



Universidade Federal de Alagoas
Instituto de Ciências Atmosféricas
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia



JULIANA DE SOUSA SANTOS

**EXTREMOS PLUVIOMÉTRICOS EM ALAGOAS: VARIABILIDADE INTRA-
SAZONAL E INTERANUAL EM REGIÕES HIDROGRÁFICAS**

Maceió – Alagoas
Agosto, 2026

JULIANA DE SOUSA SANTOS

**EXTREMOS PLUVIOMÉTRICOS EM ALAGOAS: VARIABILIDADE INTRA-
SAZONAL E INTERANUAL EM REGIÕES HIDROGRÁFICAS**

Dissertação de mestrado
apresentada ao Programa de Pós-
graduação em Meteorologia da
Universidade Federal de Alagoas –
UFAL como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de
Mestre em Meteorologia.

Orientador: **Prof. Dr. José Francisco
de Oliveira Júnior**

Maceió, Alagoas
Agosto, 2026

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

S237e Santos, Juliana de Sousa.

Extremos pluviométricos em Alagoas : variabilidade intra-sazonal e interanual em regiões hidrográficas / Juliana de Sousa Santos. – 2026.
112 f. : il. color.

Orientador: José Francisco de Oliveira Júnior.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Maceió, 2026.

Bibliografia: f. 90-112.

1. Chuvas extremas. 2. Variabilidade intrasazonal e interanual. 3. Regiões hidrográficas - Alagoas. I. Título.

CDU: 551.577.37 (813.5)

Folha de Aprovação
JULIANA DE SOUSA SANTOS

**EXTREMOS PLUVIOMÉTRICOS EM ALAGOAS: VARIABILIDADE
INTRA-SAZONAL E INTERANUAL EM REGIÕES HIDROGRÁFICAS**

Dissertação de mestrado apresentada
ao Programa de Pós-graduação em
Meteorologia da Universidade Federal
de Alagoas – UFAL como parte dos
requisitos necessários à obtenção do
grau de Mestre em Meteorologia,
aprovado em: 14/08/2026

Banca examinadora

Prof. Dr. José Francisco de Oliveira Júnior
ICAT/UFAL (Orientador)

Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Júnior
ICAT/UFAL

Prof. Dr. Helder José Farias da Silva
ICAT/UFAL

Prof. Dr. Ricardo Victor Rodrigues Barbosa
FAU/UFAL

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me sustentar nos momentos de dificuldade, renovar minhas forças e me permitir concluir mais esta etapa da minha vida.

À minha mãe, M^a Denilda, por caminhar ao meu lado em todos os momentos. Obrigada por cada incentivo, por acolher minhas angústias e comemorar cada conquista como se fosse sua. Seu amor, sua força e sua confiança sempre me deram a segurança necessária para seguir em frente, mesmo diante das maiores dificuldades. Espero que esta seja apenas uma das muitas conquistas que ainda teremos a alegria de celebrar juntas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Francisco de Oliveira Júnior, pela dedicação, paciência, disponibilidade e pelas valiosas orientações ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu colega Kelvy Cardoso, pela disponibilidade em compartilhar conhecimentos e por todo o auxílio prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e membros da banca examinadora, pelas contribuições, sugestões e pelo tempo dedicado à avaliação desta dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro concedido por meio do financiamento desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste sonho e fizeram parte desta importante etapa da minha vida.

RESUMO

A variabilidade da chuva e seus extremos representa um desafio para o gerenciamento e o planejamento hídrico e socioambiental em Alagoas. A gestão hídrica utiliza a delimitação de regiões hidrográficas (RH) para garantir a melhor utilização, distribuição e abastecimento dos recursos hídricos. O estudo tem como objetivo analisar os impactos da variabilidade intrasazonal e interanual dos extremos pluviométricos nas regiões hidrográficas de Alagoas. Utilizou-se dados mensais de 54 estações pluviométricas separadas em dez RH baseadas nas delimitações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o período de 1960 a 2016. A estatística aplicada a série temporal pluviométrica foi baseada nas estatísticas descritiva, exploratória (boxplot) e multivariada (método hierárquico de Ward e índice de Silhueta). O Índice de Anomalia de Chuva (IAC) e Índice de Precipitação Padronizado (SPI) obtido via software DrinC foram associados os episódios de ENOS (El Niño e La Niña) via índices ONI e RONI. Os mapas de chuva (sazonal) e seca anual (SPI-12 e IAC) foram confeccionados a partir do software QGIS via método de interpolação IDW. A caracterização dos eventos extremos foi realizada por meio do algoritmo DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications). Para facilitar a interpretação dos padrões multivariados e a visualização dos agrupamentos identificados empregou-se a Análise de Componentes Principais (ACP). Os resultados obtidos evidenciaram a existência de dois grupos pluviométricos homogêneos de RH com características distintas. A análise espacial dos índices SPI-12 e IAC confirmou a influência da variabilidade climática interanual, independente de ONI e RONI. O algoritmo DBSCAN mostrou-se eficiente na identificação de anos secos, chuvosos e de transição nas bacias hidrográficas. A integração de informações climáticas, socioeconômicas e de demanda hídrica revelou que a vulnerabilidade das regiões hidrográficas resulta da interação entre fatores naturais e antrópicos, e assim reforça a importância de abordagens integradas para o monitoramento, planejamento e gestão dos recursos hídricos em Alagoas.

Palavras-Chaves: chuva extrema, seca, regiões hidrográficas, SPI.

ABSTRACT

Rainfall variability and the occurrence of extreme precipitation events represent significant challenges for water resources management and socio-environmental planning, particularly in the state of Alagoas, Brazil. Water management strategies rely on the delimitation of hydrographic regions (HRs) to support the efficient allocation, distribution, and supply of water resources. This study aimed to analyze the impacts of intra-seasonal and interannual variability of precipitation extremes across the hydrographic regions of Alagoas. Monthly rainfall data from 54 rain gauge stations distributed among ten hydrographic regions, according to the regional division established by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), were analyzed for the period from 1960 to 2016. Time-series analyses were based on descriptive and exploratory statistical techniques, including boxplot analysis. The Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated using the DrinC software, while seasonal rainfall and annual drought (SPI-12) maps were generated in QGIS using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method. To identify spatial precipitation patterns across the hydrographic regions, hierarchical clustering based on Ward's method was applied and validated using the Silhouette Index. Extreme events were characterized through the Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) algorithm. In addition, Principal Component Analysis (PCA) was employed to facilitate the interpretation of multivariate patterns and the visualization of the identified clusters by reducing data dimensionality while preserving most of the original variability. The results revealed the existence of two homogeneous groups of hydrographic regions with distinct rainfall regimes. Analyses based on SPI-12 and the Rainfall Anomaly Index (RAI) confirmed the influence of interannual climate variability on precipitation patterns. The DBSCAN algorithm proved effective in identifying dry, wet, and transition years. Furthermore, the integration of climatic, socioeconomic, and water-demand indicators showed that the vulnerability of hydrographic regions results from the interaction between natural and anthropogenic factors, highlighting the importance of integrated approaches for water resources monitoring, planning, and management in Alagoas.

Keywords: extreme rainfall; drought; hydrographic regions; SPI.

SUMÁRIO

	pág.
1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Justificativa	11
2 OBJETIVOS	11
2.1 Geral	11
2.2 Específicos	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Eventos extremos climáticos	12
3.2 Variabilidade climática no Nordeste do Brasil	14
3.2.1 Mudanças Climáticas e Extremos Hidrometeorológicos em Alagoas	16
3.3 Chuva	17
3.4 Seca	19
3.5 Impactos de eventos extremos em bacias hidrográficas	21
3.5.1 Regiões Hidrográficas como Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos	23
3.6 Segurança Hídrica, Vulnerabilidade Socioeconômica e Pressão Antrópica	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 Área de estudo	25
4.2 Dados pluviométricos	29
4.2.1 Dados Socioeconômicos e de Demanda Hídrica	29
4.3 Standardized Precipitation Index (SPI)	30
4.4 Método de interpolação espacial	32
4.5 Critérios das fases do ENOS	32
4.6 Estatística aplicada	35
4.7 Interpretação do Boxplot	36
4.8 Índice de Anomalia de Chuva – IAC	36
4.9 Coeficiente de Silhueta (Silhouette Score)	38
4.10 Método Hierárquico de Ward e Dendrograma	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Regionalização das bacias hidrográficas de Alagoas via técnicas de agrupamento hierárquico	42

5.2 Perfil Médio Mensal de Precipitação por Grupo	45
5.3 Análise da Variabilidade Mensal por Boxplot	47
5.4 Análise DBSCAN: Identificação de Períodos Chuvosos e Secos.....	50
5.4.1 Seleção do Parâmetro eps — Curva de Distância k-NN	50
5.4.2 Dispersão PCA com Classificação DBSCAN	51
5.4.3 Série Temporal Classificada por DBSCAN	52
5.4.4 Heatmap Mensal por Categoria DBSCAN	54
5.4.5 Calendário de Anomalias e Eventos Extremos	55
5.4.6 Perfil Sazonal por Categoria DBSCAN	56
5.5 Estatística Descritiva e Informações Ambientais	58
5.6 Análise pluviométrica anual dos grupos homogêneos de BH em Alagoas	61
5.7 Análise espaço-temporal das chuvas	65
5.7.1 Mapas Mensais	65
5.8 Análise espacial do SPI-12 e IAC	68
5.9 Integração dos fatores socioeconômicos e de uso da água na vulnerabilidade hídrica	79
6 CONCLUSÕES	86
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1 INTRODUÇÃO

A água como fonte de vida, fonte de energia e como indicativo de desenvolvimento regional tem sido desperdiçada e ao mesmo tempo mercantilizada por empresas públicas e privadas ao redor do mundo (EVARISTO et al., 2023; SCHROERING, 2024; KILIÇ, 2025; BROWN et al., 2026). Porém, a falta de gerenciamento hídrico adequado, a escassez hídrica, a seca severa e a estiagem prolongada são problemas que comprometem as atividades humanas ligadas ao uso da água (MISHRA, 2023; BORAH, 2025; MATTA et al., 2025).

A água como recurso estratégico, deve ser analisada sob os seguintes aspectos: i) abastecimento humano, ii) gerenciamento de recursos hídricos e iii) a interação com a matriz energética (ANA, 2024). Para o abastecimento de água potável ocorrer da forma abrangente e igualitária é necessário a integração entre a infraestrutura de abastecimento e a gestão espacial dos recursos, com o intuito de reduzir as vulnerabilidades socioambientais e rupturas nos serviços ofertados (ANA, 2024).

É importante distinguir as Bacias Hidrográficas (BH) das Regiões Hidrográficas (RH); por exemplo, as BH se caracterizam como uma unidade territorial de drenagem com deságue comum (PIROLI, 2022) ou, anteriormente, definida como a área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída (TUCCI, 1997; BEVEN, 2012). Já as RH se caracterizam por uma bacia, grupo de bacias ou ainda sub-bacias (ANA, 2021). No Brasil há 12 RH, sendo que essas regiões têm sua divisão justificada pelas diferenças existentes no país, tanto no que se refere aos ecossistemas como também em diferenças de caráter econômico, social e cultural (BRASIL, 2003; PORTO; PORTO, 2008; MEDEIROS et al., 2022).

Diversos estudos têm demonstrado que a combinação de índices de seca com produtos de sensoriamento remoto (SR) constituem ótimas ferramentas na avaliação da variabilidade pluviométrica e dos impactos hidrológicos em BH (CHOI et al., 2013; MOHAMMED et al., 2017; ALAHACON & EDIRISINGHE, 2022; MULLAPUDI et al., 2023; CUARTAS et al., 2024). Entre os índices de seca mais utilizados na literatura científica destacam-se o *Standardized Precipitation Index* (SPI), *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* (SPEI) e o

Palmer Drought Severity Index (PDSI), baseados na precipitação, temperatura do ar e evapotranspiração (ET); o *Soil Moisture Deficit Index* (SMDI), o *Standardized Soil Moisture Index* (SSI) e o *Multivariate Standardized Drought Index* (MSDI), que incorporam variáveis de umidade do solo; além de índices hidrológicos, como o *Standardized Runoff Index* (SRI), e índices baseados em sensoriamento remoto, como o *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI) (YIHDEGO et al., 2019; LI et al., 2023; WU et al., 2024; GUAN et al., 2025). Em termos aplicados, diferentes regiões têm utilizado esses indicadores para compreender impactos e subsidiar políticas públicas.

No Brasil, estudos recentes evidenciaram a utilidade do SPI e SPEI no monitoramento das secas no Nordeste do Brasil (NEB) - (MARENGO et al., 2018; CUNHA et al., 2019; NETO et al., 2026). Nas Américas, o PDSI tem sido bastante usado no monitoramento das secas da Califórnia-USA (DETTINGER et al., 2015). Já na Europa, estudos de abrangência continental aplicaram o SPEI e o MSDI para caracterizar a intensificação das secas hidrológicas nas últimas décadas (SPINONI et al., 2019). Esses exemplos reforçam o caráter abrangente e adaptável dos índices de seca em múltiplos contextos climáticos e geográficos.

Os índices de seca são de suma importância no diagnóstico e monitoramento de secas meteorológicas, pois permitem analisar os eventos de seca em multiescala, o que possibilita identificar tanto eventos de curta duração quanto de longa duração que afetam diretamente o fluxo dos rios e os níveis dos reservatórios (GEBRECHORKOS et al., 2023; LI et al., 2023; WU et al., 2024; GUAN et al., 2025). Anteriormente, Zhang et al. (2025) relacionaram os índices SPI e SPEI com índices de vegetação como o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e mostraram que a resposta da cobertura vegetal aos eventos de seca pode ser atrasada ou atenuada.

Chuvas extremas podem estar associadas a eventos que excedem limiares estatisticamente definidos baseados na climatologia de uma região (SENEVIRATNE et al., 2021). As chuvas extremas nas BH causam diversas consequências de ordem hidrológica, geomorfológica, ambiental, socioeconômica e sanitária, especialmente no estado de Alagoas, pertencente a região Leste do Nordeste do Brasil (ENEB) – (BACK et al., 2020; OLIVEIRA-

JÚNIOR et al., 2021). Além de gerar cheias, enxurradas, inundações e erosão, também há possibilidade de assoreamento e degradação da qualidade da água, que, somados a fatores de vulnerabilidade social e urbanização desordenada, ampliam os impactos negativos sobre as populações e sobre o meio ambiente (LOPES E DOMINGOS, 2020; SGB/CPRM, 2022; MARENGO et al., 2023).

Embora diversos estudos sobre as BHs de Alagoas tenham sido realizados anteriormente, eles possuem caráter pontual (SILVA et al., 2009; SILVA et al., 2010a; SILVA et al., 2010b; SILVA et al., 2018) ou se limitam à comparação entre apenas duas bacias (SOUZA, 2011; SILVA ALEXANDRE et al., 2019; LIMA et al., 2021), sem que haja uma avaliação climatológica e antrópica integrada que abranja todo o território estadual. Em suma, este estudo busca preencher essa lacuna por meio de uma análise conjunta que associa a variabilidade climatológica à pressão antrópica, utilizando indicadores socioeconômicos, demográficos e ambientais.

1.1 JUSTIFICATIVA

A água é um recurso essencial à vida e ao desenvolvimento da sociedade, sendo sua relação com a variabilidade climática um tema que necessita de investigações profundas, especialmente, na compreensão dos extremos climáticos e seus impactos. As Bacias Hidrográficas constituem unidades fundamentais para a gestão e planejamento hídrico; contudo há lacunas no campo científico acerca das análises dos impactos dos eventos extremos em regiões hidrográficas em Alagoas de forma conjunta. Estudos prévios, em sua maioria, limitaram-se em análises isoladas ou análises comparativas pontuais, sem abordar de forma integrada o ciclo hidrológico e seus extremos (secas severas, chuvas intensas) e seus efeitos sobre as populações vulneráveis socioeconômicas.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

- **Analisar** os impactos da variabilidade intrasazonal e interanual dos extremos pluviométricos nas regiões hidrográficas de Alagoas.

2.2 Específicos

- **Avaliar** os padrões pluviométricos em diferentes escalas temporais em cada região hidrográfica.
- **Regionalizar** as regiões hidrográficas de Alagoas segundo a similaridade dos padrões de precipitação, utilizando os métodos de agrupamento Ward e DBSCAN;
- **Identificar** as regiões hidrográficas afetadas pelos extremos climáticos via índices de seca.
- **Mostrar** a relação da disponibilidade hídrica com a vulnerabilidade socioeconômica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será abordada a fundamentação teórica e a revisão de literatura sobre a ocorrência de extremos de chuva e seca, seguidas de seus impactos e consequências, além de metodologias que auxiliam na avaliação e monitoramento desses fenômenos. Assim, os subtópicos estão estruturados da seguinte forma: (3.1) Eventos extremos climáticos; (3.2) Variabilidade climática no Nordeste do Brasil; (3.2.1) Mudanças Climáticas e Extremos Hidrometeorológicos em Alagoas; (3.3) Chuva; (3.4) Seca; (3.5) Impactos de eventos extremos em bacias hidrográficas; (3.5.1) Regiões Hidrográficas como Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos; (3.6) Segurança Hídrica, Vulnerabilidade Socioeconômica e Pressão Antrópica.

3.1 Eventos extremos climáticos

Eventos extremos climáticos fazem parte da história do clima global, porém, com mudanças climáticas em curso, os registros desses eventos estão cada vez mais frequentes e intensos (IPCC, 2021). A caracterização de eventos extremos está relacionada com a ocorrência atípica de um evento para um determinado lugar ou época do ano, ou seja, um evento é considerado extremo quando uma variável meteorológica ultrapassar o seu limiar máximo ou mínimo (OLIVEIRA, 2018; IPCC, 2021).

Vale ressaltar que máximos e mínimos são esperados e fazem parte da variabilidade climática, porém, o aumento ou diminuição da intensidade e a persistência de um padrão de tempo da ocorrência desses eventos podem ser atribuídas às alterações do clima (GUIMARÃES et al., 2021). O debate sobre esses fenômenos tem ganhado cada vez mais notoriedade na atualidade, em virtude da intensidade e complexidade da sua relação com os ecossistemas e ciclos naturais (OLIVEIRA, 2018). Tais eventos não ocorrem de forma isolada, eles fazem parte de um padrão em escala global, pois as alterações climáticas induzem variações que afetam os fenômenos em diferentes escalas temporais e espaciais (SILVA DIAS, 2014; PERERA et al., 2020).

A intensificação de eventos climáticos, a elevação do nível médio do mar (NMM) e o aumento de temperaturas que levam a incêndios florestais e flutuações imprevisíveis nas chuvas são impactos diretos relacionados às mudanças climáticas (BOLAN et al., 2024). O sexto relatório (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) reforça sobre o aumento/diminuição da frequência de precipitação e temperatura a nível global desde 1950 (IPCC, 2021). Entre 2011-2020, a temperatura da superfície global atingiu um valor 1,1 °C maior em relação ao período de 1850-1900, devido à intensificação do Aquecimento Global decorrente das emissões dos gases de efeito estufa (GEE). Tais emissões são decorrentes do uso insustentável de energia, do uso e ocupação da terra, dos estilos de vida e dos padrões de consumo e produção (IPCC, 2023).

Vale ressaltar quando um evento de grande magnitude ocorre em uma sociedade com condições sociais vulneráveis e altera severamente o seu funcionamento cotidiano, causando perdas humanas, materiais, econômicas e ambientais é caracterizado como um desastre natural (LAVELL et al., 2012; UNGA, 2016; VIEIRA et al., 2023). Esses eventos extremos podem causar, por exemplo, ondas de calor e frio, aumento de incêndios, inundações repentinas, deslizamentos de terra e severidade das secas (MARENGO E ESPINOZA, 2016; RODRIGUES et al., 2020).

No Brasil, os desastres naturais com maior frequência estão relacionados ao excesso ou escassez de precipitação, tais como secas e enchentes repentinas (enxurradas), que por sua vez causam sérios danos à sociedade e ao meio ambiente (CEPED, 2013; RODRIGUES et al., 2020). Nos episódios de enchentes, é perceptível o estabelecimento da situação extrema por causa do impacto do aumento dos rios e alagamentos das ruas; ao contrário das secas, onde o evento impacta nos recursos hídricos de forma gradual (SILVA DIAS, 2014). Os desastres naturais hidrometeorológicos não estão obrigatoriamente relacionados com extremos de precipitação com baixa probabilidade de ocorrência, mas sim com valores extremos com probabilidade média e, principalmente, com a vulnerabilidade da região afetada (RODRIGUES et al.,

2021). O monitoramento desses desastres tem permitido que ações de mitigação possam ser postas em prática (SILVA DIAS, 2014).

3.2 Variabilidade climática no Nordeste do Brasil

A variabilidade climática no NEB está associada à interação entre sistemas atmosféricos regionais e fenômenos oceânico-atmosféricos de grande escala, conhecidos como teleconexões climáticas. As teleconexões representam conexões atmosféricas entre regiões distantes do planeta, capazes de modificar padrões de circulação, precipitação e temperatura em diferentes escalas espaciais e temporais (GRIMM; TEDESCHI, 2009; KAYANO; ANDREOLI, 2009; REBOITA et al., 2021).

Entre os principais mecanismos de variabilidade climática que influenciam o regime pluviométrico do NEB destaca-se o El Niño–Oscilação Sul (ENOS), caracterizado pelas anomalias de temperatura da superfície do mar (ATSM) no Oceano Pacífico Equatorial e pelas alterações na circulação atmosférica tropical. Em sua fase quente, denominada El Niño, observa-se o aquecimento anômalo das águas superficiais do Pacífico Equatorial central e leste, favorecendo alterações na célula de Walker (CW) e redução da convecção sobre o NEB. Em contrapartida, durante eventos de La Niña, associados ao resfriamento dessas águas, tende-se a observar aumento da atividade convectiva e maiores acumulados pluviométricos sobre parte do NEB (ALVES et al., 2022; CAI et al., 2021).

Diante da relevância desses episódios, os critérios científicos para a identificação e mensuração das fases do ENOS passaram por revisões profundas para acompanhar as mudanças climáticas globais. Historicamente, para o monitoramento e a classificação operacional desses episódios pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) era utilizado o Oceanic Niño Index (ONI), baseado em médias climatológicas móveis de 30 anos na região equatorial do Pacífico Niño 3.4. Todavia, sob a influência direta do Aquecimento Global e do aumento acelerado da TSM dos oceanos tropicais, esse índice tradicional passou a exibir limitações físicas, uma vez que a sua base histórica de referência móvel pode não acompanhar adequadamente o

aquecimento recente. Assim, houve correção do viés e prover uma métrica fisicamente representativa e estável diante da tendência de Aquecimento Global, a NOAA introduziu e adotou oficialmente, a partir de fevereiro de 2026, o Índice Oceânico Relativo de Niño (Relative Oceanic Niño Index - RONI).

Conceitualmente, os impactos dinâmicos do ENOS dependem essencialmente do gradiente e da diferença de temperatura entre a bacia do Pacífico equatorial centro-leste e o restante dos trópicos. Enquanto o ONI afere de forma estritamente local se a região Niño 3.4 está mais quente ou fria que o seu passado histórico local, a metodologia do RONI calcula a anomalia térmica da região de foco subtraindo a média das anomalias observadas em toda a faixa tropical global. Este ajuste matemático remove o ruído do aquecimento oceânico de fundo, mantendo intactos os efeitos atmosféricos reais sobre os ventos, as chuvas e a circulação. De acordo com os relatórios técnicos mais recentes da NOAA (2026), a consolidação do RONI demonstrou desempenho superior e conferiu maior estabilidade teórica às previsões sazonais, aprimorando substancialmente a correlação física entre as flutuações oceânicas e as respostas atmosféricas observadas no continente.

Além do ENOS, as anomalias térmicas do Oceano Atlântico Tropical exercem papel fundamental na modulação das chuvas do NEB. O gradiente térmico entre o Atlântico Tropical Norte e Sul influencia diretamente o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema produtor de precipitação sobre o norte do NEB. Quando o Atlântico Tropical Norte apresenta temperaturas mais elevadas em relação ao Atlântico Sul, ocorre deslocamento da ZCIT para latitudes mais ao norte, favorecendo condições mais secas no Nordeste brasileiro. Situação oposta favorece maior ocorrência de chuvas sobre a região (REBOITA et al., 2021; ALVES et al., 2022).

A Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) também influencia a variabilidade climática interdecadal no Brasil tropical. Estudos recentes demonstram que fases da ODP podem intensificar ou atenuar os impactos do ENOS sobre o regime pluviométrico do NEB, e assim favorece eventos extremos frequentes, tanto secos quanto chuvosos (CHOI; SON, 2022; WEI et al., 2021).

No setor ENEB, onde está localizado o estado de Alagoas, a atuação dessas teleconexões ocorre de forma integrada aos sistemas atmosféricos regionais, como os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), ventos alísios e as circulações de brisas. Dessa forma, a variabilidade pluviométrica em Alagoas resulta da interação entre mecanismos locais, regionais e globais, contribuindo para elevada irregularidade espacial e temporal da precipitação (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021; LYRA et al., 2024).

3.2.1 Mudanças Climáticas e Extremos Hidrometeorológicos em Alagoas

As mudanças climáticas têm contribuído para alterações significativas nos padrões hidrometeorológicos observados em diferentes regiões do planeta, intensificando a frequência, a duração e a magnitude dos eventos extremos de precipitação e seca (IPCC, 2021; IPCC, 2023). No Brasil, estudos recentes indicam que os impactos associados às mudanças climáticas tendem a se manifestar de forma mais intensa em regiões vulneráveis do ponto de vista socioambiental, especialmente no Nordeste brasileiro, onde a elevada variabilidade pluviométrica e a dependência dos recursos hídricos ampliam os riscos associados aos extremos climáticos (MARENGO et al., 2022; ANA, 2024).

No estado de Alagoas, localizado no setor leste do Nordeste do Brasil, a ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos tem sido observada com maior frequência nas últimas décadas, resultando em episódios de enchentes, enxurradas, movimentos de massa e secas prolongadas. A distribuição irregular das chuvas, associada à atuação simultânea de sistemas atmosféricos regionais e de mecanismos de teleconexão climática, contribui para a elevada vulnerabilidade hidrológica do estado (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021; LYRA et al., 2024).

Eventos extremos recentes registrados em municípios alagoanos evidenciam a sensibilidade da região frente às oscilações climáticas. Estudos realizados para o leste do Nordeste demonstram que episódios de precipitação extrema estão associados principalmente à atuação de DOLs, VCANs e à interação entre sistemas atmosféricos tropicais e anomalias oceânicas,

produzindo impactos significativos sobre áreas urbanas e rurais (SILVA et al., 2020; OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021).

Além dos eventos de excesso hídrico, os períodos de estiagem prolongada também representam importante fator de pressão sobre os recursos hídricos estaduais. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), projeções climáticas indicam tendência de redução da disponibilidade hídrica em diversas regiões hidrográficas do Nordeste até meados do século XXI, podendo intensificar conflitos pelo uso da água e comprometer a segurança hídrica regional (ANA, 2024). Dessa forma, compreender a dinâmica dos extremos hidrometeorológicos em Alagoas torna-se fundamental para subsidiar estratégias de adaptação climática, planejamento territorial e gestão integrada dos recursos hídricos.

3.3 Chuva

A variabilidade espaço-temporal da precipitação é um dos principais fatores que caracterizam o clima de Alagoas, influenciando diretamente a disponibilidade hídrica, os sistemas produtivos e a ocorrência de desastres naturais (LYRA et al., 2014; LYRA et al., 2017). A determinação dos padrões de ocorrência de eventos extremos de precipitação é fundamental para o planejamento de médio e longo prazo da infraestrutura urbana, gestão dos recursos hídricos e fortalecimento da resiliência frente aos impactos das mudanças climáticas (LIMA et al., 2020).

Os impactos associados à recorrência de eventos extremos de chuva e vazão são geralmente evidenciados por meio de enchentes, inundações e alagamentos, contudo, esses fenômenos são frequentemente tratados como sinônimos, apesar de apresentarem características e definições distintas (OLIVEIRA, 2018). O alagamento corresponde ao acúmulo momentâneo de água em áreas urbanas, normalmente associado à deficiência dos sistemas de drenagem. As enchentes resultam do aumento temporário da vazão em canais de drenagem, enquanto as inundações são caracterizadas pelo

transbordamento do fluxo de água para áreas adjacentes em decorrência da elevação da vazão (OLIVEIRA, 2018).

As características dos regimes de chuva no Nordeste do Brasil (NEB) estão relacionadas à posição geográfica da região, à atuação dos sistemas atmosféricos e à interação oceano-atmosfera, além dos efeitos remotos associados aos modos de variabilidade climática (ALVES et al., 2022). Em Alagoas, a dinâmica das chuvas é influenciada principalmente pelo ENOS, pela circulação geral da atmosfera (CGA) e pelas características fisiográficas locais (BARROS et al., 2012; OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021).

Além dos sistemas meteorológicos já mencionados destacam-se também a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e os ventos alísios de nordeste e sudeste, que exercem forte influência sobre o regime pluviométrico do estado (BARROS et al., 2012). Em relação aos VCANs (citados anteriormente), que também contribuem para a variabilidade climática regional, Costa (2010) verificou que, entre 1998 e 2007, aproximadamente 61% dos sistemas atuantes sobre o Nordeste brasileiro influenciaram a região de Alagoas. Esses sistemas apresentam maior frequência entre setembro e abril, com máxima ocorrência no mês de janeiro (KOUSKY; GAN, 1981; COSTA, 2010). Repinaldo (2010), ao analisar a frequência dos VCANs em anos de ENOS, verificou que 37,1% dos eventos ocorreram em anos de El Niño, 28,8% em anos de La Niña e 34,1% em condições neutras.

A configuração fisiográfica do estado também exerce influência significativa na distribuição das chuvas. A presença dos tabuleiros costeiros favorece a atuação das circulações de brisa marítima e terrestre, permitindo maior penetração de umidade sobre a porção leste de Alagoas e, em alguns casos, até o interior do continente. Essas precipitações podem ocorrer ao longo de todo o ano, embora sejam mais frequentes entre março e setembro, geralmente associadas a chuvas de intensidade fraca a moderada (MELO, 1980).

As diferenças espaciais do regime pluviométrico alagoano foram evidenciadas por Pereira et al. (2012), que identificaram comportamento distinto entre as mesorregiões do estado. No Sertão Alagoano, janeiro apresentou o menor número de dias com chuva, enquanto o aumento da frequência de precipitação ocorreu a partir de março. Já as mesorregiões do Litoral e Agreste registraram os maiores valores médios de dias chuvosos no mês de janeiro. Esses resultados corroboram os achados de Lyra et al. (2014), que observaram forte gradiente espacial na distribuição das chuvas entre o Litoral e o Sertão, bem como diferenças entre os setores norte e sul do litoral alagoano. Segundo os autores, a topografia exerce papel importante nessa distribuição, destacando-se a estação de Santana do Mundaú, localizada a cerca de 50 km da costa, que apresentou acumulado anual de 2619 mm em virtude de sua posição a barlavento da Serra da Borborema, cuja altitude média é de aproximadamente 400 m acima do nível médio do mar, com picos de até 1000 m.

A variabilidade da precipitação no NEB também é responsável pelas oscilações no volume dos reservatórios ao longo da estação chuvosa, impactando diretamente a disponibilidade hídrica da população. Gomes e Lima (2021) destacam que o atraso da estação chuvosa em determinada sub-região reduz a captação de água pelos reservatórios, enquanto períodos chuvosos acima da média favorecem o aumento do armazenamento hídrico e podem ocasionar o transbordamento desses sistemas. Dessa forma, compreender a dinâmica das chuvas e seus extremos é essencial para o monitoramento hidrometeorológico e para o planejamento de ações de mitigação e adaptação aos impactos climáticos no estado de Alagoas (LIMA et al., 2020; GOMES E LIMA, 2021).

3.4 Seca

A seca pode ser definida de diferentes maneiras em função das características climáticas regionais e dos distintos padrões de utilização dos recursos hídricos, dificultando a adoção de uma definição universalmente aceita (FERNANDES et al., 2009; SOUSA JUNIOR et al., 2021). De modo geral, os

estudos associam as secas às condições de escassez hídrica decorrentes da redução das precipitações, elevada evapotranspiração (ET) e intensa exploração dos recursos hídricos (PALMER, 1965; FERNANDES et al., 2009; CUNHA et al., 2019). Embora algumas regiões do Brasil apresentem chuvas abundantes ao longo de praticamente todo o ano, como as regiões Norte e Sul (SILVA et al., 2021), outras áreas, especialmente aquelas inseridas no clima semiárido, possuem estação seca prolongada e elevada irregularidade pluviométrica (SOUZA et al., 2024).

A atuação de sistemas atmosféricos de grande escala também influencia diretamente a ocorrência e persistência das secas. Certas combinações entre fases de oscilações climáticas, como o ENOS (CAI et al., 2020; 2021) e a ODP (WEI et al., 2021; CHOI; SON, 2022), podem favorecer episódios de seca mais intensos e persistentes no Nordeste brasileiro (GRIMM et al., 2020). Em Alagoas, sistemas como a Alta da Bolívia (AB), um anticiclone de altos níveis que atua predominantemente entre outubro e janeiro, também contribuem para condições mais secas observadas principalmente no sertão alagoano (LYRA et al., 2014). Segundo Costa (2010), durante o verão, o padrão de circulação associado à AB favorece a formação de uma circulação ciclônica em altos níveis que induz subsidência em baixos níveis sobre o NEB, e assim reduz a formação de nuvens e a ocorrência de precipitação.

A seca é considerada um fenômeno natural complexo, podendo ocorrer tanto em regiões úmidas quanto em áreas de baixa precipitação, o que torna difícil prever precisamente seu início e término (WILHITE; GLANTZ, 1985; CUNHA et al., 2019). Além disso, sua severidade não depende apenas da duração, intensidade e extensão geográfica do evento, mas também das demandas hídricas das atividades humanas e da vegetação em determinada região (WILHITE; GLANTZ, 1985). Nesse contexto, os impactos associados às secas estão diretamente relacionados à vulnerabilidade da população exposta ao fenômeno (CUNHA et al., 2019), podendo persistir por vários anos mesmo após o encerramento do evento climático (MARENGO et al., 2016).

Diversos autores classificam a seca em diferentes categorias: i) seca hidrológica, relacionada à redução dos níveis de água em reservatórios superficiais e subterrâneos; ii) seca meteorológica, caracterizada pelo déficit de precipitação em relação à média climatológica; iii) seca agrícola, associada à disponibilidade de água no solo para a vegetação; e iv) seca socioeconômica, que ocorre quando a escassez hídrica compromete o fornecimento de bens e serviços devido à insuficiência de água (PALMER, 1965; WILHITE; GLANTZ, 1985; HEIM JR., 2002; BLAIN; BRUNINI, 2006; FERNANDES et al., 2009; VIEIRA et al., 2023).

Apesar de as secas serem recorrentes em diversas regiões brasileiras, especialmente no NEB, os impactos registrados reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à mitigação, monitoramento e preparação frente a esses eventos (CUNHA et al., 2019). Nesse contexto, os índices de seca surgem como importantes ferramentas para identificar, avaliar e monitorar a severidade e duração desses fenômenos, contribuindo para a compreensão dos processos meteorológicos, hidrológicos e agrícolas associados à variabilidade climática (GONÇALVES et al., 2021).

3.5 Impactos de eventos extremos em bacias hidrográficas

Historicamente, diversos autores conceituam Bacia Hidrográfica (BH) à sua maneira. Para Horton (1945), a BH compreende um sistema composto por um conjunto de canais que drenam uma determinada superfície com limites naturalmente definidos; assim, os canais fluviais podem ser hierarquizados e quantificados para fins de compreensão do ciclo hidrológico, da erosão e da dinâmica natural da bacia. Em 1962, Chorley conceituou BH como um sistema aberto de captação de água, constituído por setores elevados e divisores topográficos, por onde partem os cursos de água para um rio principal que segue para uma saída comum. Strahler (1979) entende que a BH é um sistema de drenagem composto por um conjunto de pequenas bacias adaptadas em formas e tamanhos em relação ao rio para o qual confluem.

Vale ressaltar que essas conceituações restringem as BHs ao âmbito hidrológico, não enfatizando seus outros elementos e processos interativos.

Gradualmente, o conceito de BH passou a ser mais complexo com a inclusão de variáveis sociais, políticas, econômicas, culturais, a expansão de seus limites e suas aplicações além das ciências naturais, sendo empregada também pelas ciências humanísticas (GOMES et al., 2021). É notória a importância de uma BH para a região à qual ela pertence.

Estudos têm mostrado a relação das mudanças climáticas com casos e projeções de eventos extremos nas bacias. Por exemplo, Coutinho e Cataldi (2021) analisaram as projeções de vazão futura para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, com base no modelo chuva-vazão SMAP para a cabeceira da bacia do rio São Francisco (BRSF) e observaram que o maior problema é a má distribuição das vazões ao longo do próximo século; ou seja, espera-se anos com vazões superiores a 95% da distribuição para a bacia, o que pode acarretar sérios problemas estruturais, tais como enchentes, surtos de doenças e crises na logística urbana. Há também projeções de períodos prolongados com vazões abaixo da média, o que implica na redução do armazenamento nos reservatórios e conflitos entre municípios e estados.

De Jong et al. (2021) estimaram o impacto das mudanças climáticas no potencial hidroelétrico de várias bacias na América do Sul (AS). Em 9 das 10 bacias estudadas, as projeções são de diminuição da precipitação nas próximas décadas se comparadas com a média climatológica de 1961-1990, sendo acentuadas nas bacias do Norte e NEB. Ainda segundo os autores, apenas na bacia do Uruguai (parte da região Sul do Brasil) espera-se que o potencial hidrelétrico aumente consistentemente. Porém, a quantidade de excesso de água derramada (ou seja, não podendo ser usada para gerar eletricidade) deverá aumentar nas próximas três décadas.

Regionalmente, o estudo de Andrade et al. (2021) se concentrou na avaliação dos impactos futuros nos recursos hídricos da Bacia do Rio Mundaú, entre os estados de Pernambuco e Alagoas, via modelos climáticos regionais (Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2). De acordo com o estudo, são esperadas reduções significativas nas chuvas e aumentos nas temperaturas para essa bacia, principalmente na estação chuvosa e, ainda menor, na estação seca.

Assim, o cenário esperado é de escassez hídrica e vulnerabilidade em quase toda a bacia. Os autores sugerem o desenvolvimento de políticas públicas e planos de gestão que favoreçam o uso sustentável da água para garantir a segurança hídrica.

Diante desse cenário, adota-se a divisão em Regiões Hidrográficas (RHs), as quais abrangem espaços territoriais compostos por uma bacia, grupos de bacias ou sub-bacias adjacentes que compartilham perfis naturais e socioeconômicos similares. Essa delimitação é estruturada com o objetivo de otimizar as diretrizes de planejamento e a gestão integrada dos recursos hídricos (ANA, 2020).

3.5.1 Regiões Hidrográficas como Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos

A gestão dos recursos hídricos utiliza as bacias e RHs como unidades de planejamento, pois esses recortes permitem integrar aspectos hidrológicos, ambientais, econômicos e sociais (ANA, 2024). Essa abordagem foi consolidada pela Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433/1997, que define a bacia hidrográfica como unidade territorial para o gerenciamento das águas no Brasil. A divisão de RHs permite uma visão mais integrada dos processos hidrológicos e dos diferentes usos da água, contribuindo para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (ANA, 2024).

A utilização das RHs torna-se ainda mais importante diante das mudanças climáticas. Segundo a ANA (2024), a redução da disponibilidade hídrica prevista para algumas regiões brasileiras poderá aumentar a pressão sobre o abastecimento público, a irrigação, a geração de energia e os ecossistemas aquáticos.

3.6 Segurança Hídrica, Vulnerabilidade Socioeconômica e Pressão Antrópica

A disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas é fundamental para o desenvolvimento econômico, social e ambiental de uma região. Nesse contexto, a segurança hídrica está relacionada à garantia de água

para os diferentes usos e à redução dos riscos associados à escassez hídrica e aos eventos extremos (ANA, 2024).

No NEB, a segurança hídrica está diretamente ligada à variabilidade climática. A irregularidade das chuvas influencia o abastecimento humano, a agricultura, a geração de energia e a manutenção dos ecossistemas naturais. Durante períodos de seca, esses impactos tendem a ser mais intensos em áreas com infraestrutura limitada ou elevada dependência dos recursos hídricos locais (CUNHA et al., 2021).

Além dos fatores climáticos, aspectos socioeconômicos também influenciam a capacidade de resposta da população aos eventos extremos. Segundo o IPCC (2022), a vulnerabilidade está relacionada à suscetibilidade de pessoas e comunidades aos impactos da variabilidade climática e das mudanças climáticas. Assim, regiões com baixos indicadores socioeconômicos costumam apresentar maiores dificuldades para enfrentar secas e eventos extremos de precipitação.

Os impactos dos eventos hidrometeorológicos não dependem apenas da intensidade do fenômeno. Problemas como deficiência no saneamento, ocupação inadequada do território, crescimento urbano desordenado e limitações na gestão dos recursos hídricos podem aumentar os danos causados por secas, enchentes e inundações (RODRIGUES et al., 2021; VIEIRA et al., 2023).

A pressão antrópica também contribui para esse cenário, já que o aumento da demanda por água, as mudanças no uso da terra e os processos de degradação ambiental podem reduzir a disponibilidade hídrica e aumentar a vulnerabilidade das regiões hidrográficas (ANA, 2024). Em áreas com maior pressão antrópica, os efeitos da variabilidade climática tendem a ser mais intensos, principalmente durante períodos de estiagem (CARETTA et al., 2022).

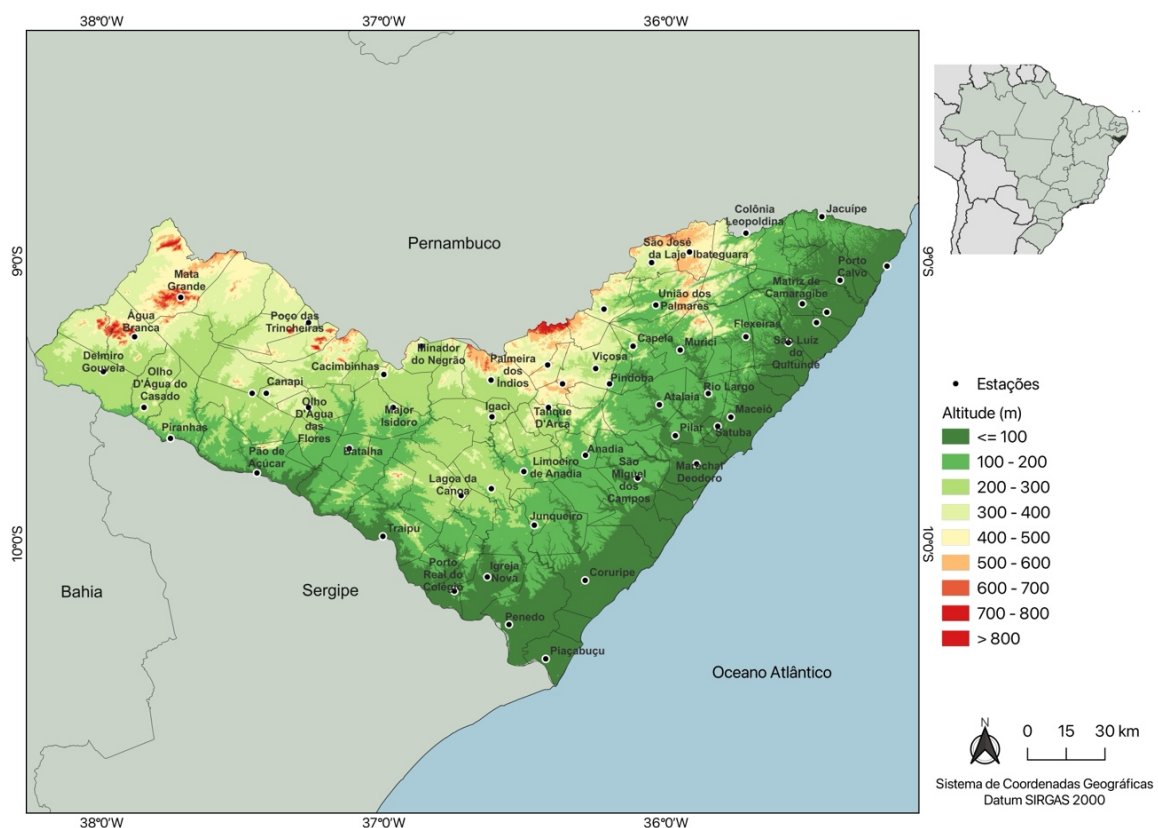
Por isso, a análise conjunta de informações climáticas, hidrológicas e socioeconômicas é importante para compreender a vulnerabilidade das regiões hidrográficas e auxiliar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (IPCC, 2022; UNESCO, 2024).

4 MATERIAIS E METÓDOS

4.1 Área de estudo

Alagoas está localizada no ENEB - (Figura 1), entre as latitudes 8°48'12" e 10°29'12" Sul (S) e entre as longitudes 35°09'36" e 38°13'54" a oeste (W) de Greenwich. O Estado possui uma área territorial de 27.830,661 km² e cerca de 3.127.511 habitantes, com uma densidade demográfica de 112,38 hab/km² e um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,684 em 2021.

Figura 1 – Mapa da área de estudo, com a localização das 54 estações pluviométricas e os municípios, respectivamente. Fonte: Autora



Alagoas, que tem como base econômica a produção de cana-de-açúcar, pecuária, indústria e turismo, possui dez RH (Figura 2) e os piores indicadores socioeconômicos (IBGE, 2022). Em relação a divisão das RH, há divergência entre a base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 202; Figura 2) e da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH, 2019; Figura 3). No estudo será adotado a base de dados do IBGE.

Figura 2 – Microrregiões hidrográficas de acordo com dados do IBGE (2021) e altimetria (m) com dados STRM/NASA (2000). Fonte: Autora.

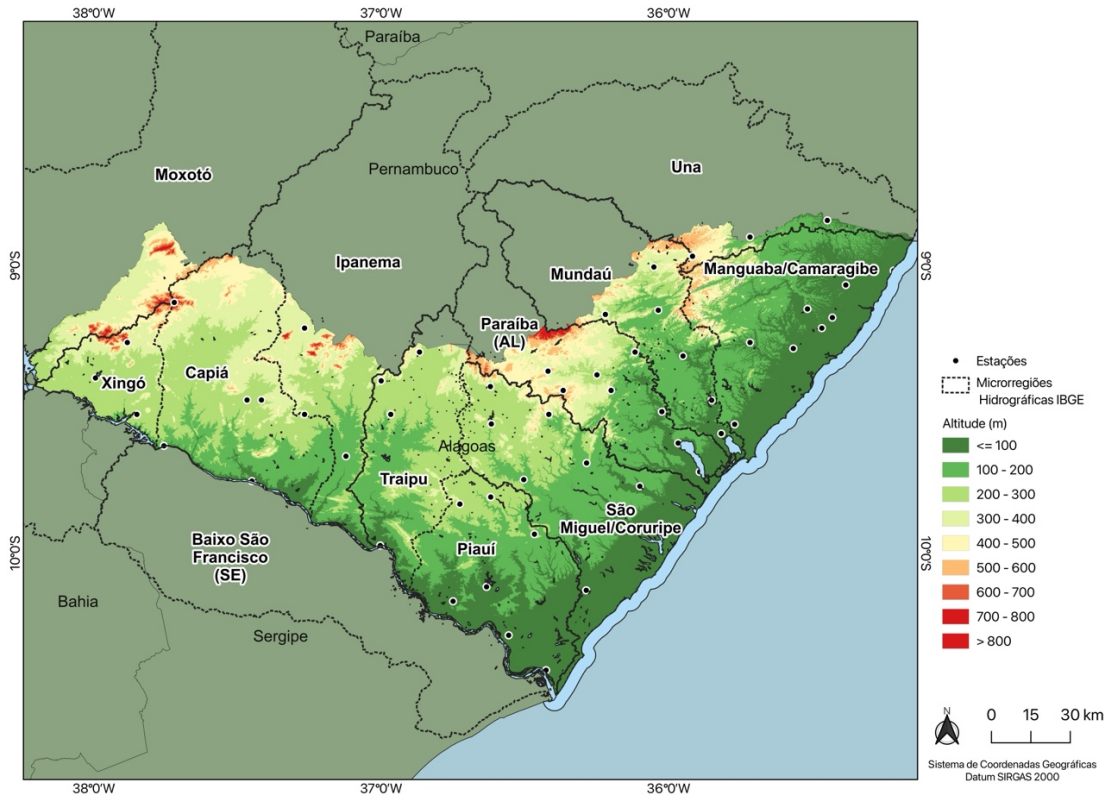
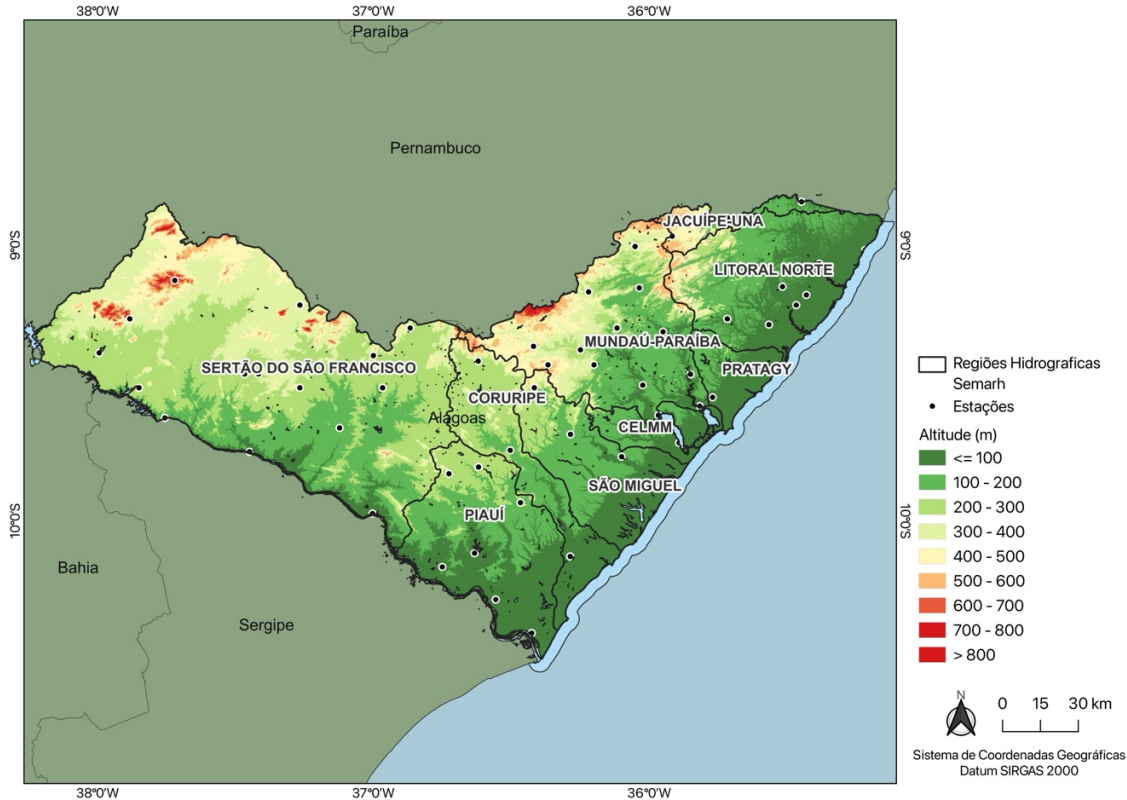
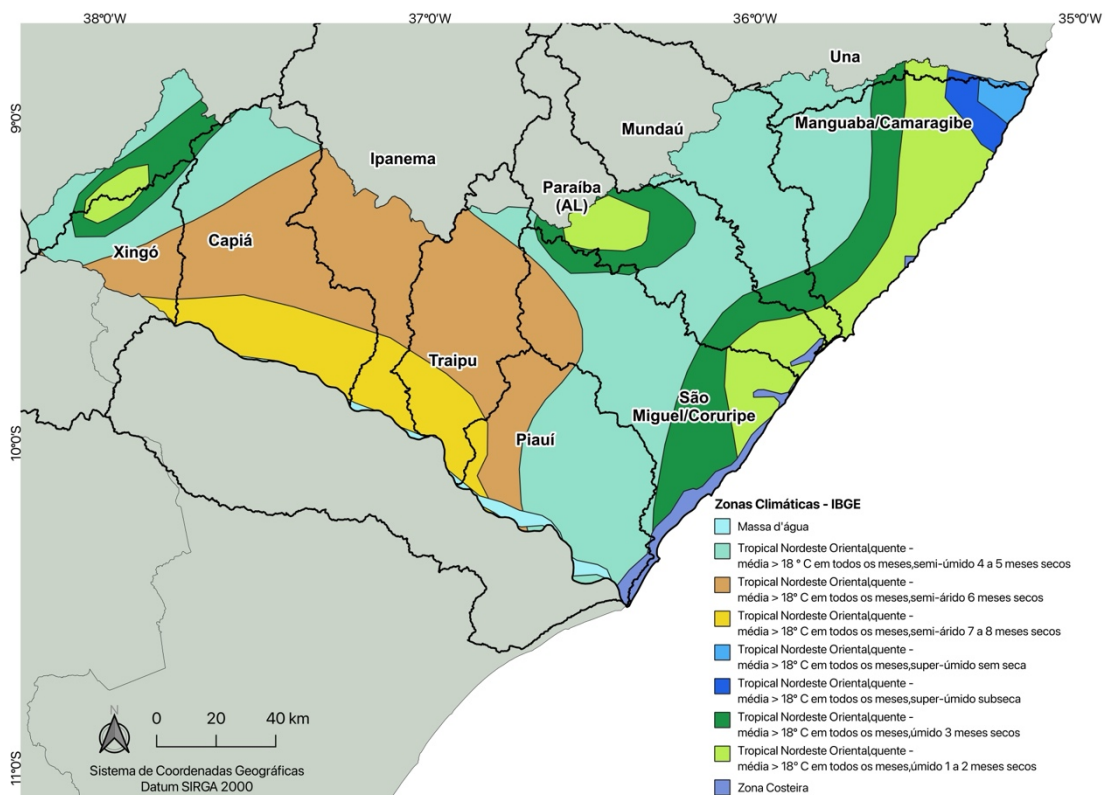


Figura 3 – Regiões hidrográficas de acordo com dados da SEMARH (2019) e altimetria (m) com dados STRM/NASA (2000). Fonte: Autora.



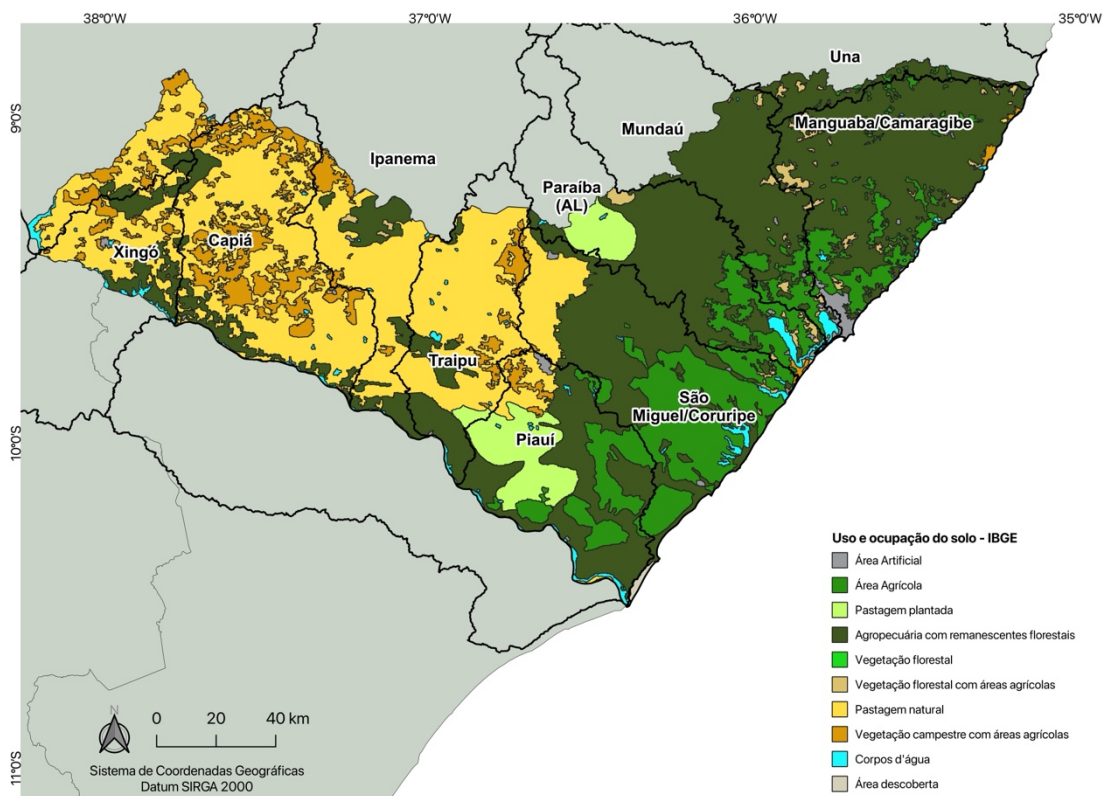
Devido a sua localização no ENEB, Alagoas apresenta características climáticas como irregularidades da chuva e menor variação sazonal da radiação solar, do fotoperíodo e da temperatura do ar (LYRA et al, 2014; SANTOS et al, 2020). De acordo com a classificação de Köppen, a maior parte do Estado possui clima do tipo 'As', ou seja, tropical e quente, com chuva de março a agosto entre 1.000 mm e 1.500 mm. A parte do leste alagoano, próximo à divisa com Pernambuco (PE), possui clima 'Ams', tropical com chuvas de abril a agosto e médias pluviométricas anuais entre 1.500 mm e 2.200 mm. Já a metade ocidental do estado apresenta condições semiáridas, com clima 'BSh', isto é, quente e seco, com chuva média anual no sertão entre 400 mm e 600 mm e no agreste de 600 mm a 900 mm (BARROS et al., 2012; IBGE, 2020). A Figura 4 apresenta as zonas climáticas de Alagoas com base nos dados do IBGE (2020) e suas respectivas características. Todas as zonas do Estado apresentam temperaturas acima de 18° C em todos os meses com divergências apenas no período chuvoso e seco.

Figura 4 – Zonas climáticas com base nos dados do IBGE (2020). Fonte: Autora.



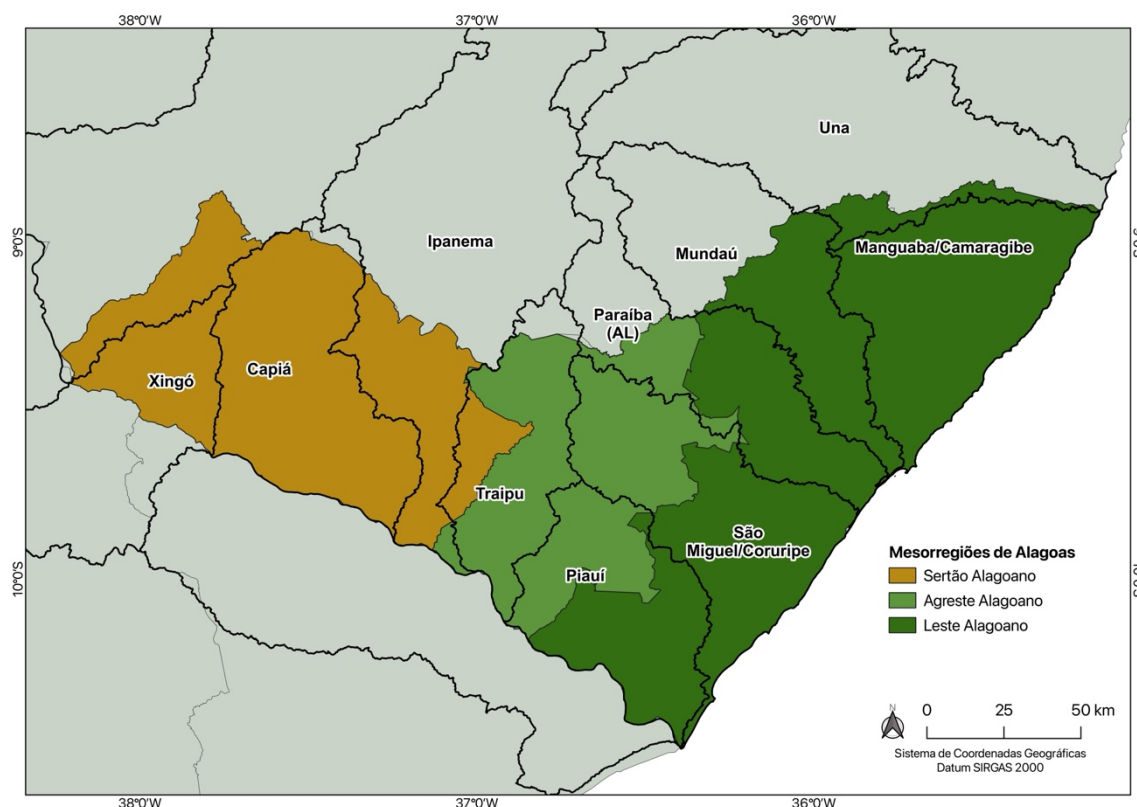
Já na Figura 5 é apresentado a espacialização das características de uso e ocupação do solo também com base nos dados do IBGE (2020). Podemos observar que pelo menos dez classes diferentes, desde áreas naturais com vegetação nativa ou com áreas agrícolas à áreas artificiais referentes as principais áreas urbanas.

Figura 5 – Uso e ocupação do solo com base nos dados do IBGE (2020). Fonte: Autora.



Para auxiliar na contextualização das análises dos resultados foi destacado as mesorregiões climáticas (Figura 6) de acordo com a Secretaria de Estado do Planejamento e do Desenvolvimento Econômico de Alagoas – SEPLANDE (2014), sendo elas: Leste, Agreste e Sertão Alagoano.

Figura 6 – Mesorregiões climáticas de Alagoas com base nos dados do IBGE (2020). Fonte: Autora.



4.2 Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos mensais utilizados no estudo são referentes a 54 estações localizadas no estado de Alagoas (Figura 1) pertencentes à rede hidrometeorológica da ANA – Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA, 2022), obtidos via portal eletrônico denominado HidroWeb no seguinte endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>. O período de estudo compreende 1960 a 2016. Os dados pluviométricos apresentavam falhas e foram imputados via método MICE, maiores detalhes do controle de qualidade, preenchimento de falhas e homogeneidade da série temporal encontram-se em Souza et al. (2021) e Costa et al. (2021).

4.2.1 Dados Socioeconômicos e de Demanda Hídrica

Para a caracterização da pressão antrópica e avaliação da vulnerabilidade nas RHs, foram utilizados dados secundários de densidade demográfica e Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, censos 2022/2024).

Complementarmente, os dados geoespaciais de vazão de retirada (urbana, rural, irrigação e total) e o Índice de Vulnerabilidade Hídrica (IVI) de 2021 (apenas disponível para esse ano) foram extraídos da base de dados oficiais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

4.3 Standardized Precipitation Index - SPI

O SPI foi desenvolvido pelos autores McKee; Does-ken e Kleist em 1993 e quantifica o déficit de chuva nas diversas escalas de tempo (1 a 24 meses) e ajuda a avaliar a severidade da seca (McKEE et al., 1993; GONÇALVES et al., 2021). O cálculo do SPI (Eqs. (1) e (2)) é realizado com base nos dados mensais de chuva acumulada para um intervalo de tempo de n meses. Essas séries temporais são submetidas a uma função Gama, e logo após, são calculadas as probabilidades de ocorrência de cada valor de chuva. Em seguida, aplica-se a inversa da distribuição Normal para encontrar os desvios pluviométricos em relação à média para os intervalos analisados (McKEE et al., 1993; GONÇALVES et al., 2021).

$$\text{Se } 0 < H(x) < 0,5. \quad (1)$$

$$\text{Se } 0,5 < H(x) < 1. \quad (2)$$

em que, $t = \sqrt{\ln [1 / (H(x))^2]}$ para $0 < H(x) < 0,5$ e $t = \sqrt{\ln [1 / (1 - (H(x))^2)]}$ para $0,5 < H(x) < 1$; $H(x)$ = distribuição de probabilidade acumulada; C_0 , C_1 , C_2 , d_1 , d_2 e d_3 são constantes e equivalem respectivamente aos valores: 2,515517; 0,802853; 0,010328; 1,432788; 0,189269; 0,001308.

Após o cálculo do SPI, obtém-se um valor adimensional correspondente a uma categoria, segundo a Tabela 1 (McKEE et al., 1993; DA SILVA et al., 2021). Neste estudo, o SPI foi usado o SPI de doze meses (SPI-12) para identificar secas de longo prazo nas BH existentes em Alagoas. Todos foram calculados através do software DrinC (Tigkas et al., 2014; Tigkas et al., 2022), cuja metodologia é descrita da seguinte forma:

- i) Primeiro, prepara-se uma série de dados de precipitação mensal para um período de ' m ' meses, idealmente um período contínuo de pelo menos 30 anos.

- ii) Em seguida, são selecionados períodos de média (3, 6, 12, 24 ou 48 meses) para determinar as escalas de tempo, neste caso apenas 12 meses. Embora arbitrárias, essas escalas de tempo são representativas dos períodos em que a falta de chuva pode afetar os cinco tipos de fontes de água utilizáveis. A análise utiliza uma média móvel, onde a cada mês um novo valor é calculado com base nos meses anteriores.
- iii) A seguir, cada uma das séries de dados é ajustada a uma função Gamma para estabelecer a relação entre a probabilidade e a precipitação. Uma vez que essa relação é estabelecida a partir dos registros históricos, a probabilidade de qualquer valor de precipitação observado é calculada.
- iv) Esse valor é então usado, juntamente com uma estimativa da normal inversa, para calcular o desvio de precipitação para uma densidade de probabilidade com distribuição normal, com média zero e desvio padrão de um. Esse valor final é o SPI para o ponto de dado de precipitação específico.

Tabela 1. Classificação dos períodos secos e chuvosos de acordo com valores de SPI. Fonte: Adaptado de McKee et al., (1993).

Valores de SPI	Categorias
-2,00	Extremamente seco
-1,99 a -1,50	Muito seco
-1,49 a -1,00	Moderadamente seco
-0,99 a 0,99	Próximo ao normal
1,00 a 1,49	Moderadamente úmido
1,50 a 1,99	Muito úmido
2,00	Extremamente úmido

4.4 Método de interpolação espacial

Para a elaboração dos mapas de chuva e SPI-12, o procedimento de interpolação e o geoprocessamento dos dados foram realizados através do software Quantum GIS (QGIS) versão 3.34.15 (QGIS, 2024). Foi utilizado o método de interpolação Inverse Distance Weighting (IDW), esse processo atribui valores a pontos desconhecidos utilizando um conjunto disperso de pontos conhecidos. As formulações matemáticas para calcular um valor interpolado são dadas por:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (3)$$

$$\omega_i = \frac{1}{h(x, x_i)^p} \quad (4)$$

em que, $Z(x)$ o valor do ponto que se deseja interpolar; n o número de pontos próximos utilizados na interpolação do ponto x ; $Z(x_i)$ o valor do ponto x_i ; ω_i o peso do valor de x_i sobre o ponto x ; $h(x, x_i)$ a distância entre o ponto x e o ponto x_i ; e p o parâmetro de potência.

À medida que a distância aumenta, o peso desse valor em relação ao ponto calculado diminui. Assim, maiores valores de parâmetro de potência evidenciam pontos mais próximos e torna o resultado menos suave; e menores valores de parâmetro de potência evidenciam pontos mais afastados, o que torna o resultado mais suavizado (EL-SHEIMY et al., 2005).

4.5 Critérios das fases do ENOS

O Oceanic Niño Index (ONI) é o principal índice da National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) utilizado para classificar as fases do ENOS (REBOITA et al., 2021). O ONI é o resultado da média móvel trimestral da anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) coletada em quatro regiões do Pacífico, sendo a região denominada de Niño 3.4 a mais utilizada (DE PAULA, 2009; NOAA, 2009; REBOITA et al., 2021). A NOAA considera que as condições do El Niño estão presentes no oceano quando o ONI da região Niño 3.4 é $\geq 0,5^\circ\text{C}$, ao contrário, das condições da La Niña que existem quando o ONI é $\leq -0,5^\circ\text{C}$ por, no mínimo, cinco meses consecutivos. No intervalo de $-0,5^\circ\text{C}$ a $0,5^\circ\text{C}$ são considerados anos neutros. Para a elaboração das figuras e mapas foram escolhidos anos com eventos extremos do ENOS (Tabela 2).

Tabela 2. Intensidade de eventos El Niño e La Niña via **índice ONI**. Fonte: Golden Gate Weather Services.

Evento	Intensidade	Anos
El Niño	Fraco	1952/53, 1953/54, 1958/59, 1969/70, 1976/77 1977/78, 1979/80, 2004/05, 2006/07, 2014/15
	Moderado	1951/52, 1963/64, 1968/69, 1986/87, 1994/95, 2002/03, 2009/10
	Forte	1957/58, 1965/66, 1972/73, 1987/88, 1991/92
	Muito Forte	1982/83, 1997/98, 2015/16
Neutro		1960/61, 1967, 1978/79, 1980/81, 1990, 1993, 2013
La Niña	Fraca	1954/55, 1964/ 65, 1971/72, 1974/ 75, 1983/ 84, 1984/85, 2000/01, 2005/06, 2008/09, 2016/17
	Moderada	1955/56, 1970/71, 1995/96, 2011/12
	Forte	1973/74, 1975/76, 1988/89, 1998/99, 1999/00, 2007/08, 2010/11

A partir de fevereiro de 2026, a NOAA passou a utilizar o Índice Oceânico Relativo de Niño (RONI) como novo padrão para monitorar o ENOS (El Niño–Oscilação Sul) porque o índice tradicional ONI apresentava limitações diante do aquecimento global dos oceanos. O ONI utiliza desvios da temperatura da superfície do mar em relação a uma média climatológica de 30 anos, porém essa referência pode não acompanhar adequadamente o aquecimento recente dos oceanos tropicais. O RONI busca corrigir esse problema ao comparar as anomalias da região Niño 3.4 com a média das anomalias de toda a faixa tropical global, tornando a classificação dos eventos mais estável e fisicamente representativa (NOAA, 2026).

Segundo a NOAA, os impactos do ENOS dependem da diferença de temperatura entre o Pacífico equatorial centro-leste e o restante dos trópicos. Enquanto o ONI analisa apenas se a região Niño 3.4 está mais quente ou fria que a média histórica local, o RONI avalia se essa região está mais quente ou fria em relação ao conjunto dos oceanos tropicais. Isso melhora a representação das condições oceânicas e atmosféricas associadas ao El Niño e à La Niña (NOAA, 2026).

A metodologia mantém os critérios operacionais já utilizados anteriormente, incluindo o limiar de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a necessidade de cinco trimestres móveis consecutivos para caracterizar eventos de El Niño ou La Niña. A principal mudança está apenas na forma de medir as anomalias (NOAA, 2026).

A NOAA também destaca que o RONI não altera os impactos reais dos eventos recentes, apenas remove parte do aquecimento associado à tendência global dos oceanos. Por exemplo, o El Niño 2023–2024 passa a apresentar intensidade menor numericamente no RONI ($+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) em comparação ao ONI ($+2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), embora seus impactos permaneçam os mesmos (NOAA, 2026).

Com a adoção do novo índice, alguns eventos históricos foram reclassificados. Entre as mudanças citadas estão a retirada da classificação de El Niño fraco de 1958–59, 2014–15 e 2019–20, além da inclusão de 1992–93 como evento de El Niño fraco. Também ocorreram ajustes em episódios de La Niña. Segundo a NOAA, essas alterações refletem uma medição mais precisa do ENOS, e não mudanças no comportamento do fenômeno (NOAA, 2026).

Tabela 3. Reclassificação da intensidade de eventos El Niño e La Niña via **índice RONI**. Fonte: Golden Gate Weather Services.

Evento	Intensidade	Anos
El Niño	Fraco	1951/52, 1952/53, 1953/54, 1969/70, 1977/78, 1979/80, 1992/93, 2004/05, 2006/07, 2014/15, 2028/19
	Moderado	1963/64, 1968/69, 1976/77, 1986/87, 1994/95, 2002/03, 2009/10, 2023/24
	Forte	1957/58, 1965/66, 1972/73, 1987/88,
	Muito Forte	1982/83, 1991/92, 1997/98, 2015/16
Neutro		1959/60, 1960/61, 1962/63, 1967/68, 1978/79, 1980/81, 1985/86, 1990, 1993, 2001/02, 2013/14, 2019/20
La Niña	Fraca	1954/55, 1964/ 65, 1970/71, 1974/ 75, 1983/ 84, 1984/85, 1995/96, 2000/01, 2005/06, 2008/09, 2011/12, 2024/25, 2025/26
	Moderada	1955/56, 2016/17, 2017/18, 2020/21, 2021/22, 2022/23
	Forte	1973/74, 1975/76, 1988/89, 1998/99, 1999/00, 2007/08, 2010/11

A NOAA afirma ainda que o RONI apresenta classificações mais estáveis ao longo do tempo, mantém desempenho semelhante ou ligeiramente superior nas previsões sazonais e melhora a relação entre os índices oceânicos e os impactos atmosféricos observados, como chuva, temperatura e circulação atmosférica (NOAA, 2026).

4.6 Estatística Aplicada

Para a análise dos dados pluviométricos foram calculados: a média – $\bar{x}$ (mm) (1), a mediana – M_d (mm) (2), o desvio padrão – DP (mm) (3), o coeficiente de variação – CV (%) (4), a Média Móvel – MM (9), a Regressão Linear Simples (10) e o Coeficiente de Determinação – R^2 (11).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

$$M_d = l_i + \left[\frac{\frac{n}{2} - f_{ac_{ant}}}{f_i} \right] x h \quad (6)$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (7)$$

$$CV = \frac{DP}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (8)$$

$$MM_t = \frac{x_{t-k+1} + x_{t-k+2} + \dots + x_t}{k} \quad (9)$$

$$y = a + bX \quad (10)$$

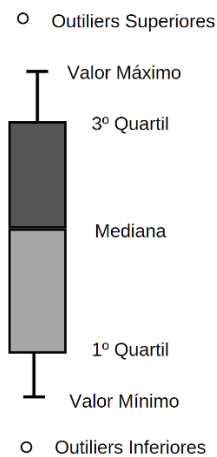
$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad (11)$$

em que, x_i é um dado elemento e n o número total de elementos; l_i é o limite inferior da classe mediana; $f_{ac_{ant}}$ é a frequência acumulada da classe que antecede à classe da mediana; f_i é a frequência simples da classe da mediana; h é a amplitude da classe da mediana; DP é o desvio padrão; MM_t é a média móvel no tempo t ; k é o número de períodos considerados (no caso, dois períodos); x_t é o valor observado na posição t ; a é intercepto; b é o coeficiente angular; SQ_{res} é a diferença entre os valores observados e valores estimados e SQ_{tot} é a diferença entre os valores observados e a média.

4.7 Interpretação do *Boxplot*

O gráfico de boxplot auxilia na interpretação e classificação de regimes pluviométricos anuais, com valores mínimos, máximos e primeiro, segundo (mediana) e terceiro quartis (Figura 7).

Figura 7 – Legenda para interpretação do gráfico boxplot. Fonte: Adaptado de SILVA et al., 2017).



4.8 Índice de Anomalia de Chuva – IAC

O Índice de Anomalia de Chuva (IAC), proposto por Rooy (1965), é uma metodologia amplamente utilizada (RAZIEI, 2021; SILVA; SOUSA; KAYANO, 2010; ROCHA et al., 2025i) para quantificar desvios da precipitação em relação a climatologia de uma região. O IAC permite classificar períodos secos e úmidos com base na comparação entre os valores observados e os extremos históricos da série temporal, sendo particularmente útil em estudos de variabilidade climática e monitoramento de eventos extremos.

O cálculo do IAC é realizado a partir da diferença entre a precipitação observada em um determinado período e a média climatológica da série, normalizada pelos valores médios dos maiores e menores extremos históricos. Para valores positivos (anos úmidos), o índice é calculado por:

$$IAC = 3 \cdot \frac{(P - \bar{P})}{P_{m\acute{a}x} - \bar{P}} \quad (12)$$

Para valores negativos (anos secos), utiliza-se:

$$IAC = -3 \cdot \frac{(P - \bar{P})}{P_{m\acute{i}n} - \bar{P}} \quad (13)$$

em que:

$\bar{P}$ representa a precipitação observada no período analisado;

$\bar{P}$ corresponde à média climatológica da série;

$\bar{P}_{m\acute{a}x}$ é a média dos maiores valores de precipitação da série (geralmente os 10 maiores);

$\bar{P}_{m\acute{i}n}$ é a média dos menores valores de precipitação (geralmente os 10 menores).

O fator de escala (± 3) é utilizado para padronizar os valores do índice, e assim permite comparação entre diferentes regiões e períodos. Valores positivos de IAC indicam condições acima da média (períodos úmidos), enquanto valores negativos indicam condições abaixo da média (períodos secos).

A classificação dos eventos pode ser realizada conforme intervalos do índice, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação do IAC.

Valores de IAC	Classificação
≥ 4	Extremamente úmido
2 a 3,99	Muito úmido
0 a 1,99	Úmido
0 a -1,99	Seco
-2 a -3,99	Muito seco
≤ -4	Extremamente seco

No estudo, o IAC foi aplicado à série histórica de precipitação anual das RH de Alagoas no período de 1960 a 2016. O índice foi utilizado como ferramenta complementar ao SPI, pois permite avaliar a intensidade e a persistência de eventos secos e úmidos de forma direta, sem a necessidade de ajuste probabilístico da série temporal.

Uma das principais vantagens do IAC é sua simplicidade de cálculo e interpretação, além da sua capacidade de destacar eventos extremos. No

entanto, diferentemente do SPI, o índice não considera a distribuição estatística dos dados, o que pode limitar sua aplicação em análises probabilísticas (CUNHA et al., 2020; HAYES et al., 2011).

Ainda assim, o uso combinado do IAC com o SPI permite uma análise robusta da variabilidade pluviométrica, uma vez que o IAC enfatiza os desvios em relação à média, enquanto o SPI permite a avaliação da severidade da seca em múltiplas escalas temporais. Essa abordagem integrada tem sido usada em estudos recentes de monitoramento climático e hidrológico (WU et al., 2024; GUAN et al., 2025).

4.9 Coeficiente de Silhueta (Silhouette Score)

O coeficiente de silhueta é uma métrica amplamente utilizada para avaliar a qualidade de agrupamentos obtidos por técnicas de clusterização, permitindo quantificar o grau de similaridade de um elemento em relação ao seu próprio grupo em comparação com outros grupos. Proposto por Peter J. Rousseeuw (1987), o método é amplamente aplicado em diferentes áreas do conhecimento, incluindo climatologia e hidrologia, para validação de agrupamentos espaciais e temporais.

O coeficiente de silhueta $s(i)$ para cada elemento i é definido por:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))} \quad (14)$$

em que:

$a(i)$ representa a distância média entre o elemento i e os demais elementos do mesmo grupo (coesão);

$b(i)$ corresponde à menor distância média entre o elemento i e os elementos de outro grupo mais próximo (separação).

Os valores do coeficiente variam no intervalo de -1 a 1, sendo interpretados da seguinte forma:

$s(i) \approx 1$: o elemento está bem ajustado ao seu grupo e bem separado dos demais;

$s(i) \approx 0$: o elemento está na fronteira entre dois grupos;

$s(i) < 0$: o elemento pode ter sido alocado ao grupo incorreto.

A média do coeficiente de silhueta para todos os elementos fornece uma medida global da qualidade do agrupamento, sendo utilizada como critério para definição do número ideal de clusters. Valores mais elevados indicam melhor separação entre os grupos e maior homogeneidade interna.

No presente estudo, o coeficiente de silhueta foi utilizado como ferramenta de validação dos agrupamentos hierárquicos aplicados às regiões hidrográficas de Alagoas, permitindo avaliar a consistência dos grupos formados com base nos padrões pluviométricos. A escolha do número ótimo de clusters considerou os maiores valores médios de silhueta, associados a agrupamentos mais coerentes do ponto de vista estatístico e climático.

Uma das principais vantagens do método é sua capacidade de fornecer uma interpretação intuitiva da qualidade dos agrupamentos, permitindo identificar tanto clusters bem definidos quanto possíveis ambiguidades na classificação. No entanto, o coeficiente pode ser sensível à métrica de distância utilizada e à estrutura dos dados, sendo recomendado seu uso em conjunto com outras métricas de validação (KAUFMAN & ROUSSEEUW, 1990; ARBELAITZ et al., 2013).

Além disso, estudos têm destacado a aplicação do coeficiente de silhueta em análises climáticas e ambientais, especialmente na identificação de padrões espaciais e regimes climáticos homogêneos, demonstrando sua relevância em estudos de regionalização hidrológica e climatológica (EVERITT et al., 2011; LI et al., 2023).

4.10 Método Hierárquico de Ward e Dendrograma

A análise de agrupamento hierárquico é uma técnica estatística amplamente utilizada para identificar padrões de similaridade entre elementos, sendo particularmente útil em estudos climatológicos e hidrológicos para regionalização de variáveis ambientais. Entre os métodos hierárquicos, destaca-se o método hierárquico aglomerativo (Bottom-up), no qual cada elemento inicia como um cluster individual e, de forma iterativa, os grupos mais semelhantes são

unidos até a formação de um único agrupamento (MURTAGH; LEGENDRE, 2014). O resultado desse processo é representado graficamente por meio de um dendrograma, que ilustra a hierarquia de agrupamento e a distância entre os clusters formados. No dendrograma, o eixo vertical representa a distância ou dissimilaridade entre os grupos, enquanto o eixo horizontal apresenta os elementos ou regiões analisadas. A altura em que dois grupos se unem indica o grau de similaridade entre eles, sendo que uniões em níveis mais baixos representam maior semelhança (ROUSSEEUW, 1987; ZHANG et al., 2022).

No presente estudo, foi utilizado o método hierárquico de Ward, proposto por Joe H. Ward Jr., que tem como objetivo minimizar a variância interna dos grupos formados. Esse método difere de outros critérios de ligação por buscar a formação de clusters mais homogêneos, sendo amplamente aplicado em análises ambientais (WARD JR., 1963; MURTAGH; LEGENDRE, 2014).

O critério de Ward baseia-se na minimização do aumento da soma dos quadrados dos erros (SSE – Sum of Squared Errors) a cada etapa de agrupamento, sendo expresso por:

$$\Delta SSE = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (15)$$

em que:

x_i representa os valores observados;

$\bar{x}$ é a média do grupo;

n corresponde ao número de elementos no cluster.

A cada etapa, o método combina os dois grupos cuja fusão resulta no menor aumento da variância interna total, o que favorece a formação de clusters compactos e bem definidos (MURTAGH; LEGENDRE, 2014). No contexto deste trabalho, o dendrograma foi utilizado para identificar regiões hidrográficas com comportamento pluviométrico semelhante, permitindo a definição de grupos homogêneos com base nas características da precipitação. A escolha do ponto de corte no dendrograma foi orientada tanto pela estrutura hierárquica observada quanto pelos resultados do coeficiente de silhueta, garantindo maior consistência na definição dos clusters. A utilização conjunta dessas abordagens é

recomendada na literatura recente como forma de aumentar a robustez na validação de agrupamentos (ZHANG et al., 2022; LI et al., 2023).

Uma das principais vantagens do método de Ward é a sua capacidade de formar grupos com baixa variabilidade interna, sendo especialmente relevante em estudos de regionalização climática. No entanto, o método pode ser sensível à escala dos dados e à presença de outliers, sendo recomendada a padronização das variáveis antes da aplicação (MURTAGH; LEGENDRE, 2014; WILKS, 2019).

Além disso, estudos recentes têm destacado a eficiência do método de Ward na identificação de padrões espaciais de precipitação e na delimitação de regiões climáticas homogêneas, especialmente quando aplicado em conjunto com métricas de validação estatística (WILKS, 2019; LI et al., 2023).

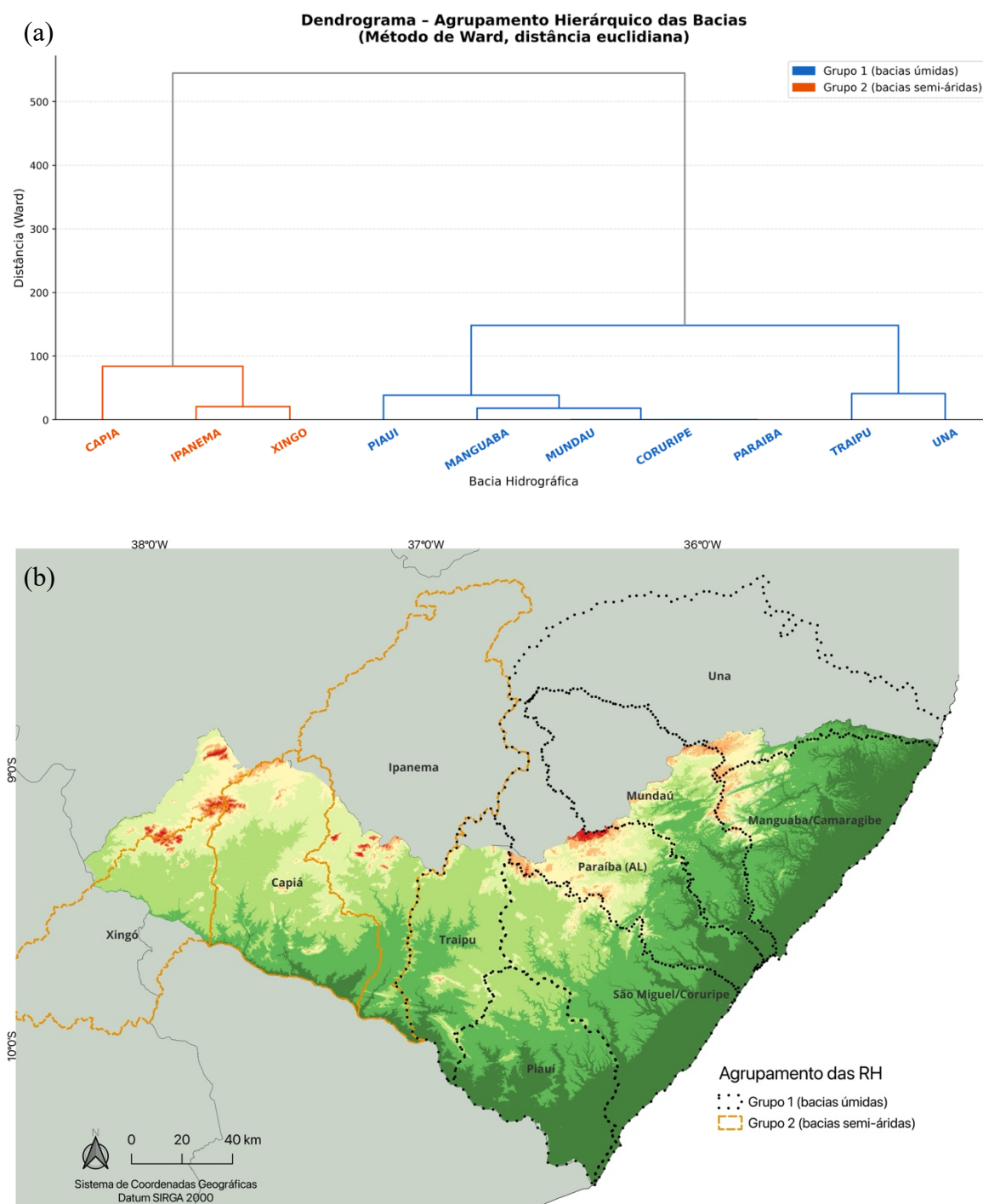
5 Resultados e Discussão

5.1 Regionalização das bacias hidrográficas de Alagoas via técnicas de agrupamento hierárquico

A regionalização das BH de Alagoas foi realizada via técnica de agrupamento hierárquico, com intuito de identificar padrões homogêneos pluviométricos, sendo aplicados o método de Ward e o coeficiente de silhueta (item 4.10) para definição e validação do agrupamento. Os resultados obtidos do coeficiente de silhueta (Figura 8), do dendrograma (Figura 9), e da distribuição média mensal (Figura 10) foram consistentes com a literatura anterior aplicada a região de estudo (LYRA et al., 2014; COSTA et al., 2021; OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021; ABREU et al., 2023). Essa convergência metodológica permitiu uma interpretação integrada dos padrões pluviométricos na BH.

O dendrograma obtido pelo método de Ward (Figura 8) revelou a formação de dois grupos distintos entre as BH com base nos perfis médios mensais de precipitação (Figura 8a), separados por uma distância intragrupo elevada (superior a 150 unidades Ward), isso indicou alta diferenciação climatológica entre elas. A escolha do método de Ward se deve ao método minimizar a variância interna dos grupos, sendo reconhecida na literatura científica (Lyra et al., 2014; Costa et al., 2021; Abdolmanafi et al., 2025; Ullah et al., 2026) como adequada para dados de precipitação, bem como por sua sensibilidade na identificação das diferenças nas médias dos grupos e, ainda por produzir grupos compactos e bem separados (WARD, 1963; MURTAGH; LEGENDRE, 2014; WILKS, 2019). Esse resultado é consistente com a dicotomia climática existente no estado de Alagoas, em relação ao gradiente pluviométrico longitudinal (Figura 8b), com os totais anuais decrescendo da costa em direção ao semiárido no interior (WANDERLEY et al., 2012; LYRA et al., 2014; COSTA et al., 2021; OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021; ABREU et al., 2023).

Figura 8 – Dendrograma do agrupamento hierárquico das bacias hidrográficas de Alagoas obtido pelo método de Ward (a) e mapa com distribuição dos grupos.

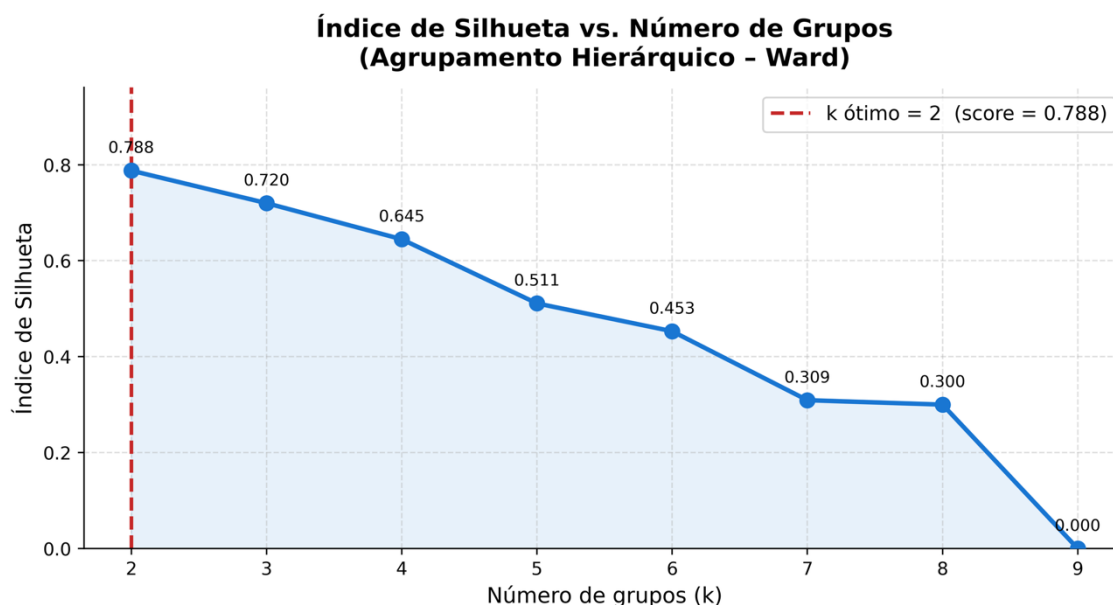


O Grupo 1 (G1) englobou as bacias do Coruripe, Manguaba–Camaragibe, Mundaú, Paraíba do Meio, Piauí, Traipu e Una, todas situadas predominantemente na Zona da Mata e no Litoral Leste do estado. Essas bacias são diretamente influenciadas pelos sistemas convectivos organizados

associados às DOL e à ZCAS, que promovem episódios de precipitação intensa no período de inverno austral (MOLION & BERNARDO, 2002; LYRA et al., 2014). O Grupo 2 (G2) compreendeu as bacias do Capiá, Ipanema e Xingó, localizadas no Agreste e Sertão de Alagoas, onde o regime pluviométrico é condicionado essencialmente pela ZCIT e apresenta totais anuais inferiores a 800 mm (SOUZA et al., 2021; SANTOS et al., 2023). A maior proximidade entre as bacias Ipanema e Xingó no dendrograma, antes de sua fusão com Capiá, indicou que Ipanema e Xingó compartilham perfis sazonais similares entre si, possivelmente por suas localizações mais interiorizadas e exposição similar aos ventos alísios de nordeste (NE).

A validação da partição em dois grupos foi corroborada pelo índice de Silhueta (Figura 9), que atingiu o valor máximo de 0,75 para $k=2$ — configurando uma separação de qualidade elevada segundo os critérios propostos anteriormente por Rousseeuw (1987), segundo o qual valores superiores a 0,70 indicam estrutura alta de agrupamento e bem definida. O índice apresentou declínio monotônico para valores de k entre 3 e 9, isso indicou a estrutura dicotômica observada na série temporal, o que refletiu nas condições físicas reais das BH. A anotação dos escores sobre a curva permite visualizar a magnitude da queda, por exemplo, a segunda partição em $k=3$ apresentou score de 0,58, isso representou uma perda de 23% em relação ao k ótimo, e portanto inviabilizou qualquer subdivisão adicional do ponto de vista estatístico.

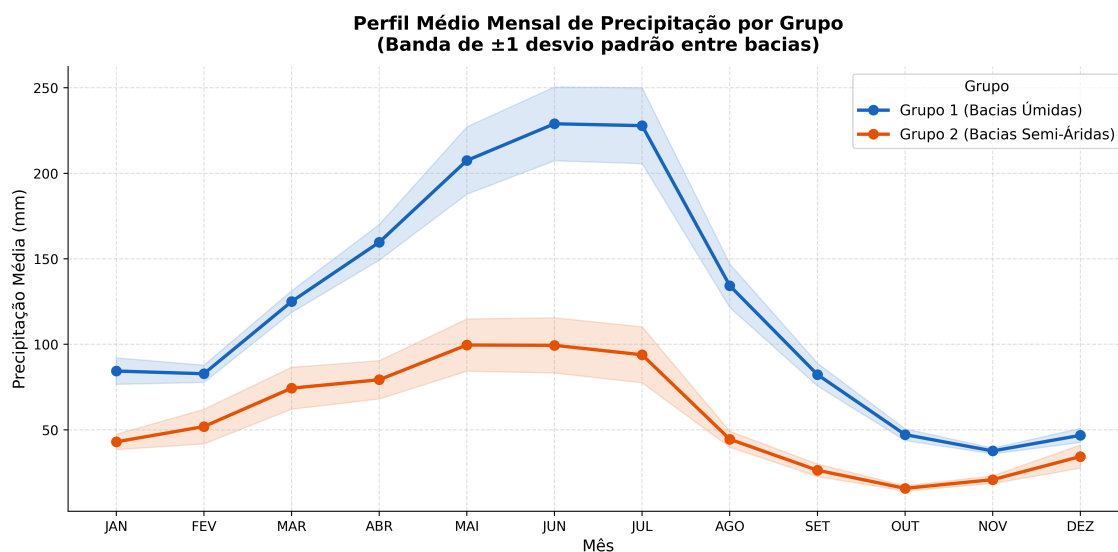
Figura 9 – Coeficiente de silhueta em função do número de clusters (k) para as regiões hidrográficas de Alagoas.



5.2 Perfil Médio Mensal de Precipitação por Grupo

A análise do perfil climatológico mensal (Figura 10) evidenciou contrastes marcantes entre os dois grupos tanto em termos de volume quanto de sazonalidade. O grupo G1 exibiu uma precipitação média mensal entre 48 mm (outubro–novembro) e 229 mm (junho–julho), com totais anuais médios de 1.464 mm, característicos da Zona da Mata alagoana (MOLION & BERNARDO, 2002; BARROS et al., 2012; LYRA et al., 2014). O grupo G2 registrou valores significativamente menores, com mínimas de 22 mm (outubro) e máximas de 100 mm (maio–junho), com totais anuais de 684 mm, compatíveis com o clima semiárido do Sertão (DA SILVA et al. 2010; LYRA et al., 2014).

Figura 10 – Perfil médio mensal de precipitação por grupo.



Ambos os grupos exibiram padrão sazonal similar: estação chuvosa concentrada entre abril e agosto, com maior registro em junho–julho, e a estação seca com mínimos entre setembro e novembro. A variabilidade sazonal das estações é determinada, por exemplo, pela migração meridional da ZCIT, que atinge sua posição mais austral entre fevereiro e abril, e assim favorece a advecção de umidade pelo fluxo de leste no NEB (HASTENRATH & HELLER, 1977; MOURA & SHUKLA, 1981; MOLION & BERNARDO, 2002). No grupo G1, há superposição de outros sistemas meteorológicos, tais como, os DOL e os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) orograficamente forçados, que por sua vez aumenta os totais mensais e prolonga a estação chuvosa (MOLION & BERNARDO, 2002; GOMES et al., 2019). O início da estação chuvosa em janeiro–fevereiro para o grupo G1 já apresenta precipitações médias superiores a 80 mm, com a influência dos SCM costeiros independentemente da posição da ZCIT, situação que não foi observada com a mesma intensidade no grupo G2.

As bandas de ± 1 de desvios padrão representadas na Figura 10 revelam maior variabilidade interanual no grupo G1, especialmente nos meses chuvosos (maio–agosto), quando o desvio padrão entre bacias ultrapassou 50 mm. No grupo G2, a variabilidade relativa (CV%) foi maior, sendo consistente com as

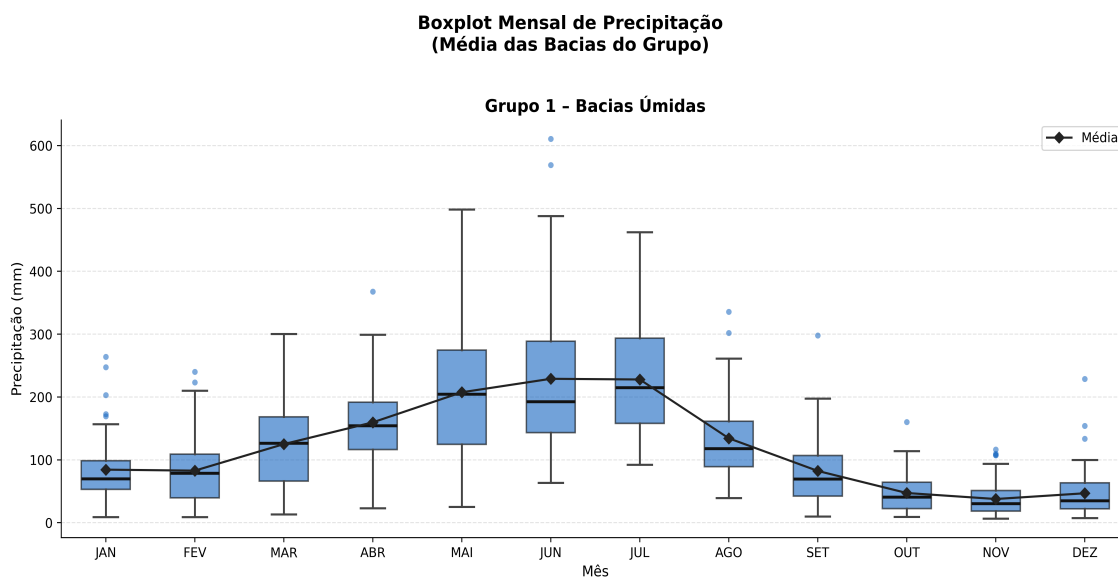
precipitações em regiões semiáridas (MARENGO et al., 2017; DA SILVA et al., 2020; COSTA et al., 2021). Essa característica tem implicações diretas para a gestão dos recursos hídricos, principalmente a maior imprevisibilidade do grupo G2, que o torna mais crítico em relação ao monitoramento de sinais climáticos de grande escala como precursores de eventos extremos.

5.3 Análise da Variabilidade Mensal por Boxplot

Os boxplots da série temporal média mensal a partir de cada grupo (Figuras 11 e 12) confirmaram a assimetria positiva da distribuição de precipitação nos meses chuvosos, evidenciada pelos bigodes superiores prolongados e pela abundância de valores extremos acima do terceiro quartil. Essa assimetria é característica da distribuição de precipitação em regiões tropicais e subtropicais, cujas séries temporais frequentemente se aproximam de distribuições Gama ou Log-Normal (MOLION & BERNARDO, 2002). A abordagem metodológica baseada na média das bacias de cada grupo, antes de construir o boxplot, eliminou a variabilidade espacial intragrupo e permitiu focar na variabilidade temporal interanual, que é o objeto de interesse central desta análise.

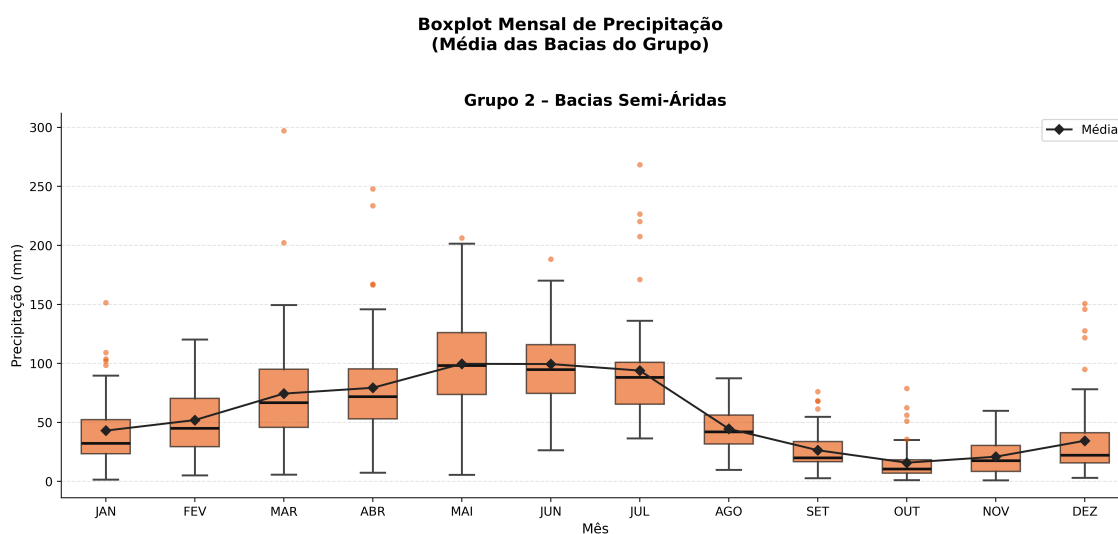
No grupo G1 (Figura 11), os meses de junho e julho apresentaram amplitudes interquartílicas (AIQ) superiores a 130 mm, com a mediana próxima a 180 mm e outliers que excedem 550 mm, isso corresponde a eventos de chuvas excepcionais registrados nas BH litorâneas. Por exemplo, o evento de junho de 2010, que causou inundações severas nas bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, representa um dos registros históricos de extremo chuvoso nessa região (SOUZA, 2011; DA SILVA et al., 2020; SILVA JUNIOR et al., 2022). O mês de outubro registrou a menor AIQ (~30 mm), correspondente a estação seca.

Figura 11 – Boxplot mensal de precipitação (mm) do grupo 1.



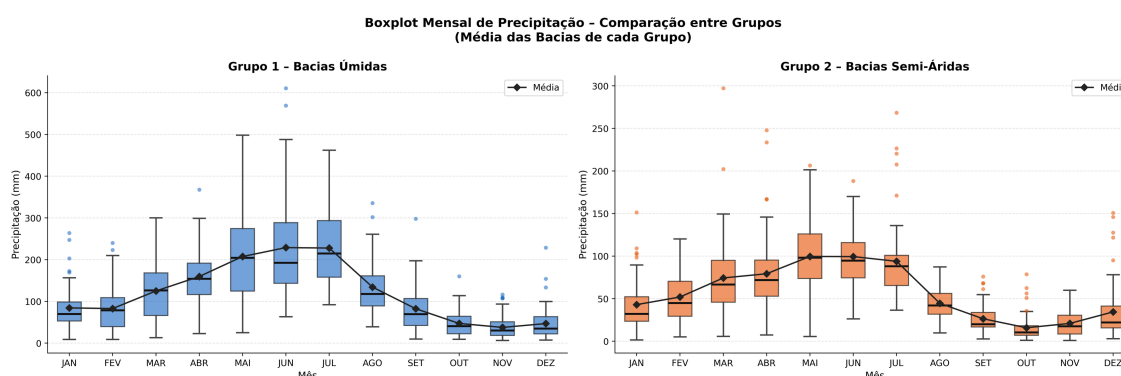
No grupo G2 (Figura 12), a AIQ obtida dos boxplots foi menor em valores absolutos, mas significativa em relação à média mensal, com característica irregular e concentrado das chuvas no semiárido. Os meses de maio e junho exibiram a maior dispersão, com outliers superiores que correspondem a episódios de La Niña ou de dipolo positivo do Atlântico — condições que favorecem a intensificação da ZCIT sobre o NEB (UVO et al., 1998; ANDREOLI & KAYANO, 2006; LYRA et al., 2014; COSTA et al., 2021). A linha de médias sobrepostas (diamantes) aos boxplots das Figuras 11 e 12 confirmou a compatibilidade entre a mediana e a média nos meses secos, com divergência nos meses úmidos, reflexo da assimetria positiva mencionada anteriormente.

Figura 12 – Boxplot mensal de precipitação (mm) do grupo 2.



O boxplot comparativo (Figura 13) sintetiza as diferenças entre os grupos e demonstrou a superioridade dos totais pluviométricos e da variabilidade do grupo G1 em todos os meses, com destaque para o período maio–agosto, quando a diferença entre as medianas dos dois grupos ultrapassou 100 mm. A atenção às escalas distintas dos eixos verticais dos dois painéis (até 650 mm para o grupo G1 e até 300 mm para o grupo G2) é fundamental para uma interpretação adequada dos padrões de variabilidade relativa.

Figura 13 – Comparação dos boxplot mensal de precipitação dos dois grupos.

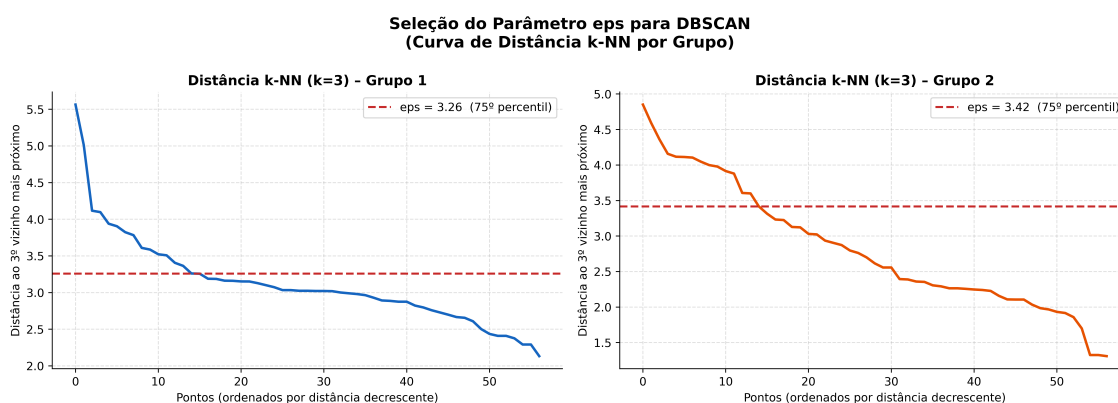


5.4 Análise DBSCAN: Identificação de Períodos Chuvosos e Secos

5.4.1 Seleção do Parâmetro eps — Curva de Distância k-NN

A calibração do algoritmo DBSCAN iniciou-se pela construção da curva de distância ao k-ésimo vizinho mais próximo (k-NN, com $k=3$), apresentada na Figura 14. O método consiste em ordenar decrescentemente as distâncias ao k-ésimo vizinho no espaço multivariado padronizado de 12 variáveis mensais, sendo que o ponto de inflexão ("cotovelo") da curva indica o valor de eps que melhor discrimina regiões densas de pontos isolados (ESTER et al., 1996; BIRANT & KUT, 2007; SMEJKALOVÁ et al., 2023). Para o grupo G1, o percentil 75 das distâncias resultou em $\text{eps}=3,26$, enquanto para o grupo G2 obteve-se $\text{eps}=3,42$ — valores consistentes com a maior dispersão dos dados do semiárido no espaço de características padronizadas.

Figura 14 – Seleção do parâmetro eps para DBSCAN.

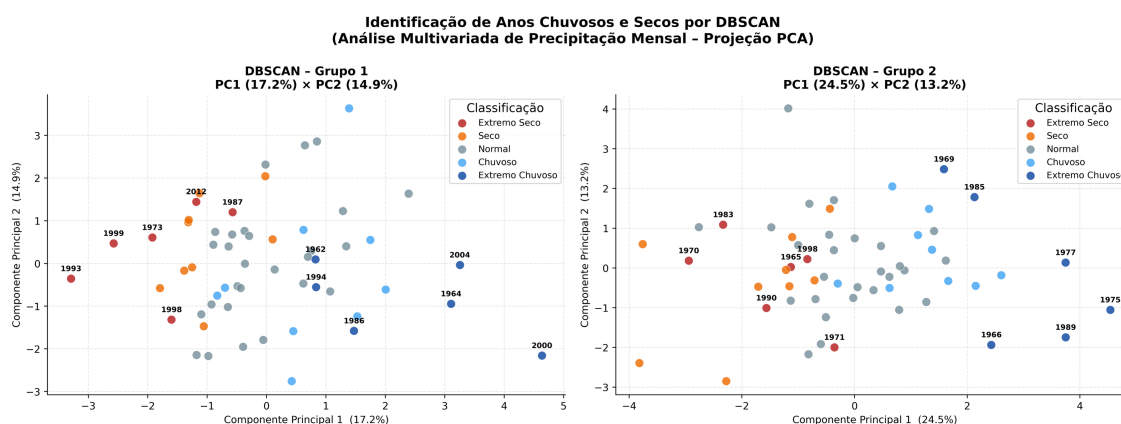


A escolha de $\text{min_samples}=3$ refletiu no tamanho relativamente menor das séries temporais (~57 anos por grupo) e a necessidade de capturar clusters de características típicas com ao menos três anos próximos no espaço multivariado. Configurações com min_samples menor produziriam classificações fragmentadas, enquanto valores maiores resultariam em proporção elevada de pontos classificados como ruído (BIRANT & KUT, 2007). A escolha do percentil 75 — em vez do "cotovelo" visual — foi adotada para garantir reprodutibilidade do procedimento e evitar subjetividade na identificação do ponto de inflexão.

5.4.2 Dispersão PCA com Classificação DBSCAN

A projeção dos dados no espaço bidimensional dos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) - (Figura 15) revelou estruturas de agrupamento coerentes com o regime pluviométrico de cada grupo. Por exemplo, para o grupo G1, os PC1 e PC2 registraram 17,2% e 14,9% da variância total, respectivamente. Para o grupo G2, os valores PC1 e PC2 foram 24,5% e 13,2%. A proporção menor de variância obtidos das PC1 e PC2 refletiu a elevada dimensionalidade da precipitação mensal padronizada, com contribuições relevantes de múltiplos meses para a separação entre anos (JOLLIFFE & CADIMA, 2016). A PC1 concentrou a maior fração da variância, onde pode ser interpretado como um índice de "anomalia geral de precipitação", sendo que valores positivos se associam a anos acima do normal em todos os meses, enquanto, os valores negativos correspondem aos déficits.

Figura 15 – Identificação de anos chuvosos e secos via DBSCAN.



Para o grupo G1, os anos categorizados como Extremo Seco (1973, 1987, 1993, 1998, 1999, 2012) situam-se na região negativa da PC1. A presença de 1998 correspondente ao evento El Niño de 1997–1998, El Niño do século, um dos mais intensos já registrados (MARENGO et al., 2017; DA SILVA et al., 2020; OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021) e de 2012, marco do início da grande seca do NEB (2012–2016) – (CUNHA et al., 2019; COSTA et al., 2021; REBOITA et al., 2021; SANTOS et al., 2023), validou a capacidade de identificação do método DBSCAN. Para o grupo G2, os anos extremamente secos (1965, 1970, 1971, 1983, 1990, 1998) incluem os eventos El Niño de 1982–1983 e 1997–1998, novamente reforçou a influência do modo de variabilidade climática do ENOS e

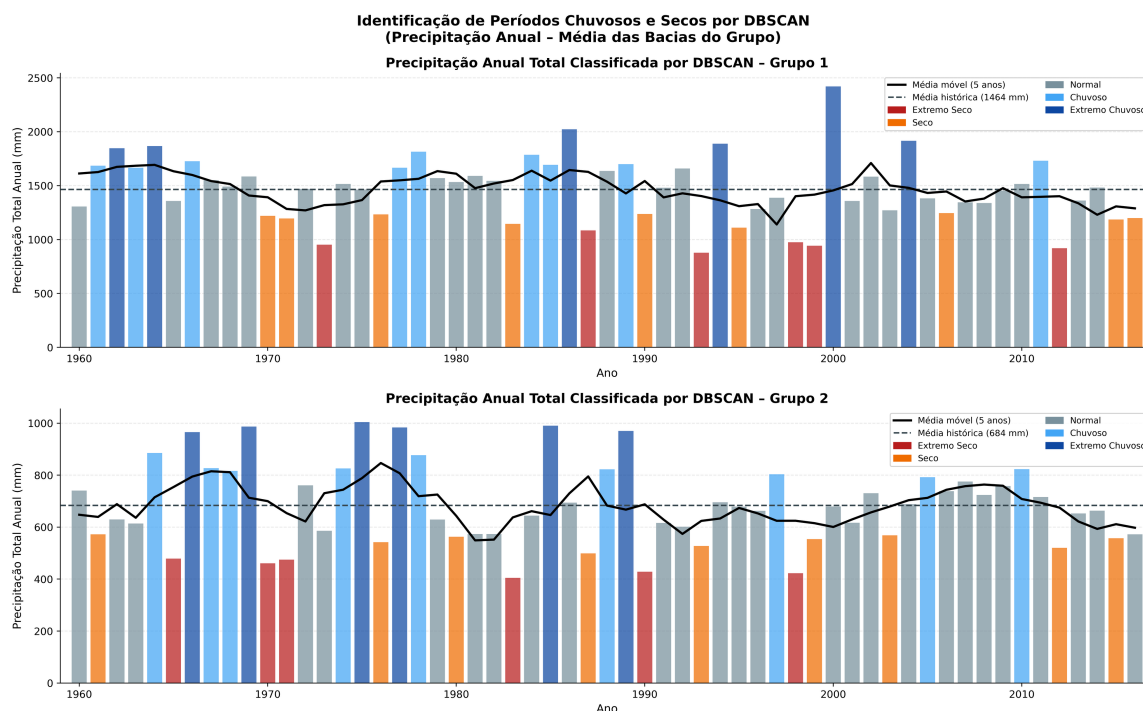
a precipitação no semiárido nordestino (UVO et al., 1998; ANDREOLI & KAYANO, 2006; LYRA et al., 2014; LYRA et al., 2017; LUCENA, 2023). O ano destacado de 1998 como extremo seco em ambos os grupos confirma o caráter regional e da forçante de grande responsável, neste caso, o El Niño de 1997–1998 (REBOITA et al., 2021; DA SILVA et al., 2020; CAI et al., 2021).

Os anos de Extremo Chuvoso concentram-se na extremidade positiva da PC1. No grupo G1, destacam-se 1962, 1964, 1986, 1994, 2000 e 2004; no grupo g2, ressaltam-se 1966, 1969, 1975, 1977, 1985 e 1989, sendo anos correspondentes aos episódios de La Niña moderada a forte ou com anomalias negativas de TSM no Pacífico tropical, que por sua vez favorecem o posicionamento mais austral da ZCIT (ANDREOLI & KAYANO, 2006; REBOITA et al., 2010). Destaque para ausência de anos extremamente chuvosos comuns a ambos os grupos, que por sua vez parte dos eventos, principalmente os mecanismos responsáveis pelos extremos de chuva são distintos entre as BH úmidas e as semiáridas, sendo possivelmente com maior peso para sistemas meteorológicos em multiescala para o grupo G1.

5.4.3 Série Temporal Classificada por DBSCAN

A série temporal de precipitação anual avaliada via classificação DBSCAN (Figura 16) permitiu mostrar a distribuição temporal dos períodos chuvosos e secos em ambos os grupos G1 e G2. Para o grupo G1, a precipitação média histórica de 1.464 mm foi superada nos anos Extremo Chuvoso (média de 1.994 mm) e reduzida nos anos Extremo Seco (média de 959 mm), isso representou anomalias positivas e negativas de aproximadamente $\pm 35\%$ em relação à normal histórica. Para o grupo G2, as anomalias extremas foram maiores, por exemplo, a precipitação média nos anos Extremo Chuvoso (983 mm) foi o dobro da média dos anos Extremo Seco (445 mm), sendo evidenciada a característica do semiárido em relação as forçantes climáticas de grande escala.

Figura 16 – Identificação de anos chuvosos e secos por DBSCAN.



A média móvel quinquenal sobreposta às séries temporais indicou tendência de redução nos totais pluviométricos a partir dos anos 2000 para ambos os grupos G1 e G2, com valores abaixo da média histórica entre 2012 e 2016. Esse período corresponde a severa seca que afetou o NEB, sendo destacado por Marengo et al. (2017) e Cunha et al., (2019) que atribuíram à combinação de anomalias positivas de TSM no Atlântico Norte com a fase positiva da ODP. A menor frequência de anos chuvosos nas décadas de 2000 e 2010 em comparação com as décadas de 1960 e 1980 mostrou uma tendência de longo prazo compatível com os cenários de redução de precipitação no NEB projetados para as próximas décadas (MARENGO et al., 2017; FREIRE e NATENZON, 2019; DANTAS et al., 2022).

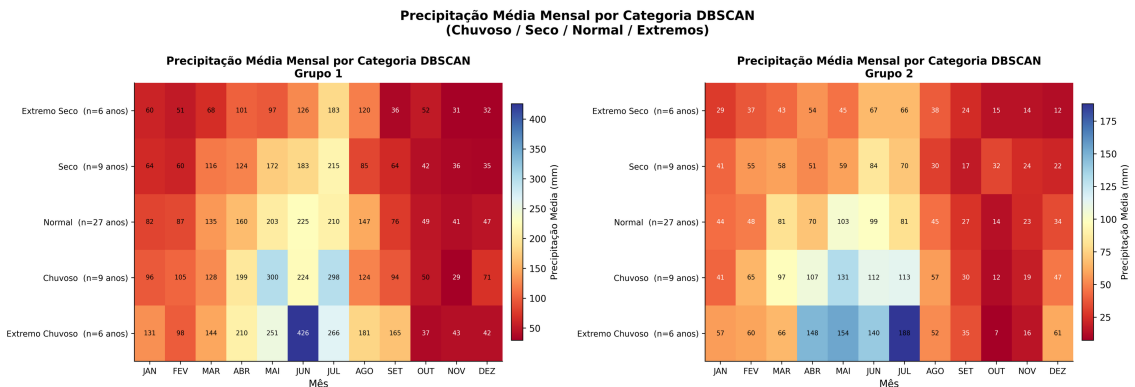
A distribuição das categorias ao longo do tempo não é aleatória. Vale ressaltar a concentração de anos secos no início da década de 1970, possivelmente associada a uma fase negativa da ODP e à ocorrência de El Niños sucessivos (Lyra et al., 2017; Choi et al., 2013; Choi et al. 2022), e um agrupamento de anos chuvosos nas décadas de 1960 e 1980 para o grupo G2, correspondentes a períodos de La Niña. Tal persistência temporal de anomalias é característica da influência das variabilidades decadal e multidecadal do

sistema climático oceânico-atmosférico no regime de chuva no NEB (ANDREOLI & KAYANO, 2006; LYRA et al., 2017; COSTA et al., 2018; VITORIO et al., 2025).

5.4.4 Heatmap Mensal por Categoria DBSCAN

O heatmap de precipitação média mensal estratificada por categoria via método DBSCAN (Figura 17) confirmou que as diferenças entre anos chuvosos e secos não se restringem a um único mês, mas se distribuem ao longo de todos os meses. Para o grupo G1, nos anos Extremo Chuvoso, correspondente aos meses de maio a agosto registraram precipitações médias superiores 300 mm, enquanto nos anos Extremo Seco os mesmos meses supracitados apresentaram valores inferiores a 100 mm. Para o grupo G2, a amplitude entre categorias foi similar, com destaque para os meses de maio e junho, que apresentaram os maiores contrastes em valores absolutos entre anos chuvosos e secos.

Figura 17 – Precipitação média mensal (mm) por categoria DBSCAN.

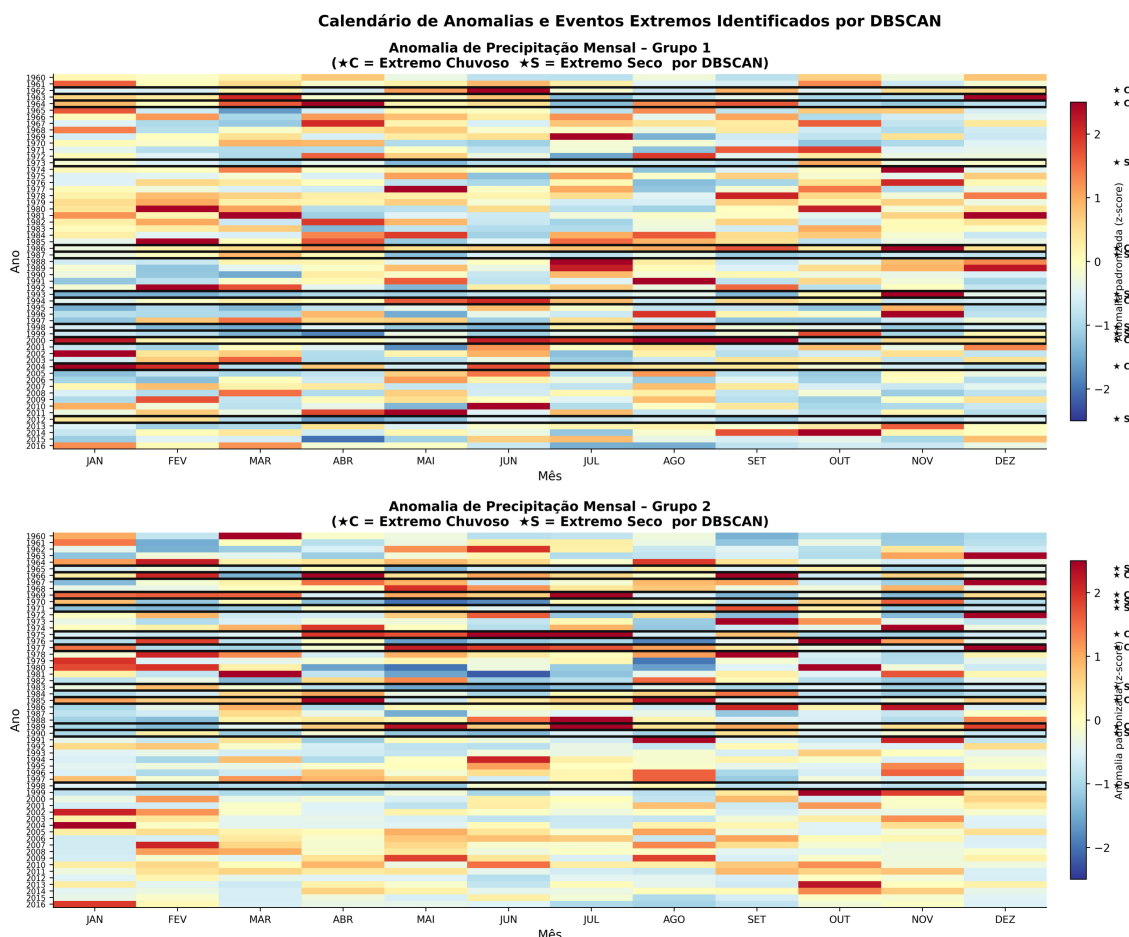


Os valores numéricos obtidos em cada célula do heatmap facilitaram a comparação direta e identificar padrões específicos, por exemplo, no grupo G2 mesmo nos anos Extremo Seco, os meses de março e abril ainda registraram valores médios de 40–50 mm, isso indicou que os sistemas meteorológicos em multiescala sempre produz alguma precipitação nesse período (LYRA et al., 2014).

5.4.5 Calendário de Anomalias e Eventos Extremos

As anomalias padronizadas (z-score) para anos extremos versus escala mensal (Figura 18) mostrou a variabilidade espaço-temporal da precipitação em ambos os grupos. Os anos de Extremo Seco (contornados em preto, marcados com ★S) exibiram tonalidades avermelhadas consistentes ao longo de todos os meses da estação chuvosa, e assim confirmou que os déficits foram de caráter sazonal e persistente, e não em episódio. Em contraste, os anos de Extremo Chuvoso (★C) apresentaram anomalias positivas (azul intenso) persistentes de abril a agosto, com eventual extensão para os meses de setembro e outubro.

Figura 18 – Distribuição temporal de anomalias e eventos extremos identificados via método DBSCAN.



A análise temporal via método DBSCAN do grupo G1 revelou que 1998 destacou-se com anomalia negativa máxima em quase todos os meses, sendo configurado o ano em destaque na série histórica para as bacias úmidas

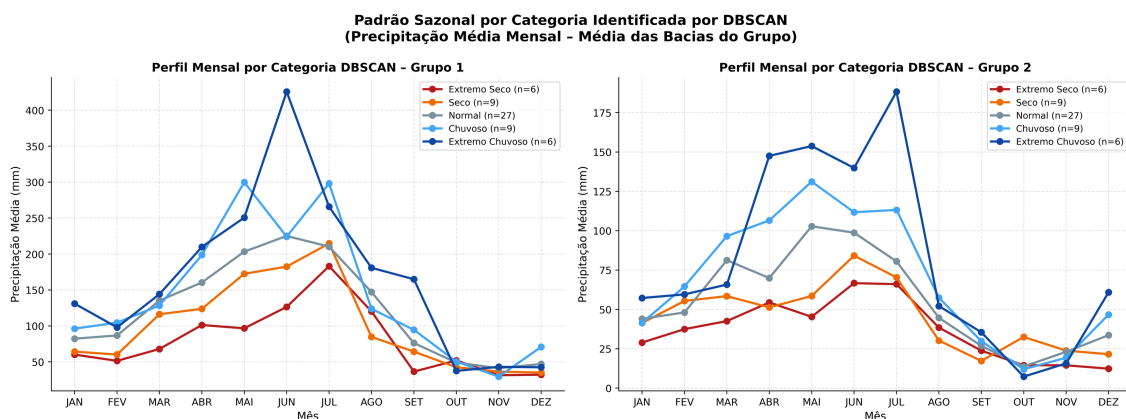
alagoanas. No grupo G2, o ano de 1983 apresentou anomalias negativas excepcionais em todos os meses da estação chuvosa, correspondentes ao El Niño de 1982–1983 sobre o semiárido nordestino, sendo reconhecido na literatura como um dos eventos de seca mais severos do século XX no NEB (CAI et al., 2020; COSTA et al., 2018; VITORIO et al., 2025). A distribuição temporal permitiu identificar a recorrência decenal dos eventos extremos, com concentração de anos secos no início da década de 1970 e novo agrupamento de anos secos na década de 2010 (MARENGO et al., 2017; LYRA et al., 2017; CUNHA et al., 2019).

A escala cromática de z-scores ($-2,5$ a $+2,5$) adotada na Figura 18 permitiu classificar as anomalias segundo a convenção estatística padrão: i) valores $|z| > 2$ correspondem aos eventos com probabilidade de ocorrência inferior a 5% sob distribuição normal, sendo categorizados como extremos climáticos. Vale destacar que alguns anos extremamente secos apresentaram anomalias inferior a $-2,5$ desvios padrão em múltiplos meses simultâneos, e assim reforçou a excepcionalidade desses eventos e sua relevância para estudos de vulnerabilidade hídrica regional no estado de Alagoas.

5.4.6 Perfil Sazonal por Categoria DBSCAN

A Figura 19 apresenta o perfil médio mensal de precipitação para cada categoria identificada pelo DBSCAN. De forma geral, a distribuição sazonal, com maior registro entre junho e julho, — foi preservada em todas as categorias adotadas no estudo, com variação apenas em amplitude. Isso indicou que os sistemas meteorológicos em multiescala (ZCIT, DOL, circulações de brisas, ventos alísios, VCAN entre outros) são responsáveis pela sazonalidade e atuam de forma relativamente estável ao longo da série histórica, mas sua intensidade também foi modulada pelos forçantes interanuais (ENOS, ODP e o Gradiente Interhemisférico da Temperatura da Superfície do Mar do Oceano Atlântico - GITSMA) – (LYRA et al., 2014; LYRA et al., 2017; WEI et al., 2021).

Figura 19 – Padrão sazonal por categoria identificada por DBSCAN.



Para o Grupo 1, a razão entre a precipitação média mensal de junho para anos Extremo Chuvoso e anos Extremo Seco superou 3,5, isso indicou que, em anos favoráveis, o volume mensal máximo foi mais de três vezes superior ao de anos de seca extrema. No Grupo 2, essa razão para o mês de maior registro (junho) se aproximou de 3,0. A diferença de amplitude entre categorias foi maior no Grupo 1 devido ao gradiente pluviométrico longitudinal e proximidade do ambiente costeiro (Figura 8b), porém comparável em termos relativos entre os grupos G1 e G2, o que sugere que ambos os grupos são igualmente sensíveis, em escala normalizada, às condições oceânico-atmosféricas de grande escala (ANDREOLI & KAYANO, 2006; MARENGO et al., 2017) e atuação de sistemas meteorológicos em multiescala (LYRA et al., 2014; LYRA et al., 2017; COSTA et al., 2021; ABREU et al., 2023).

Os perfis sazonais das categorias "Seco" e "Chuvoso" — que representam a maioria dos anos (54% do total para ambos os grupos combinados) se assemelham ao perfil médio histórico. Tal variabilidade distingue-se dos anos extremos, nos quais as diferenças em relação à média foram mais pronunciadas nos meses chuvosos do que nos meses secos, isto é, os mecanismos de amplificação atuam preferencialmente durante a estação úmida. Esse padrão é consistente com a hipótese de que a intensidade da convecção tropical, controlada pela TSM e pela posição da ZCIT, intensifica as anomalias existentes quando o potencial convectivo é elevado (MOURA & SHUKLA, 1981; HASTENRATH & HELLER, 1977; COSTA et al., 2018; VITORIO et al., 2025).

5.5 Estatística Descritiva e Informações Ambientais

Na Tabela 5 é apresentada os dados censitários referentes a área territorial, população e densidade demográfica das RH de Alagoas oriundos do IBGE nos anos de (2022 e 2024). Vale ressaltar que os dados da extensão territorial e da densidade demográfica não contemplam as RH no total, referem-se apenas as cidades/estações descritas anteriormente na Figura 1. A análise da relação entre densidade demográfica e BH é de suma importância nos estudos ambientais e no planejamento do território (CAROLINO et al., 2024). Pois, a bacia é uma unidade de gestão de água, que inclui tanto os processos físicos quanto as ações antrópicas. Dessa forma, o uso da densidade populacional dentro dos limites de uma bacia, consegue entender melhor o manejo dos recursos hídricos por parte da população, principalmente em regiões, onde a urbanização é acelerada e a infraestrutura de saneamento é insuficiente, comum ainda no Brasil (ANA; IBGE, 2021).

A maior RH (nos limites do Estado) em extensão é a São Miguel/Coruripe com 2.638,3 km², seguida por Manguaba/Camaragibe com 2.633,7 km² e Xingó com 2.339,605 km². A RH mais populosa é a Manguaba/Camaragibe com 1.101.608 habitantes, com cerca de 44% da população total das RH, devido à proximidade da Região Metropolitana de Maceió (RMM) – (Figura 3). As RH Piauí, Una, São Miguel/Coruripe e Mundaú também têm população expressiva: 393.072; 348.99; 242.475; 234.808 habitantes, respectivamente. As menos populosas são Traipu com 56.592 habitantes e Ipanema com 49.661 habitantes, o que pode indicar áreas menos urbanizadas. A RH Manguaba/Camaragibe se destacou com a maior densidade (418,26 hab/km²), isso indica forte urbanização e pressão sobre os recursos hídricos, devido principalmente à presença da capital Maceió e suas cidades adjacentes. Ao contrário, Traipu e Xingó apresentam as menores densidades 36,11 26 hab/km² e 42,96 26 hab/km², respectivamente, o que resulta por serem áreas mais rurais. A diferença na distribuição populacional nas RH implica em desafios distintos de gestão dos recursos hídricos (MACHADO, 2003; ROSA & MIRANDA GUARDA, 2019). Em RH mais densas, há maiores riscos de poluição, escassez de água e conflitos de uso; já em RH menos densas, os desafios estão relacionados à infraestrutura de

abastecimento bem como o escoamento da produção agrícola e vulnerabilidade a secas (RIBEIRO e TEXEIRA, 2022; SCHEIBEL et al., 2024).

Tabela 5: Dados censitários do IBGE nos anos de (2022 e 2024).

Grupos Homogêneos	Nome RH	Área Territorial – km ² (2024)	População no último censo - pessoas (2022)	Densidade demográfica - hab/km ² (2022)
Grupo G1	Una	676,425	348.99	51,59
	Manguaba/Camaragibe	2633,747	1.101.608	418,26
	Mundaú	1661,982	234.808	141,28
	Paraíba	2281,359	189.342	82,99
	São Miguel/Coruripe	2638,302	242.475	91,90
	Piauí	2274,21	393.072	172,84
	Traipu	1567,073	56.592	36,11
Grupo G2	Capiá	2129,831	108.211	50,80
	Xingó	2339,605	100.519	42,96
	Ipanema	804,675	49.661	61,72

A Tabela 6 apresenta dos dados estatísticos da chuva anual para cada uma das RH. A chuva anual no estado de Alagoas exibe uma heterogeneidade temporal significativa entre suas RH, conforme evidenciado pelos valores médios, máximo, mínimos e do coeficiente de variação (CV%). O grupo G1 apresentou os maiores totais anuais de precipitação do Estado, sobretudo nas RH localizadas próximas à costa e na região do litoral norte, como Manguaba/Camaragibe, Mundaú e Una, cujas médias anuais corresponderam a 1699,71 mm, 1439,87 mm e 1259,90 mm, respectivamente. Os maiores acumulados pluviométricos estão associados à maior disponibilidade de umidade atmosférica proveniente do Oceano Atlântico (LYRA et al., 2014; BACK et al., 2020; LYRA et al., 2024), bem como à atuação de sistemas meteorológicos

em multiescala que favorecem a ocorrência de chuva da faixa costeira em direção ao interior do continente, incluindo a influência da ZCIT (COSTA et al., 2021; ABREU et al., 2023). Além disso, o grupo G1 apresentou menor variabilidade interanual da precipitação, evidenciada pelos menores valores de CV%, como observado nas RH Manguaba/Camaragibe (16,51%), Mundaú (19,73%) e Una (18,04%), indicando um regime pluviométrico mais regular em comparação às demais RH (SANTOS et al., 2023; ROCHA et al., 2025).

Por outro lado, o grupo G2 apresentou menores médias anuais de precipitação, correspondendo a 542,23 mm, 739,00 mm e 769,43 mm, respectivamente, além dos maiores valores de CV% (24% a 27,15%). Esses resultados evidenciam maior irregularidade espaço-temporal das chuvas e maior susceptibilidade à escassez hídrica nas RH inseridas predominantemente no interior do Estado. Apesar de integrar o G1, a RH de Traipu apresentou comportamento pluviométrico semelhante ao observado no G2, com média anual de 673,02 mm, refletindo a influência das condições climáticas de transição entre o Agreste e o Sertão. Esses padrões reforçam a existência de um forte gradiente pluviométrico em Alagoas, caracterizado pela redução progressiva dos volumes de precipitação à medida que se avança para o interior do continente (ABREU et al., 2023; LUCENA, 2023; SANTOS et al., 2023).

Em relação aos extremos anuais, o G1 apresentou os maiores acumulados máximos e mínimos de precipitação, destacando-se a RH Manguaba/Camaragibe, com máxima anual de 2269,80 mm e mínima de 1106,34 mm. No G2, a RH de Capiá registrou máxima anual de 938,70 mm e mínima de 278,60 mm, evidenciando a elevada amplitude e irregularidade das chuvas nas regiões mais interioranas. Essas diferenças são consistentes com estudos anteriores que identificaram alta frequência de eventos extremos de precipitação e períodos de déficit hídrico em distintas regiões do Estado (SANTOS et al., 2023; FIRMINO et al., 2024).

Os maiores desvios padrão foram observados nas RH pertencentes ao G1, especialmente em Mundaú (284,15 mm), em decorrência dos maiores acumulados pluviométricos registrados nessas áreas. Em contrapartida, o G2 apresentou menores desvios padrão, com destaque para Capiá (147,25 mm),

indicando séries temporais relativamente mais homogêneas, embora associadas a baixos volumes de precipitação. Segundo Reis et al. (2020), menores valores de desvio padrão indicam maior homogeneidade dos dados pluviométricos ao longo da série temporal. As maiores medianas de precipitação ocorreram predominantemente nas RH do G1, inseridas na mesorregião climática do Leste Alagoano, enquanto as menores medianas foram verificadas nas RH do G2, localizadas nas mesorregiões do Agreste e Sertão (Figura 6).

Tabela 6: Estatística descritiva da chuva anual nas RH.

Grupos Homogêneos	RH	Média (mm)	Mediana (mm)	Desvio Padrão (mm)	Máxima (mm)	Mínima (mm)	CV (%)
Grupo G1	Una	1259,90	1253,57	227,29	1725,24	826,20	18,04
	Manguaba/Camaragibe	1699,71	1712,48	280,65	2269,80	1106,34	16,51
	Mundaú	1439,87	1426,53	284,15	2017,30	877,20	19,73
	Paraíba	1251,90	1275,51	240,10	1834,35	686,31	19,18
	São Miguel/Coruripe	1206,80	1203,80	209,75	1941,62	713,10	17,40
	Piauí	1013,50	1030,51	213,71	1579,34	551,35	21,10
	Traipu	673,02	669,53	161,40	1076	282,25	24,00
Grupo G2	Ipanema	739,00	727,10	156,71	1049,42	362,50	21,20
	Capiá	542,23	545,85	147,25	938,70	278,60	27,15
	Xingó	769,43	739,30	197,10	1237,65	378,03	25,61

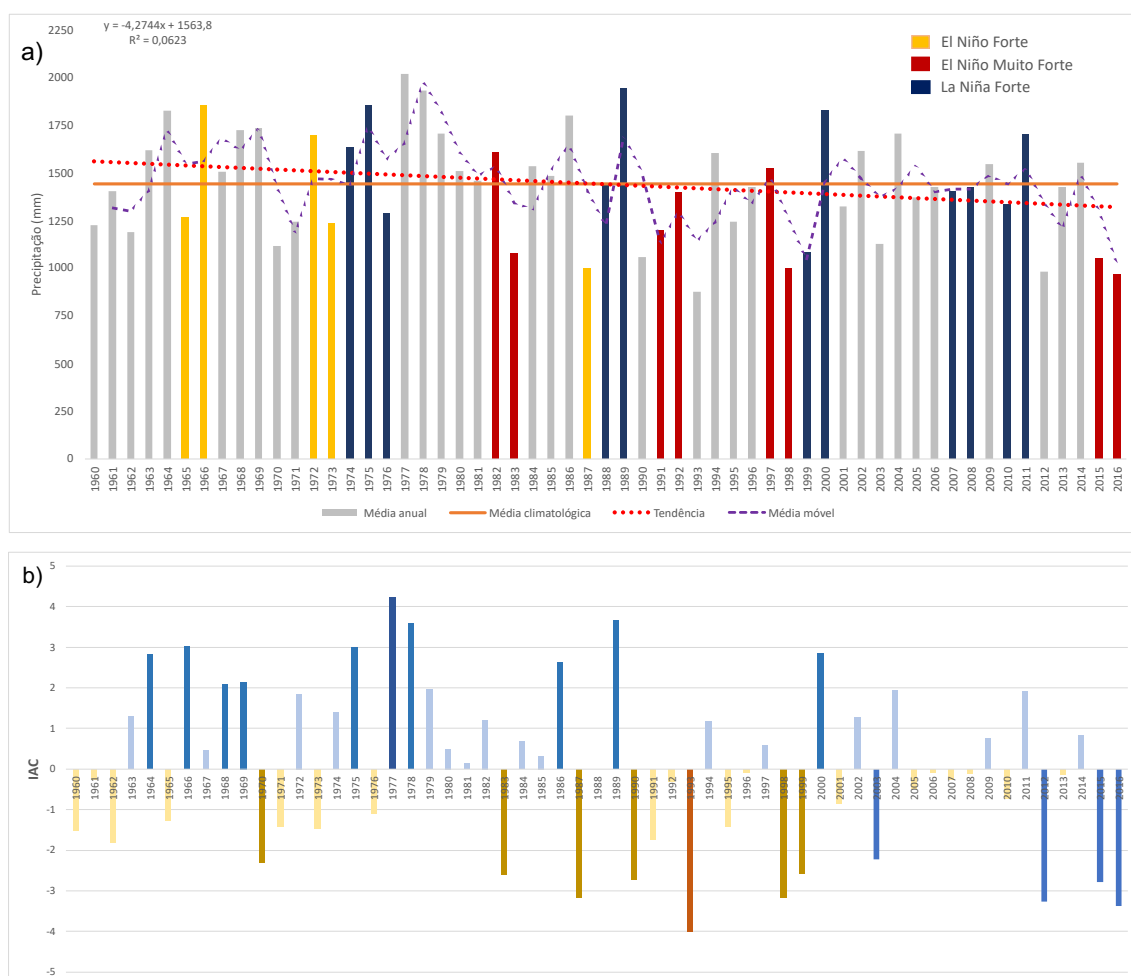
5.6 Análise pluviométrica anual dos grupos homogêneos de BH em Alagoas

As Figuras 20 e 21 mostram a avaliação da climatologia anual da chuva para a BH Mundaú (representante do Grupo G1) e a BH Xingó (representante do Grupo G2), respectivamente, durante o período de 1960 a 2016. Os anos de El

Niño Forte (cor amarela), El Niño Muito Forte (cor vermelha) e La Niña Forte (cor azul) foram destacados, bem como a regressão linear e a média móvel aplicadas na série temporal histórica.

A RH Mundaú, situada na porção leste de Alagoas, apresentou média anual de precipitação de 1429,86 mm (Figura 20a), sendo uma das RH mais úmidas do estado. O maior acumulado anual foi registrado em 1977 (2017,29 mm), enquanto o menor ocorreu em 1993 (877,19 mm), ano associado à atuação da fase quente do ENOS (El Niño), que contribuiu para a redução das chuvas em diferentes áreas do NEB. Aproximadamente 47% dos anos analisados apresentaram precipitação acima da média climatológica, isso indicou relativa variabilidade interanual do regime pluviométrico. Além disso, a análise da regressão linear evidenciou tendência de redução gradual dos totais anuais de precipitação ao longo da série temporal.

Figura 20 – a) Distribuição do acumulado de chuva anual e sua média (mm) na RH Mundaú no período de 1960 a 2016; **b)** Índice de Anomalia de Chuva.



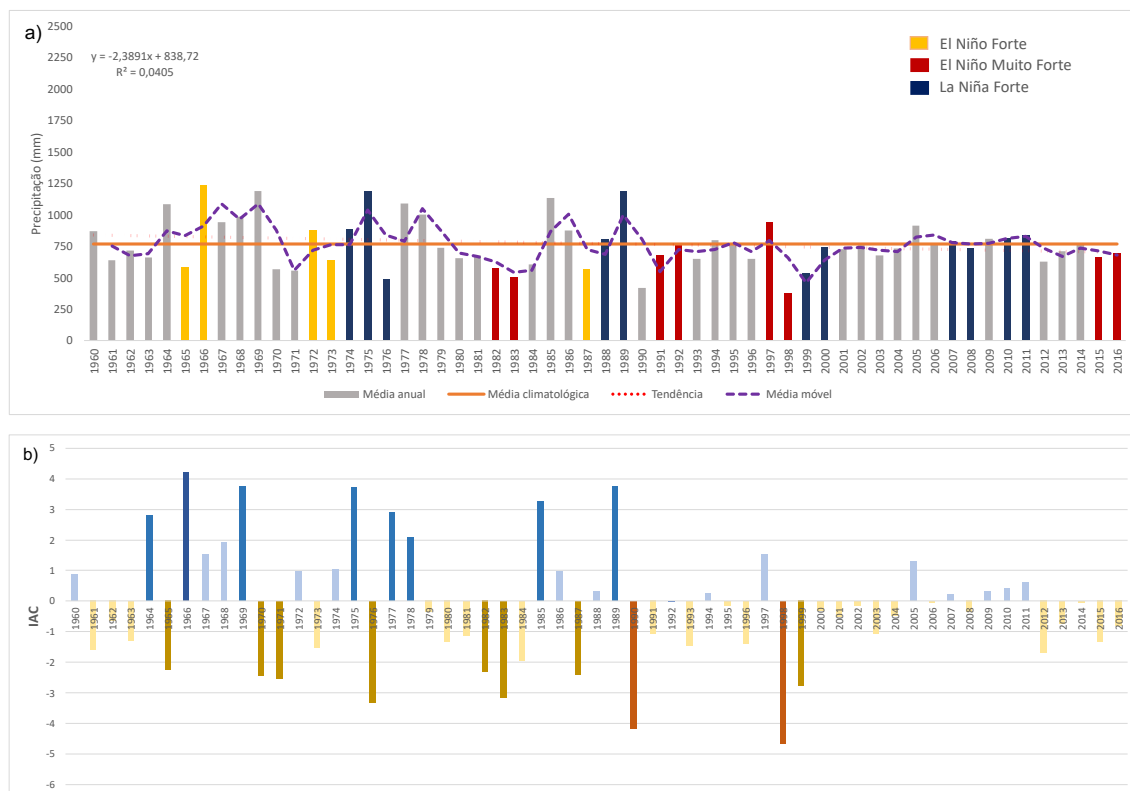
A RH Mundaú possui elevada relevância socioeconômica e ambiental para os estados de Alagoas e Pernambuco, sendo uma das BH mais estudadas da região (DA SILVA et al., 2009; DA SILVA et al., 2010a; DA SILVA et al., 2010b; SILVA et al., 2018). Sua importância está associada tanto à disponibilidade hídrica quanto à recorrência de eventos hidrometeorológicos extremos, por exemplo, as enchentes registradas em 2010 e 2022 que atingiram diversos municípios ribeirinhos, que por sua vez ocasionou inundações de grande magnitude, perdas humanas, danos à infraestrutura urbana e prejuízos econômicos significativos (FREIRE & NATENZON, 2019; SILVA JUNIOR et al., 2022; SGB/CPRM, 2022). Além dos impactos diretos, esses eventos contribuem para processos erosivos, transporte de sedimentos e degradação da qualidade da água, especialmente em áreas com ocupação irregular das margens fluviais. Estudos realizados na região de União dos Palmares demonstram que a ausência de planejamento territorial e a ocupação desordenada potencializam os impactos ambientais e sociais decorrentes das cheias (LOPES & DOMINGOS, 2020).

Do ponto de vista econômico, destacam-se atividades ligadas à agricultura, especialmente o cultivo de cana-de-açúcar, além da pecuária leiteira e avicultura, setores fortemente dependentes da distribuição temporal das chuvas (ANDRADE et al., 2021). Dessa forma, tanto períodos de excesso quanto de déficit pluviométrico exercem influência direta sobre a produtividade agrícola, a disponibilidade hídrica e a dinâmica socioeconômica regional.

A análise do IAC na RH Mundaú (Figura 20b) mostrou uma alternância entre anos secos e úmidos quando comparada às regiões litorâneas do estado, sendo caracterizada uma área de transição climática entre o litoral úmido e o agreste. As anomalias negativas apresentaram maior concentração temporal e frequentemente associadas às fases quentes do ENOS, ou seja, a forte influência dos forçantes climáticos de grande escala sobre a variabilidade interanual das chuvas (DA SILVA et al., 2009; DA SILVA et al., 2010a; DA SILVA et al., 2010b). Embora os totais anuais indiquem relativa estabilidade em determinados períodos, o IAC evidenciou que os déficits pluviométricos podem apresentar elevada intensidade, mesmo em anos próximos da média climatológica. Isso reforça a importância da utilização dos índices padronizados

existentes na literatura científica na identificação de extremos hidrológicos e na compreensão da dinâmica climática regional, principalmente em Alagoas tão dependente de recursos hídricos para desenvolvimento socioeconômico do Estado.

Figura 21 – a) Distribuição do acumulado de chuva anual e sua média (mm) na RH Xingó no período de 1960 a 2016; **b)** Índice de Anomalia de Chuva.



A RH Xingó, localizada no extremo oeste de Alagoas, apresentou média anual de precipitação de 769,43 mm (Figura 21), isso reflete o gradiente pluviométrico observado no estado, no qual os totais de chuva diminuem progressivamente da faixa costeira em direção ao interior continental (LYRA et al., 2014; COSTA et al., 2021) e confirmados no estudo via técnica de análise de agrupamento aplicado as BH. O maior acumulado anual foi registrado em 1966 (1237,65 mm), enquanto o menor ocorreu em 1998 (378,03 mm), isso evidenciou a elevada irregularidade do regime pluviométrico na região. Aproximadamente 38% dos anos da série temporal apresentaram precipitação abaixo da média histórica, característica típica das áreas semiáridas do Nordeste brasileiro.

A variabilidade das chuvas na RH Xingó está associada à atuação de sistemas atmosféricos de grande escala e à reduzida influência da umidade

oceânica sobre o interior do estado. Essa condição favorece maior frequência de períodos secos prolongados e elevada vulnerabilidade hídrica, especialmente durante eventos de El Niño. Assim como observado em outras regiões interioranas do NEB, a irregularidade espaço-temporal das precipitações representa um dos principais fatores limitantes para a disponibilidade hídrica e para o desenvolvimento das atividades econômicas locais.

A análise do IAC (Figura 21b) mostrou predominância de anomalias negativas persistentes e baixa frequência de eventos úmidos intensos. Os períodos secos tendem a apresentar maior duração e intensidade, o que potencializa impactos hidrológicos, ambientais e socioeconômicos na região do entorno. Mesmo em anos com precipitação próxima da média climatológica, o IAC apontou a ocorrência de déficits relevantes, indicando que a análise baseada apenas nos acumulados anuais pode subestimar a severidade das secas. A associação entre as anomalias negativas e as fases quentes do ENOS reforça o papel dos forçantes climáticos globais na intensificação das secas no interior do NEB (IPCC, 2021). Esse comportamento evidencia a elevada suscetibilidade da RH Xingó à ocorrência de eventos extremos secos, ressaltando a importância do monitoramento climático contínuo e da adoção de estratégias de gestão e adaptação voltadas à segurança hídrica da região.

5.7 Análise espaço-temporal das chuvas

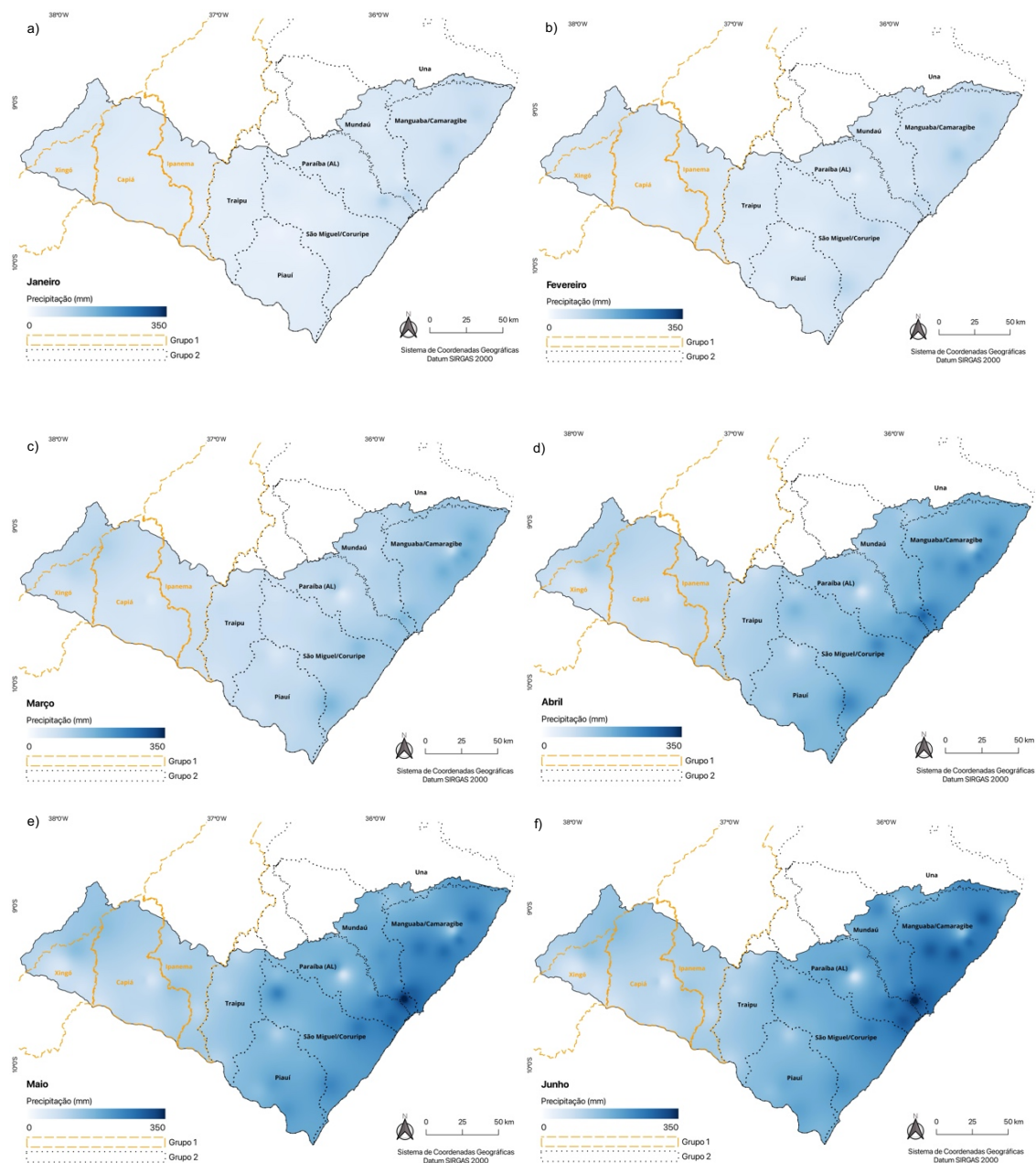
5.7.1 Mapas Mensais

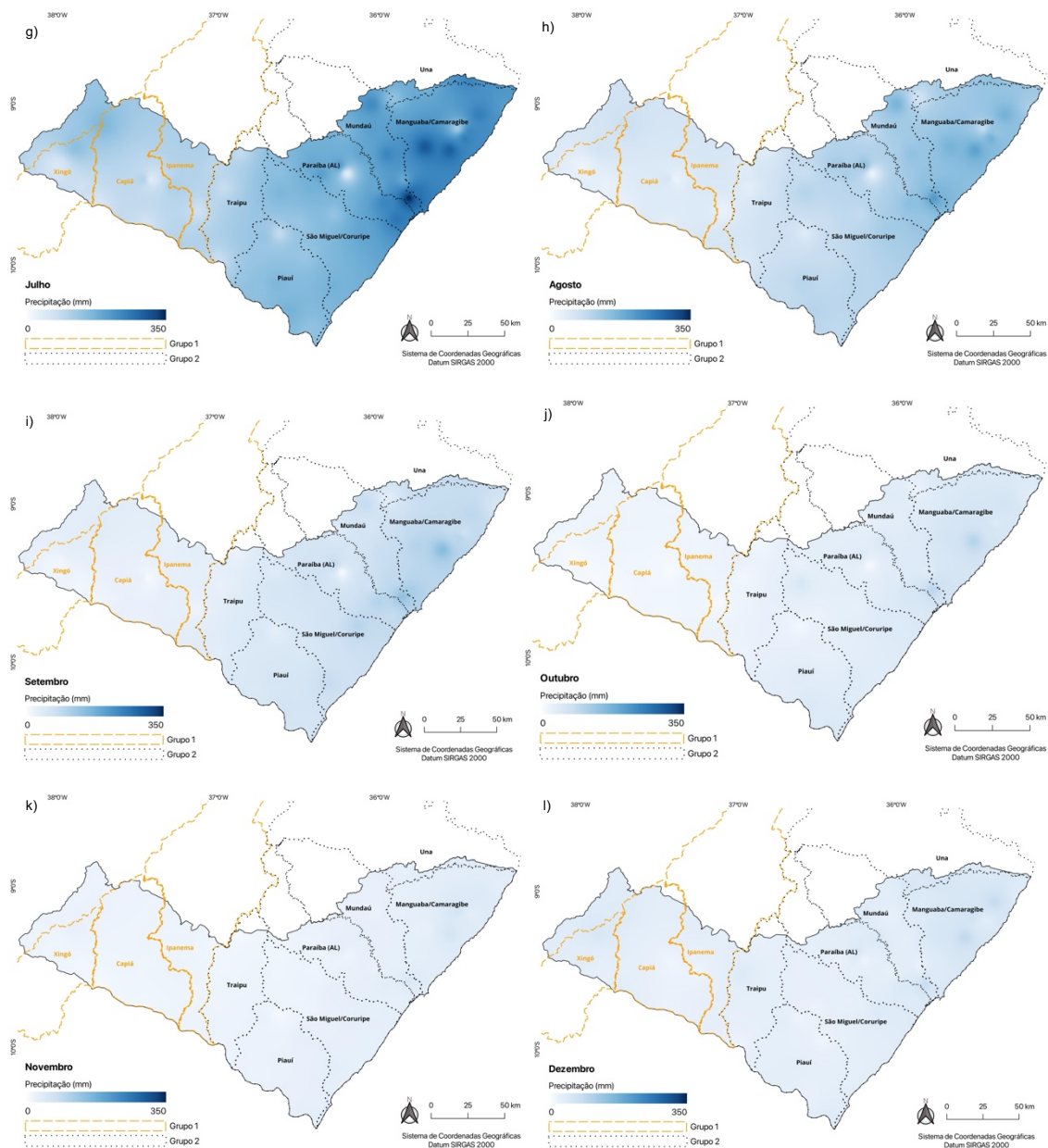
A análise dos mapas mensais de precipitação (Figura 22) permite identificar a distribuição espacial das chuvas nas RH de Alagoas ao longo do ano. De forma geral, o ciclo sazonal é bem definido, com aumento gradual das chuvas entre março e abril, máximos entre maio e julho e redução dos acumulados a partir de agosto.

Tal variabilidade está relacionado à atuação de sistemas meteorológicos em multiescala, por exemplo, a ZCIT, VCAN, circulações de brisas associadas com regime de ventos alísios, DOL entre outros, esses sistemas exercem alta influência sobre a precipitação no NEB (LYRA et al., 2014; ALVES et al., 2022; COSTA et al., 2021; DANTAS et al., 2022). A distribuição das chuvas também é

influenciada pelas condições do Atlântico Tropical, que modulam o transporte de umidade para a região (LYRA et al., 2017; SILVA et al., 2024).

Figura 22 – Distribuição espacial da média mensal (mm) do período de 1960 a 2016, para a) janeiro; b) fevereiro; c) março; d) abril; e) maio; f) junho; g) julho; h) agosto; i) setembro; j) outubro; k) novembro e l) dezembro.





Nos meses de janeiro a março predominaram menores volumes de precipitação em grande parte do estado. Os maiores acumulados concentram-se nas regiões litorâneas, enquanto o Agreste e o Sertão apresentaram chuvas irregulares e dependentes de eventos isolados.

A partir de abril ocorre o estabelecimento da estação chuvosa, com aumento significativo da precipitação, principalmente no Leste alagoano. Os maiores acumulados mensais ocorrem entre maio e julho, com destaque para as RHs de Manguaba/Camaragibe, Mundaú e Una. Isso confirmou os padrões observados nas análises anual e sazonal realizadas anteriormente, e ainda evidenciou a maior disponibilidade hídrica das regiões próximas ao litoral.

A distribuição espacial da precipitação em Alagoas apresentou um gradiente bem definido, com redução dos volumes de chuva do litoral em direção ao interior. Esse padrão reflete a diminuição da influência marítima e o predomínio das condições semiáridas no Agreste e Sertão. Nas RHs de Capiá, Ipanema, Traipu e Xingó, as chuvas apresentam maior irregularidade e maior variabilidade ao longo do ano.

Nos meses de agosto e setembro ocorre a transição para a estação seca. Nesse período, as chuvas tornam-se menos frequentes, permanecendo principalmente nas áreas costeiras. Já no interior do estado predominam condições mais secas, e assim reduz gradativamente a disponibilidade hídrica.

Entre outubro e fevereiro são registrados os menores acumulados pluviométricos do ano em praticamente todas as regiões hidrográficas. As condições mais secas ocorrem no Sertão, onde a irregularidade das chuvas é mais acentuada. Em alguns anos, a atuação do El Niño pode intensificar esse cenário, contribuindo para a redução das precipitações sobre o NEB (CUNHA et al., 2020; MARENGO et al., 2017).

De forma geral, os mapas evidenciaram alta diferenciação espacial da precipitação em Alagoas. As regiões litorâneas com maiores acumulados e menor variabilidade ao longo do ano, enquanto as regiões interioranas apresentam chuvas irregulares e maior vulnerabilidade à escassez hídrica. Esses achados reforçam a necessidade de estratégias de gestão dos recursos hídricos adaptadas às características climáticas de cada RH.

5.8 Análise espacial do SPI-12

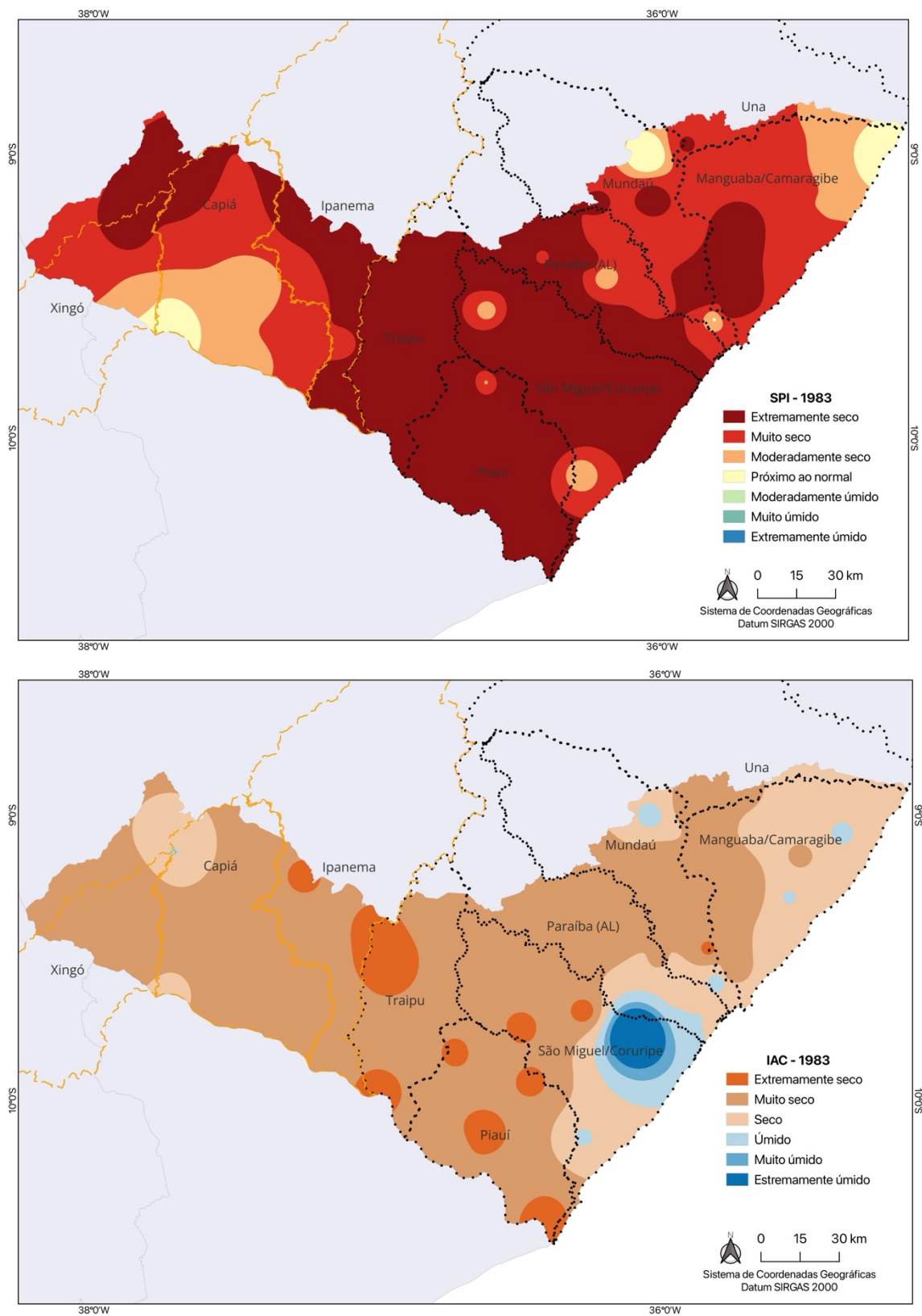
É sabido da influência das fases do ENOS sobre a precipitação no NEB (Lyra et al., 2017; Marengo et al., 2017; Costa et al., 2018; Vitorio et al., 2025), e assim foram selecionados anos representativos das fases quente (1983, 1998 e 2015) e fria (1975, 1989 e 2011) do ENOS, sendo categorizados como muito forte e forte conforme os índices ONI (Tabela 2) e RONI (Tabela 3). A análise foi realizada a partir do SPI-12 e comparada com os resultados do IAC, e assim

avaliou a distribuição espacial das condições secas e úmidas nas RH em Alagoas.

O ano de 1983 (Figura 23), associado a um forte evento de El Niño, apresentou condições de seca em praticamente todo o estado. No SPI-12 predominaram as classes muito seco e extremamente seco, principalmente nas RHs de Capiá, Ipanema e Xingó. Nas demais RH também foram observadas anomalias negativas, com déficit pluviométrico persistente. Apenas áreas menores apresentaram condições próximas à normalidade.

Os resultados do IAC mostraram similaridade ao SPI-12, com predomínio das classes seco e muito seco em grande parte do estado. Áreas úmidas ocorreram de forma isolada no litoral sul e porções menores das RHs de Mundaú, Una e Manguaba/Camaragibe. A concordância entre os índices confirmou que o ano de 1983 foi um dos anos mais secos da série histórica, com a forte influência do El Niño sobre a precipitação em Alagoas (LYRA et al., 2017; DA SILVA et al., 2020; OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021; ABREU et al., 2023).

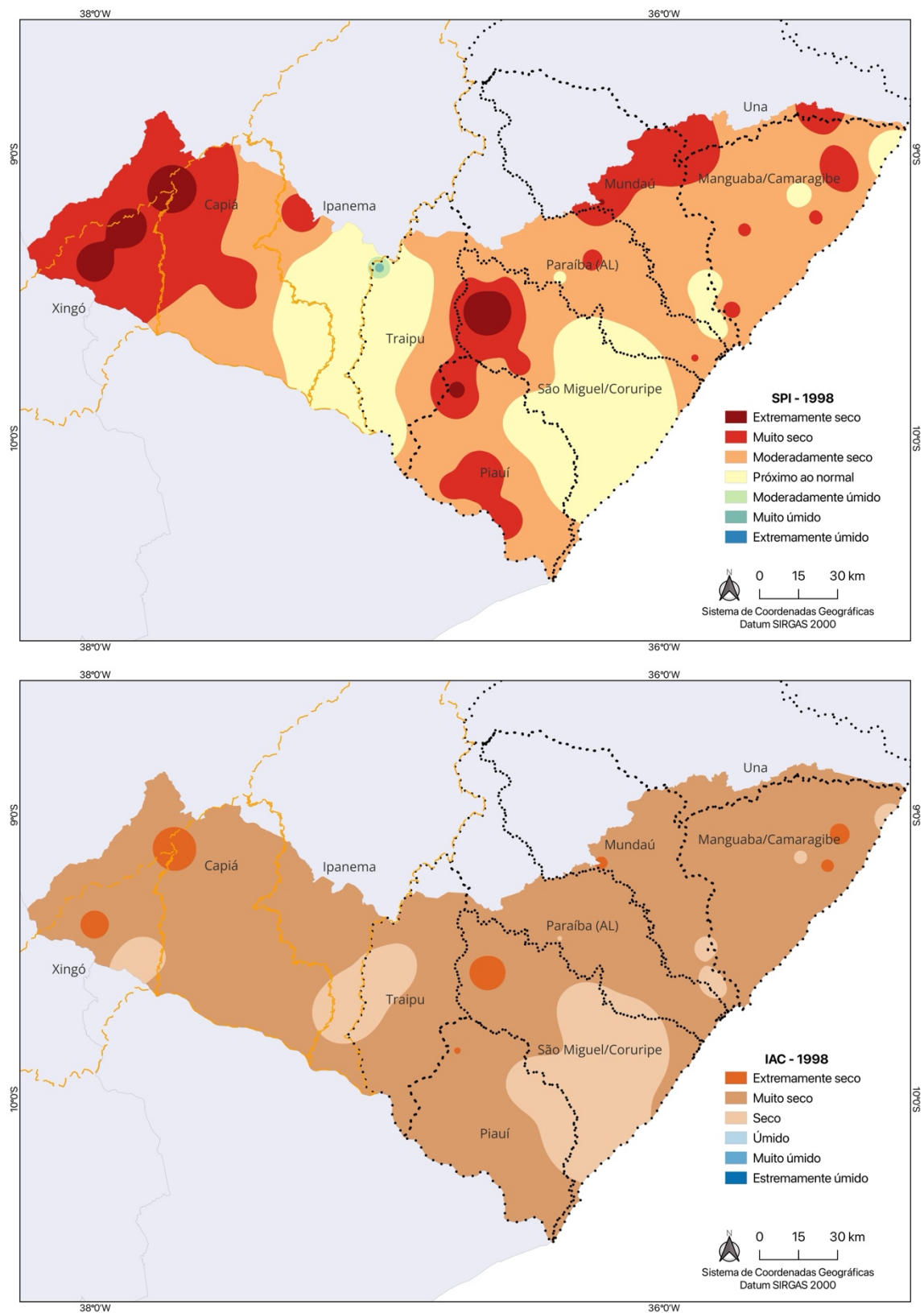
Figura 23 – Análise espacial do SPI anual e IAC para o ano de 1983.



O ano de 1998 (Figura 24), também sob influência de um forte evento de El Niño, apresentou predominância de condições secas em grande parte das RH. Entretanto, a intensidade da seca foi menor quando comparada a 1983. No SPI-12 predominaram as classes moderadamente seco e muito seco, principalmente nas RHs do grupo G1, seguido de algumas áreas do grupo G2 apresentaram condições próximas à normalidade.

O IAC também indicou predomínio de anomalias negativas de precipitação, com ocorrência das classes seco e muito seco em praticamente todo o estado. A semelhança entre os resultados obtidos pelos dois índices reforça a ocorrência de déficit hídrico generalizado durante em eventos de El Niño categorizados como Muito Forte (Tabelas 2 e 3). Os impactos foram significativos nas RHs do interior, onde a variabilidade pluviométrica é naturalmente maior. É sabido que a irregularidade das chuvas influencia o abastecimento humano, a agricultura e a manutenção dos ecossistemas naturais, principalmente durante períodos de seca (CUNHA et al., 2021).

Figura 24 – Análise espacial do SPI anual e IAC para o ano de 1998.

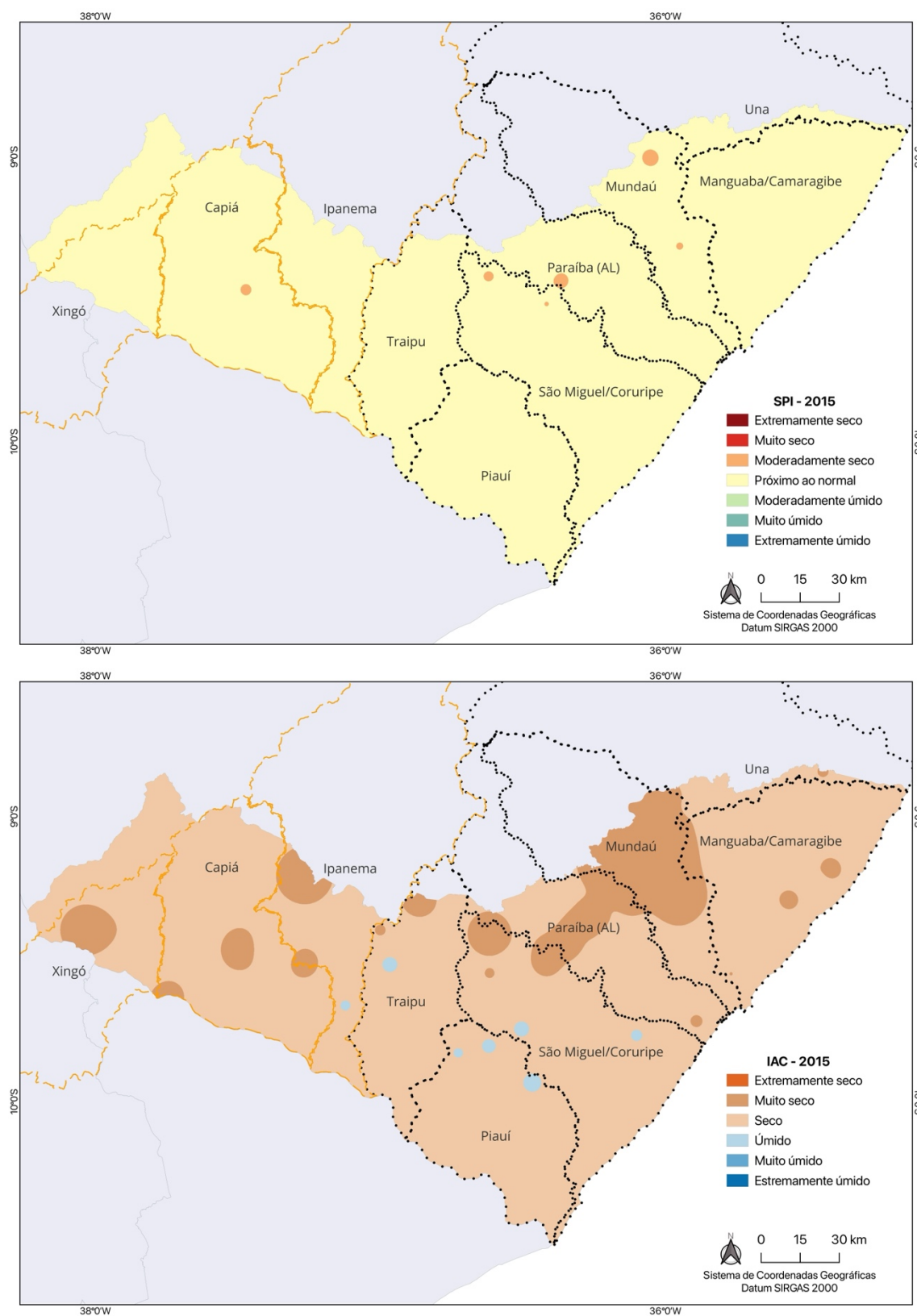


O ano de 2015 (Figura 25), apesar de estar associado a um dos eventos de El Niño mais intensos das últimas décadas, denominado de Mega El Niño, apresentou situação diferente dos demais anos analisados. No SPI-12 predominou a categoria próxima ao normal em praticamente todas as RH, isso indicou ausência de seca prolongada. Apenas pequenas áreas foram classificadas como moderadamente secas.

O IAC apresentou maior ocorrência de anomalias negativas, principalmente nas RHs de Xingó, Ipanema, Paraíba (AL) e Mundaú. Essa diferença entre os índices está relacionada às suas metodologias de obtenção dos valores normalizados (itens 4.3 e 4.8). Vale ressaltar que o SPI- representa o acumulado da precipitação ao longo do tempo e normalizado em multiescala, enquanto, o IAC é sensível às variações anuais da chuva.

Os resultados indicaram que, embora tenham ocorrido déficits pluviométricos pontuais, os impactos do El Niño de 2015 foram menos intensos em Alagoas em comparação aos eventos de 1983 e 1998. Tal variabilidade pode estar relacionado à atuação de sistemas meteorológicos regionais e à influência das condições oceânicas do Atlântico Tropical (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021; FIRMINO et al., 2024).

Figura 25 – Análise espacial do SPI anual e IAC para o ano de 2015.

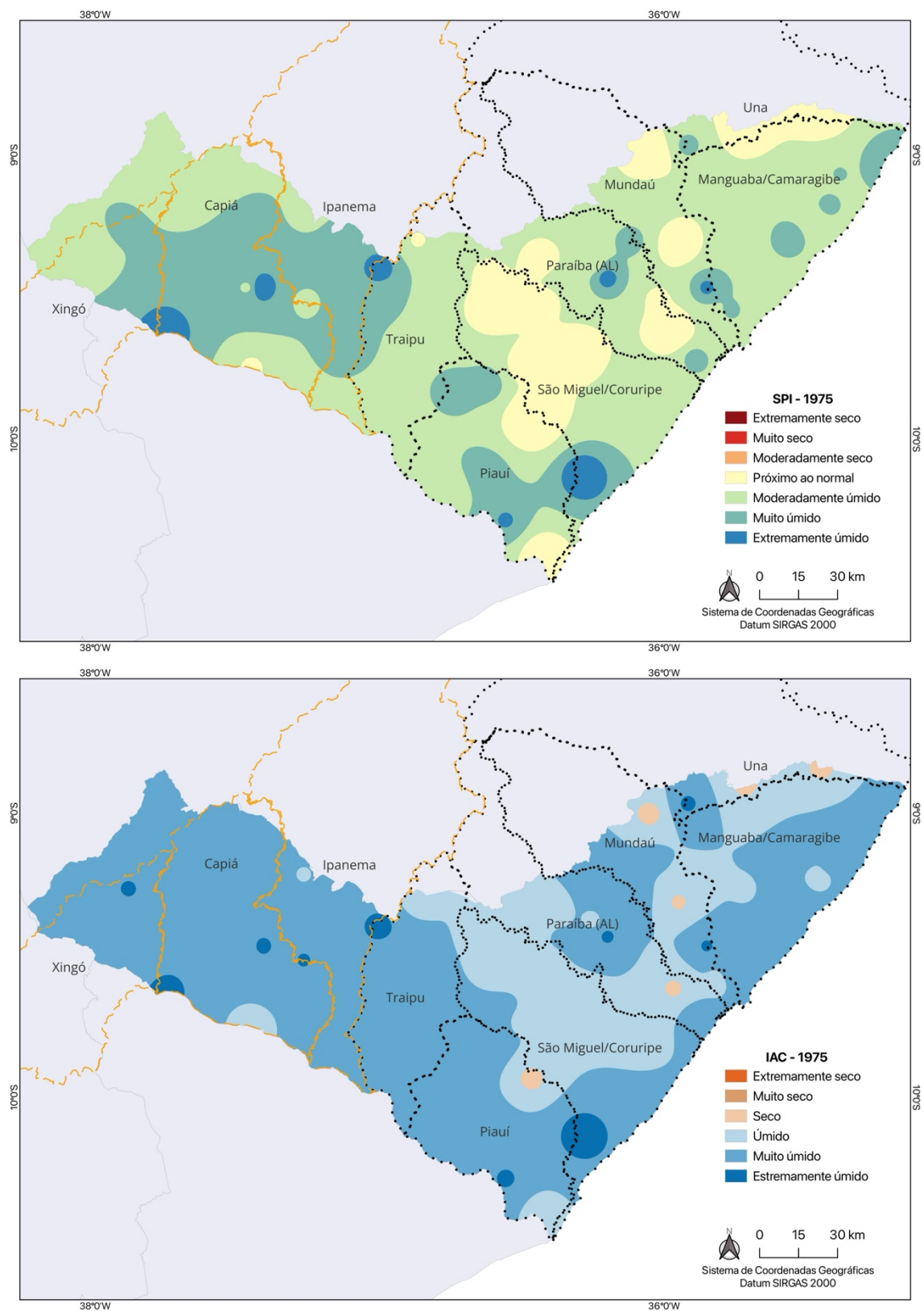


O ano de 1975 (Figura 26), associado à fase fria do ENOS (La Niña), exibiu predominância de condições úmidas em grande parte do estado. No SPI-

12 prevaleceram as classes moderadamente úmido e muito úmido, com ocorrência de áreas extremamente úmidas principalmente nas RHs de Xingó, Capiá e Ipanema.

O IAC confirmou esse padrão, com anomalias positivas de precipitação em praticamente todas as RH de Alagoas. Apesar da ocorrência de menores núcleos secos isolados, predominou um cenário de elevada disponibilidade hídrica. Esses resultados demonstram a influência da La Niña no aumento das chuvas sobre o NEB (IPCC, 2021; REBOITA et al., 2021) e confirmaram o uso satisfatório de índices de seca aplicados para Alagoas em estudo realizados anteriormente (LYRA et al., 2017; COSTA et al., 2021; ABREU et al., 2023; SANTOS et al., 2023).

Figura 26 – Análise espacial do SPI anual e IAC para o ano de 1975.

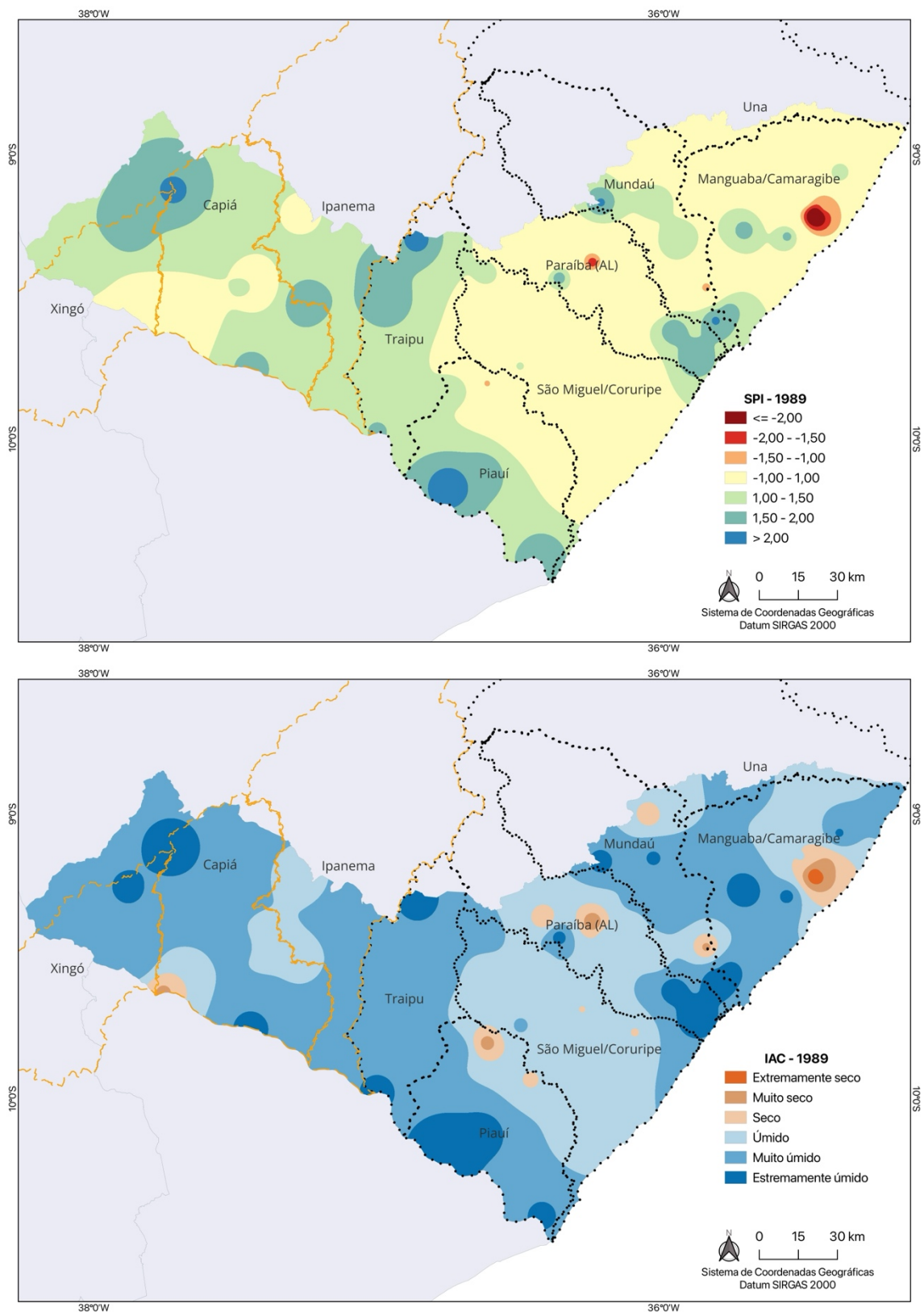


O ano de 1989 (Figura 27) também apresentou predominância de condições úmidas, embora com maior variabilidade espacial quando comparado

ao ano de 1975. No SPI-12 predominaram as classes moderadamente úmido e muito úmido, principalmente nas RHs do grupo G1. No grupo G2 ocorreram áreas próximas à normalidade, seguido de alguns núcleos secos isolados.

Os resultados do IAC foram similares aos do SPI-12, com anomalias positivas de precipitação na maior parte do estado. A presença de áreas secas localizadas, principalmente no litoral, demonstra que a resposta das chuvas aos eventos de La Niña não ocorre de forma homogênea em todo o território alagoano, conforme apontando anteriormente com uso de Análise Harmônica e Espectral (AHE) - (LYRA et al., 2017) e Análise de Wavelet (AW) - (DA SILVA et al., 2020).

Figura 27 – Análise espacial do SPI anual e IAC para o ano de 1989.



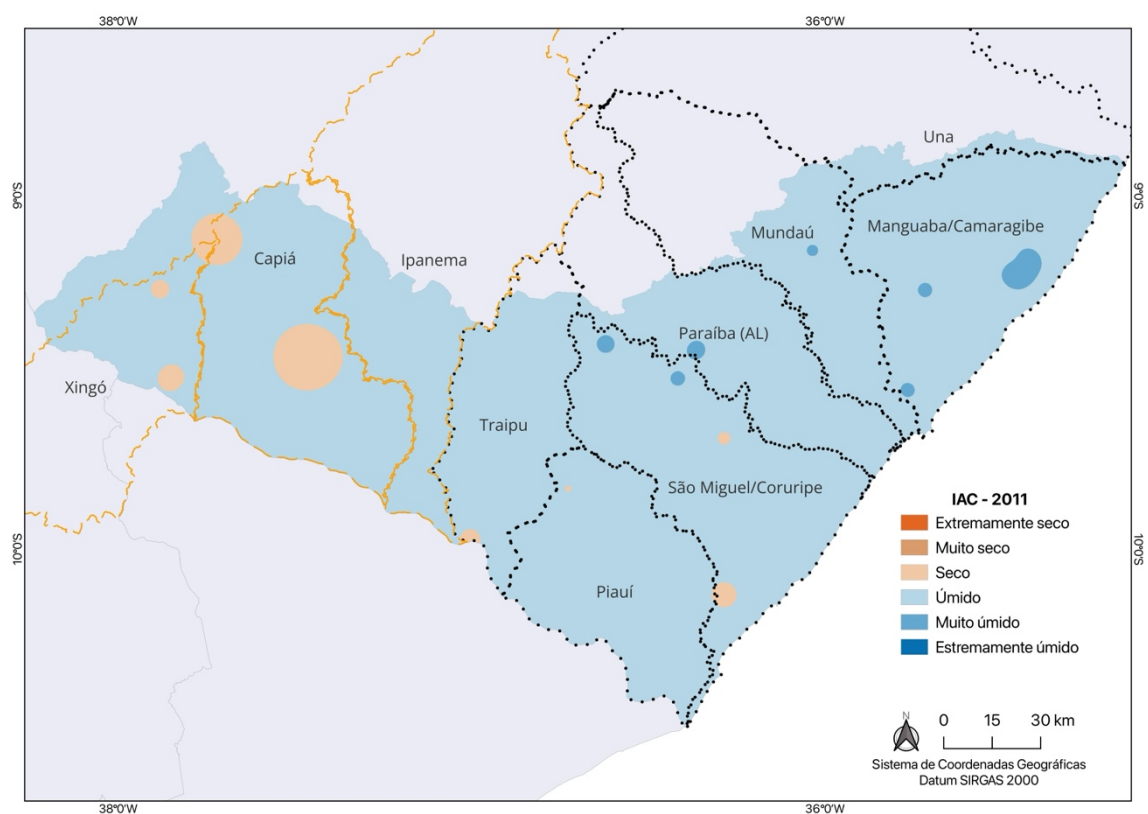
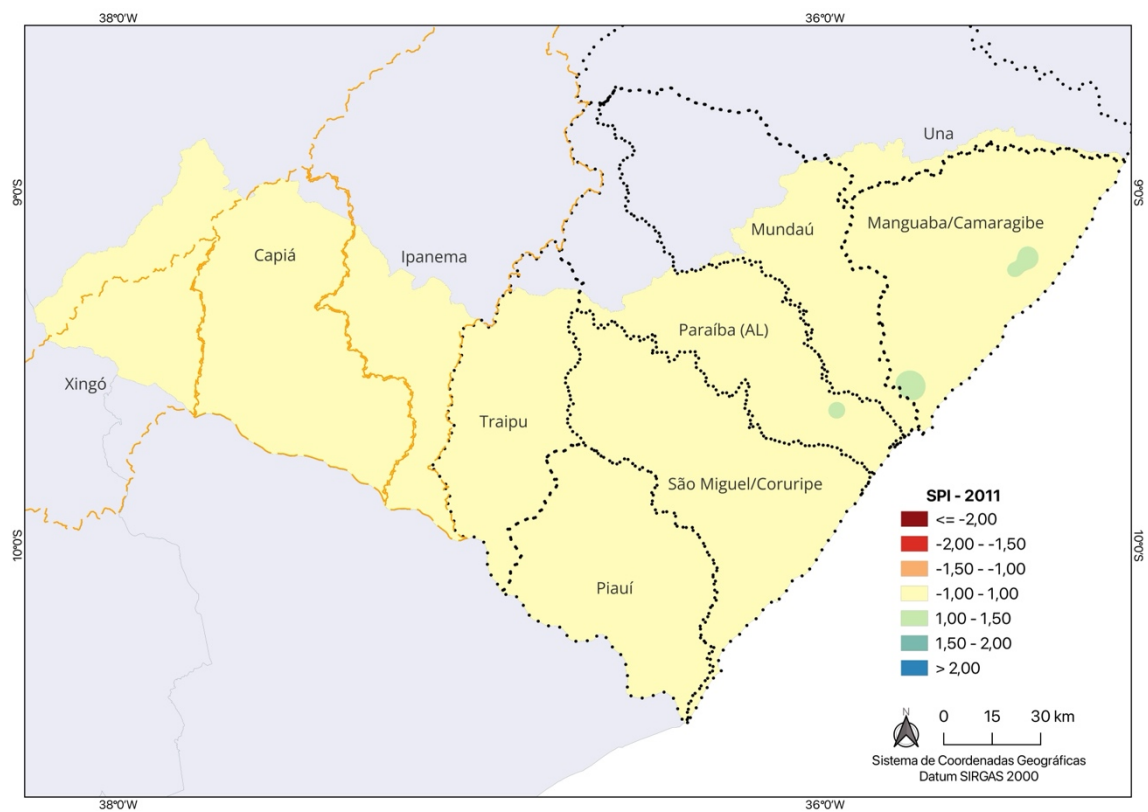
O ano de 2011 (Figura 28), embora associado à La Niña, apresentou predominância da categoria próxima ao normal no SPI-12. Pequenas áreas

moderadamente úmidas foram identificadas principalmente no litoral e em setores das RHs de Manguaba/Camaragibe e São Miguel/Coruripe.

Por outro lado, o IAC indicou condições mais úmidas em grande parte do estado, especialmente nas RHs de Manguaba/Camaragibe, Mundaú e Paraíba (AL). Essa diferença evidencia que os índices respondem de maneira distinta às anomalias de precipitação, mesmo na ocorrência da atuação de modos de variabilidade climática.

Mesmo com essas diferenças, ambos os índices indicaram ausência de seca severa em 2011. Os resultados mostram que a variabilidade hidroclimática de Alagoas é influenciada tanto pelo ENOS quanto por sistemas meteorológicos regionais que atuam no ENEB (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021).

Figura 28 – Análise espacial do SPI anual e IAC para o ano de 2011.



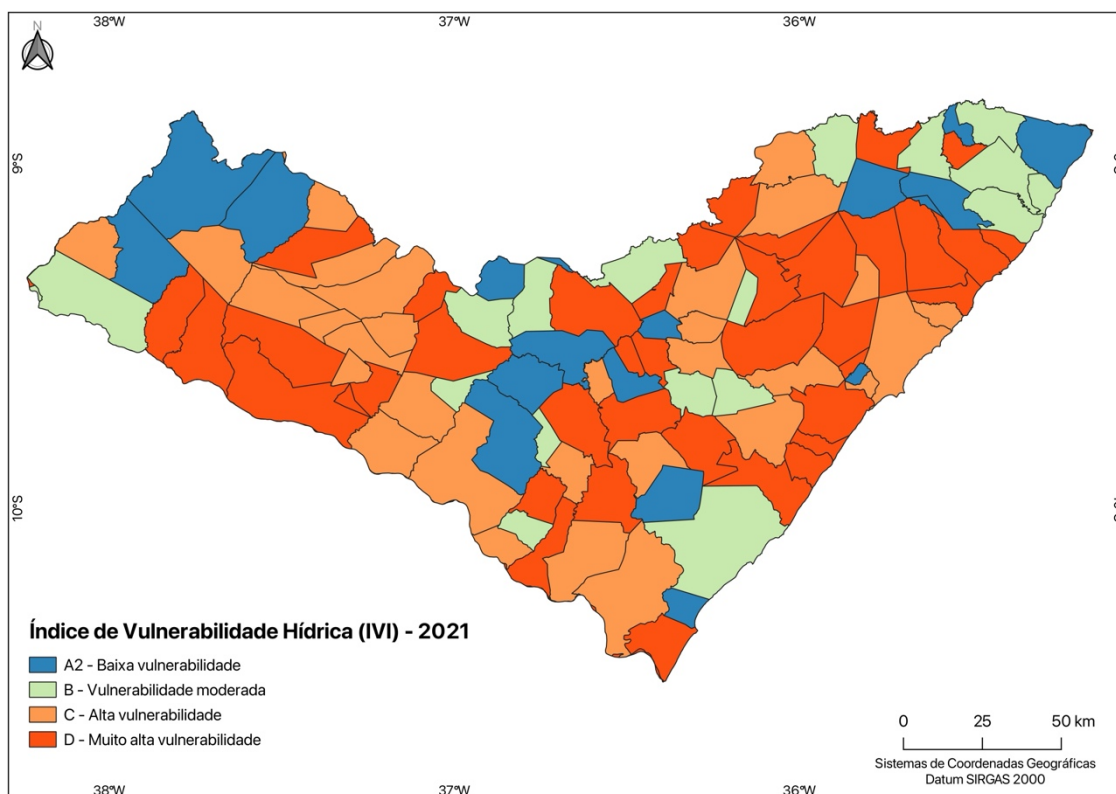
De forma geral, os resultados mostraram que os eventos de El Niño estiveram associados à redução da precipitação e ao aumento da ocorrência de secas, principalmente nas RHs do interior do estado. Em contraste, os anos de

La Niña apresentaram condições mais úmidas e maior disponibilidade hídrica. A comparação entre SPI-12 e IAC demonstrou que os dois índices são complementares e contribuem para uma melhor compreensão da variabilidade hidroclimática em Alagoas, e ainda mostrou que o uso de mais de um índice de seca concorda com a literatura científica (YIHDEGO et al., 2019; GEBRECHORKOS et al., 2023; ZHANG et al., 2025).

5.9 Integração dos fatores socioeconômicos e de uso da água na vulnerabilidade hídrica

Em relação à vulnerabilidade hídrica em Alagoas, é necessário analisar de forma conjunta os fatores climáticos e a pressão antrópica gerada pelas atividades humanas e características socioeconômicas de cada região. Para isso, os mapas apresentados a seguir reúnem os dados de Índice de Vulnerabilidade Hídrica (IVI) para 2021, a densidade demográfica com base no Censo de 2022, as vazões de retirada urbana e rural, além das projeções de demanda para irrigação e vazão total até o ano de 2040. A integração dessas informações oficiais oriundas das bases da ANA e do IBGE ajudam a compreender por que bacias com regime de chuva tão distintos também respondem de forma diferente quando expostas aos extremos de seca ou chuvas extremas (ANA, 2024).

Figura 29 – Índice de Vulnerabilidade Hídrica (IVI) para o estado de Alagoas (2021). Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da ANA.

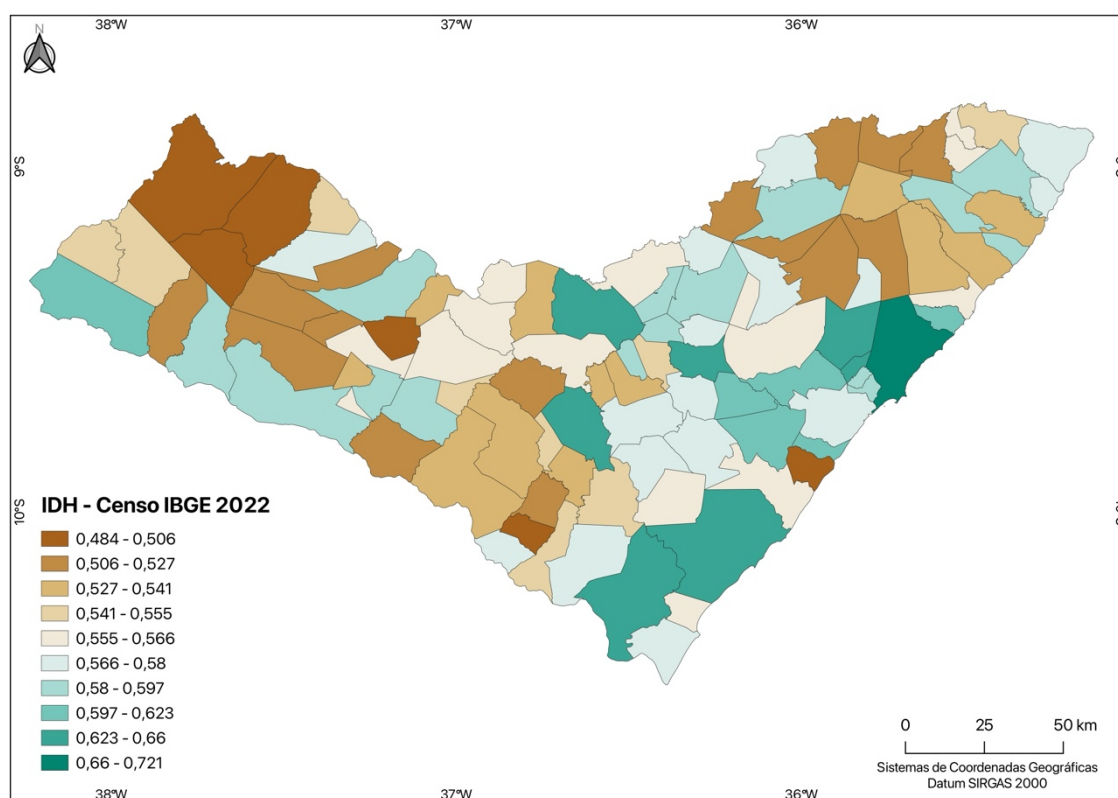


Baseado no mapa do IVI (Figura 29) houve alta predominância das classes de alta e muito alta vulnerabilidade hídrica (C e D) em diversos municípios do interior do estado. No caso do grupo G2, que envolve as bacias Capiá, Ipanema e Xingó, esse cenário está associado diretamente às limitações climáticas locais. Conforme apresentado na estatística descritiva (Tabela 6), essas bacias possuem as menores médias anuais de chuva de Alagoas, entre 542,23 mm a 769,43 mm, além disso os maiores valores de CV%, o que mostrou uma característica de regime de chuva irregular (LYRA et al., 2014; SANTOS et al., 2023).

Embora essas regiões apresentem baixa densidade demográfica e menores volumes absolutos de retirada de água urbana e rural, a vulnerabilidade hídrica se manteve elevada por causa das condições socioeconômicas estruturais (VIEIRA et al., 2023). Ao cruzar esses dados com o mapa do IDH municipal (Figura 30), fica evidente que as áreas com os piores IDH coincidem exatamente com as regiões propensas a secas severas e prolongadas, como as identificadas nos eventos de El Niño Forte de 1983 e 1998 via aplicação do SPI-12 (OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2021). Portanto, no grupo G2, a população sofre com uma vulnerabilidade estrutural, onde a falta crônica de infraestrutura hídrica e a baixa capacidade econômica limitam a convivência com o clima semiárido (CUNHA et al., 2021; CARETTA et al., 2022; VIEIRA et al., 2023).

Figura 30 – Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) dos municípios do estado de Alagoas.

Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da ANA.



Por outro lado, as bacias que formam o grupo G1, tais como Manguaba/Camaragibe, Mundaú, Paraíba, São Miguel/Coruripe, Piauí e Una, mostraram um cenário oposto, onde a vulnerabilidade hídrica foi ditada pela alta pressão antrópica. Do ponto de vista climatológico, o setor leste e litorâneo apresentou a maior segurança hídrica natural, com médias anuais que

ultrapassam 1200 mm e chuvas regulares, seguido de baixos valores de CV% (Tabela 6) - (LYRA et al., 2014; COSTA et al., 2021).

Contudo, a Figura 31 destacou que essa mesma faixa concentra as maiores densidades populacionais do estado, devido principalmente a capital Maceió e a Região Metropolitana de Maceió (RMM). Esse adensamento gera uma demanda bastante alta de retirada de água para abastecimento urbano, o que amplia as rupturas potenciais nos serviços ofertados (ANA, 2024). Além da questão populacional, a atividade agropecuária e o cultivo histórico da cana-de-açúcar exigem volumes elevados de captação, o que é confirmado pelo mapa de vazão retirada para irrigação (SPERA et al., 2020). Esse conjunto de fatores explica o paradoxo de encontrarmos municípios do litoral e da zona da mata classificados com alta e muito alta vulnerabilidade hídrica, mesmo estando na região onde mais chove em Alagoas. Nesses locais, o problema não é a falta de chuva, mas sim o estresse hídrico causado pela saturação da demanda urbana e agrícola sobre os rios e reservatórios (SILVA COSTA et al., 2025).

Figura 31 – Densidade demográfica dos municípios do estado de Alagoas. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da IBGE (2022).

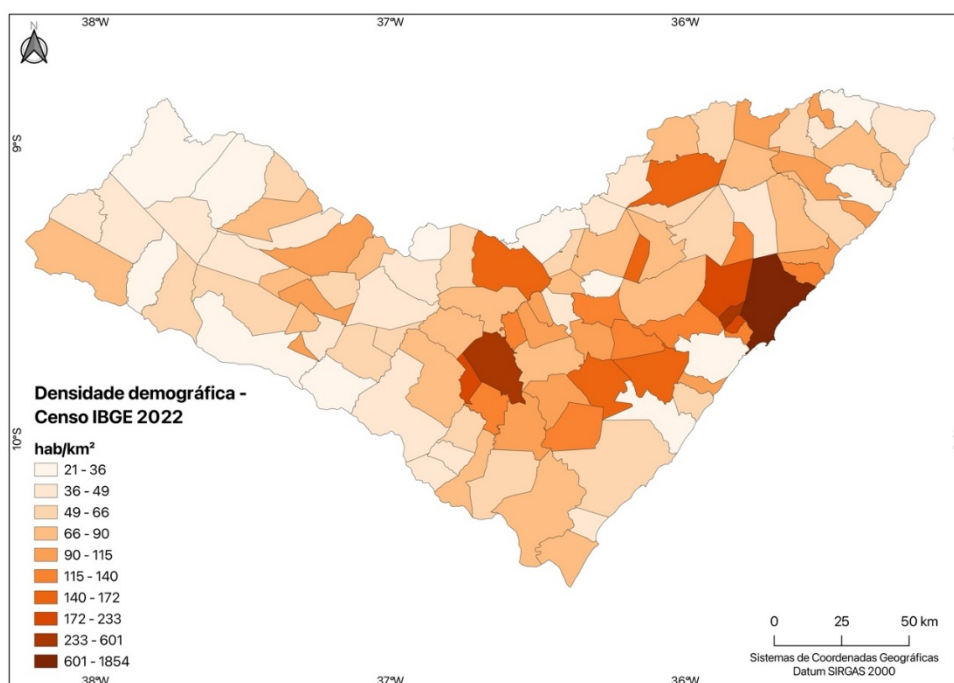
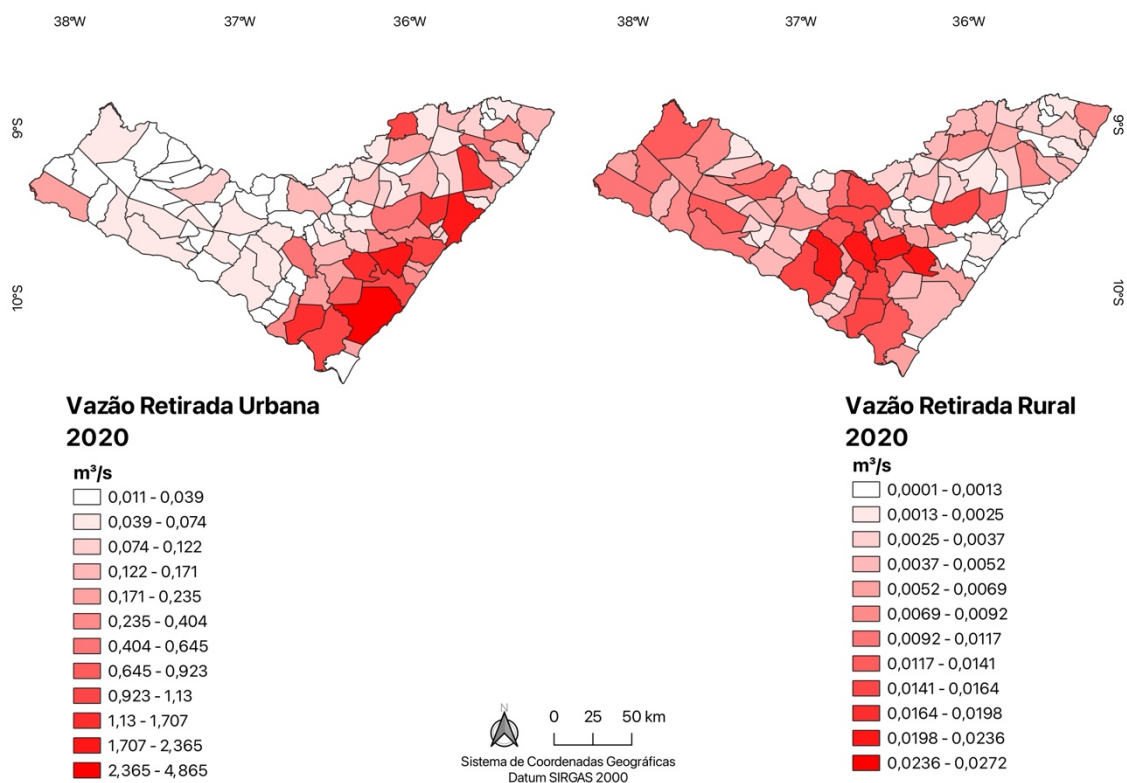


Figura 32 – Vazão retirada para abastecimento urbano e uso rural nos municípios do estado de Alagoas (2020). Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da ANA.



Em relação às tendências futuras para o estado de Alagoas, os mapas de 1980, 2020 e a projeção para o ano de 2040 (Figuras 33 e 34) revelam um sinal preocupante para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, com aumento significativo da vazão nos anos em questão. Há um aumento significativo nas vazões retiradas para irrigação e nas vazões totais, concentrado principalmente nas bacias do setor leste e na porção sul do estado, que por sua vez afeta as bacias dos rios Piauí e São Miguel/Coruripe (SCHEIBEL et al., 2024; CAROLINO et al., 2024).

Esse aumento contínuo da pressão antrópica sob a ótica econômica entra em choque direto com os resultados físicos encontrados na análise climática deste estudo. Como visto anteriormente nas Figuras 20 (a) e 21 (a), as linhas de regressão linear obtidas das séries históricas de chuva (1960–2016) apontaram para uma tendência de redução gradual dos volumes anuais de precipitação em boa parte das RH de Alagoas, o que corroborou com estudos de modelagem regional de cenários futuros de chuva para o ENEB (ANDRADE et al., 2021; DANTAS et al., 2022). Esse desalinhamento entre a oferta natural de água que tende a diminuir e a pressão antrópica que avança em direção ao ano de 2040

reforça a necessidade urgente de estratégias integradas de gestão (ANA, 2024). Sem ações de mitigação e controle de perdas, o estado poderá enfrentar cenários severos de escassez e aumento nos conflitos pelo uso da água, ameaça à segurança hídrica das populações rurais e urbanas (SPERA et al., 2020; ANDRADE et al., 2021; RIBEIRO; TEIXEIRA, 2022).

Figura 33 – Vazão (m^3/s) retirada para irrigação nos municípios do estado de Alagoas nos anos de 1980, 2020 e projeção para 2040. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da ANA.

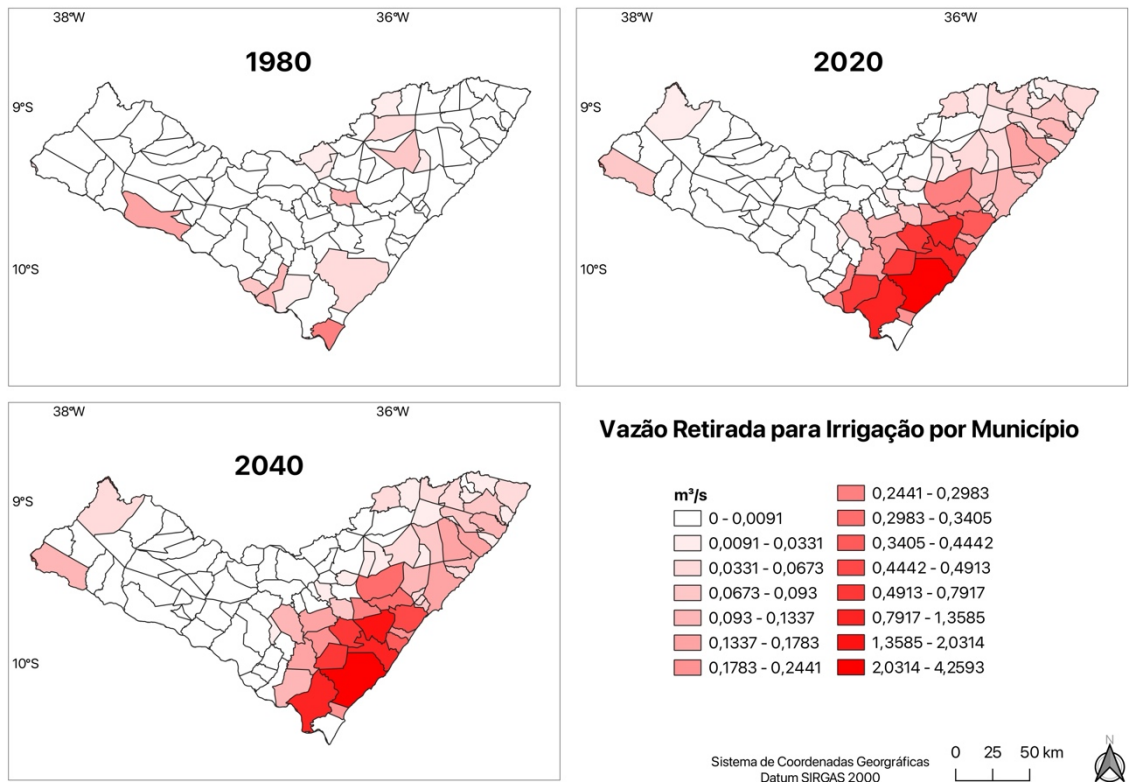
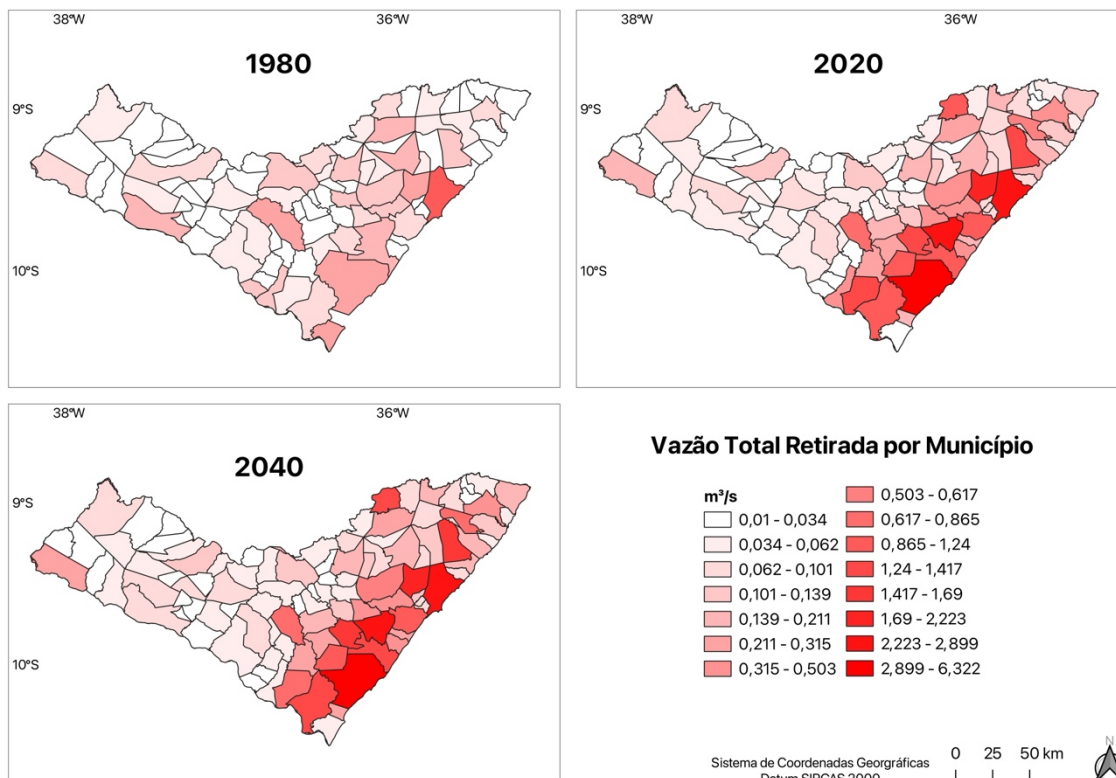


Figura 34 – Vazão total retirada nos municípios do estado de Alagoas nos anos de 1980, 2020 e projeção para 2040. Fonte: Elaborado pela autora com base em dados da ANA.



6 CONCLUSÕES

As conclusões obtidas no estudo são:

A regionalização das bacias hidrográficas de Alagoas via análise multivariada revela a existência de dois grupos homogêneos pluviométricos distintos. O grupo G1, associado às regiões mais úmidas do estado, com maiores totais pluviométricos, seguido de maior frequência de eventos extremos de chuva e maior regularidade na distribuição sazonal. Em contrapartida, o grupo G2 com características típicas do semiárido, seguido de menores acumulados anuais, maior irregularidade temporal das chuvas e maior susceptibilidade à ocorrência de déficits pluviométricos prolongados.

A análise dos perfis médios mensais e da estatística exploratória evidencia que ambos os grupos apresentam sazonalidade com magnitudes distintas e ainda com implicações no regime de chuva nas bacias hidrográficas de Alagoas. O grupo G1 com elevada variabilidade durante a estação chuvosa, associada à ocorrência de eventos extremos de precipitação, ao contrário do grupo G2 com irregularidade sazonal, caracterizado pela concentração das chuvas em poucos episódios e maior variabilidade relativa em relação à sua climatologia.

A aplicação do algoritmo DBSCAN é eficiente na identificação de anos secos, chuvosos e de transição que ocorrem nas bacias hidrográficas, pois permite identificar padrões temporais consistentes com a variabilidade climática observada na série histórica. Os achados obtidos no estudo indicam que os eventos extremos são diferenciados entre os grupos homogêneos pluviométricos, devido os mecanismos atmosféricos responsáveis pelos excedentes pluviométricos não atuam de forma uniforme em todo o estado. Além disso, a maior dispersão observada no grupo G2 reforça a complexidade e a irregularidade do regime pluviométrico das regiões semiáridas e, principalmente o uso da água oriundas destas bacias hidrográficas para as atividades e necessidades da população que nelas habitam.

A análise espacial dos índices de seca confirma a alta influência da variabilidade climática interanual sobre as regiões hidrográficas de Alagoas, independente da adoção da categorização do ENOS via ONI e RONI. Os episódios de El Niño são associados à redução da precipitação e à intensificação das condições de seca, sobretudo nas regiões hidrográficas do interior do estado, enquanto os episódios de La Niña favorecem condições mais úmidas e maior disponibilidade hídrica. Os achados obtidos no estudo também demonstram que uso de mais de um índice de seca são ferramentas complementares para o monitoramento da variabilidade hidroclimática e para a identificação de eventos extremos.

A integração das informações climáticas com indicadores socioeconômicos e de demanda hídrica evidencia que a vulnerabilidade hídrica não depende exclusivamente da disponibilidade de água. Aspectos relacionados à densidade populacional, ao uso dos recursos hídricos e às demandas passadas e futuras exercem influência significativa sobre a capacidade de adaptação das regiões hidrográficas frente aos eventos extremos, que por sua vez tem sido intensificado com as mudanças climáticas em curso. Dessa forma, a vulnerabilidade identificada no estudo resulta da interação entre fatores naturais e antrópicos, e portanto, reforça a necessidade de abordagens integradas no planejamento dos recursos hídricos.

Por fim, conclui-se que a regionalização das regiões hidrográficas, associada à análise dos extremos pluviométricos e dos fatores socioeconômicos, constitui uma importante ferramenta para subsidiar ações de monitoramento, planejamento e gestão dos recursos hídricos em Alagoas. Os achados obtidos contribuem para o entendimento da dinâmica hidroclimática estadual e fornecem subsídios para estratégias de adaptação e mitigação frente aos impactos decorrentes da variabilidade climática e dos eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDOLMANAFI, A., SAGHAFIAN, B., & AMINYAVARI, S. (2025). Classification of design precipitation intensities for different return periods in Iran. **Earth Science Informatics**, 18(3), 308.
- ABREU, M. C., DE SOUZA FRAGA, M., LYRA, G. B., DE OLIVEIRA JUNIOR, J. F., DE JESÚS VILLAR-HERNÁNDEZ, B., DE SOUZA, A., & ZERI, M. (2023). Long-term trend analysis in annual, seasonal and monthly rainfall in East Northeast of Brazil and the influence of modes of climate variability. **International Journal of Climatology**, 43(16), 7463-7480.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Bases de Dados Hidrográficos do Brasil: BHB250 e DHN250**. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-e-ibge-lancam-ineditas-bases-de-dados-hidrograficos-do-brasil>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS — ANA. **Panorama da gestão de recursos hídricos no Brasil 2024**. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/porta1/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura2024_04122024.pdf
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: informe 2024**. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: ANA Biblioteca Digital.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Impactos da mudança climática nos recursos hídricos das diferentes regiões do Brasil**. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: ANA Notícias Oficiais. https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-lanca-estudo-sobre-impactos-da-mudanca-climatica-nos-recursos-hidricos-das-diferentes-regioes-do-brasil/resumo-executivo_26012024.pdf
- ALAHACON, N., & EDIRISINGHE, M. (2022). A comprehensive assessment of remote sensing and traditional based drought monitoring indices at global

and regional scale. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, 13(1), 762-799.

ALVES, J. E., Gonçalves, T. S., & Nascimento, S. A. M. (2022). Precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Nordeste do Brasil: tendências e variabilidade (1970-2020). *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, 17(2), 527-542. <http://doi.org/10.46357/bcnaturais.v17i2.841>

ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A.A.A.; LIMA, J.R.D.S.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A. Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. **International Journal of Climatologia**. 2021; 41(Suppl.1): p1045-1061 <https://doi.org/10.1002/joc.6751>

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Tropical Pacific and South Atlantic effects on rainfall variability over Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 26, n. 13, p. 1895–1912, 2006. DOI: 10.1002/joc.1341

ARBELAITZ, O.; GURRUTXAGA, I.; MUGUERZA, J.; PÉREZ, J. M.; PERONA, I. An extensive comparative study of cluster validity indices. **Pattern Recognition**, v. 46, n. 1, p. 243–256, 2013.

BACK, Á. J., CADORIN, S. B., & GALATTO, S. L. (2020). Extreme rainfall and IDF equations for Alagoas State, Brazil. *Ambiente E Agua - an Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 15(6), 1. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2544>

BARROS, A. H. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. **Climatologia do Estado de Alagoas**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa. Recife, 2012.

BEVEN, K. J. (2012). Rainfall-runoff modelling: the primer. **John Wiley & Sons**.

- BIRANT, D.; KUT, A. ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial–temporal data. *Data & Knowledge Engineering*, v. 60, n. 1, p. 208–221, 2007. DOI: 10.1016/j.datak.2006.01.013
- BLAIN, C.G.; BRUNINI, O. Quantificação da seca agrícola pelo Índice Padronizado de Evapotranspiração Real (IPER) no estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 65, n. 4, p. 517-525, 2006.
- BOLAN, S.; PADHYE, L. P.; JASEMIZAD, T.; GOVARTHANAN, M.; KARMEGAM, N.; WIJESEKARA, H.; AMARASIRI, D.; HOU, D.; ZHOU, P.; BISWAL, B.K.; BALASUBRAMANIAN, R.; WANG, H.; SIDDIQUE, K.H.M.; RINKLEBE, J.; KIRKHAM, M.B.; BOLAN, N. Impacts of climate change on the fate of contaminants through extreme weather events. **Sci Total Environ**. 2024 Jan 20; 909:168388. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168388. Epub 2023 Nov 11. PMID: 37956854.
- BORAH, Gongutri. Urban Water Stress: Climate Change Implications for Water Supply in Cities. **Water Conservation Science and Engineering**, v. 10, n. 1, e20, 2025.
- BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Resolução nº 32, de 15 de outubro de 2003. Institui as Divisões Hidrográficas Nacionais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 nov. 2003.
- BROWN, Adrienne R. et al. Democracy in practice: a global systematic review of democracy and water governance research. **Journal of Environmental Policy & Planning**, v. 28, n. 3, p. 413-447, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1080/1523908X.2026.2640938>.
- CAI, W.; MCPHADEN, M.J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES, R. R.; TASCHETTO, A. S.; GARREAUD, R. D.; DEWITTE, B.; POVEDA, G.; HAM, Y.G.; SANTOSO, A.; NG, B.; ANDERSON, W.; WANG, G.; GENG, T.; JO, H.S.; MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; OSMAN, M.; LI, S.; WU, L.; KARAMPERIDOU, C.; TAKAHASHI, K. e VERA, C. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nat Rev Earth Environ** 1, 215–231 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>

- CARETTA, M. A.; MUKHERJI, A.; ARFANUZZAMAN, M.; BETTS, R. A.; GELFAN, A.; HIRABAYASHI, Y.; LISSNER, T. K.; LIU, J.; LOPEZ GUNN, E.; MORGAN, R.; MWANGA, S.; SUPRATID, S. Water. In: PÖRTNER, H.-O. et al. (ed.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 551–712.
- CAROLINO, M. P.; BARROS JÚNIOR, G.; BARBOSA, W. B. A. A sustentabilidade hídrica das bacias hidrográficas. *REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 21, e2, 2024.
- CEPED. (2013) **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**. Florianópolis: Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, UFSC.
- CHOI, J., SON, SW. Seasonal-to-decadal prediction of El Niño–Southern Oscillation and Pacific Decadal Oscillation. *npj Clim Atmos Sci* 5, 29 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00251-9>
- CHOI, J.; SON, S. W. Impact of the Pacific Decadal Oscillation on hydroclimatic variability over South America. *Climate Dynamics*, v. 59, p. 1815-1832, 2022.
- CHOI, M., JACOBS, J. M., ANDERSON, M. C., & BOSCH, D. D. (2013). Evaluation of drought indices via remotely sensed data with hydrological variables. *Journal of Hydrology*, 476, 265-273.
- CHORLEY, R. J. (1962) *Geomorphology and general systems theory. Geological survey professional paper 500 b*. Washington: United States Government Printing Office, 11p.
- COSTA, D. D., UVO, C. B., ROLIM DA PAZ, A., DE OLIVEIRA CARVALHO, F., & FRAGOSO JR, C. R. (2018). Long-term relationships between climate oscillation and basin-scale hydrological variability during rainy season in eastern Northeast Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 63(11), 1636-1652. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1523614>

- COSTA, I. S.; MEDEIROS, E. S.; SILVA, A. Q.; MEDEIROS, C. C. B.; OLIVEIRA, L. A. Mapeamento da precipitação em uma Região do Nordeste Brasileiro por meio de técnicas geoestatística. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.5, p.761-769, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0059>
- COSTA, Julio César Calixto; LIRA, Rubiana do Nascimento; SANTOS, Cícero Gomes dos; SANTOS, Márcio Aurélio Lins dos; SILVA, Thaís Rayane Gomes da. Estimativa da erosividade das chuvas na bacia hidrográfica do Rio Coruripe em Alagoas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 37, n. 21, p. 1-20, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v37i21.18961>.
- COSTA, M. D. S., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. D., SANTOS, P. J. D., CORREIA FILHO, W. L. F., GOIS, G. D., BLANCO, C. J. C., ... & JARDIM, A. M. D. R. F. (2021). Rainfall extremes and drought in Northeast Brazil and its relationship with El Niño–Southern Oscillation. **International Journal of Climatology**, 41, E2111-E2135.
- COUTINHO, P. E., & CATALDI, M. (2021). Assessment of water availability in the period of 100 years at the head of the São Francisco River basin, based on climate change scenarios. **Revista Engenharia Na Agricultura-REVENG**, 29(Contínua), 107–121. <https://doi.org/10.13083/reveng.v29i1.11641>
- CUARTAS, L. A., FUJITA, T., CAMPOS, J. A., UVO, C. B., NIKRAVESH, G., OLSSON, J., & PEIXOTO, J. (2024). Hydrometeorological drought analysis through Two-variate Standardized Index for the Paraná River Basin, Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, 54, 101886.
- CUNHA, A. P. M. A. et al. O monitoramento da seca meteorológica no Brasil: evolução e desafios. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, n. 14, p. 210-228, 2020.
- CUNHA, A. P. M. A. et al. Secas no Brasil: impactos, monitoramento e perspectivas futuras. **Parcerias Estratégicas**, v. 26, n. 53, p. 203-228, 2021.

- CUNHA, A. P. M. A., ZERI, M., DEUSDARÁ LEAL, K., COSTA, L., CUARTAS, L. A., MARENGO, J. A., RIBEIRO-NETO, G. (2019). Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, 10(11), 642. doi:10.3390/atmos10110642
- DA SILVA, D. F., SOUSA, F. D. A. S. D., & KAYANO, M. T. (2010). Escalas temporais da variabilidade pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Mundaú. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 25, 324-332.
- DA SILVA, D. F.; KAYANO, M. T.; SOUSA, F. DE A. S. DE. Uso De Ferramentas Estatísticas Para Acompanhamento Climático E Prevenção De Riscos Na Bacia Hidrográfica Do Rio Mundaú (Brasil). **Revista Territorium** (Portugal), v. 17, p. 17-26, 2010b.
- DA SILVA, D. F.; SOUSA, F. DE A. S. DE; KAYANO, M. T. Uso De Iac E Ondeletas Para Análise Da Influência Das Multiescalas Temporais Na Precipitação Da Bacia Do Rio Mundaú. **Engenharia Ambiental** (Online), v. 6, p. 180-195, 2010a.
- DA SILVA, D.F., LIMA, M.J.S, SOUZA NETO, P.F, GOMES, H.B, SILVA, F.D.S, ALMEIDA, H.R.R.C, PEREIRA, M.P.S, COSTA, R.L., 2020. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 13, 449-464. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p449-464>
- DANTAS, L. G., DOS SANTOS, C. A., SANTOS, C. A., MARTINS, E. S., & ALVES, L. M. (2022). Future changes in temperature and precipitation over northeastern Brazil by CMIP6 model. **Water**, 14(24), 4118. <https://doi.org/10.3390/w14244118>
- EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulation, and Applications**. Boston/ EUA. Artech House, p 270, 2005.
- ESTER, M.; KRIEGEL, H.-P.; SANDER, J.; XU, X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: Proceedings

of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96), Portland, OR: AAAI Press, 1996. p. 226–231.

EVARISTO, J., JAMEEL, Y., TORTAJADA, C., WANG, R. Y., HORNE, J., NEUKRUG, H. M., DAVID, C. C., FASNACHT, A. M., ZIEGLER, A. D., & BISWAS, A. K. Water woes: the Institutional Challenges in Achieving SDG 6. **Sustainable Earth Reviews**, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s42055-023-00067-2>. (2023)

EVERITT, Brian S.; LANDAU, Sabine; LEESE, Morven; STAHL, Daniel. Cluster analysis. 5. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 346 p.

FERNANDES, D. S. HEINEMANN, A. B. PAZ, R. L. da AMORIM, A. de O. CARDOSO, A. S. Índices para a quantificação da seca. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2009.

FIRMINO, M. V. DA S. L., RODRIGUES, D. T. & CABRAL JÚNIOR, J. B. (2024). Climatologia Dos Eventos Extremos De Precipitação Em Maceió, Alagoas. **Revista Contexto Geográfico**, 9(22), 96–106. <https://doi.org/10.28998/contegeo.9i.22.16974>

FIRMINO, M. V. S. L.; RODRIGUES, D. T.; CABRAL JÚNIOR, J. B. Climatologia dos eventos extremos de precipitação em Maceió, Alagoas. **Revista Contexto Geográfico**, v. 9, n. 22, p. 96–106, 2024.

FREIRE, N. C. F., & NATENZON, C. E. (2019). Analyzing social vulnerability to natural disasters in Northeast Brazil: catastrophic flooding cycles at Alagoas Littoral zone. In Social-ecological Systems of Latin America: Complexities and Challenges (pp. 213-227). Cham: **Springer International Publishing**.

GEBRECHORKOS, S. H., PENG, J., DYER, E., MIRALLES, D. G., VICENTE-SERRANO, S. M., FUNK, C., BECK, H. E., ASFAW, D. T., SINGER, M. B., AND DADSON, S. J.: Global high-resolution drought indices for 1981–2022, **Earth Syst. Sci. Data**, 15, 5449–5466, <https://doi.org/10.5194/essd-15-5449-2023>, 2023.

- GOLDEN GATE WEATHER SERVICES. **El Niño and La Niña Years and Intensities**. 2022. Disponível em <<https://ggweather.com/enso/oni.htm>>.
- GOMES, H. B., AMBRIZZI, T., PONTES DA SILVA, B. F., HODGES, K., SILVA DIAS, P. L., HERDIES, D. L., ... & GOMES, H. B. (2019). Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics**, 53(3), 1393-1411.
- GOMES, R. C.; BIANCHI, C.; OLIVEIRA, V. P. V; Análise da multidimensionalidade dos conceitos de bacia hidrográfica. **GEOgraphia**, vol. 23, n. 51, 2021. DOI: 10.22409/GEOgraphia2021.v23i51.a27667
- GOMES, R., & Lima, K. C. (2021). Influence of the modes of climate variability in the Tropical Pacific and Atlantic on accumulated rainfall and reservoir water volumes in the Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, 41(11), 5331–5349. doi:10.1002/joc.7132
- GONÇALVES, S. T. N., VASCONCELOS, F. D. C., SAKAMOTO, M. S., SILVEIRA, C. D. S., & MARTINS, E. S. P. R. (2021). Índices e metodologias de monitoramento de secas: uma revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 36(3 suppl), 495-511.
- GRIMM, A. M.; ALMEIDA, A. S.; BENETI, C. A. A.; LEITE, E. A. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. **Brazilian Journal of Water Resources**. *Versão On-line*. ISSN 2318-0331. *RBRH*, Porto Alegre, v. 25, e48, 2020
- GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate**, Boston, v. 22, n. 7, p. 1589–1609, 2009. DOI: 10.1175/2008JCLI2429.1.
- GUAN, B.; WANG, Q.; ZHAO, Y.; LI, Haihong; CHANG, Huanyu; YANG, Wenjing [inserir demais coautores se necessário]. Analysis of the meteorological factors and atmospheric circulation factors over SPEI drought index in Haihe River Basin, China. *Atmospheric Research*, v. 325, e108182, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108182>.

- GUIMARÃES, D. F. S.; VASCONCELOS, M. A. de; VIDAL, T. do C. S.; PEREIRA, H. dos S. The relation between extreme climate events and river environmental disasters in Amazonas. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 9, p. e25510917882, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i9.17882.
- HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 103, n. 435, p. 77–92, 1977. DOI: 10.1002/qj.49710343505
- HAYES, M. J. et al. The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 92, n. 4, p. 485–488, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>.
- HEIM JUNIOR, R. R. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, n. 8, p. 1149-1166, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149>.
- HORTON, R. E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol Soc. Am. Bull.**, v.56, n.3, p. 275-370.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- IPCC, 2021: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

- IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the **Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 374, p. 20150202, 2016. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202
- JONG, P., BARRETO, T. B., TANAJURA, C. A. S., OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P., KIPERSTOK, A., & ANDRADE TORRES, E. (2021). The Impact of Regional Climate Change on Hydroelectric Resources in South America. **Renewable Energy**, 173, 76–91. doi:10.1016/j.renene.2021.03.077
- KAUFMAN, L.; ROUSSEEUW, P. J. FINDING GROUPS in Data: An Introduction to Cluster Analysis. **New York: Wiley**, 1990.
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da região Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (org.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 213–233.
- KILIÇ, Z. Water on People and Women Life. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 26, n. 1, p. 2922-2930, 2025. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.26.1.1388>.
- KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, n. 6, p. 538–551, 1981.
- LAVELL, A.; OPPENHEIMER, M.; DIOP, C.; HESS, J.; LEMPert, R.; LI, J.; MUIR-WOOD, R.; MYEONG, S. Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Cambridge University Press**, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, p. 25-64, 2012.

LI, M. H.; VU, T. M.; CHEN, P. Y. Multiple drought indices and their teleconnections with ENSO in various spatiotemporal scales over the Mekong River Basin. **Science of the Total Environment**, v. 854, art. 158589, 2023.

LIMA, A. O., LYRA, G. B., ABREU, M. C., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., ZERI, M., & CUNHA-ZERI, G. (2020). Extreme rainfall events over Rio de Janeiro State, Brazil: Characterization using probability distribution functions and clustering analysis. **Atmospheric Research**, 105221. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105221

LIMA, M. C. G., DE SOUZA, W. M., & DE QUEIROGA MIRANDA, R. (2021). Efeitos da variabilidade climática e cenários futuros na bacia hidrográfica do Rio Mundaú-Pernambuco/Alagoas. **Revista Brasileira de Climatologia**, 28, 743-765.

LIU, Z.; ZHOU, W. Glo3DHydroClimEventSet(v1.0): A global-scale event set of hydroclimatic extremes detected with the 3D DBSCAN-based workflow (1951–2022). *International Journal of Climatology*, v. 43, p. 7722–7744, 2023. DOI: 10.1002/joc.8289

LOPES, J. L. DE S.; DOMINGOS, L. L. População em perigo: rios urbanos e áreas vulneráveis a inundações – o caso do município de União dos Palmares, Alagoas, Brasil . **PerCursos, Florianópolis**, v. 21, n. 46, p. 113–135, 2020. DOI: 10.5965/1984724621462020113. Disponível em: <https://periodicos.udesc.br/index.php/percursos/article/view/17409>

LUCENA, R. L. Semiaridity and Rainfall Variability in Northeastern Brazil. **International Journal of Semi-Arid**, v. 6, n. 6, p. 87-97, 2023. DOI: <https://doi.org/10.56346/ijsa.v6i6.164>.

LYRA, G. B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; Zeri, M. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state,

Northeast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 34, p. 3546-3558, 2014.

LYRA, G.B., OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F., GOIS, G., CUNHA-ZERI, G., ZERI, M., 2017. Rainfall variability over Alagoas under the influences of SST anomalies. **Meteorology and Atmospheric Physics** 129, 157-171. <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0461-1>

LYRA, M. J. A. et al. Extreme precipitation events over the east coast of northeast Brazil: Synoptic study and MPAS simulation. **Weather and Climate Extremes**, [S. I.], v. 45, e100688, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100688>.

LYRA, M. J. A.; GOMES, H.B.; HERDIES, D. L.; RAMIREZ, E.; CAVALCANTE, L. C. V.; DE FREITAS, I. G. F.; ARAVÉQUIA, J. A.; FIGUEROA, S. N.; DA SILVA, M. C. L.; DOS SANTOS SILVA, F. D.; GOMES, H. B.; VENDRASCO, E. P.; CALVETTI, L.; MANTOVANI, J. A.; PENDHARKAR, J.; COELHO, W. DE QUADRO, M. F. L.; ROBERTI, D. R.; BENETI, C. A. A. Extreme precipitation events over the east coast of northeast Brazil: Synoptic study and MPAS simulation, **Weather and Climate Extremes**, Volume 45, 2024, 100711, ISSN 2212-0947, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2024.100711>.

MACHADO, C. J. S. (2003). Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. **Ambiente & Sociedade**, 6, 121-136.

MARENGO, J. A. et al. Climate change and drought in Northeast Brazil: current trends and future projections. **Climate Research**, v. 89, p. 1-18, 2022.

MARENGO, J. A. et al. Vulnerabilidade socioambiental a eventos extremos de precipitação e inundações no Nordeste do Brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA)*, v. 20, e12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21168/rega.v20e12>.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil — past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, 2017. DOI: 10.1007/s00704-016-1840-8

- MARENGO, J.A. and Espinoza, J.C. (2016) Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, 36(3), 1033– 1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>.
- MATTA, Gagan; PANT, Gaurav; KUMAR, Pawan; PAL, Rama. Navigating Water Scarcity for Global Climate Change and Ramifications. *World Water Policy*, v. 11, e70055, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/wwp2.70055>.
- McKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY. 1993, Anais. Anaheim: **American Meteorological Society**, p.179-186.
- MEDEIROS, Yasmin da Silva et al. Desafios da gestão integrada de recursos hídricos no Brasil: uma análise das disparidades socioeconômicas entre as regiões hidrográficas. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 11, n. 1, e21456, 2022.
- MELO, Mário L. **Os Agrestes: estudos dos espaços nordestinos do sistema gadopoliculura de uso dos recursos**. Recife: SUDENE, 1980. 554p.
- MISHRA, R. K. (2023). Fresh water availability and its global challenge. **British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies**, 4(3), 1-78.
- MOHAMMED, R., SCHOLZ, M., & ZOUNEMAT-KERMANI, M. (2017). Temporal hydrologic alterations coupled with climate variability and drought for transboundary river basins. **Water Resources Management**, 31(5), 1489-1502.
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, p. 1–10, 2002.
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 38, n. 12, p. 2653–2675, 1981. DOI: 10.1175/1520-0469(1981)038<2653:OTDODI>2.0.CO;2

- MULLAPUDI, A., VIBHUTE, A. D., MALI, S., & PATIL, C. H. (2023). A review of agricultural drought assessment with remote sensing data: Methods, issues, challenges and opportunities. **Applied Geomatics**, 15(1), 1-13.
- NETO, R. M. B., DO AMARAL CUNHA, A. P. M., DA SILVA, R. M., DE OLIVEIRA, G., & SANTOS, C. A. G. (2026). How does the reference period influence meteorological drought analysis and monitoring? A case study in Northeast Brazil using a century of data. *Science of The Total Environment*, 1010, 181124.
- NOAA. **Climate Variability: Oceanic Niño Index**. Online. 2009. Disponível na Internet: [https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index#:~:text=The%20Oceanic%20Ni%C3%B1o%20Index%20\(ONI,Pacific%2C%20near%20the%20International%20Date,1950,2019\)](https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index#:~:text=The%20Oceanic%20Ni%C3%B1o%20Index%20(ONI,Pacific%2C%20near%20the%20International%20Date,1950,2019)).
- OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. ; GOIS, G.; SILVA, I. J. L.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, M. V.; SHAH, M.; JAMJAREEGULGARN, P. Wet and dry periods in the state of Alagoas (Northeast Brazil) via Standardized Precipitation Index. **Journal of Atmospheric And Solar-Terrestrial Physics**, v. 224, p. 105746, 2021.
- OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., SILVA JUNIOR, C. A., TEODORO, P. E., ROSSI, F. S., BLANCO, C. J. C., LIMA, M., GOIS, G., CORREIA FILHO, W. L. F., BARROS SANTIAGO, D., & SANTOS VANDERLEY, M. H. G. (2021b). Confronting CHIRPS dataset and in situ stations in the detection of wet and drought conditions in the Brazilian Midwest. **International Journal of Climatology**, 41, 4478–4493. <https://doi.org/10.1002/joc.7080>
- OLIVEIRA, Danilo Henrique Moraes Castro. **Extremos de precipitação e vazão associados às características naturais e antrópicas das regiões hidrográficas do São Francisco e do Paraná**. 2018. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

- PALMER, W. C. **Meteorological drought**. Washington: U. S. Department of Commerce, 1965. 65 p. (Research paper, 45).
- PAULA, G. M. **O fenômeno El Niño Oscilação Sul e a Erosividade das chuvas em Santa Maria – RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Engenharia Agrícola, Área de concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria. 2009.
- PEREIRA, Emerson R. R.; DE FREITAS, Joherlan C.; DE ANDRADE, Antonio R. S.; DE MACEDO, Monica L. A.; NETO, Manoel F. S. Variabilidade do número de dias de chuva no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**. Guarapuava-PR, v. 5, n. 1, p. 7-26, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5777/paet.v5i1.1696>
- PERERA, A. T. D., Nik, V. M., Chen, D., Scartezzini, J.-L., & Hong, T. (2020). Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. **Nature Energy**, 5(2), 150–159. doi:10.1038/s41560-020-0558-0
- PIROLI, E. L. (2022). **Água e bacias hidrográficas: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas**. <https://doi.org/10.7476/9786557142981>
- PORTO, M. F., & PORTO, R. L. L. (2008). Gestão de bacias hidrográficas **Estudos Avançados**, 22, 43-60.
- RAO, V.B.; LIMA, M. C.; FRANCHITO, S.H. Seasonal and Interannual Variations of Rainfall over Eastern Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 6, n. 9, p. 1754-1763, 1993.
- RAZIEL, T. Revisiting the Rainfall Anomaly Index to serve as a Simplified Standardized Precipitation Index. **Journal of Hydrology**, v. 602, e126761, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126761>.
- REBOITA, M. S. et al. Climate aspects of Brazil: present climate and future projections. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 1-28, 2021.

- REBOITA, M. S.; OLIVEIRA, KELVEM R.; CORRÊA, Pedro Y. C.; RODRIGUES, R. Influência dos diferentes tipos do fenômeno El Niño na precipitação da América do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.02, p. 729-742, 2021.
- REBOITA, M. S.; PAMPUCH, Luana Albertani; DRUMOND, Anita; ROCHA, Rosmeri Porfírio da. Impacts of teleconnection patterns on South America climate. **Atmosphere**, v. 12, n. 6, e680, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12060680>.
- REIS, F. A. S.; PEREIRA, Liri L.; AMADO, Franco D. R.; STRACTERI, Juliana; LISBOA, Gerson S. Aplicação da estatística descritiva: análise da precipitação pluviométrica no município de Canavieiras, BA. **Gaia Scientia**, v. 14, n. 3, p. 128-138, 2020.
- RIBEIRO, R. Z., & TEIXEIRA, D. (2022). Desafios no Processo de Obtenção da Segurança Hídrica Frente a Aplicação dos Instrumentos de Gestão da Água. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 15(5), 2371–2397. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2371-2397>
- ROCHA, L. H. S.; SILVA, D. F.; SOUZA NETO, P. F. Variabilidade pluviométrica em Alagoas e sua coerência com a variabilidade climática dos oceanos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 36, n. 21, p. 145-165, 2025.
- RODRIGUES, D. T., Gonçalves, W. A., Spyrides, M. H. C., Andrade, L. de M. B., de Souza, D. O., de Araujo, P. A. A., Silva, C. M. S. e. (2021). Probability of occurrence of extreme precipitation events and natural disasters in the city of Natal, Brazil. **Urban Climate**, 35, 100753. doi:10.1016/j.uclim.2020.100753
- RODRIGUES, D. T., Gonçalves, W. A., Spyrides, M. H. C., Santos e Silva, C. M., & Souza, D. O. (2020). Spatial distribution of the level of return of extreme precipitation events in Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**. doi:10.1002/joc.6507

- ROOY, M. P. van. A rainy anomaly index independent of time and space. **Notos**, Pretoria, v. 14, n. 1, p. 43-48, 1965.
- ROSA, A. M. R., & DE MIRANDA GUARDA, V. L. (2019). Gestão de recursos hídricos no Brasil: um histórico. **Revista Direito Ambiental e sociedade**, 9(2).
- ROUSSEEUW, Peter J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 20, p. 53-65, 1987.
- SANTOS, F. S.; GOMES, H. B.; BARROS, G. V. P.; ALVES, L. E. R.; DA SILVA, D. F.; COSTA, R. L.; SILVA, F. D. S.; OLIVERIA-JÚNIOR, J.F. Análise Sazonal dos Parâmetros Biofísicos Utilizando o Sensor MODIS para o Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. Especial, 955 968, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863550093>
- SANTOS, J. S., DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., DA SILVA COSTA, M., CARDOSO, K. R. A., SHAH, M., SHAHZAD, R., ... & DA SILVA JÚNIOR, R. S. (2023). Effects of extreme phases of El Niño–Southern Oscillation on rainfall extremes in Alagoas, Brazil. **International Journal of Climatology**, 43(16), 7700-7721.
- SCHEIBEL, C. H., BATISTA, A., GEORGE, CLAUDIO, FREIRE, G., PEREIRA, L., BENTO, F., DE, A., ALVES, P., FRANCISCO, SILVA, JOÃO, F. M., SANTOS, A., TEODORO, I., ELIAS, & VINÍCIUS, M. (2024). Characterization of Water Bodies through Hydro-Physical Indices and Anthropogenic Effects in the Eastern Northeast of Brazil. **Climate**, 12(9), 150–150. <https://doi.org/10.3390/cli12090150>
- SCHROERING, Caitlin Hays. **Water grabbing, privatization, and resistance against commodification**. In: SCHROERING, Caitlin Hays. Global solidarities against water grabbing: Without water, we have nothing. Manchester: Manchester University Press, 2024. p. 29-53.
- SENEVIRATNE, S. I. et al. Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Ed.). Climate Change 2021:

The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the **Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. cap. 11, p. 1513–1766. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/>.

SEPLANDE - Secretaria de Estado do Planejamento e do Desenvolvimento Econômico de Alagoas. 2014. Alagoas em Mapas. Mesorregiões (2ª Edição). Disponível em: https://dados.al.gov.br/catalogo/ne/dataset/mapas-de-caracterizacao-territorial/resource/26b85113-5fe3-42ca-b144-ec03986de62f?inner_span=True.

SGB/CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Relatório técnico: enchentes em Alagoas e Pernambuco (maio–junho de 2022)**. Recife: SGB/CPRM, 2022.

SILVA ALEXANDRE, F., DE SOUZA COSTA, S. O., DE OLIVEIRA, G. F., SOUZA, L. R., NETO, J. D. B. S., & GOMES, D. D. M. (2019). Mapeamento da cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do alto curso do rio Mundaú–Pernambuco/Alagoas. **Revista GeoUECE**, 8(14), 190-200.

SILVA COSTA, M., DE OLIVEIRA JUNIOR, J. F., DE BARROS, B. G., DA SILVA, L. F. F. F., CARDOSO, K. R. A., DOS SANTOS SILVA, A. H., ... & SHAH, M. (2025). Rainfall variability, land use and land cover dynamics, and implications for climate risk through a theoretical-conceptual model for the Eastern Northeast of Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 158, 105470.

SILVA DIAS, Maria Assunção Faus da. Eventos climáticos extremos. **Revista USP**, v. 103, p. 33-40, 2014.

SILVA JUNIOR, R. S.; GAMA, M. C. C.; MARIANO, G. L.; OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; SILVA, E. H. L.; SILVA, L. S. O.; CARDOSO, KELVY ROSALVO ALENCAR. Avaliação De Eventos Extremos De Precipitação, Associados

A Desastres Naturais. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 15, p. 2755-2767, 2022.

SILVA LIMA, M. J. DA, CAVALCANTE, I. B. DA S., MENDONÇA, H. D. S., DE SOUZA NETO, P. F., DA SILVA, S. D., AMORIM, D. D. O. C., & Da Silva, D. F. (2019). Classificação, quantificação e ocorrência de eventos climáticos extremos nas três mesorregiões do estado de Alagoas (BR). **Ciência e Sustentabilidade**, 4(2), 151. <https://doi.org/10.33809/2447-4606.422018151-172>

SILVA, A. S. et al. Distúrbios Ondulatórios de Leste no Nordeste Brasileiro: Um Estudo de Caso Utilizando Modelagem Numérica de Mesoescala. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 637–649, 2021.

SILVA, B. F. P.; FEDOROVA, N. “Distúrbios Ondulatórios de Leste” Sobre o Atlântico Tropical Sul: Revisão e Discussão Sobre Terminologia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 38, n. 2, 2023.

SILVA, Bruce Francisco Pontes da. **Contribuição dos Distúrbios Ondulatórios de Leste para a chuva no Leste do Nordeste do Brasil: evolução sinótica média e simulações numéricas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/D.14.2011.tde-04102011-221401.

SILVA, D. F. et al. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação para o Leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 449–464, 2020.

SILVA, Djane Fonseca da; SOUSA, Francisco de Assis Salviano de; KAYANO, Mary Toshie. Escalas temporais da variabilidade pluviométrica na bacia hidrográfica do Rio Mundaú. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 3, p. 324-332, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0102-77862010000300004>.

- SILVA, F. L., FUSHITA, Â. T., DA CUNHA-SANTINO, M. B., JÚNIOR, I. B., & JÚNIOR, J. C. T. V. (2021). Gestão de recursos hídricos e manejo de bacias hidrográficas no Brasil: elementos básicos, histórico e estratégias. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 14(3), 1626-1653.
- SILVA, M. R.; MOURA, Felipe P.; JARDIM, Carlos H. O diagrama de caixa (Boxplot) aplicado à análise da distribuição temporal das chuvas em Januária, Belo Horizonte e Sete Lagoas, Minas Gerais-Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 023-040, 2017.
- SILVA, T. S. S., DE BRITO, P. L. C., DOS SANTOS, C. G., MAGALHÃES, I. D., DE SOUZA, R. B., & DE ALMEIDA, C. A. C. (2018). Diagnóstico ambiental de nascentes na bacia hidrográfica do Rio Piauí, Alagoas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, 13(3), 399-403.
- SILVA, V. P. R; PEREIRA, E. R. R; AZEVEDO, P. V; SOUSA, F. A. S; SOUSA, I. F. Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.15, n.2, p.131–\ 138, Campina Grande, PB, 2011.
- SILVA., D., F., NETO., P., F., S., SILVA., S., D., LIMA., M., J., S., CAVALCANTE., I., B., S OLIVEIRA., S., T., MENDONÇA., H., S., BATISTA., B., A., ROCHA., L., H., S ALMEIDA., H., R., R., C., PEREIRA., M., P., S., ARAÚJO., L., E. (2021). Identificação das causas climáticas dos eventos extremos e dos impactos dos ENOS Canônico e Modoki nas macrorregiões de Alagoas. **Revista Brasileira de Geografia Física [online]**, 14.
- SMEJKALOVÁ, V., ŠOMPLÁK, R., ROSECKÝ, M., & ŠRAMKOVÁ, K. (2023). Machine learning method for changepoint detection in short time series data. **Machine Learning and Knowledge Extraction**, 5(4), 1407-1432.
- SOUSA JUNIOR, M. F.; ULIANA, E. M.; CARVALHO, M. A. C. C.; MENDES, M. A. S. A.; LISBOA, L.. Monitoramento de seca meteorológica com dados TRMM para uma região produtora de grãos do Brasil. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.2, p.249-264, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0024>

- SOUZA, E. O.; COSTA, M. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; GOIS, G.; MARIANO, G. L.; COSTA, C. E. S.; CORREIA FILHO, W. L. F.; SANTIAGO, D. B. Estimativa e Espacialização da Erosividade em Mesorregiões Climáticas no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 769-783, 2021.
- SOUZA, Gabriel da Silva; BACK, Álvaro José; GALATTO, Sérgio Luciano. Índice de irregularidade temporal das chuvas no território do Brasil. REGA - **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 21, e4, 2024.
- SOUZA, J. C. O. (2011). Análise do Evento Climático Extremo Ocorrido na Região Leste de Alagoas: Bacias Hidrográficas dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 4(2), 377-395.
- SPERA, S. A.; GALFORD, G. L.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; MUSTARD, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's agricultural frontier. *Environmental Research Letters*, 15 (3), e034024, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6375>.
- STRAHLER, A. N. (1979) Las aguas de escorrentía y de saturación. In: STRAHLER, A. N. **Geografía física**. Barcelona: Ediciones Omega S. A. p.449-475.
- TIGKAS, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2014). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. **Earth Science Informatics**, 8(3), 697–709. doi:10.1007/s12145-014-0178-y
- TIGKAS, D.; VANGELIS, H.; PROUTSOS, N.; TSAKIRIS, G. Incorporating aSPI and eRDI in Drought Indices Calculator (DrinC) Software for Agricultural Drought Characterisation and Monitoring. **Hydrology**. 2022, 9, 100. <https://doi.org/10.3390/hydrology9060100>
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Relative Oceanic Niño Index (RONI): What's Changing and Why It Matters. NOAA National Weather Service – Climate Services, 2026. Disponível em: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>

- TUCCI, C. E. M. 1997. Hidrologia: ciência e aplicação 2.ed. Porto Alegre: **ABRH/Editora da UFRGS**, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).
- ULLAH, H., NIAZ, R., HUSSAIN, I., ALSHANBARI, H. M., ALMAZAH, M., & CHENG, H. (2026). Assessment of Climatological Trends, Spatial Distribution and Driving Forces of Extreme Daily Precipitation Events. **Pure and Applied Geophysics**, 1-35.
- UNESCO. United Nations World Water Development Report 2024: **Water for Prosperity and Peace**. Paris: UNESCO, 2024.
- UNGA. Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. A/71/644. **Proceedings of the Seventy-First Session**. Agenda Item 19c, p. 41, 2016.
- UVO, C. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation. *Journal of Climate*, v. 11, n. 4, p. 551–562, 1998. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<0551:TRBTPA>2.0.CO;2
- VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; CUNHA, A. P. M. A.; BARBOSA, A. A.; POMPEU, J.; FERREIRA, Y.; SANTOS, F. C.; ALVES, L. M.; OMETTO, J. Global Assessment of Environmental and Socioeconomic Vulnerability to Continuous Drought in Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 10, e8029, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15108029>.
- VITORIO, E. L., SILVA, T., VILELA, I., SANTOS, E., & VELEDA, D. (2025). Interannual rainfall variability in Northeast Brazil influenced by Pacific and Atlantic climate modes. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, 101596.
- WANDERLEY, H. S.; AMORIM, R. F. C.; CARVALHO, F. O. Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 27, n. 3, p. 347–354, 2012. DOI: 10.1590/s0102-77862012000300009

- WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, v. 58, n. 301, p. 236–244, 1963. DOI: 10.1080/01621459.1963.10500845
- WEI, T. et al. Pacific Decadal Oscillation and hydroclimate variability over tropical South America. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 13, p. 6028-6045, 2021.
- WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. (1985) Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions, **Water International**, 10:3, 111-120. <http://dx.doi.org/10.1080/02508068508686328>
- WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 4. ed. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- WU, R.; WANG, Z.; CUI, C.; LI, Y.; TANG, M.; CHU, J.; HUANG, Z. Applicability analysis of comprehensive drought index based on GRACE data in ten major river basins in China. **Journal of Hydrology**, v. 645, 132275, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132275>.
- YIHDEGO, Y., VAHEDDOOST, B., & AL-WESHAH, R. A. (2019). Drought indices and indicators revisited. **Arabian Journal of Geosciences**, 12(3), 69.
- ZHANG, Y.; LIU, Y.; CHEN, L.; SUN, J.; SUN, Y.; PENG, C.; WANG, Y.; DU, M.; WU, Y. Characterizing Drought Patterns and Vegetation Responses in Northeast China: A Multi-Temporal-Scale Analysis Using the SPI and NDVI. **Sustainability**, 2025, 17, 5288. <https://doi.org/10.3390/su17125288>