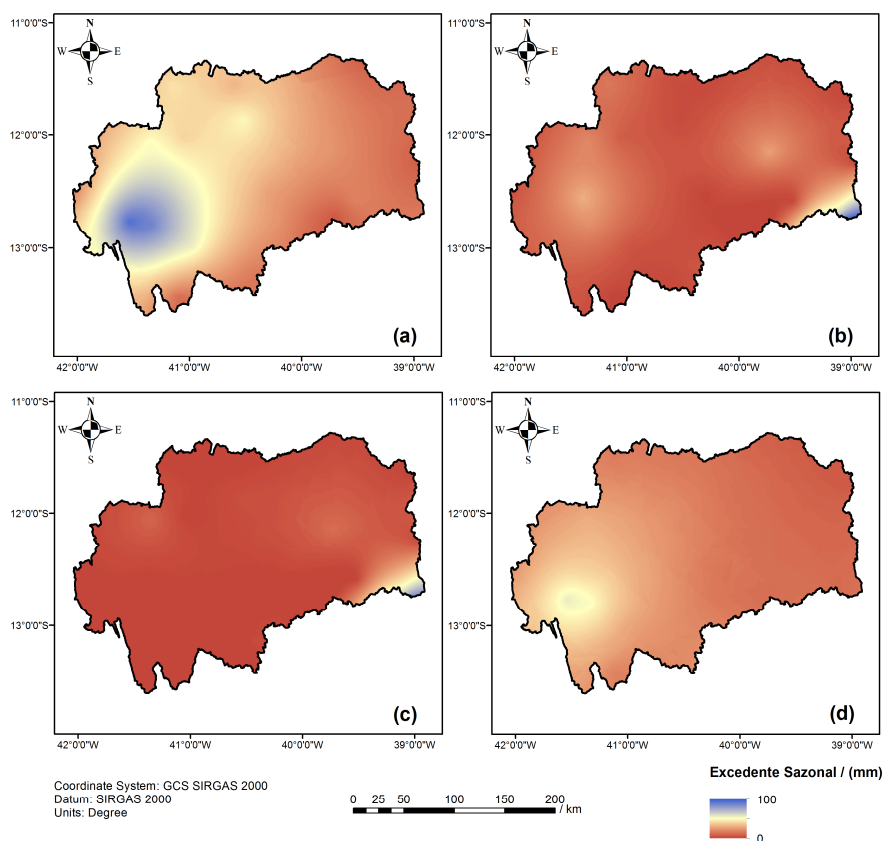


Figura 17 - Distribuição espacial e sazonal do excedente hídrico acumulado para a região hidrográfica do Paraguaçu, considerando as estações: verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d) (Autor, 2020)

No outono e no inverno (Figuras 17b e 17c), o comportamento dos excedentes é bem semelhante, com índices reduzidos praticamente em toda região hidrográfica, com a exceção de uma pequena parcela no extremo leste do baixo Paraguaçu, onde alguns pontos ultrapassam 55 mm. Essa sub-região integra o litoral baiano, onde os superávits hídricos são recorrentes ao longo do ano (SEI, 1999). A tendência de existirem menores excedentes onde a atividade evapotranspirativa é elevada, como apontam Cecílio et al. (2012), ocorre principalmente no médio Paraguaçu.

A Figura 18a ilustra que, no verão, há um decréscimo da deficiência hídrica do leste ao oeste, saindo de valores maiores que 210 mm no baixo Paraguaçu para valores inferiores a 105 mm na sub-região de maior altitude. O outono (Figura 18b) e o inverno (Figura 18c) podem ser consideradas estações mais amenas, por apresentarem déficits

intermediários (< 120 mm) em boa parte da região, exceto no centro-sul e no sudoeste, locais que ocorrem os mais negativos índices da diferença  $P-ETP$ , razão indicada por Fries et al. (2020) para a ocorrência de déficits durante o ano.

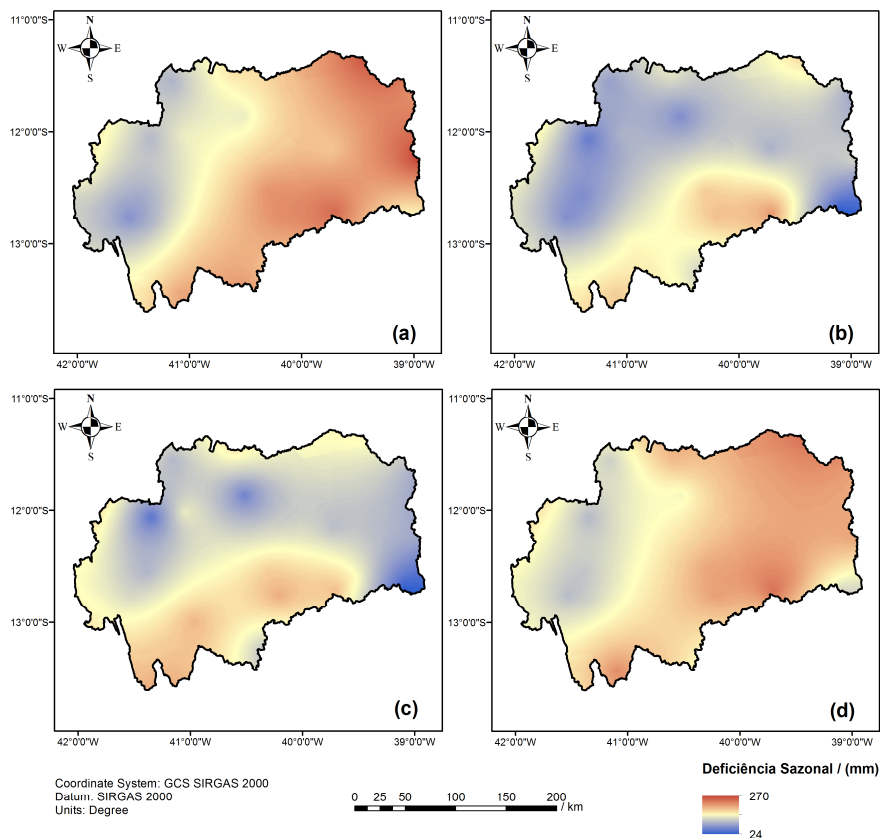


Figura 18 - Distribuição espacial e sazonal do déficit hídrico acumulado para a região hidrográfica do Paraguaçu, considerando as estações: verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d) (Autor, 2020)

Por fim, a primavera (Figura 18d) apresenta comportamento semelhante ao verão, salvo pela menor deficiência no extremo leste do Paraguaçu. Os mapas das deficiências hídricas indicaram a tendência de ocorrerem menores déficits nas áreas de maiores altitudes ou maiores índices pluviométricos, como também identificado nas espacializações de Cecílio et al. (2012).

A Figura 19 apresenta o mapeamento do Índice de Aridez médio, entre 1989 e 2018, no Paraguaçu. Observa-se que 23,3 % da área dessa região apresenta tipologia úmida e baixa susceptibilidade à desertificação, correspondendo justamente aos extremos leste e oeste, áreas de maiores excedentes e menores déficits. A maior parcela da região (54 %), que se estende ao longo de todo Paraguaçu, apresenta tipologia subúmida e susceptibilidade moderada, mesmo abrangendo parte do médio Paraguaçu cujo clima é considerado semiárido.

Os mais reduzidos Índices de Aridez, que indicam alta susceptibilidade à desertificação, ocorreram ao nordeste, centro-sul e sudoeste da região hidrográfica, com área equivalente igual a 22,7 %. Segundo Tsiros et al. (2020), essa condição de desertificação é intrinsecamente ligada à valores crescentes do déficit hídrico e decrescentes de excedentes. Outros estudos no semiárido nordestino já apontam para a existência de alta susceptibilidade desse processo de modificação ambiental e sua expansão está alinhada com o avanço de atividades antrópicas, como uso inadequado do solo e desmatamento indiscriminado (VIEIRA et al., 2015; LUCENA et al., 2018).

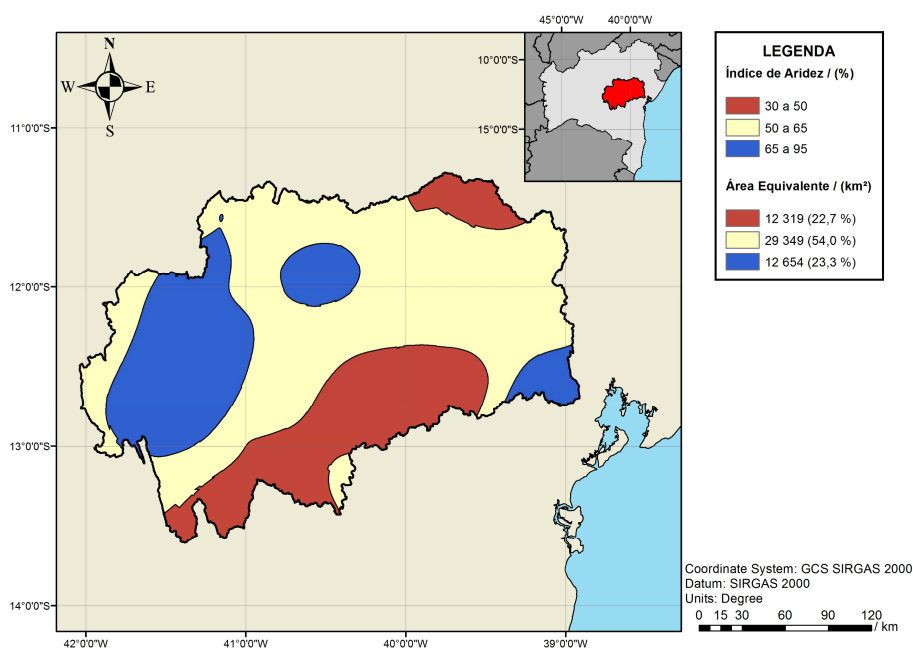


Figura 19 - Mapeamento do Índice de Aridez (IA) médio na região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020)

O nível de aridez, quando espacializado em diferentes períodos de tempo, pode ser utilizado para balizar as melhores épocas de plantio, conforme indicam Umar e Yusuf (2019). Porém, o presente estudo avaliou com propriedade quais localidades possuem boas e más condições de disponibilidade hídrica no território da região hidrográfica. Os processos de avanço da seca e consequente desertificação devem se tornar fator de preocupação no planejamento de recursos hídricos de alguns municípios no nordeste (Santaluz), centro-sul (Iaçu, Ipirá, Itaberaba e Itatim) e sudoeste do Paraguaçu (Iramaia e Itaetê).

O percentual da variância total dos dados de BHC, explicada pelas diferentes componentes principais, é apresentado na Figura 20. Cerca de 46,5 % da variância é explicada pelo primeiro componente principal (CP1). Juntos, CP1 e CP2 explicam uma variância acumulada de 72,1 %, superando o limite de 70 % que tornam esses componentes altamente explicativos para o sistema, segundo Prado et al. (2016).

Mesmo sem alcançar esse limite e aplicando a análise de sensibilidade, Olsen et al. (2012) verificaram que duas CPs já apresentam características não triviais.

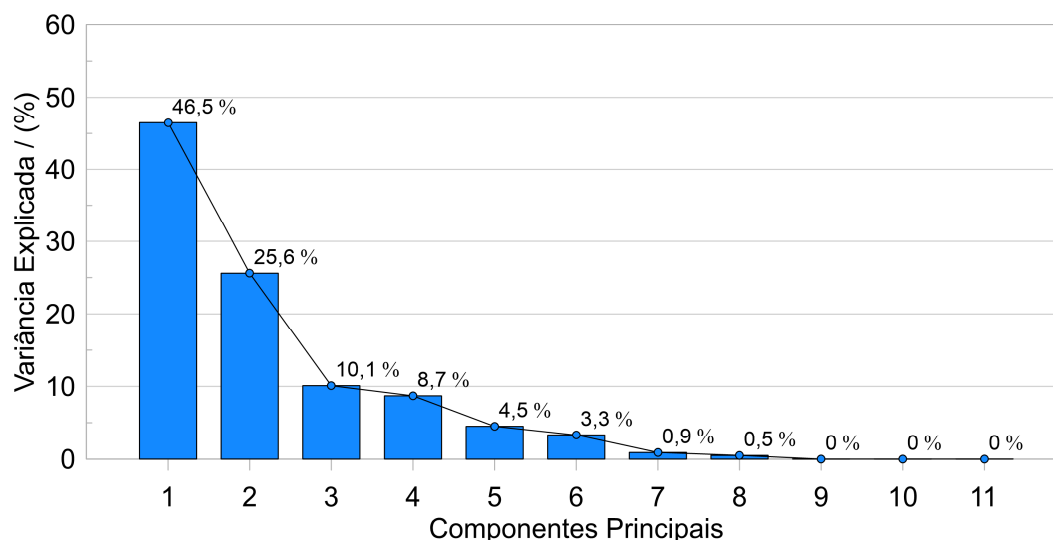


Figura 20 - Scree plot com a variância explicada pelos diferentes componentes principais do BHC (Autor, 2020)

Toda CP é descrita por um vetor carregamentos, correspondente às variáveis originais. Segundo Olsen et al. (2012), uma variável é importante para o processo quando possui carga alta, de módulo maior que 0,75, contribuindo de maneira direta (se positivo) ou inversa (se negativo). A Figura 21 exibe as cargas envolvidas no BHC da região do Paraguaçu através de um gráfico de barras para as componentes relevantes. As variáveis importantes na CP1 são: precipitação, diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial, armazenamento de água no solo, evapotranspiração real e excedente hídrico. Para a CP2, apenas a temperatura e a evapotranspiração potencial são mais impactantes.

Manandhar et al. (2018) demonstram que cada CP pode explicar um fenômeno único. Fortes carregamentos positivos de  $P$ ,  $P-ETP$ ,  $ARM$ ,  $ETR$  e  $EXC$  indicam maior aproximação da CP1 com climas úmidos, de maior disponibilidade hídrica, enquanto os carregamentos elevados de  $T$  e  $ETP$  indicam maior aproximação da CP2 com climas secos. Prado et al. (2016), através da ACP de diferentes variáveis meteorológicas, chegaram a mesma divisão de fenômenos, com CP1 representando clima úmido, devido às cargas elevadas em umidade relativa, precipitação e temperatura mínima e CP2 representando clima seco, com maiores contribuições de carregamento das temperaturas máximas e médias.

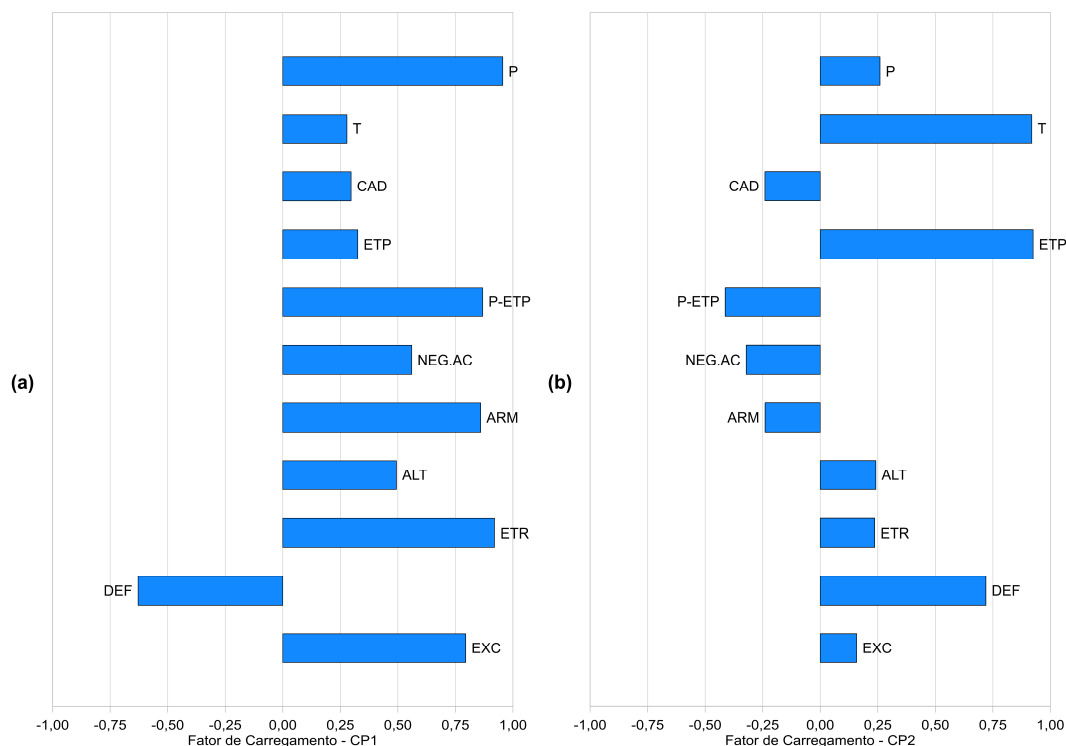


Figura 21 - Fatores de carregamento de CP1 e CP2 da ACP para o BHC da região hidrográfica do Paraguai. Notas: Precipitação (P); Evapotranspiração Potencial (ETP); Capacidade de Água Disponível (CAD); diferença entre Precipitação e Evapotranspiração Potencial (P-ETP); Negativo Acumulado (NEG.AC); Armazenamento de água no solo (ARM); Alteração de umidade do solo (ALT); Evapotranspiração Real (ETR); Déficit (DEF); e Excedente (EXC) (Autor, 2020)

O gráfico apresentado na Figura 22 apresenta vetores do carregamento associado a cada variável original, no plano cartesiano que representa o cruzamento entre CP1 e CP2. As cargas positivas da CP1 estão associadas com os vetores localizados nos primeiro e quarto quadrante, eixo positivo das abscissas. Por outro lado, o impacto positivo em CP2 está no primeiro e segundo quadrante, eixo positivo das ordenadas (PRADO et al., 2016).

Como ilustraram Manandhar et al. (2018), variáveis são positivamente correlacionadas quando apontam para o mesmo sentido e negativamente correlacionadas quando opostas. Portanto, percebe-se a relação positiva entre: *P*, *ETR* e *EXC*, quanto maior a precipitação, nota-se o aumento da evapotranspiração real e do excedente hídrico; *T* e *ETP*, quanto mais elevadas as temperaturas, maior será a evapotranspiração potencial; e *P-ETP* e *ARM*, quanto maior o balanço entre precipitação e evapotranspiração potencial, maior o armazenamento de água no solo. A relação negativa mais marcante é entre *P-ETP* e *DEF*, na qual os déficits hídricos são menores onde esse balanço inicial é maior.

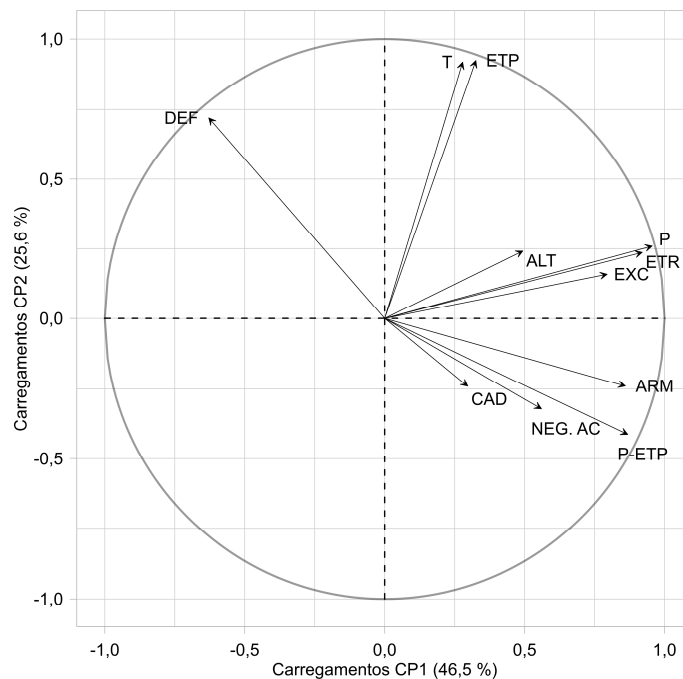


Figura 22 - Carregamentos CP1 versus CP2 da ACP para o BHC da região hidrográfica do Paraguaçu. Notas: Precipitação (P); Evapotranspiração Potencial (ETP); Capacidade de Água Disponível (CAD); diferença entre Precipitação e Evapotranspiração Potencial (P-ETP); Negativo Acumulado (NEG.AC); Armazenamento de água no solo (ARM); Alteração de umidade do solo (ALT); Evapotranspiração Real (ETR); Déficit (DEF); e Excedente (EXC) (Autor, 2020)

Na Figura 22, ainda é importante observar aquelas variáveis não representativas para o sistema, que são basicamente cálculos intermediários do modelo de Thornthwaite e Mather (1955) - o Negativo Acumulado e a Alteração de umidade do solo - ou uma variável de entrada no modelo - a Capacidade de Água Disponível. Por ser um dado de entrada, esperava-se que esse fator tivesse uma contribuição maior para a variância geral dos dados de balanço hídrico, o que não aconteceu, de fato. Esse pode ser o motivo de muitos estudos brasileiros adotarem 100 mm para o CAD (CECÍLIO et al., 2012; SCHMIDT et al., 2018; MATOS et al., 2020), independente da avaliação da textura do solo.

#### 4 CONCLUSÕES

A temperatura média na região hidrográfica do Paraguaçu decresce no sentido Leste-Oeste, com médias mais altas no litoral e mais baixas nos pontos de maior elevação, devido à influência do efeito orográfico no clima.

Anualmente, foi possível observar o predomínio da deficiência hídrica de maneira geral na região hidrográfica, com baixos e mal distribuídos valores para os excedentes hídricos, principalmente no médio Paraguaçu, sub-região afetada diretamente pelo clima semiárido.

As extremidades leste e oeste, pertencentes ao baixo e alto Paraguaçu, respectivamente, apresentaram os maiores índices pluviométricos e do balanço entre precipitação e evapotranspiração potencial, que deriva em excedentes consideráveis.

O centro-sul e o centro-norte da região, que fazem parte do médio Paraguaçu, apresentaram os maiores índices de evapotranspiração potencial e os menores de armazenamento de água no solo, resultando em excedentes praticamente nulos e deficiências altas em todas as estações do ano.

O índice de aridez aponta para a alta susceptibilidade à desertificação em cerca de 23 % da área da região hidrográfica, principalmente nas porções nordeste, centro-sul e sudoeste.

Apenas duas componentes principais foram necessárias para explicar a variância dos parâmetros de BHC no Paraguaçu. CP1 representou o clima úmido, devido às cargas elevadas de *P*, *P-ETP*, *ARM*, *ETR* e *EXC*, enquanto CP2 representou o clima seco, com maiores contribuições de carregamento de *T* e *ETP*.

## REFERÊNCIAS

- ALAMANOS, A.; LATINOPOULOS, D.; PAPAIOANNOU, G.; MYLOPOULOS, N. Integrated Hydro-Economic Modeling for Sustainable Water Resources Management in Data-Scarce Areas: The Case of Lake Karla Watershed in Greece. **Water Resources Management**, v. 33, n. 8, p. 2775-2790, 2019.
- AL-SUDANI, H. I. Z. Estimation of Water Balance in Iraq using Meteorological Data. **International Journal of Recent Engineering Science**, v. 6, n. 5, p. 8-13, 2019.
- AMAMRA, A.; KHANCHOUL, K. Water Quality Of The Kebir Watershed, Northeast Of Algeria. **Journal Clean WAS**, v. 3, n. 1, p. 28-32, 2019.
- BANDOC, G.; PRĂVĂLIE, R. Climatic water balance dynamics over the last five decades in Romania's most arid region, Dobrogea. **Journal of Geographical Sciences**, v. 25, n. 11, p. 1307-1327, 2015.
- BROWN, D. P.; COMRIE, A. C. Spatial modeling of winter temperature and precipitation in Arizona and New Mexico, USA. **Climate Research**, v. 22, p. 115-128, 2002.
- CALDERON, H.; UHLENBROOK, S. Characterizing the climatic water balance dynamics and different runoff components in a poorly gauged tropical forested catchment, Nicaragua. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 14, p. 2465-2480, 2016.
- CASTRO, F. S.; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; SPERANDIO, H. V. Interpolação dos parâmetros do balanço hídrico climatológico considerando diferentes capacidades de água disponível no solo. **Nucleus**, v. 13, n. 2, p. 209-222, 2016.

- CECÍLIO, R. A.; SILVA, K. R.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M. Método para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 478-488, 2012.
- CHEN, T.; REN, L.; YUAN, F.; YANG, X.; JIANG, S.; TANG, T.; LIU, X.; ZHAO, C.; ZHANG, L. Comparison of Spatial Interpolation Schemes for Rainfall Data and Application in Hydrological Modeling. **Water**, v. 9, n. 5, p. 342, 2017.
- CHENG, M.; WANG, Y.; ENGEL, B.; ZHANG, W.; PENG, H.; CHEN, X.; XIA, H. Performance Assessment of Spatial Interpolation of Precipitation for Hydrological Process Simulation in the Three Gorges Basin. **Water**, v. 9, n. 11, p. 838, 2017.
- FASHAE, O. A.; OBATERU, R. O.; OLUSOLA, O. A. A Simple Distributed Water Balance Model for an Urbanized River Basin using Remote Sensing and GIS Techniques. **Geocarto International**, p. 1-22, 2019.
- FRIES, A.; SILVA, K.; PUCHA-COFREP, F.; OÑATE-VALDIVIESO, F.; OCHOA-CUEVA, P. Water Balance and Soil Moisture Deficit of Different Vegetation Units under Semiarid Conditions in the Andes of Southern Ecuador. **Climate**, v. 8, n. 2, p. 30, 2020.
- GLEICK, P. H. Climate change, exponential curves, water resources, and unprecedented threats to humanity. **Climatic Change**, v. 100, n. 1, p. 125-129, 2010.
- GOMES, D. J. C.; LIMA, A. M. M.; FERREIRA, N. S.; SERRÃO, E. A. O. Variabilidade espaço-temporal da precipitação: bacia hidrográfica do Rio Madeira. **Revista Geografia Acadêmica**, v. 13, n. 1, p. 90-104, 2019.
- GONÇALVES, M. J. de S. **Gestão quantitativa das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu no estado da Bahia - Brasil**. Salvador, 2014, 168 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia.
- JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G. (Ed.). **Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements**. American Society of Civil Engineers, 2016. 744 p.
- JESUS, M. F. C.; MORAIS, J. O. R. Políticas públicas para revitalização de bacias hidrográficas: O caso do Paraguaçu. In: LAMAS, I. R.; RITA, L. S.; MIRANDA, R. M. (Orgs.). **Semeando Águas no Paraguaçu**. Rio de Janeiro: Conservação Internacional, 2016. p. 37-47.
- LIAS, S. A.; IRMAYANI; LABAN, S. The potential of water availability in Maros Watershed using Thornthwaite-Mather water balance method. In: **Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, v. 486, n. 1, p. 012135, 2020.

- LUCENA, R. L.; CABRAL JR., J. B.; STEINKE, E. T. Comportamento Hidroclimatológico do Estado do Rio Grande do Norte e do Município de Caicó. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 485-496, 2018.
- MACEDO, M. J. H. **Aplicações de redes neurais artificiais e satélite TRMM na modelagem chuva-vazão da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu/BA**. Campina Grande, 2013, 109 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande.
- MANANDHAR, S.; DEV, S.; LEE, Y. H.; WINKLER, S.; MENG, Y. S. Systematic study of weather variables for rainfall detection. In: **IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IEEE, p. 3027-3030, 2018.
- MARTINS, A. P.; ALVES, W. S.; DAMASCENO, C. E. Avaliação de métodos de interpolação para espacialização de dados de temperatura do ar na bacia do rio Paranaíba – Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 15, v. 25, p. 444-463, 2019.
- MATOS, R. M.; SILVA, P. F.; MEDEIROS, R. M.; SANTOS, B. D. B.; BARROS, A. S.; DANTAS NETO, J.; SABOYA, L. M. F. Balanço hídrico climatológico normal e sequencial para o município de Barbalha - CE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 973-982, 2020.
- MAURYA, S. P.; SINGH, P. K.; OHRI, A.; SINGH, R. Identification of indicators for sustainable urban water development planning. **Ecological Indicators**, v. 108, p. 105691, 2020.
- MEDEIROS, R. M.; HOLANDA, R. M.; VILAR, H. N. Climate change in Tacaimbó-PE, Brazil. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 60-66, 2018.
- MEDEIROS, E. S.; LIMA, R. R.; OLINDA, R. A.; DANTAS, L. G.; SANTOS, C. A. C. Space–Time Kriging of Precipitation: Modeling the Large-Scale Variation with Model GAMLSS. **Water**, v. 11, n. 11, p. 2368, 2019.
- MUSASHI, J. P.; PRAMOEDYO, H.; FITRIANI, R. Comparison of inverse distance weighted and natural neighbor interpolation method at air temperature data in Malang Region. **Cauchy**, v. 5, n. 2, p. 48-54, 2018.
- NUGROHO, A. R.; TAMAGAWA, I.; RIANDRASWARI, A.; FEBRIANTI, T. Thornthwaite-Mather water balance analysis in Tambakbayan watershed, Yogyakarta, Indonesia. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, v. 280, p. 05007, 2019.
- OLSEN, R. L.; CHAPPELL, R. W.; LOFTIS, J. C. Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis e literature

- review and Illinois River watershed case study. **Water Research**, v. 46, n. 9, p. 3110-3122, 2012.
- PALTINEANU, C. R.; MIHAILESCU, I. F.; PREFAC, Z.; DRAGOTA, C.; VASENCIUC, F.; CLAUDIA, N. Combining the standardized precipitation index and climatic water deficit in characterizing droughts: a case study in Romania. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 97, n. 3-4, p. 219, 2009.
- PEDRO-MONZONÍS, M.; SOLERA, A.; FERRER, J.; ESTRELA, T.; PAREDES-ARQUIOLA, J. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 482-493, 2015.
- PRADO, B. Q. M.; FERNANDES, H. R.; ARAÚJO, T. G.; LAIA, G. A.; BIASE, N. G. Avaliação de variáveis climatológicas da cidade de Uberlândia (MG) por meio da análise de componentes principais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 407-413, 2016.
- PRĂVĂLIE, R.; PITICAR, A.; ROȘCA, B.; SFÎCĂ, L.; BANDOC, G.; TISCOVSCHI, A.; PATRICHE, C. Spatio-temporal changes of the climatic water balance in Romania as a response to precipitation and reference evapotranspiration trends during 1961-2013. **Catena**, v. 172, p. 295-312, 2019.
- RAZIEI, T. A precipitation regionalization and regime for Iran based on multivariate analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 131, n. 3-4, p. 1429-1448, 2018.
- SCHMIDT, D. M.; LIMA, K. C.; JESUS, E. S. Variabilidade climática da disponibilidade hídrica na região semiárida do estado do Rio Grande do Norte. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 41, n. 3, p. 483-491, 2018.
- SHAHARUDIN, S. M.; AHMAD, N.; ZAINUDDIN, N. H.; MOHAMED, N. S. Identification of Rainfall Patterns on Hydrological Simulation Using Robust Principal Component Analysis. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 11, n. 3, p. 1162-1167, 2018.
- SOUZA, T. S.; NASCIMENTO, P. S. Spatial and temporal variability of pluviometric precipitation in the Hydrographic Region of Paraguaçu - BA. **Revista Cerrados (Unimontes)**, 2021. No prelo.
- SUBEDI, M. R.; XI, W.; EDGAR, C. B.; RIDEOUT-HANZAK, S.; HEDQUIST, B. C. Assessment of geostatistical methods for spatiotemporal analysis of drought patterns in East Texas, USA. **Spatial Information Research**, v. 27, n. 1, p. 11-21, 2019.
- SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA - SEI. **Balanco hídrico do estado da Bahia**. Salvador: SEI, 1999. 250 p.

- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.
- TSIROS, I. X.; NASTOS, P.; PROUTSOS, N. D.; TSAOUSIDIS, A. Variability of the aridity index and related drought parameters in Greece using climatological data over the last century (1900–1997). **Atmospheric Research**, v. 240, p. 104914, 2020.
- UMAR, R.; YUSUF, M. Determination of the Growing Season for Dry Land Agriculture Based on Thornthwaite Method in Bulukumba Regency, South Sulawesi Province. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, v. 1244, n. 1, p. 012032, 2019.
- UNEP. **World Atlas of Desertification**. Edward Arnold, London, 1992. 69 p.
- VERBOIS, H.; HUVA, R.; RUSYDI, A.; WALSH, W. Solar irradiance forecasting in the tropics using numerical weather prediction and statistical learning. **Solar Energy**, v. 162, p. 265-277, 2018.
- VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Localized Irrigation: Design, Installation, Operation, Evaluation**. FAO - Irrigation and Drainage, 1980, n. 36. 203 p.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; SAZ-SÁNCHEZ, M. A.; CUADRAT, J. M. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. **Climate research**, v. 24, n. 2, p. 161-180, 2003.
- VIEIRA, R. M. S. P. et al. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, n. 1, p. 347-360, 2015.
- WANG, X. L. Accounting for autocorrelation in detecting mean-shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 47, n. 9, p. 2423-2444, 2008a.
- WANG, X. L. Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean shifts without trend-change. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 25, n. 3, p. 368-384, 2008b.
- XU, C.; WANG, J.; LI, Q. A new method for temperature spatial interpolation based on sparse historical stations. **Journal of Climate**, v. 31, n. 5, p. 1757-1770, 2018.
- ZAPATA-SIERRA, A. J.; CAMA-PINTO, A.; MONTOYA, F. G.; ALCAYDE, A.; MANZANO-AGUGLIARO, F. Wind missing data arrangement using wavelet based techniques for getting maximum likelihood. **Energy Conversion and Management**, v. 185, p. 552-561, 2019.

**CAPÍTULO 4 - TENDÊNCIAS DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E DO  
BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO  
PARAGUAÇU - BA**

---

## **CAPÍTULO 4 - TENDÊNCIAS DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO PARAGUAÇU - BA**

---

Submetido ao periódico Journal of Hydrologic Engineering

### **Resumo**

Em dados hidroclimáticos, a análise de tendências é essencial no desenvolvimento da gestão dos recursos hídricos, pois ela pode visionar mudanças no padrão de comportamento, auxiliando na elaboração de estratégias para adaptação diante das mudanças climáticas eminentes. Esse estudo objetivou a averiguação da presença de possíveis tendências anuais e sazonais da precipitação pluviométrica e do balanço hídrico climatológico na região hidrográfica do Paraguaçu - BA. A partir das séries históricas de precipitação, deficiência e excedentes hídricos, compreendidas entre 1989 e 2018, foram conduzidos dois cenários de análise: o primeiro para verificação das tendências anuais e sazonais de cada posto, através dos métodos tradicionais de Mann-Kendall (MK) e do estimador de Sen; e o segundo para cada sub-região do Paraguaçu, através da comparação de MK com a Análise de Tendência Inovadora (ATI). Os resultados das séries anuais, independente da metodologia adotada, apontam para tendências negativas na precipitação pluviométrica, positivas no déficit e negativas no excedente hídrico. Sazonalmente, nas estações do outono e do inverno, consideradas secas de maneira geral, ocorreram mais tendências de crescimento das chuvas e de decréscimo da deficiência hídrica. Comparando-se os modelos de MK e ATI, foi constatado que os mesmos apresentam resultados semelhantes para indicação das tendências nas sub-regiões do Paraguaçu, embora a ATI tenha apresentado uma quantidade superior de tendências significativas.

**Palavras-chave:** Déficit Hídrico, Excedente Hídrico, Significância da Tendência, Mann-Kendall, Análise de Tendência Inovadora

### **TRENDS IN PLUVIOMETRIC PRECIPITATION AND CLIMATIC WATER BALANCE IN THE HYDROGRAPHIC REGION OF PARAGUAÇU - BA**

### **Abstract**

Trend analysis of hydroclimatic data is essential in the development of water resources management, as it can envisage changes in the pattern of behavior, helping in the development of strategies for adaptation in the face of imminent climate change. This

study aimed to investigate the presence of possible annual and seasonal trends in rainfall and climatological water balance in the hydrographic region of Paraguaçu - BA. From the historical series of precipitation, deficit and water surplus, between 1989 and 2018, two analysis scenarios were conducted: the first to verify the annual and seasonal trends of each station, using the traditional Mann-Kendall (MK) methods and Sen's estimator; and the second for each sub-region of Paraguaçu, by comparing MK with the Innovative Trend Analysis (ITA). The results of the annual series, regardless of the methodology adopted, point to negative trends in rainfall, positive trends in deficit and negative trends in water surplus. Seasonally, in the autumn and winter seasons, generally considered to be drought period, there were more trends of increasing rainfall and decreasing water deficit. A comparison between the MK and ITA models showed that both have similar results for indicating trends in the sub-regions of Paraguaçu, although the ITA has shown a higher number of significant trends.

**Keywords:** Water Deficit, Water Surplus, Trend Significance, Mann-Kendall, Innovative Trend Analysis

## 1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global tem se configurado como um potencial agente de alterações ambientais e climatológicas. A intensificação do aumento da temperatura média no planeta é responsável por mudanças consideráveis no ciclo hidrológico, que vão desde a recorrência de eventos meteorológicos extremos até a aceleração do metabolismo das plantas (WANG et al., 2016; MOHAMMADI et al., 2017; PRÄVÄLIE et al., 2019). Assim, os cenários de variabilidade climática se acentuam progressivamente, sendo representados através de grandes contrastes entre períodos secos e úmidos e da ocorrência de fenômenos com menor previsibilidade (GIORGI et al., 2019).

Nesse sentido, a análise de tendência aplicada em séries temporais tem sido uma ferramenta muito útil na compreensão das mudanças climáticas e dos seus efeitos sobre o ambiente e o homem (PHUONG et al., 2019; ALIFUJIANG et al., 2020). Essa inspeção dos dados históricos climáticos tem a intenção de investigar as ocorrências passadas para projetar cenários futuros, sinalizando as possíveis modificações (PAUL et al., 2017). A análise de tendência possibilita uma boa visão geral do comportamento das variáveis climáticas ao longo do tempo (TEHRANI et al., 2019). Tendências da precipitação pluvial e do balanço hídrico podem afetar a disponibilidade hídrica, vital para realização das atividades antrópicas (ANAND et al., 2018; PRÄVÄLIE et al., 2019).

A boa interpretação das tendências nos padrões de parâmetros hidrológicos pode exercer um papel essencial no desenvolvimento e na gestão dos recursos hídricos, principalmente quando tendências significativas são detectadas (THOMAS; PRASANNAKUMAR, 2016; TOSUNOGLU; KISI, 2016). No âmbito de região hidrográfica, um planejamento apropriado deve prezar por boas estratégias de adaptação e mitigação frente às mudanças climáticas e pela utilização ótima dos recursos hídricos (CHANDNIHA et al., 2017; ASFAW et al., 2018; KHAN et al., 2019; ALIFUJIANG et al., 2020). Esse tipo de gerenciamento se faz necessário nos limites da região do Paraguaçu, uma vez que a recorrência de déficits hídricos e a má distribuição dos excedentes hídricos podem potencializar os problemas de acesso à água (SOUZA; NASCIMENTO, 2020).

Segundo Şen (2017) e Mrad et al. (2018), nas últimas três décadas, as pesquisas de tendência em dados hidroclimáticos tem se baseado amplamente na análise clássica de Mann-Kendall (MK) (MANN, 1945; KENDALL, 1975), em conjunto com o teste de inclinação de Sen (SEN, 1968). Ambos métodos podem ser aplicados em séries históricas de diferentes categorias de parâmetros climáticos. Asfaw et al. (2018) investigaram a tendência da precipitação e da temperatura na Etiópia. Ali et al. (2019) abordaram as vazões de longo prazo, enquanto Wang et al. (2019) priorizaram a evapotranspiração de referência na China. Právǎlie et al. (2019) deram ênfase às tendências que afetam as séries de Balanço Hídrico Climatológico (BHC) na Romênia. As avaliações de tendência ainda podem abranger índices de seca como o Índice de Precipitação Padronizada (IPP) (AZAM et al., 2018) e até mesmo séries históricas de altura de ondas (AYDOĞAN; AYAT, 2018).

Uma das limitações desses testes clássicos é avaliar a série de forma monotônica, sem considerar as tendências intrínsecas nos dados de baixo, médio e alto valor (CALOIERO et al., 2018; MALIK et al., 2019). Com esse intuito, Şen (2012) desenvolveu a Análise de Tendência Inovadora (ATI), que apresenta algumas outras vantagens frente aos métodos tradicionais e vem sendo empregada com sucesso em estudos recentes da geociência (KISI, 2015; CUI et al., 2017; WU; QUIAN, 2017; ZHOU et al., 2018; ALI et al., 2019; ALIFUJIANG et al., 2020; WANG et al., 2020). Contudo, a aplicação do jovem método ATI ainda carece de aperfeiçoamentos, havendo muitos pontos de desenvolvimento e discussão dentro da comunidade acadêmica (TOSUNOGLU; KISI, 2016).

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo averiguar a presença de possíveis tendências anuais e sazonais da precipitação pluviométrica e do balanço hídrico climatológico na região hidrográfica do Paraguaçu - BA, através da análise

espacial das magnitudes e significâncias de tendência e da comparação entre o método clássico de Mann-Kendall e a Análise de Tendência Inovadora.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A região hidrográfica do Paraguaçu (13° 36' S a 11° 17' S, 42° 2' W a 38° 55' W) possui o sistema fluvial mais importante do estado da Bahia, sendo composta por 86 municípios e possuindo uma área de 54322 km<sup>2</sup>. O rio Paraguaçu, curso d'água principal da região, é o manancial responsável pelo abastecimento hídrico de boa parte da capital Salvador e sua região metropolitana (SILVA et al., 2017). A Figura 23 apresenta a localização da região, suas três divisões geográficas, a localização dos principais rios, a variação de altitude e a localização das estações pluviométricas e climáticas consideradas nesse estudo.

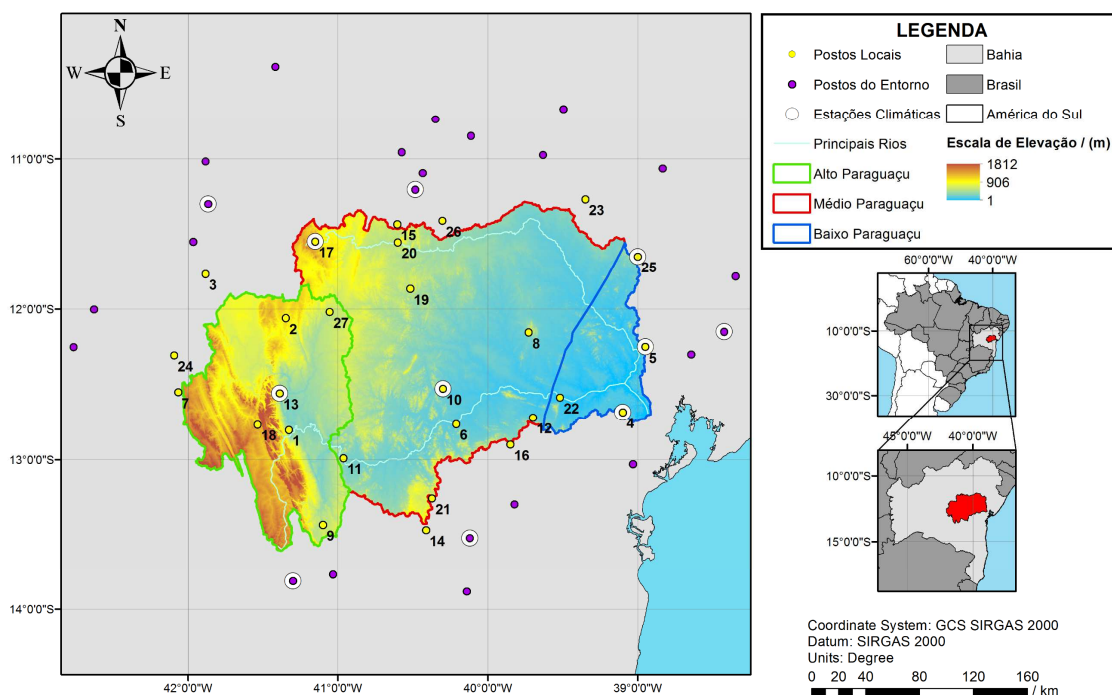


Figura 23 - Localização, divisões, hidrografia e escala de elevação da área de estudo, identificando as estações pluviométricas e climáticas (Autor, 2020)

O alto Paraguaçu é a divisão geográfica com elevadas altitudes, onde predomina o clima subúmido a seco, com eventos chuvosos superiores a 1000 mm por ano. O médio Paraguaçu é caracterizado pelo clima semiárido, característico de toda região hidrográfica, com índices pluviométricos anuais em torno de 650 mm. O baixo Paraguaçu é a divisão mais próxima do litoral, onde predomina o clima úmido a subúmido, com pontos que atingem 1250 mm anuais de chuva. A temperatura média da

região supera os 25 °C, com a exceção de algumas ilhas mesotérmicas na Chapada Diamantina, devido aos efeitos orográficos (MACEDO, 2013).

## 2.2 CONJUNTO DE DADOS

Os registros climatológicos coletados nesse estudo foram mensais no período de 1989 a 2018, contabilizando um total de 30 anos. Os 50 pontos identificados como estações pluviométricas apresentam dados de precipitação que foram coletados na plataforma “Hidroweb”, da Agência Nacional de Águas (ANA). Dentre eles, 27 são estações locais de municípios que fazem parte da região hidrográfica do Paraguaçu (Tabela 7), enquanto os demais 23 são pontos que estão no entorno da região hidrográfica, que serviram apenas com a finalidade da interpolação espacial das informações.

Tabela 7 - Dados das 27 estações situadas na região hidrográfica do Paraguaçu

ID	Município	Altitude / (m)	Latitude	Longitude
1	Andaraí	330	12° 48' 06" S	41° 19' 39" W
2	Bonito	962	12° 03' 36" S	41° 20' 51" W
3	Canarana	693	11° 46' 00" S	41° 53' 00" W
4	Cruz das Almas	226	12° 41' 00" S	39° 06' 00" W
5	Feira de Santana	231	12° 15' 00" S	38° 57' 00" W
6	Iaçú	237	12° 45' 44" S	40° 12' 39" W
7	Ibitiara	1098	12° 33' 00" S	42° 04' 00" W
8	Ipirá	350	12° 09' 16" S	39° 43' 38" W
9	Iramaia	590	13° 26' 00" S	41° 06' 00" W
10	Itaberaba	250	12° 31' 36" S	40° 17' 59" W
11	Itaetê	299	12° 59' 24" S	40° 57' 48" W
12	Itatim	260	12° 43' 10" S	39° 41' 57" W
13	Lençóis	439	12° 33' 26" S	41° 23' 19" W
14	Maracás	677	13° 28' 08" S	40° 24' 44" W
15	Miguel Calmon	562	11° 25' 57" S	40° 36' 16" W
16	Milagres	395	12° 54' 00" S	39° 51' 00" W
17	Morro do Chapéu	1003	11° 32' 51" S	41° 09' 05" W
18	Mucugê	870	12° 45' 59" S	41° 32' 10" W
19	Mundo Novo	515	11° 51' 56" S	40° 31' 04" W
20	Piritiba	508	11° 33' 12" S	40° 36' 00" W
21	Planaltino	723	13° 15' 27" S	40° 22' 21" W
22	Rafael Jambeiro	159	12° 35' 06" S	39° 31' 06" W
23	Santaluz	349	11° 16' 00" S	39° 21' 00" W
24	Seabra	1033	12° 18' 22" S	42° 05' 31" W
25	Serrinha	360	11° 39' 00" S	39° 00' 00" W
26	Serrolândia	380	11° 24' 38" S	40° 18' 13" W
27	Utinga	511	12° 01' 10" S	41° 03' 17" W

Fonte: ANA, 2019. Organizado pelo autor, 2020

Os 11 pontos sinalizados como estações climáticas, além dos dados pluviométricos, também apresentam dados de temperatura utilizados no cálculo do BHC, coletados no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Baseado nessas séries de temperatura,

as demais localidades desse estudo tiveram suas médias mensais estimadas a partir de interpolação com o modelo Inverso da Distância Ponderada (IDP). Esse modelo determinístico é o que apresenta melhor desempenho de modelagem da temperatura para uma densidade relativamente baixa de estações climáticas (HADI; TOMBUL, 2018).

O preenchimento de falhas das séries históricas foi realizado com o auxílio do interpolador geoestatístico da krigagem, que considera a correlação espacial e reproduz boas estimativas (MEDEIROS et al., 2019; BRUBACHER et al., 2020). Além disso, a homogeneidade das séries também foi avaliada, mediante o uso do pacote RHtest, elaborado por Wang (2008a, 2008b), programa que contém testes estatísticos que verificam a significância dos pontos de mudança dentro da série, identificam os ruídos temporais e harmonizam o novo conjunto de dados.

### 2.3 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

A estimativa do BHC seguiu o modelo de Thornthwaite e Mather (1955) com a abordagem sequencial, que pondera todos os meses do período em estudo. As demais considerações foram descritas por Souza e Nascimento (2020) e tratam do cálculo da evapotranspiração potencial e da capacidade de armazenamento de água do solo para cada município. Segundo Muniz Jr. et al. (2020), nesse modelo, a entrada de água é a precipitação, enquanto a evapotranspiração representa a saída. A quantidade de água que ultrapassa ou falta para atingir a capacidade do solo torna-se excesso ou déficit hídrico, respectivamente.

Num primeiro cenário, a análise de tendência (abordagem clássica) foi realizada sobre as séries históricas anual e sazonal de cada município inserido no Paraguaçu para três variáveis distintas: a precipitação pluviométrica, dado de entrada no método de Thornthwaite e Mather (1955); o excesso hídrico; e o déficit hídrico, esses últimos representando duas das principais variáveis interdependentes geradas no cálculo do BHC. A série histórica anual média de cada divisão da região hidrográfica estudada compõe o segundo cenário da análise de tendência, que consistiu na comparação do teste de Mann-Kendall com a Análise de Tendência Inovadora.

### 2.4 TESTE DE MANN-KENDALL

O modelo estatístico de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) é amplamente utilizado em estudos de tendências em dados hidroclimáticos (CALOIERO et al., 2018; AZAM et al., 2018). Aplica-se bem pelo fato de ser um método sequencial e não paramétrico, que elimina o pressuposto da distribuição normal dos dados

(PHUONG et al., 2019). Cada valor da série deve ser comparado com os valores seguintes, definindo-se a estatística  $S_{MK}$  apresentada nas Equações 14 e 15, onde  $n$  é o comprimento do conjunto de dados e  $x_i$  e  $x_j$  representam os valores nos tempos  $i$  e  $j$ .

$$S_{MK} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (14)$$

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

Segundo Phuong et al. (2019), quando a série tem uma quantidade de dados maior ou igual a 10, a estatística  $S_{MK}$  se aproxima de uma distribuição normal com média nula e variância definida pela Equação 16, onde  $m$  é o número de grupos empatados na série temporal e  $t$  é o número de empates na extensão  $k$ .

$$\text{Var}(S_{MK}) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^m t_k(t_k-1)(2t_k+5)]}{18} \quad (16)$$

Finalmente, a estatística de teste  $Z_{MK}$  pode ser calculada, seguindo a Equação 17. Esse parâmetro tem a função de indicar se a tendência é crescente (valor positivo) ou decrescente (valor negativo) e se ela é significativa a certo nível de confiança.

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S_{MK} - 1}{\sqrt{\text{Var}(S_{MK})}}, & \text{se } S_{MK} > 0 \\ 0, & \text{se } S_{MK} = 0 \\ \frac{S_{MK} + 1}{\sqrt{\text{Var}(S_{MK})}}, & \text{se } S_{MK} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

No presente trabalho, foi adotado um nível de significância de 5%, com um valor  $Z$  limite de 1,96 para a significância, seguindo a tabela de distribuição cumulativa normal padrão. Para cada município do Paraguaçu, os resultados obtidos para o teste MK foram apresentados através de mapas que retratam o posicionamento geográfico das tendências de maneira visual, como já registrado em estudos do gênero (DENG et al., 2018; PHUONG et al., 2019; PRĂVĂLIE et al., 2019; WANG et al., 2020).

## 2.5 ESTIMADOR DE INCLINAÇÃO DE SEN

O método de Sen (1968) tem acompanhado a aplicação do teste MK, acrescentando a ideia de magnitude às tendências, por meio da determinação da inclinação entre os pontos consecutivos de dados. Como apresenta a Equação 18, o fator da inclinação de Sen ( $\beta$ ) é a mediana de todas as inclinações ao longo de todo período.

$$\beta = med\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (18)$$

As respostas obtidas para a magnitude das tendências foram obtidas nos 50 municípios (pertencentes ao limite e no entorno da região hidrográfica do Paraguaçu), uma vez que foram apresentadas através da distribuição espacial com o auxílio da interpolação, semelhante ao realizado em outros estudos (AYDOĞAN; AYAT, 2018; AZAM et al., 2018; DENG et al., 2018). Para tanto, adotou-se o método determinístico IDP, utilizado na espacialização de diferentes resultados estatísticos de tendência (PHUONG et al., 2019; SHARMA; SINGH, 2019; TEHRANI et al., 2019).

## 2.6 ANÁLISE DE TENDÊNCIA INOVADORA

O conceito introduzido por Şen (2012) consiste inicialmente na divisão da série temporal em duas partes iguais. As duas subséries são organizadas em ordem crescente e plotadas no plano Cartesiano, sendo que a primeira metade dos dados se localiza no eixo X e a segunda metade no eixo Y. A dispersão dos dados deve ser comparada com a linha 1:1 (45°), sendo que a tendência é crescente se os pontos ficam acima da linha 1:1 e decrescente quando ficam abaixo. Nesse gráfico, ainda foram apresentadas duas bandas de confiança, que representam a diferença de  $\pm 10\%$  da média geral dos dados (TOSUNOGLU; KISI, 2016), com a finalidade de ajudar o leitor a captar melhor a variação entre os pontos da dispersão e a linha sem tendência, não configurando implicações estatísticas (ALIFUJIANG et al., 2020).

A significância da tendência verificada pela ATI é avaliada segundo a metodologia proposta por Şen (2017), que consiste na comparação da inclinação da reta que representa os pontos dispersos com limites de confiança determinados com base no desvio padrão da inclinação de amostragem e na correlação dos dados. Seguindo a Equação 19, a inclinação  $s$  da tendência pode ser calculada, considerando que  $\bar{y}_1$  e  $\bar{y}_2$  são os valores médios da primeira e segunda metade da série, respectivamente. Valores de  $s$  positivos indicam tendência geral de crescimento, enquanto os valores negativos indicam decrescimento (MALIK et al., 2019).

$$s = \frac{2(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)}{n} \quad (19)$$

O desvio padrão da inclinação de amostragem ( $\sigma_s$ ) calcula-se baseado na Equação 20, onde:  $\sigma$  é o desvio padrão da série histórica e  $\rho_{\bar{y}_1\bar{y}_2}$  é o coeficiente de correlação entre as duas subséries ordenadas de forma crescente.

$$\sigma_s = \frac{2\sqrt{2}}{n\sqrt{n}} \sigma \sqrt{1 - \rho_{\bar{y}_1\bar{y}_2}} \quad (20)$$

Segundo Zhou et al. (2018), na aplicação do ATI considera-se, como critério de significância, a função densidade de probabilidade Gaussiana de média nula e desvio padrão  $\sigma_s$ , sendo que o limite ( $s_{cri}$ ) continua seguindo a tabela de distribuição normal e depende do nível de significância. Assim, os limites de confiança superior e inferior da inclinação da ATI (LC) são determinados através da Equação 21.

$$LC_{(1-\alpha)} = 0 \pm s_{cri}\sigma_s \quad (21)$$

Nessa etapa da análise, também foi adotado o nível de significância de 5 %, com um valor para  $s_{cri}$  igual a 1,96. Dessa forma, a inclinação da tendência de cada série passa a ter seu próprio limite de confiança, que ao ser ultrapassado, indica a aceitação da hipótese alternativa do teste estatístico, apontando a tendência significativa.

O método ATI apresenta algumas vantagens frente aos métodos tradicionais, tais como: permitir a inspeção visual das tendências, gerando novas interpretações; admitir a possibilidade de existência de subtendências nos valores baixos, médios e altos da série; ser um modelo de cálculo de simples compreensão; e não ser influenciado pelo tamanho da série temporal (KISI, 2015; WU; QUIAN, 2017; ZHOU et al., 2018; ALI et al., 2019).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As tendências na precipitação pluviométrica, na deficiência e no excedente hídrico pelo método tradicional de MK estão resumidas nas Tabelas 8 e 9. Os resultados apontam para a dominância de valores negativos na precipitação, positivos no déficit e negativos/nulos nos excessos hídricos, sendo tendências não significativas em sua grande maioria.

Alguns municípios apresentaram recorrência na significância da tendência para uma mesma variável em cenários distintos, como é o caso da precipitação pluviométrica e do déficit hídrico em Canarana (3), que exibiram tendências significativas em quatro dos cinco períodos analisados. A situação se repete com o déficit hídrico em Iramaia (9), que só não manifestou tendências significativas no outono. Mucugê (18) se destaca por apresentar tendências positivas significativas para o déficit hídrico em todos os períodos considerados, também com a exceção do outono. Recorrências desse tipo já foram verificadas em estudos de tendência anteriores, como em Zhou et al. (2018), que apreciam a valorização desse aspecto pelos órgãos de planejamento.

Tabela 8 - Valores de  $Z_{MK}$  para o teste de MK, considerando a precipitação anual (An) e sazonal do verão (Ve), outono (Ou), inverno (In) e primavera (Pr). Nota: \* Tendência significativa no nível de 5 %

ID da Estação	$Z_{MK}$ da Precipitação					ID da Estação	$Z_{MK}$ da Precipitação				
	An	Ve	Ou	In	Pr		An	Ve	Ou	In	Pr
1	-0,25	-0,14	1,07	0,37	-0,50	15	-0,82	-0,54	0,27	1,91	-0,73
2	-0,29	0,18	1,28	2,32*	-1,03	16	0,79	0,07	0,29	3,05*	-1,32
3	-2,03*	-2,89*	2,57*	3,31*	-1,71	17	-1,36	-0,36	-1,07	-0,11	-1,93
4	-0,29	1,37	0,89	0,29	-2,46*	18	-2,36*	-1,14	-1,00	-1,64	-2,32*
5	-0,04	1,53	1,39	-0,96	-1,36	19	-1,36	-0,61	0,18	-0,04	-0,25
6	-1,11	0,04	-1,36	-0,46	-1,36	20	-0,79	-0,86	-0,41	-1,82	-0,43
7	0,68	-2,64*	2,03*	3,62*	-1,16	21	-1,61	-0,75	0,07	-0,11	-1,75
8	-2,78*	-2,25*	-1,84	-1,28	-0,79	22	-1,21	0,11	-0,14	1,21	-1,07
9	-1,14	-1,53	0,43	4,26*	-1,57	23	-2,96*	-0,89	-1,16	-1,71	-2,39*
10	-1,68	-0,32	-0,82	-1,37	-1,50	24	-2,39*	-1,14	0,48	2,07*	-2,60*
11	-0,79	-0,25	0,46	-0,04	-0,45	25	-1,03	-0,46	0,04	-0,61	-0,23
12	-1,82	-1,39	-0,68	0,39	-2,68*	26	0,29	-0,07	1,86	1,34	-1,11
13	-0,14	1,00	0,50	-0,43	-1,14	27	-1,32	-0,32	-0,32	-0,93	-1,46
14	-1,62	-0,50	-0,82	-2,50*	0,43						

Fonte: Autor, 2020

Tabela 9 - Valores de  $Z_{MK}$  para o teste de MK, considerando a deficiência e o excedente hídrico anual (An) e sazonal do verão (Ve), outono (Ou), inverno (In) e primavera (Pr). Nota: \* Tendência significativa no nível de 5 %

ID da Estação	$Z_{MK}$ da Deficiência Hídrica					$Z_{MK}$ do Excedente Hídrico				
	An	Ve	Ou	In	Pr	An	Ve	Ou	In	Pr
1	0,21	0,66	-0,82	-0,18	0,96	-0,78	-0,27	0,38	0,00	-1,24
2	0,29	0,14	-0,89	-2,67*	0,41	-0,86	-0,56	0,26	0,77	-1,77
3	2,78*	3,25*	0,61	-2,46*	2,25*	-2,16*	-1,25	0,00	0,00	-1,58
4	-0,89	-2,07*	-1,16	1,32	1,46	-0,98	-0,52	0,05	-0,49	-1,41
5	0,64	0,79	-1,89	-0,07	2,18*	0,00	0,88	0,10	1,41	-1,58
6	1,82	0,00	1,18	1,03	2,00*	-0,80	-0,15	-0,69	0,00	-0,86
7	0,32	3,36*	-0,50	-3,21*	1,32	-2,79*	-1,31	-2,31*	0,00	-1,50
8	2,39*	2,86*	1,68	1,64	1,53	-2,70*	-0,52	-1,95	-2,11*	-1,62
9	2,89*	3,03*	-0,57	-3,68*	3,25*	-0,58	0,38	0,00	0,00	-1,62
10	1,82	0,54	0,68	1,78	1,86	-0,26	0,82	-0,69	0,00	-1,49
11	1,39	1,00	-0,61	-0,18	1,50	-0,51	0,00	0,00	0,00	-0,16
12	2,25*	1,07	1,14	1,86	3,07*	-1,33	-0,12	0,00	0,00	-1,62
13	0,89	0,84	-0,75	0,64	0,87	-0,67	-0,34	-0,26	0,00	-2,25*
14	2,25*	0,21	1,21	2,28*	1,53	0,52	-0,08	0,23	0,00	-0,17
15	0,68	0,98	0,86	-0,54	0,64	-0,99	0,00	-0,08	0,00	-1,31
16	0,00	0,79	0,29	-2,36*	1,57	-1,35	-0,33	0,00	0,00	-1,62
17	2,21*	1,00	0,82	1,64	1,39	-1,13	-0,17	-0,77	0,00	-1,94
18	3,39*	2,59*	1,75	2,18*	2,59*	-2,57*	-1,79	-0,07	0,00	-2,49*
19	1,61	1,03	0,52	0,93	0,89	-0,82	-1,04	-1,28	-0,70	-0,10
20	1,64	1,32	1,21	1,82	-0,11	-0,10	0,00	0,23	0,00	-0,28
21	1,03	0,50	-0,21	-0,18	1,89	-2,10*	-1,12	-0,33	1,04	-2,45*
22	1,28	0,32	0,00	0,32	1,11	-1,38	-0,06	-0,69	0,00	-1,91
23	3,25*	1,43	1,36	2,46*	1,96*	-1,16	0,00	0,00	0,00	-1,62
24	3,25*	2,82*	0,54	-1,28	2,96*	-1,77	-0,52	0,00	0,00	-1,61
25	0,54	0,57	-0,25	0,25	-0,36	0,15	0,15	0,00	0,00	0,00
26	-0,54	0,50	-1,21	-2,82*	-0,07	-0,26	0,39	0,00	0,00	-0,75
27	2,07*	2,14*	0,64	1,07	2,11*	-0,89	-0,15	0,52	0,00	-1,37

Fonte: Autor, 2020

Os resultados obtidos pelo teste MK e pelo estimador de inclinação de Sen foram representados geograficamente nas Figuras 24-27. A Figura 24 apresenta as tendências para as três variáveis anuais no período entre 1989 e 2018. Para a precipitação (Figura 24a), nota-se que a tendência de declínio do volume precipitado foi predominante em toda região hidrográfica, com magnitudes de redução de até 20 mm ao ano e com 3 pontos de tendência significativa no extremo oeste do alto Paraguaçu, localidade que exhibe índices pluviométricos elevados no período de estudo, segundo Souza e Nascimento (2021, no prelo). Essa tendência geral de diminuição das chuvas pode influenciar na ocorrência de eventuais secas, conforme indicam Wu e Quian (2017).

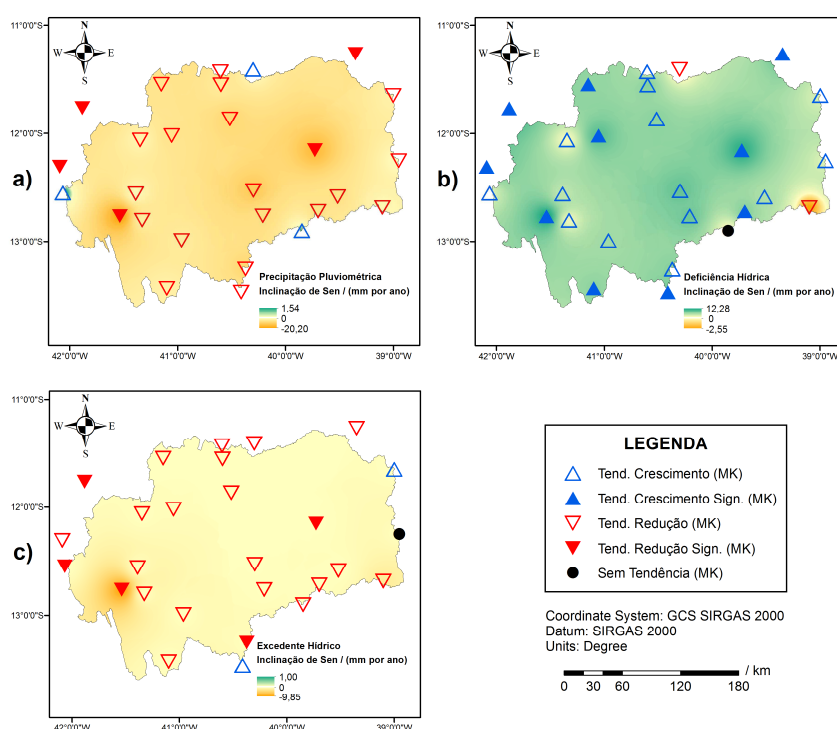


Figura 24 - Resultados da detecção de tendências nos dados anuais de precipitação pluviométrica, déficit hídrico e excedente hídrico, utilizando o teste de Mann-Kendall e estimador de declividade de Sen, na região hidrográfica do Paraguaçu (Autor, 2020)

A Figura 24b apresenta os resultados para o déficit hídrico e o cenário é inverso, observando-se a predominância de tendências de crescimento, em boa parte significativas. A deficiência hídrica é expressiva, de maneira geral, em toda região hidrográfica (SOUZA; NASCIMENTO, 2020) e o aumento desse indicador chega a 12 mm ao ano. Os excessos hídricos (Figura 24c) apresentaram quase sempre tendências de decréscimo, com taxa máxima de 10 mm anuais no município de Mucugê. A recorrência de valores iguais a zero nas séries temporais de excedentes resultou, ora na ausência de tendência pelo teste MK, ora na anulação da magnitude,

esse último retratado pela hegemonia da escala cromática intermediária nos mapas de excesso hídrico.

Previamente a análise das tendências sazonais, faz-se necessário ressaltar que o período chuvoso no alto e no médio Paraguaçu ocorre nas estações verão e primavera, enquanto, no baixo Paraguaçu, ocorre no outono e início do inverno. Os déficits crescem no sentido oeste-leste no verão e na primavera e nas demais estações são bem reduzidos, com exceção das porções centro-sul e sudoeste da região hidrográfica. Os excedentes são praticamente nulos ao longo de todo ano, exceto no verão e primavera do extremo oeste e no outono e inverno do extremo leste (SOUZA; NASCIMENTO, 2020, 2021, no prelo).

Na escala sazonal, as tendências da precipitação pluviométrica são essencialmente de diminuição no verão (Figura 25a) e na primavera (Figura 25d), estações chuvosas na maior parcela do Paraguaçu. O outono (Figura 25b) e o inverno (Figura 25c) apresentam mais pontos com tendência de aumento em relação às demais estações, com incrementos anuais que chegam a quase 6 mm. Esse comportamento de tendências negativas da precipitação durante o período úmido e positivas durante o período seco não é incomum, já sendo registrado nos estudos de Paul et al. (2017) e Phuong et al. (2019).

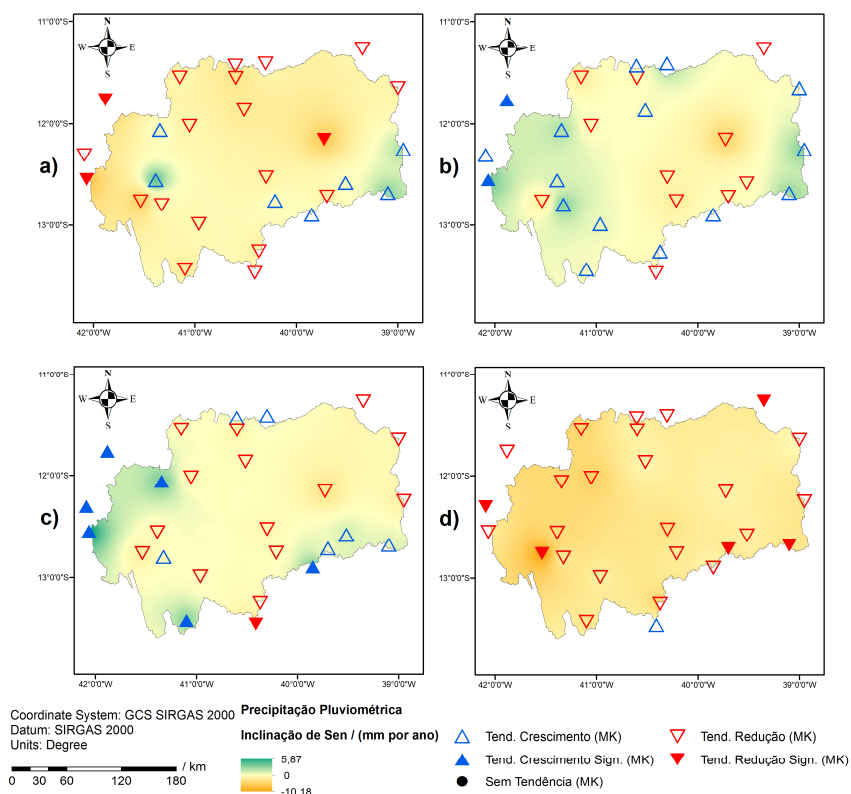


Figura 25 - Resultados da detecção de tendência nos dados sazonais de precipitação pluviométrica, usando o teste de Mann-Kendall e o estimador de inclinação de Sen, considerando as estações: verão (a); outono (b); inverno (c); e primavera (d) (Autor, 2020)

Os pontos de tendência positiva se concentraram em partes do alto e do baixo Paraguaçu, o primeiro de altitudes elevadas e o segundo de maior proximidade com o oceano, exatamente as especificidades geográficas, apontadas por Mrad et al. (2018), para manifestação de tendências positivas na precipitação. Ainda cabe destacar que são previstas reduções pluviométricas de até 10 mm anuais na primavera em praticamente toda região do Paraguaçu.

De maneira inversa, as tendências do déficit hídrico são essencialmente de aumento no verão (Figura 26a) e na primavera (Figura 26d), apesar dessa variável ser menos expressiva no alto Paraguaçu nessas estações. As estações do outono (Figura 26b) e inverno (Figura 26c), caracterizadas por déficits reduzidos ao longo de toda região hidrográfica, são as que apresentam mais pontos com tendência de diminuição da deficiência hídrica, principalmente no alto e no baixo Paraguaçu, com decréscimos anuais de até 5 mm.

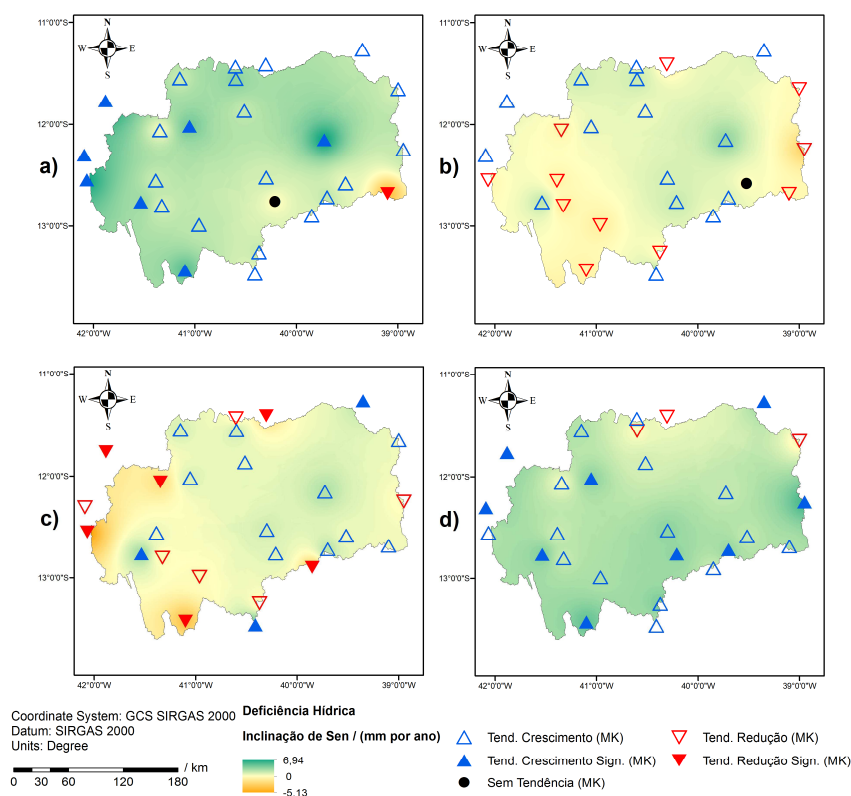


Figura 26 - Resultados da detecção de tendência nos dados sazonais de deficiência hídrica, usando o teste de Mann-Kendall e o estimador de inclinação de Sen, considerando as estações: verão (a); outono (b); inverno (c); e primavera (d) (Autor, 2020)

Ainda cabe destacar que apenas são previstas reduções significativas dos déficits no inverno e no extremo leste no período do verão, sendo observado um elevado número de tendências positivas significativas no verão e na primavera. A quantidade limitada de reduções estatisticamente significativas dos déficits indica que essas

localidades da região hidrográfica já experimentaram condições de secas severas nessa escala de tempo, segundo Prävälíe et al. (2019).

O principal reservatório da região hidrográfica é o de Pedra do Cavalo, que está localizado no baixo Paraguaçu, uma área afetada por tendências negativas de precipitação e positivas de deficiência hídrica apenas na primavera. Isso é interessante para manutenção das atividades que dependem desse reservatório, como o abastecimento das regiões metropolitanas de Feira de Santana e Salvador, a geração de energia elétrica e o controle de enchentes (SANTO; CARELLI, 2016).

Outros reservatórios no médio Paraguaçu devem ser afetados pelas tendências negativas da precipitação e positivas do déficit hídrico ao longo de todo ano, comprometendo a viabilidade dos usos múltiplos desenvolvidos na região, constituídos principalmente por agricultura, pastagens e regularização de vazão (SANTO; CARELLI, 2016). São preocupantes as tendências de redução das chuvas e aumento da deficiência no período chuvoso do alto Paraguaçu (verão e primavera), especialmente pelas recorrentes restrições no acesso à água, em virtude da poluição e do assoreamento de rios (MIRANDA et al., 2016).

O excedente se comporta de uma maneira peculiar, no que se refere às tendências. O verão (Figura 27a) e a primavera (Figura 27d), estações de elevados excessos hídricos no alto Paraguaçu, apresentam ligeiramente mais tendências de diminuição dessa variável, especialmente nessa sub-região. Por outro lado, no outono (Figura 27b) é indicada a previsão de aumento dos excessos em alguns pontos, inclusive do extremo leste, enquanto no inverno (Figura 27c) foi registado o maior número de pontos sem tendência alguma, em virtude da inexpressividade desse fenômeno do BHC nesse período.

Ainda cabe destacar que as magnitudes de tendência são menores que 1 mm ao ano, não sendo tão relevantes, o que deriva inclusive na escala cromática intermediária dos mapas, devido ao valor zero da maior parte dos estimadores de inclinação de Sen. Na região do Paraguaçu, a estação que contribui com quase 50 % do excedente hídrico anual é o verão, indicando que as tendências dessa estação guarda semelhança e têm um impacto direto nas tendências anuais dos excessos (Figura 24c), conforme ressaltam Azam et al. (2018).

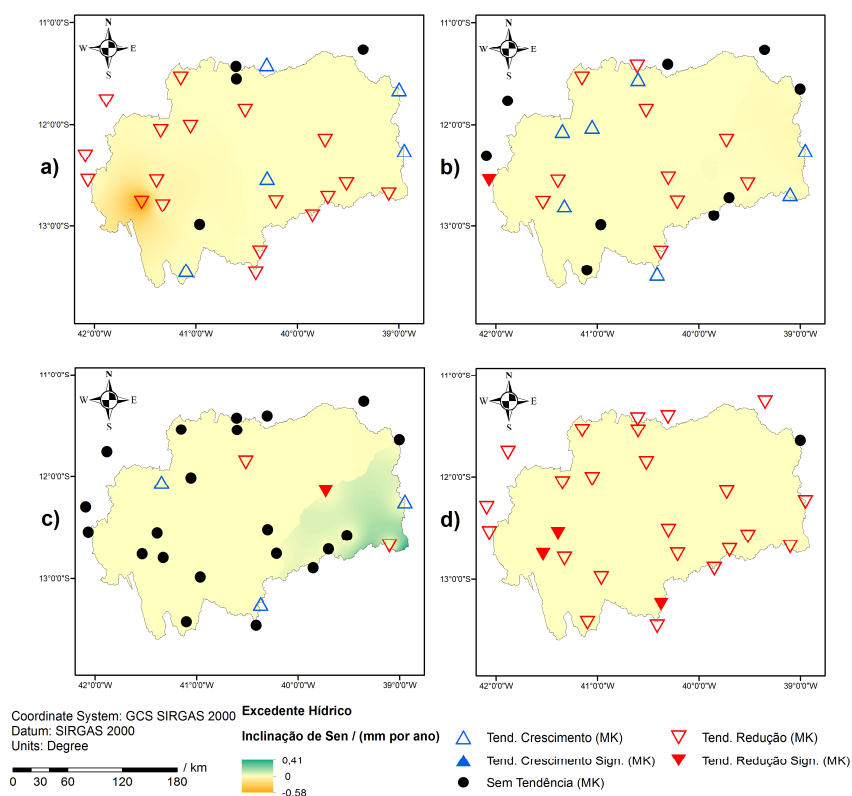


Figura 27 - Resultados da detecção de tendência nos dados sazonais de excedente hídrico, usando o teste de Mann-Kendall e o estimador de inclinação de Sen, considerando as estações: verão (a); outono (b); inverno (c); e primavera (d) (Autor, 2020)

O percentual de estações com tendências positivas, negativas ou nulas, significativas ou não, e em cada escala temporal analisada, está resumido na Figura 28. Anualmente, o cenário da disponibilidade de água no Paraguaçu é crítico, com a mesma taxa de 88,9 % para tendências de redução da precipitação e do excedente hídrico e para o aumento do déficit, independente da significância. Esse alto percentual nos cenários de redução das chuvas e dos excessos, bem como de elevação da deficiência hídrica, implicam em uma redução da disponibilidade de água, que afeta o abastecimento humano, a irrigação e a umidade do solo (HUI-MEAN et al., 2018).

Sazonalmente, pode ser verificada uma variabilidade das tendências de acordo com a estação do ano. A precipitação (Figura 28a) ultrapassa 44 % de tendências positivas no outono e no inverno, estações nas quais o déficit (Figura 28b) apresentou tendência de decréscimo em mais de 40 % dos postos, mostrando que esse período pode ser o mais promissor na oferta de recursos hídricos. Quanto ao excedente (Figura 28c), nota-se a maior presença de pontos sem tendências na série histórica, além das tendências de aumento dessa variável não ultrapassarem os 26 % de ocorrência em nenhum período.

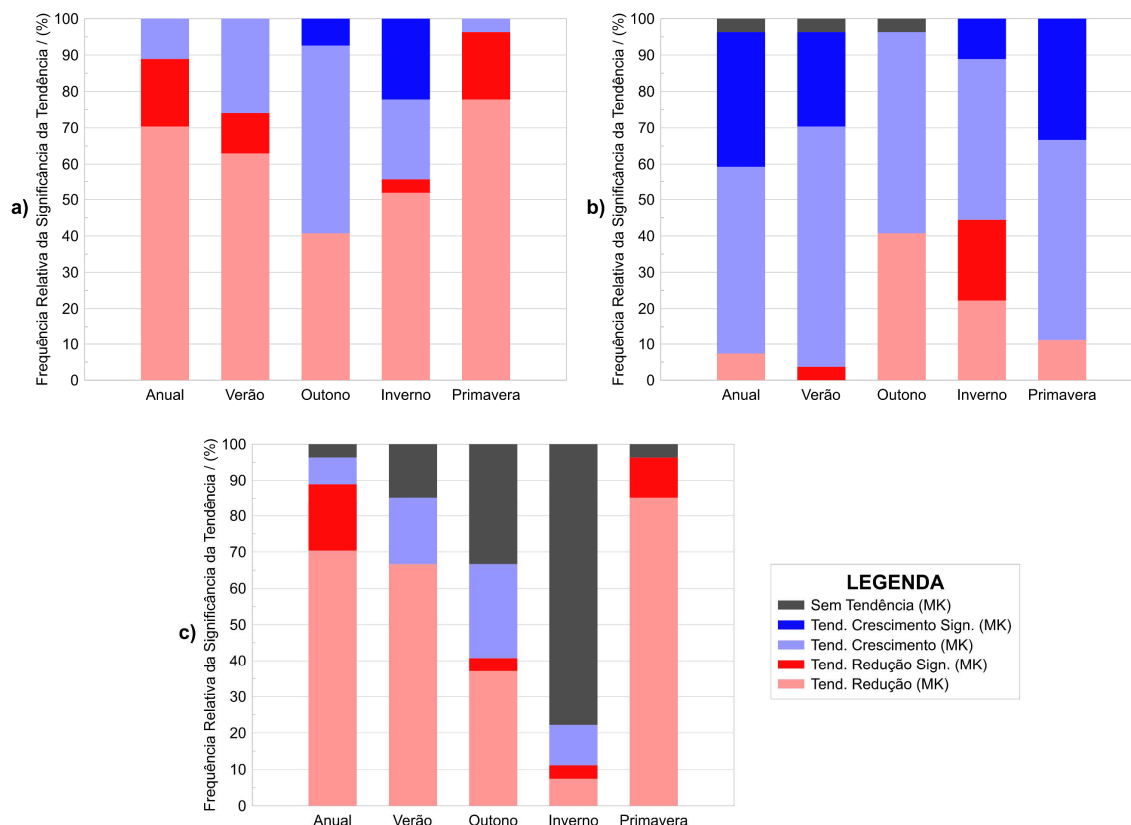


Figura 28 - Frequência relativa das tendências (período 1989-2018) de precipitação pluviométrica (a), déficit hídrico (b) e excedente hídrico (c) nas diferentes escalas temporais, de acordo com a direção (positiva / negativa / nula) e a significância estatística (significativo / não significativo) (Autor, 2020)

As tendências detectadas da precipitação pluviométrica e dos índices do BHC para cada sub-região do Paraguaçu, por dois métodos diferentes (teste MK e ATI), estão resumidas na Tabela 10. Os resultados de MK mostram que as estatísticas são negativas para precipitação e excedente hídrico, e positivas para déficit, ocorrendo significância em apenas 3 ocasiões, já vislumbradas na regionalização das tendências pontuais (Figura 24): no aumento dos déficits no alto e médio Paraguaçu e na diminuição dos excessos no baixo Paraguaçu.

Os resultados da ATI mostram que as tendências são as mesmas encontradas por MK, sendo que as inclinações são negativas para a precipitação e o excesso, e positivas para o déficit hídrico. Esse tipo de concordância entre os métodos também foi verificado em outros trabalhos (CUI et al., 2017; CALOIERO et al., 2018). A grande diferença entre eles reside no fato de que a ATI apresenta significância em 100 % das tendências. Conforme observaram Zhou et al. (2018), essa situação revela que muitas tendências significativas, que não são identificadas pelo teste de Mann-Kendall, acabam sendo detectadas através da ATI, beneficiando a análise de tendência.

Tabela 10 - Resultados do teste de Mann-Kendall e da Análise de Tendência Inovadora, considerando a média anual das variáveis em cada sub-região do Paraguaçu. Nota: \* Tendência significativa no nível de 5 %

Sub-região do Paraguaçu	$Z_{MK}$	Desvio Padrão $\sigma$	Correlação $\rho_{\bar{y}_1\bar{y}_2}$	Desvio Padrão de Inclinação $\sigma_s$	LC Inferior	LC Superior	Inclinação $s$
<b>Precipitação Pluviométrica</b>							
Alto	-1,28	202,7	0,94	0,85	-1,68	1,68	-3,27*
Médio	-1,78	149,1	0,85	0,99	-1,94	1,94	-4,88*
Baixo	-0,86	138,4	0,99	0,19	-0,37	0,37	-2,07*
<b>Deficiência Hídrica</b>							
Alto	2,25*	144,8	0,97	0,41	-0,80	0,80	4,07*
Médio	2,50*	116,0	0,92	0,56	-1,09	1,09	4,39*
Baixo	0,68	118,0	0,96	0,41	-0,81	0,81	2,28*
<b>Excedente Hídrico</b>							
Alto	-1,95	106,9	0,96	0,35	-0,69	0,69	-3,12*
Médio	-1,24	67,6	0,98	0,14	-0,28	0,28	-2,12*
Baixo	-2,36*	42,6	0,94	0,17	-0,34	0,34	-2,12*

Fonte: Autor, 2020

Os resultados obtidos através do método da ATI estão representados nas Figuras 29-31. Para a precipitação pluviométrica (Figura 29), é notável a variação da posição dos pontos em relação a reta 1:1, que influi na divergência entre as tendências nas chuvas baixas, moderadas e altas. Tendências pluviométricas anuais distintas em cada grupo de valores numa mesma localidade também foram notadas por Wang et al. (2020). No alto Paraguaçu (Figura 29a), chuvas em torno de 400 mm e acima dos 800 mm anuais tem tendência de diminuição, essas últimas significativas quanto a banda de 10 %, enquanto as precipitações moderadas possuem tendência de aumento.

A precipitação no médio Paraguaçu (Figura 29b) possui uma dispersão semelhante, sendo que a tendência é decrescente até os 400 mm e acima dos 600 mm anuais, indicando que o intervalo de precipitações com tendência de crescimento é menor nessa região, afetada pelo semiárido. No baixo Paraguaçu (Figura 29c), o comportamento é um pouco diferente, uma vez que a tendência é crescente para precipitações de até 600 mm anuais, e passa a ser decrescente quando esse valor é superado, sem qualquer tipo de significância em relação a banda dos 10 %.

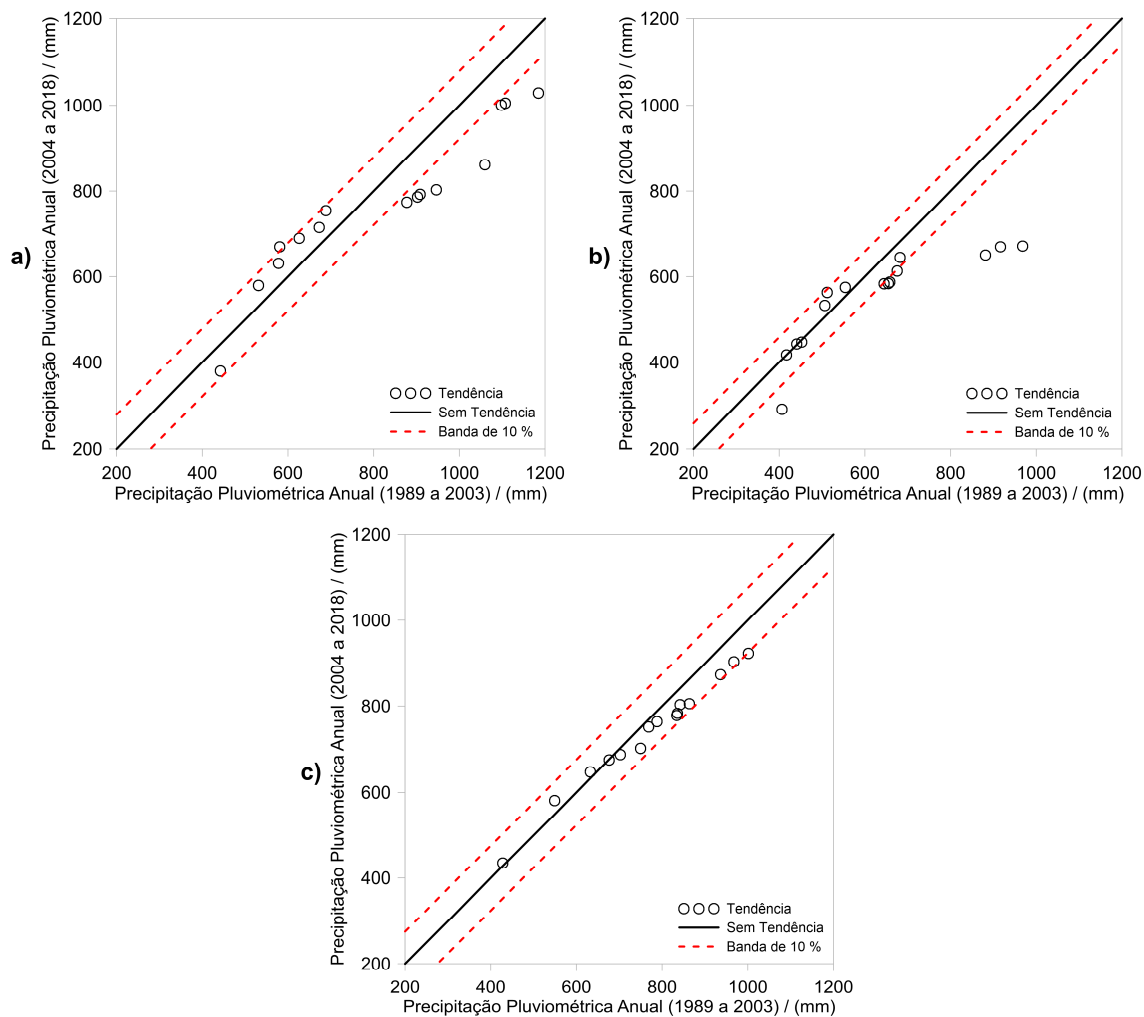


Figura 29 - Resultados da ATI em escala anual para a precipitação pluviométrica nas sub-regiões do Paraguaçu: alto (a); médio (b); e baixo (c) (Autor, 2020)

Os resultados da ATI para tendências na deficiência hídrica do Paraguaçu são mais monotônicos, uma vez que poucos pontos diferem da posição majoritária em relação a reta 1:1. Portanto, de maneira geral, as tendências apresentadas nas três sub-regiões são de aumento dos déficits, sendo que até próximo dos 400 mm anuais, no alto (Figura 30a) e no baixo Paraguaçu (Figura 30c), a tendência de aumento é significativa, quanto a banda de 10 %. No médio Paraguaçu (Figura 30b), essa tendência mais expressiva de crescimento se estende até próximo dos 600 mm, agravando o cenário de deficiência hídrica numa sub-região que já é afetada por altas temperaturas e baixos índices pluviométricos.

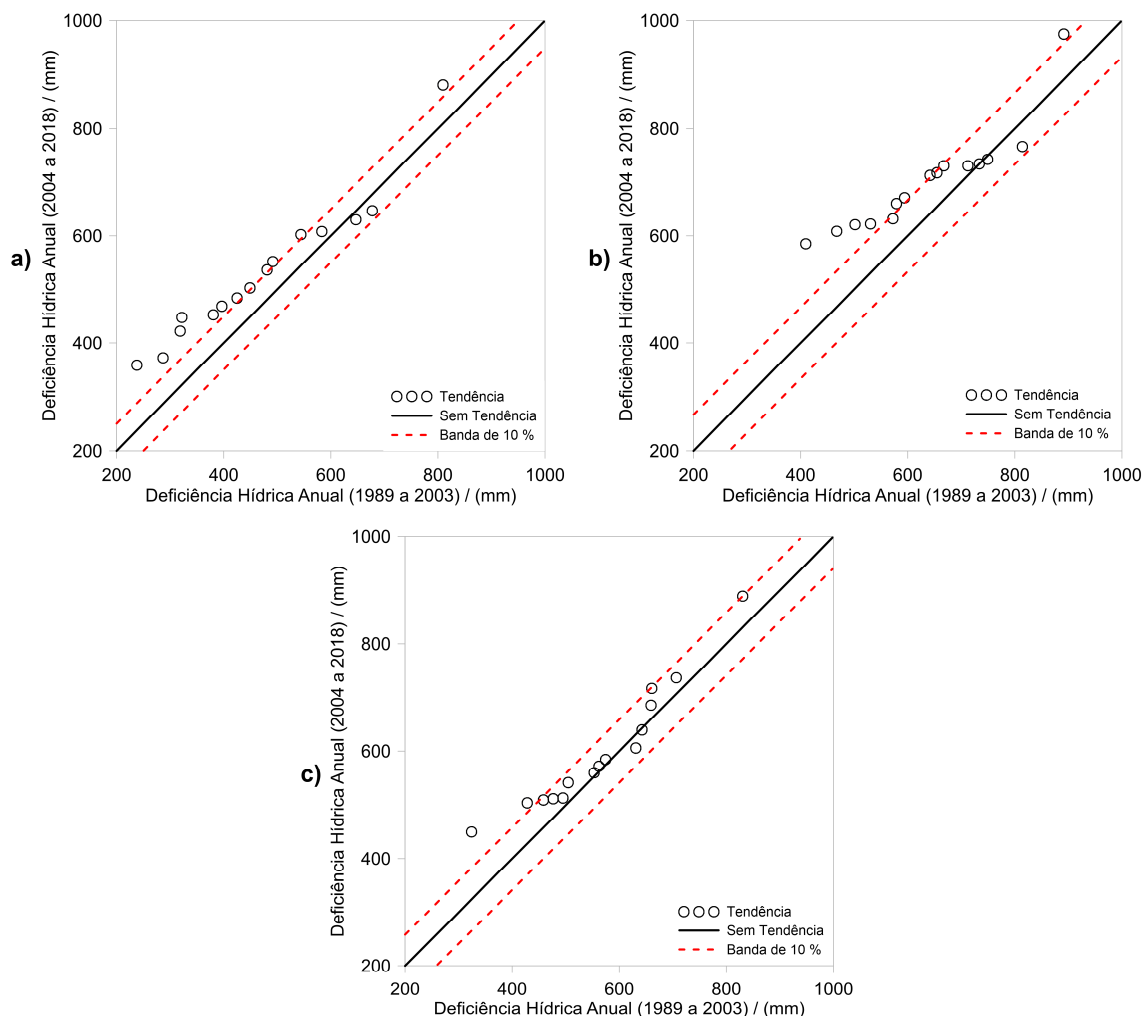


Figura 30 - Resultados da ATI em escala anual para a deficiência hídrica nas sub-regiões do Paraguaçu: alto (a); médio (b); e baixo (c) (Autor, 2020)

As tendências mais acentuadas encontradas com o método da ATI ocorreram para a variável excesso hídrico do BHC (Figura 31). De forma genérica, nota-se tendências monotônicas de redução dos excedentes, com a maior delas sendo significativas em relação a banda de 10 % em todas as sub-regiões. O alto Paraguaçu (Figura 31a) apresenta as maiores médias de excesso hídrico acumulado em um ano e as tendências de redução passam a ser relevantes após 100 mm. No médio Paraguaçu (Figura 31b), o baixo volume médio de excedentes resulta em pontos de dispersão acumulados no começo da linha 1:1, indicando pouca ou nenhuma tendência até os 50 mm anuais.

Por fim, o baixo Paraguaçu (Figura 31c) exibiu uma linha de tendência decrescente mais regular até aproximadamente 120 mm e com menos relevância quanto a banda de 10 %. A significância, pelo método de MK, ocorreu apenas nessa última sub-região, sendo visível que as tendências mais acentuadas ocorrem nos gráficos das sub-regiões anteriores. O método da ATI prenunciou tendências

significativas nas 3 divisões, retomando a vantagem desse modelo quanto à percepção da variação oculta das tendências através da ilustração gráfica, como pontuado por Malik et al. (2019).

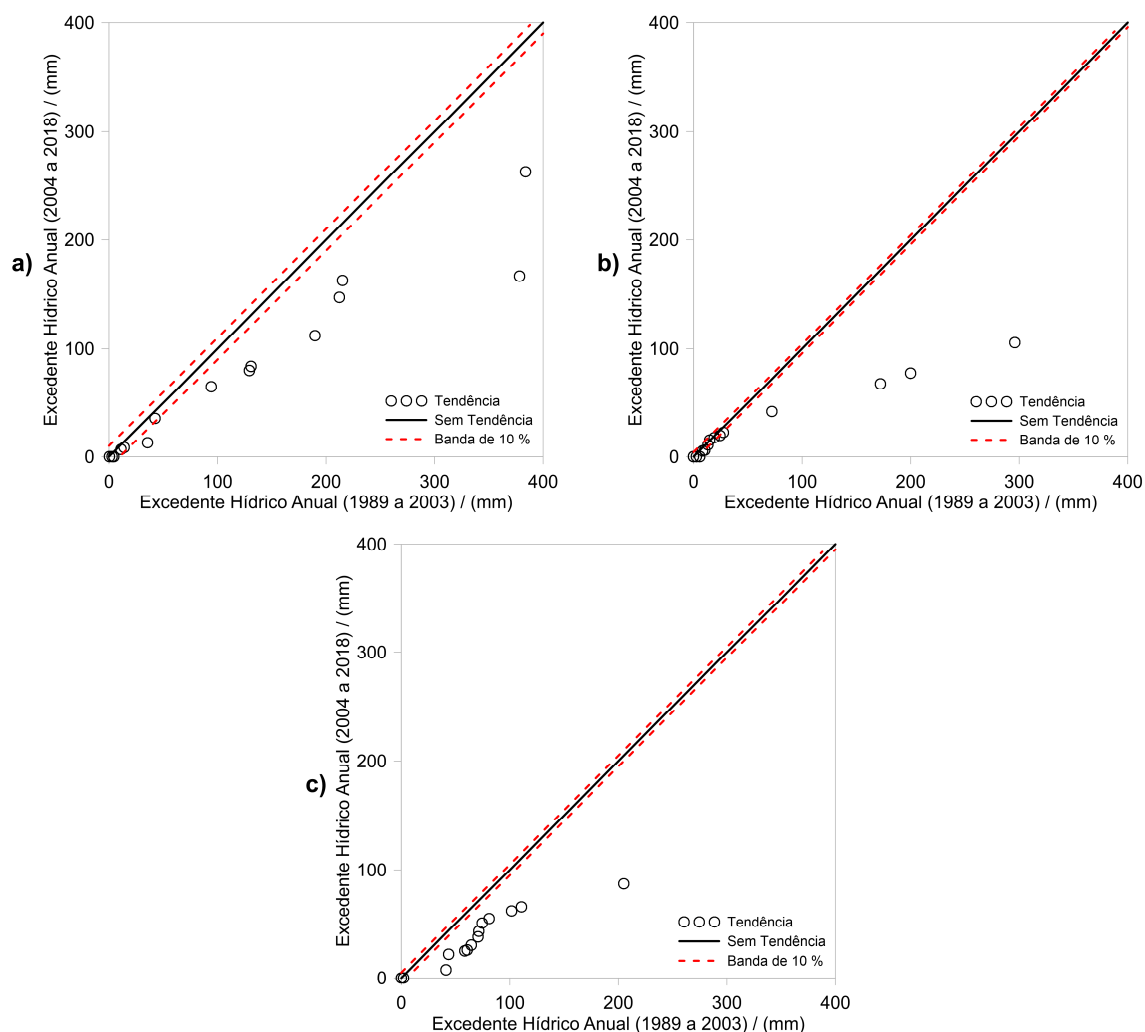


Figura 31 - Resultados da ATI em escala anual para o excedente hídrico nas sub-regiões do Paraguaçu: alto (a); médio (b); e baixo (c) (Autor, 2020)

Os resultados da ATI são satisfatórios ao ponto que atendem bem o propósito de detectar tendências em diferentes faixas dos dados, fornecendo maior poder de inspeção visual e de interpretações posteriores, como já constatado por Caloiero et al. (2018). O que ainda carece de aperfeiçoamentos, no método gráfico de Şen (2012), é a detecção direta da significância a partir da distância dos pontos até a linha neutra (1:1), uma vez que a banda de 10% não tem valor estatístico e que a avaliação da significância na ATI (ŞEN, 2017) se resume a comparação da inclinação da tendência com os limites de confiança.

Outro aspecto importante a ser observado é a proporção de tendências significantes detectadas pela ATI em relação à MK, pois outros estudos (ZHOU et al., 2018; MALIK et al., 2019; WANG et al., 2020) também atestaram que uma grande

quantidade das tendências da ATI é significativa. Boa parte desses autores veem essa questão de maneira positiva, como se existissem lacunas em MK que não permitem a constatação da significância, sem considerar que isso pode demandar uma preocupação excessiva com o cenário hidroclimático local, sem tanta necessidade a curto prazo.

#### 4 CONCLUSÕES

Anualmente, os métodos tradicionais indicam tendências negativas na precipitação pluviométrica, positivas no déficit e negativas/nulas no excedente hídrico, sendo que a grande maioria não são significativas.

Sazonalmente, as estações consideradas secas (outono e inverno) foram as que apresentaram maior quantidade de tendências de crescimento das chuvas e de decréscimo da deficiência hídrica, pronunciando que essas estações podem ser determinantes para possíveis mudanças na disponibilidade hídrica da região.

As tendências sazonais dos excedentes hídricos são peculiares, com a maior parte delas de redução em todas as estações, exceto no inverno, que apresenta maioria dos pontos sem tendência na série histórica.

Anualmente, através da Análise de Tendência Inovadora, foram reafirmadas tendências negativas na precipitação pluviométrica, positivas na deficiência hídrica e negativas nos excessos, em todas as divisões geográficas do Paraguai.

De maneira geral, os métodos de MK e da ATI apresentaram resultados semelhantes para indicação das tendências nas sub-regiões do Paraguai, embora a ATI tenha apresentado uma quantidade superior de tendências significativas.

O aspecto visual e gráfico do método da ATI colaborou para interpretações não monotônicas, uma vez que permite a detecção de tendências em faixas de valores baixos, médios e altos dentro das séries históricas.

#### REFERÊNCIAS

- ALI, R.; KURIQI, A.; ABUBAKER, S.; KISI, O. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method. **Water**, v. 11, n. 9, p. 1855, 2019.
- ALIFUJIANG, Y.; ABUDUWAILI, J.; MAIHEMUTI, B.; EMIN, B.; GROLL, M. Innovative Trend Analysis of Precipitation in the Lake Issyk-Kul Basin. Kyrgyzstan. **Atmosphere**, v. 11, n. 4, p. 332, 2020.
- ANAND, J.; GOSAIN, A. K.; KHOSA, R.; SRINIVASAN, R. Regional scale hydrologic modeling for prediction of water balance. analysis of trends in streamflow and

- variations in streamflow: The case study of the Ganga River basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 16, p. 32-53, 2018.
- ASFAW, A.; SIMANE, B.; HASSEN, A.; BANTIDER, A. Variability and time series trend analysis of rainfall and temperature in northcentral Ethiopia: A case study in Woleka sub-basin. **Weather and Climate Extremes**, v. 19, p. 29-41, 2018.
- AYDOĞAN, B.; AYAT, B. Spatial variability of long-term trends of significant wave heights in the Black Sea. **Applied Ocean Research**, v. 79, p. 20-35, 2018.
- AZAM, M.; MAENG, S. J.; KIM, H. S.; LEE, S. W.; LEE, J. E. Spatial and temporal trend analysis of precipitation and drought in South Korea. **Water**, v. 10, n. 6, p. 765, 2018.
- BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. Preenchimento de Falhas e Espacialização de Dados Pluviométricos: Desafios e Perspectivas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 615-629, 2020.
- CALOIERO, T.; COSCARELLI, R.; FERRARI, E. Application of the innovative trend analysis method for the trend analysis of rainfall anomalies in southern Italy. **Water Resources Management**, v. 32, n. 15, p. 4971-4983, 2018.
- CHANDNIHA, S. K.; MESHRAM, S. G.; ADAMOWSKI, J. F.; MESHRAM, C. Trend analysis of precipitation in Jharkhand State, India. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, n. 1-2, p. 261-274, 2017.
- CUI, L.; WANG, L.; LAI, Z.; TIAN, Q.; LIU, W.; LI, J. Innovative trend analysis of annual and seasonal air temperature and rainfall in the Yangtze River Basin, China during 1960–2015. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 164, p. 48-59, 2017.
- DENG, S.; CHEN, T.; YANG, N.; QU, L.; LI, M.; CHEN, D. Spatial and temporal distribution of rainfall and drought characteristics across the Pearl River basin. **Science of the Total Environment**, v. 619, p. 28-41, 2018.
- GIORGI, F.; RAFFAELE, F.; COPPOLA, E. The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. **Earth System Dynamics**, v. 10, n. 1, p. 73-89, 2019.
- HADI, S. J.; TOMBUL, M. Comparison of spatial interpolation methods of precipitation and temperature using multiple integration periods. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 46, n. 7, p. 1187-1199, 2018.
- HUI-MEAN, F.; YUSOP, Z.; YUSOF, F. Drought analysis and water resource availability using standardised precipitation evapotranspiration index. **Atmospheric Research**, v. 201, p. 102-115, 2018.
- KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. Charles Griffin. London. 1975.

- KHAN, N.; POUR, S. H.; SHAHID, S.; ISMAIL, T.; AHMED, K.; CHUNG, E.; NAWAZ, N.; WANG, X. Spatial distribution of secular trends in rainfall indices of Peninsular Malaysia in the presence of long-term persistence. **Meteorological Applications**, v. 26, n. 4, p. 655-670, 2019.
- KISI, O. An innovative method for trend analysis of monthly pan evaporations. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 1123-1129, 2015.
- MACEDO, M. J. H. **Aplicações de redes neurais artificiais e satélite TRMM na modelagem chuva-vazão da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu/BA**. Campina Grande, 2013, 109 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande.
- MALIK, A.; KUMAR, A.; GUHATHAKURTA, P.; KISI, O. Spatial-temporal trend analysis of seasonal and annual rainfall (1966–2015) using innovative trend analysis method with significance test. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 10, p. 328, 2019.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945.
- MEDEIROS, E. S.; LIMA, R. R.; OLINDA, R. A.; DANTAS, L. G.; SANTOS, C. A. C. Space–Time Kriging of Precipitation: Modeling the Large-Scale Variation with Model GAMLSS. **Water**, v. 11, n. 11, p. 2368, 2019.
- MIRANDA, R. M.; RITA, L. S.; GOLÇALVES, M. A. S.; MESQUITA, C. A. B.; RIGUEIRA, D. M. G.; ALMEIRA, E.; COUTINHO, B. H.; LAMAS, I. R. Conciliando políticas, governança e ciência para a revitalização. In: LAMAS, I. R.; RITA, L. S.; MIRANDA, R. M. (Orgs.). **Semeando Águas no Paraguaçu**. Rio de Janeiro: Conservação Internacional, 2016. p. 146-175.
- MOHAMMADI, M.; ABDOLLAHI, Z.; FOROZANFARD, M.; JAMALI, S. E.; SANG, Y. Trend variations of water balance components affected by climate changes (case study: Atrak river basin. Iran). **Azarian Journal of Agriculture**, v. 4, n. 3, p. 59-68, 2017.
- MRAD, D.; DJEBBAR, Y.; HAMMAR, Y. Analysis of trend rainfall: Case of North-Eastern Algeria. **Journal of Water and Land Development**, v. 36, n. 1, p. 105-115, 2018.
- MUNIZ JR., J. G. R.; OLIVEIRA JR., J. F.; GOIS, G.; SERAFINI, B.; SOBRAL, P. E. T.; SILVA JR., C. A.; CORREIA FILHO, W. L. F.; SANTIAGO, D. B. Climatological Water Balance In The Municipality of Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 5, p. 2388-2401, 2020.
- PAUL, A.; BHOWMIK, R.; CHOWDARY, V. M.; DUTTA, D.; SREEDHAR, U.; SANKAR, H. R. Trend analysis of time series rainfall data using robust statistics. **Journal of Water and Climate Change**, v. 8, n. 4, p. 691-700, 2017.

- PHUONG, D. N. D.; LINH, V. T.; NHAT, T. T.; DUNG, H. M.; LOI, N. K. Spatiotemporal variability of annual and seasonal rainfall time series in Ho Chi Minh city, Vietnam. **Journal of Water and Climate Change**, v. 10, n. 3, p. 658-670, 2019.
- PRĂVĂLIE, R.; PITICAR, A.; ROȘCA, B.; SFÎCĂ, L.; BANDOȘ, G.; TISCOVSCHI, A.; PATRICHE, C. Spatio-temporal changes of the climatic water balance in Romania as a response to precipitation and reference evapotranspiration trends during 1961-2013. **Catena**, v. 172, p. 295-312, 2019.
- SANTO, S. M.; CARELLI, L. Bacia Hidrográfica do Paraguaçu: da Chapada Diamantina à Baía de Todos os Santos. In: LAMAS, I. R.; RITA, L. S.; MIRANDA, R. M. (Orgs.). **Semeando Águas no Paraguaçu**. Rio de Janeiro: Conservação Internacional, 2016. p. 12-33.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968.
- ȘEN, Z. Innovative trend analysis methodology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 9, p. 1042-1046, 2012.
- ȘEN, Z. Innovative trend significance test and applications. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 127, n. 3-4, p. 939-947, 2017.
- SHARMA, S.; SINGH, P. K. Spatial trends in rainfall seasonality: a case study in Jharkhand, India. **Weather**, v. 74, n. 1, p. 31-39, 2019.
- SILVA, G. O. M.; MEDEIROS, Y. D. P.; FONTES, A. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Water permit integration in the Paraguaçu River Watershed (Bahia). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017.
- SOUZA, T. S.; NASCIMENTO, P. S. Sequential Climatic Water Balance applied in the hydrographic region of Paraguaçu - BA. 2020. (Artigo científico submetido para publicação).
- SOUZA, T. S.; NASCIMENTO, P. S. Spatial and temporal variability of pluviometric precipitation in the Hydrographic Region of Paraguaçu - BA. **Revista Cerrados (Unimontes)**, 2021. No prelo.
- TEHRANI, E. N.; SAHOUR, H.; BOOIJ, M. J. Trend analysis of hydro-climatic variables in the north of Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 136, n. 1-2, p. 85-97, 2019.
- THOMAS, J.; PRASANNAKUMAR, V. Temporal analysis of rainfall (1871–2012) and drought characteristics over a tropical monsoon-dominated State (Kerala) of India. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 266-280, 2016.
- THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

- TOSUNOGLU, F.; KISI, O. Trend analysis of maximum hydrologic drought variables using Mann–Kendall and Şen's innovative trend method. **River Research and Applications**, v. 33, n. 4, p. 597-610, 2017.
- WANG, X. L. Accounting for autocorrelation in detecting mean-shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 47, n. 9, p. 2423-2444, 2008a.
- WANG, X. L. Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean shifts without trend-change. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 25, n. 3, p. 368-384, 2008b.
- WANG, X. J.; ZHANG, J. Y.; SHAHID, S.; GUAN, E. H.; WU, Y. X.; GAO, J.; HE, R. M. Adaptation to climate change impacts on water demand. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 21, n. 1, p. 81-99, 2016.
- WANG, Z.; YE, A.; WANG, L.; LIU, K.; CHENG, L. Spatial and temporal characteristics of reference evapotranspiration and its climatic driving factors over China from 1979–2015. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 1096-1108, 2019.
- WANG, Y.; XU, Y.; TABARI, H.; WANG, J.; WANG, Q.; SONG, S.; HU, Z. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall in the Yangtze River Delta. eastern China. **Atmospheric Research**, v. 231, p. 104673, 2020.
- WU, H.; QIAN, H. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2582-2592, 2017.
- ZHOU, Z.; WANG, L.; LIN, A.; ZHANG, M.; NIU, Z. Innovative trend analysis of solar radiation in China during 1962-2015. **Renewable energy**, v. 119, p. 675-689, 2018.

## **CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES GERAIS**

---

## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES GERAIS

---

No aspecto da precipitação pluviométrica, a região hidrográfica do Paraguaçu, no período avaliado, apresentou uma média histórica anual de 673 mm, mais alocados nas sub-regiões alta e baixa (789 mm e 756 mm, respectivamente). O médio Paraguaçu, que sofre influência direta do clima semiárido, obteve um índice pluviométrico médio inferior, equivalente à 588 mm. O período chuvoso na região pode ser bem definido: de novembro a abril no alto e médio Paraguaçu; e de abril a julho no baixo Paraguaçu.

Os índices pluviométricos alertam para duas situações de extremos climáticos diferentes. O IAC classificou a região como seca, muito ou extremamente seca em mais da metade do período analisado, indicando a possibilidade da ocorrência de eventos extremos de secas, aliadas à desertificação. Já o ICP, com uma média de 17,04 %, classifica a região como de média irregularidade na distribuição das chuvas, indicando que boa parte delas concentram-se em áreas remotas e muito chuvosas, acarretando em inundações, enchentes e no aumento dos processos erosivos.

Geograficamente, as extremidades do alto e baixo Paraguaçu apresentaram maiores índices pluviométricos; o extremo leste do baixo Paraguaçu e os pontos com maiores altitudes apresentaram IAC acima de zero, característica de localidades chuvosas; e no leste da região hidrográfica a distribuição das chuvas foi mais regular, enquanto no oeste, mais irregular.

Na análise espacial e sazonal do ICP, observou-se que nas estações do outono e inverno há uma maior regularidade na distribuição pluviométrica, em relação às estações do verão e da primavera, consideradas mais chuvosas. Na análise de agrupamentos, foi indicada a presença de três grupos homogêneos quanto à precipitação, e suas distribuições geográficas concordam com a variação espacial das chuvas anuais.

No aspecto do balanço hídrico climatológico, a variação interanual de seus parâmetros aponta para uma deficiência hídrica expressiva, cuja média geral é 606 mm, enquanto a dos excedentes hídricos é praticamente dez vezes menor. Mensalmente, os déficits conseguem ser menos expressivos apenas na estação chuvosa do baixo Paraguaçu, enquanto os excedentes são baixos e mal distribuídos, principalmente no médio Paraguaçu. Essa caracterização alerta para a importância de uma reavaliação da gestão dos recursos na agricultura, uma vez que, devido aos grandes déficits hídricos naturais, acaba existindo a necessidade da utilização de recursos suplementares.

A temperatura na região do Paraguaçu decresce no sentido do litoral para o interior, com alguns pontos específicos de baixa temperatura, como Morro do Chapéu,

município de altitude elevada. Portanto, esses pontos de menor temperatura, foram justamente os que apresentaram os menores valores médios para evapotranspiração potencial.

Especialmente, seguindo a lógica dos maiores índices pluviométricos nas extremidades leste e oeste, essas mesmas porções apresentaram o menor balanço entre precipitação e evapotranspiração potencial. O alto Paraguaçu foi a única sub-região que apresentou um nicho com alto potencial para o armazenamento de água no solo, devido a aliança entre os consideráveis índices de chuva com a recorrência de solos argilosos, que possuem maior capacidade de armazenagem.

Sazonalmente, os excedentes são praticamente nulos durante todo ano, exceto na estação chuvosa no baixo e no verão do alto Paraguaçu. Nessa última sub-região, as deficiências tenderam a ser mais amenas ( $< 120$  mm) em todas as estações do ano. Em contrapartida, ao longo de todo ano, os déficits foram mais críticos ( $> 210$  mm) no centro-sul, sudoeste e nordeste da região hidrográfica, abrangendo boa parte do médio Paraguaçu. Praticamente essas mesmas localidades representam 23 % da área da região hidrográfica, que apresentaram alta susceptibilidade à desertificação, seguindo a classificação do índice de aridez.

A análise de componentes principais dos parâmetros do BHC indicou que apenas duas componentes foram necessárias para explicar a variância do fenômeno. A primeira componente representou o clima úmido, com cargas elevadas para precipitação, balanço entre precipitação e evapotranspiração potencial, armazenamento no solo, evapotranspiração real e excedente hídrico, enquanto a segunda componente representou o clima seco, com cargas elevadas para temperatura e evapotranspiração potencial.

A ACP serviu também para apresentar as relações existentes entre variáveis diferentes do BHC, como é o caso da relação direta entre precipitação e excedente hídrico e da relação indireta envolvendo o balanço entre precipitação e evapotranspiração potencial com o déficit hídrico. Ainda foi possível avaliar as variáveis não representativas para o sistema, como é o caso da capacidade de água disponível, que depende das condições do solo, mas comumente tem seu valor fixado em estudos do mesmo gênero.

Na análise de tendências, os métodos tradicionais de MK e Sen apontaram, para os dados individuais e anuais de cada posto, tendências negativas na precipitação pluviométrica e no excedente e positivas no déficit hídrico, com uma frequência relativa de ocorrência de 88,9 %, de maneira geral e independentemente da significância. O expressivo parâmetro da deficiência, no contexto da região hidrográfica, alcançou um

crescimento de 12 mm anuais, enquanto os decréscimos atingiram 20 mm para a precipitação e 10 mm por ano para o excesso hídrico.

As tendências sazonais apresentaram um resultado peculiar, no qual as estações do outono e do inverno, consideradas secas para região hidrográfica, apresentaram tendências positivas na precipitação e negativas no déficit hídrico, o que torna essas estações determinantes para mudanças futuras na disponibilidade hídrica do Paraguaçu. As estações mais chuvosas, por sua vez, apresentaram um comportamento das tendências semelhante ao comportamento geral das tendências anuais.

A análise de tendência é uma ferramenta de grande valor, tendo em vista que as projeções futuras dos cenários climáticos podem ser articuladas. No baixo Paraguaçu, por exemplo, apenas a primavera é afetada por tendências negativas de precipitação e positivas de deficiência hídrica, indicando uma boa manutenção do reservatório de Pedra do Cavalo nas demais estações, possibilitando o cumprimento de suas funções primordiais: o abastecimento de Salvador, Feira de Santana e regiões metropolitanas, a geração de energia e o controle das enchentes. Os demais reservatórios da região devem ser mais afetados por essas tendências ao longo de todo ano, comprometendo atividades importantes como agricultura, pastagens e regularização das vazões.

A análise de tendência inovadora reafirmou as tendências encontradas pelos métodos tradicionais, no âmbito das três divisões geográficas do Paraguaçu. As indicações de tendências foram praticamente as mesmas, com decréscimo da precipitação pluviométrica e do excedente e crescimento do déficit hídrico, sendo que a diferença básica foi a presença de significância em 100 % dos casos analisados através da ATI. Apesar disso, o método se demonstrou eficiente para detecção não monotônica das tendências, ou seja, foi possível associar tendências a diferentes intervalos de valores para cada fenômeno.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação do geoprocessamento de imagens de satélite, datadas no período de estudo, para avaliação da variabilidade temporal da precipitação pluviométrica e da evapotranspiração, verificando a evolução da disponibilidade hídrica na região hidrográfica e apreciando mais profundamente os impactos no uso e ocupação do solo desses fenômenos naturais.

Outra vertente que pode ser assumida é a da aplicação e testagem do desempenho de outros interpoladores espaciais para as variáveis do balanço hídrico climatológico, principalmente os que levam em consideração as condições do relevo no algoritmo, a exemplo da Cokrigagem e da Regressão Linear Múltipla, incluindo ainda

uma análise de incerteza dessas ferramentas, de forma a melhorar os efeitos das estimativas.

No tocante às incertezas, recomenda-se a introdução desse aspecto nas informações utilizadas, desde os dados de obtenção direta (precipitação e temperatura) até os de obtenção indireta (todas as variáveis climáticas obtidas empiricamente). Essa análise das incertezas carece de informações auxiliares, muitas vezes qualitativas, que são omitidas junto aos bancos de dados disponíveis no Brasil.