

Sazonalidade do regime de chuva nas mesorregiões do estado de Pernambuco, Brasil

Seasonality of the rainfall regime in the mesoregions of the Pernambuco state, Brazil

Estacionalidad del régimen de lluvia en las mesorregiones del estado de Pernambuco, Brasil

Recebido: 23/10/2023 | Revisado: 06/11/2023 | Aceitado: 07/11/2023 | Publicado: 10/11/2023

Wenderson Gomes Barbosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4114-0248>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: wenderson.gomes@ufrpe.br

Jaine de Moura Carvalho

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1514-3588>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: jaine.moura@ufrpe.br

Denise Honorato Lopes da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4724-5676>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: denise.honorato@hotmail.com

Arundo Nunes da Silva Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4051-6389>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: nunesarundo@gmail.com

Lidiane da Silva Araújo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3111-7925>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: lidiane_sac@hotmail.com

Antonio Samuel Alves da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8759-0036>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: samuelsmathematical@gmail.com

Tiago Alessandro Espínola Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2131-9825>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: taef.first@gmail.com

Claudio Tadeu Cristino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6748-209X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: ctcristino@gmail.com

Tatijana Stosic

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5691-945X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: tastosic@gmail.com

Resumo

Este trabalho tem como objetivo classificar os regimes de chuva dos municípios pernambucanos de Petrolina (Sertão do São Francisco), Araripina (Sertão pernambucano), Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) e Abreu e Lima (Metropolitana do Recife) com base na extração da sazonalidade de dados mensais de precipitação. O estudo é realizado pelo método da sazonalidade, com que são calculados os índices de sazonalidade (individual e geral) e o índice de replicabilidade (*RI*), e na análise de tendência pelo método de Mann-Kendall e Sen's slope. Os dados analisados foram disponibilizados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, e correspondem aos registros de precipitação mensal captados entre 1995 e 2020 em estações meteorológicas situadas em cada município. Resultados dos testes Mann-Kendall e Sen's slope indicaram que não houve tendência estatisticamente significativa na sazonalidade anual dos regimes de chuva para nenhuma das estações pluviométricas investigadas. De acordo com o índice de sazonalidade geral, os regimes médios de chuva nos municípios de Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) e Abreu e Lima (Metropolitana do Recife) para o período analisado foram classificados como bastante sazonal com curta estação seca, enquanto que, nos municípios de Araripina (Sertão pernambucano) e Petrolina (Sertão do São Francisco), foram classificados como

marcadamente sazonal com longa estação seca. Além disso, todos os municípios apresentaram regimes médios de chuva com alta replicabilidade, sendo a mais baixa em Petrolina (com $RI = 0,69$) e a mais alta em Rio Formoso (com $RI = 0,80$).

Palavras-chave: Regimes pluviométricos; Índices de sazonalidade; Teste Mann-Kendall; Teste Sen's slope.

Abstract

This research aims to classify the rainfall regimes in the Pernambuco municipalities of Petrolina (Sertão of São Francisco), Araripina (Sertão of Pernambuco), Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) and Abreu e Lima (Metropolitan region of Recife) based on the extraction of seasonality from monthly precipitation data. The study is carried out using the seasonality method, with which the seasonality indices (individual and general) and the replicability index (RI) are calculated, and in the trend analysis using the Mann-Kendall and Sen's slope methods. The data analyzed were made available by the Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, and correspond to monthly precipitation records captured between 1995 and 2020 at meteorological stations located in each municipality. Results of the Mann-Kendall and Sen's slope tests indicated that there was no statistically significant trend in the annual seasonality of rainfall regimes for any of the rainfall stations investigated. According to the general seasonality index, the average rainfall regimes in the municipalities of Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) and Abreu e Lima (Metropolitan region of Recife) for the analyzed period were classified as rather seasonal with a short dry season, while in the municipalities of Araripina (Sertão of Pernambuco) and Petrolina (Sertão of São Francisco), they were classified as markedly seasonal with a long dry season. Furthermore, all municipalities presented average rainfall regimes with high replicability, the lowest being in Petrolina (with $RI = 0.69$) and the highest in Rio Formoso (with $RI = 0.80$).

Keywords: Rainfall regimes; Seasonality indices; Mann-Kendall test; Sen's slope test.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo clasificar los regímenes de precipitaciones en los municipios pernambucanos de Petrolina (Sertão do São Francisco), Araripina (Sertão de Pernambuco), Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) y Abreu e Lima (Metropolitana do Recife). El estudio se realiza mediante el método de estacionalidad, con el que se calculan los índices de estacionalidad (individual y general) y el índice de replicabilidad (RI), y en el análisis de tendencias mediante los métodos de Mann-Kendall y Sen's slope. Los datos analizados fueron puestos a disposición de la Agencia Pernambucana de Agua y Clima – APAC, y corresponden a registros mensuales de precipitación capturados entre 1995 y 2020 en estaciones meteorológicas ubicadas en cada municipio. Los resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Sen's slope indicaron que no hubo una tendencia estadísticamente significativa en la estacionalidad anual de los regímenes de lluvia para ninguna de las estaciones pluviométricas investigadas. Según el índice general de estacionalidad, los regímenes de precipitaciones promedio en los municipios de Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) y Abreu e Lima (Metropolitana do Recife) para el período analizado fueron clasificados como bastante estacionales con una estación seca corta, mientras que en los municipios de Petrolina (Sertão do São Francisco) y Araripina (Sertão de Pernambuco), fueron clasificados como marcadamente estacionales con una larga estación seca. Además, todos los municipios presentaron regímenes de precipitaciones promedio con alta replicabilidad, siendo el más bajo en Petrolina (con $RI = 0,69$) y el más alto en Río Formoso (con $RI = 0,80$).

Palabras clave: Regímenes de lluvia; Índices de estacionalidad; Prueba de Mann-Kendall; Prueba de Sen's slope.

1. Introdução

O entendimento acerca dos regimes pluviométricos de determinadas áreas, tanto regiões urbanas quanto rurais, torna-se cada vez mais relevante na atualidade, considerando-se que o conhecimento sobre essa temática auxilia na prevenção e redução de danos socioeconômicos ocasionados pelo excesso ou carência de chuvas (Garrick & Hall, 2014; Hoekstra et al., 2018). Alguns fatores como umidade do ar e temperatura condicionam a ocorrência da mutabilidade das chuvas. Isso porque, além das variações climáticas típicas das diferentes estações do ano, há forte influência das mudanças climáticas que, segundo Kilimani et al. (2018), serão responsáveis por ampliar a frequência e a intensidade das secas em decorrência do aumento da temperatura e da alteração dos padrões de precipitação.

No Brasil, as mudanças climáticas podem ter um impacto significativo na agricultura, ampliando a ocorrência de secas que afetam consideravelmente a produção das lavouras e a segurança alimentar (Marengo et al., 2022). O Nordeste brasileiro é a região mais vulnerável aos efeitos da variabilidade climática, pois, devido ao seu clima predominantemente semiárido, caracterizado por uma alta variabilidade sazonal e interanual da precipitação, experimenta episódios extremos de chuva e de secas severas e recorrentes

(Barros et al., 2021). O estado de Pernambuco, em particular, com 89% do seu território composto por clima semiárido, apresenta índices pluviométricos reduzidos (Asfora et al., 2017) e vivencia condições de sazonalidade extrema, com tendência de aumento principalmente na região Sertão (da Silva Araújo et al., 2023).

Caracterizar a variabilidade climática em diferentes regiões é de grande relevância sobretudo porque fatores extremos como estiagens e a ocorrência de chuvas intensas trazem consigo danos irreparáveis à população que sobrevive da atividade agrícola (dos Santos et al., 2017). Impactos sociais (aumento da pobreza, conflitos por terra e migração em massa para os grandes centros urbanos) podem ser causados pelas perdas na produtividade em áreas onde a agricultura de subsistência é predominante, como o caso do Nordeste do Brasil (NEB) (Marengo et al., 2022).

Nos últimos anos, os estudos climáticos têm se voltado para a avaliação da distribuição sazonal da precipitação, dada a sua influência determinante em atividades como a produção agrícola e a economia. Uma técnica de extração da sazonalidade em regimes pluviométricos que se tem destacado (Walsh & Lawler, 1981) envolve o cálculo de índices capazes de extrair, apenas com base nos dados mensais de precipitação, o nível de sazonalidade em escala anual e global (para um dado período), bem como o nível de replicabilidade desses regimes. O método, que tem eficácia comprovada e vem sendo largamente utilizado em diversos países (Bari et al., 2017; Doyle, 2020; Rai & Dimri, 2020; Raziei, 2018; Sharma & Singh, 2019), baseia-se no cálculo dos índices de sazonalidade (individual, SI_i , e geral, \overline{SI}) e no índice de replicabilidade (RI), e, no Brasil, foi recentemente aplicado a dados de chuva do período 1953-2012 no estado de Pernambuco (da Silva et al., 2019).

Visando auxiliar no planejamento estratégico e na tomada de decisões quanto ao uso consciente dos recursos hídricos em benefício da população e das atividades agrícolas no estado de Pernambuco, este trabalho investiga (de forma comparativa) os contrastes sazonais nos dados de precipitação dos municípios de Petrolina (Sertão do São Francisco), Araripina (Sertão pernambucano), Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) e Abreu e Lima (Metropolitana do Recife) com o objetivo de classificar os seus regimes de chuva. Para isso, foram analisados os dados de precipitação (disponibilizados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC) registrados mensalmente entre 1995 e 2020 nas estações meteorológicas situadas em cada município. Como ferramenta de análise, utilizou-se o método da sazonalidade, que tem como base os índices climáticos SI_i (índice de sazonalidade individual – para classificação do regime anual de chuva e avaliação de sua variabilidade), \overline{SI} (índice de sazonalidade geral – para classificação do regime médio de chuva do período analisado) e RI (índice de replicabilidade – para avaliar o grau de repetibilidade dos regimes de chuva), bem como os testes estatísticos: Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945), para identificar tendências na sazonalidade pluviométrica anual; e Sen's slope (Sen, 1968), para determinar a magnitude das tendências.

2. Metodologia

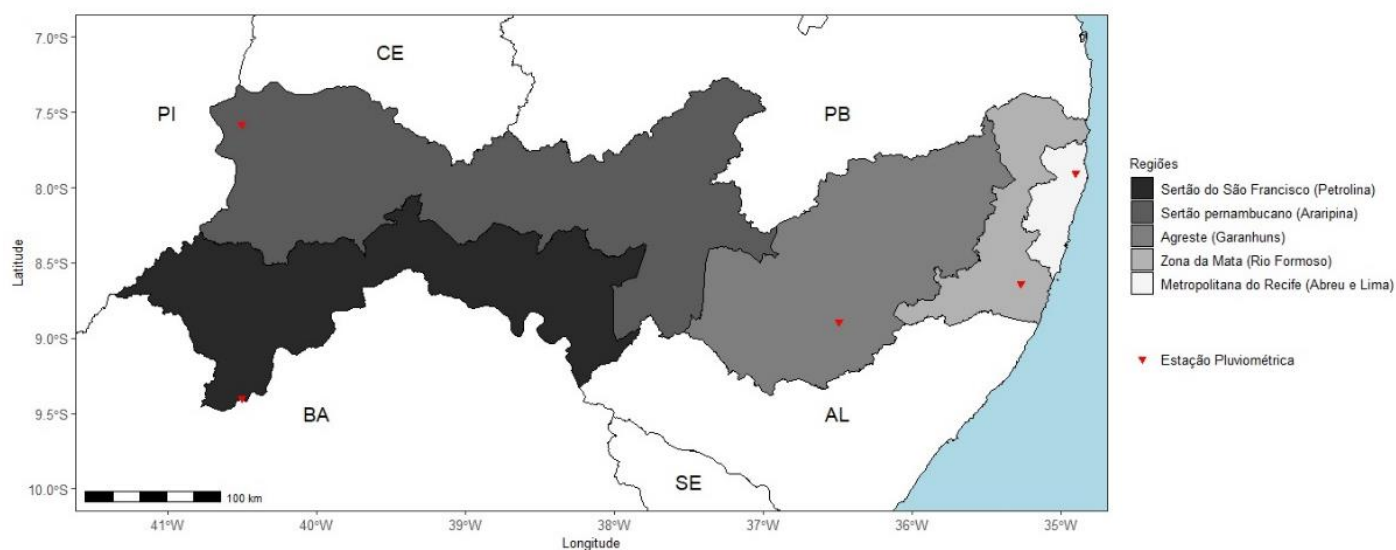
2.1 Dados e área em estudo

Pernambuco é um estado brasileiro localizado na região Nordeste do País entre os paralelos $7^{\circ}15'45''S$ e $9^{\circ}28'18''S$, meridianos $34^{\circ}48'33''W$ e $41^{\circ}19'54''W$, demarcado ao sul pelos estados de Alagoas e Bahia, a oeste pelo Piauí, a noroeste e norte pelo Ceará e Paraíba, respectivamente, e banhado a leste pelo Oceano Atlântico. O estado possui área territorial de $98.067,877 \text{ km}^2$ e é dividido geograficamente em cinco mesorregiões: Sertão do São Francisco, Sertão pernambucano, Agreste, Zona da Mata e Metropolitana do Recife, conforme ilustrado na Figura 1.

Os dados analisados neste artigo foram disponibilizados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC e correspondem aos registros mensais de precipitação do período de 1995 a 2020 em Pernambuco, captados nas seguintes estações meteorológicas: estação 04 (lat $-9,399$ e lon $-40,518$), no município de Petrolina (Sertão do São Francisco), estação 03 (lat $-7,577$ e

lon -40,506) em Araripina (Sertão pernambucano), estação 19 (lat -8,883 e lon -36,488) em Garanhuns (Agreste), estação 102 (lat -8,640 e lon -35,268) em Rio Formoso (Zona da Mata) e estação 198 (lat -7,928 e lon -34,900) localizada no município de Abreu e Lima (Metropolitana do Recife). A Figura 1 exibe ainda a localização geográfica (triângulos vermelhos) das estações meteorológicas estudadas.

Figura 1 - Mapa simplificado do estado de Pernambuco e localização geográfica das estações meteorológicas utilizadas em cada mesorregião: Sertão pernambucano (Araripina), Sertão do São Francisco (Petrolina), Agreste (Garanhuns), Zona da Mata (Rio Formoso) e Metropolitana do Recife (Abreu e Lima).

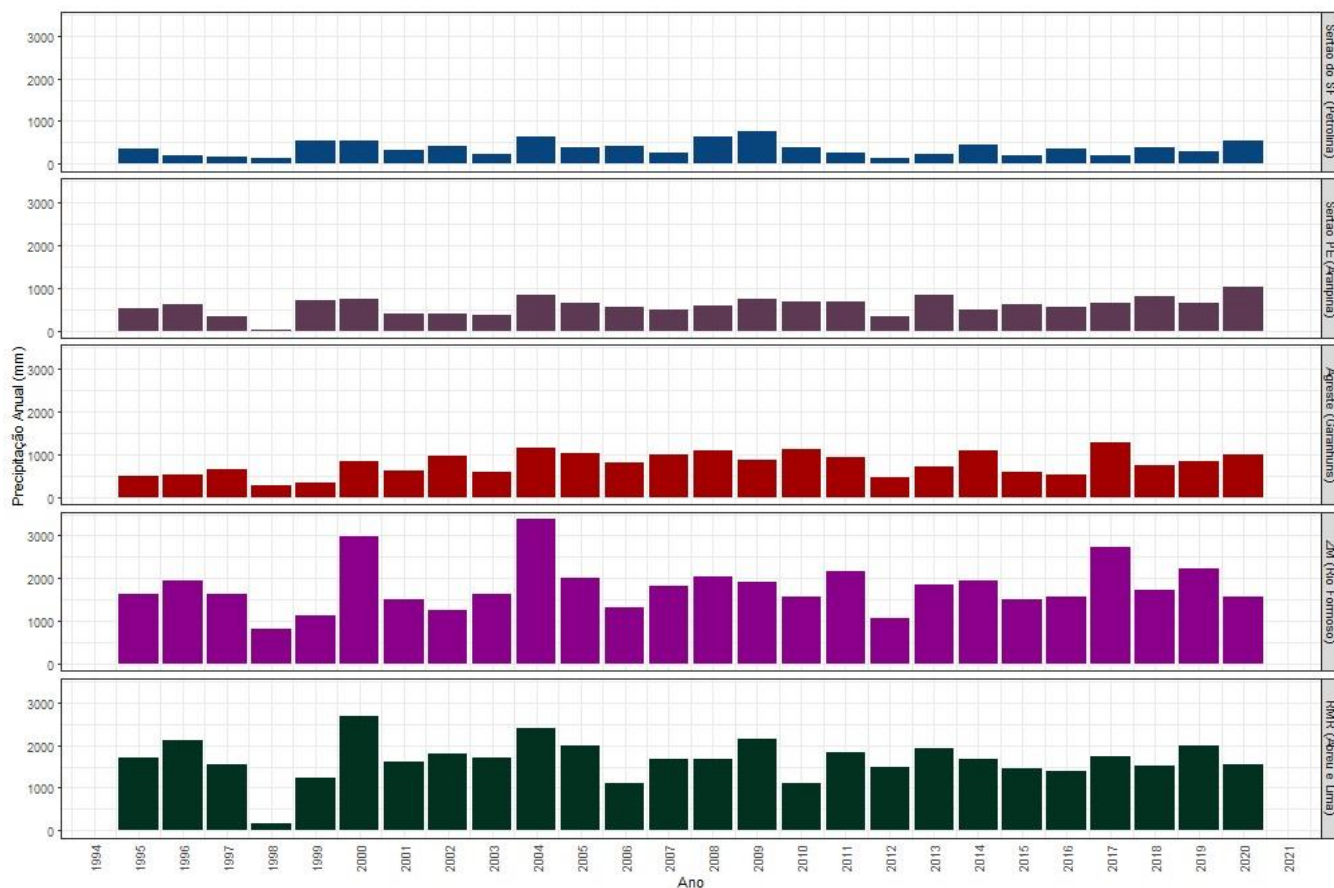


Fonte: Elaborada pelos Autores.

Devido a sua localização, a sua vasta extensão territorial na direção longitudinal (com as mesorregiões Sertão do São Francisco - SF, Sertão PE e Agreste incluídas no semiárido nordestino do Brasil), e à variabilidade em seu relevo, o estado de Pernambuco (Figura 1) possui uma alta variabilidade pluviométrica principalmente no sentido Sertão (SF e PE) – Zona da Mata (Mata Pernambucana e Região Metropolitana do Recife - RMR), passando pelo Agreste, uma região de transição.

A precipitação anual acumulada em cada uma das estações meteorológicas analisadas é apresentada na Figura 2 e a precipitação mensal média para o período é ilustrada na Figura 3. A precipitação anual acumulada (Figura 2) permite avaliar a distribuição anual de chuva no período analisado em cada município e, assim, comparar as mesorregiões do estado, bem como detectar os anos que registraram um valor de precipitação abaixo ou acima da média do período. A precipitação mensal média (Figura 3), por sua vez, evidencia o comportamento médio do regime pluviométrico de cada município onde as estações meteorológicas se encontram localizadas.

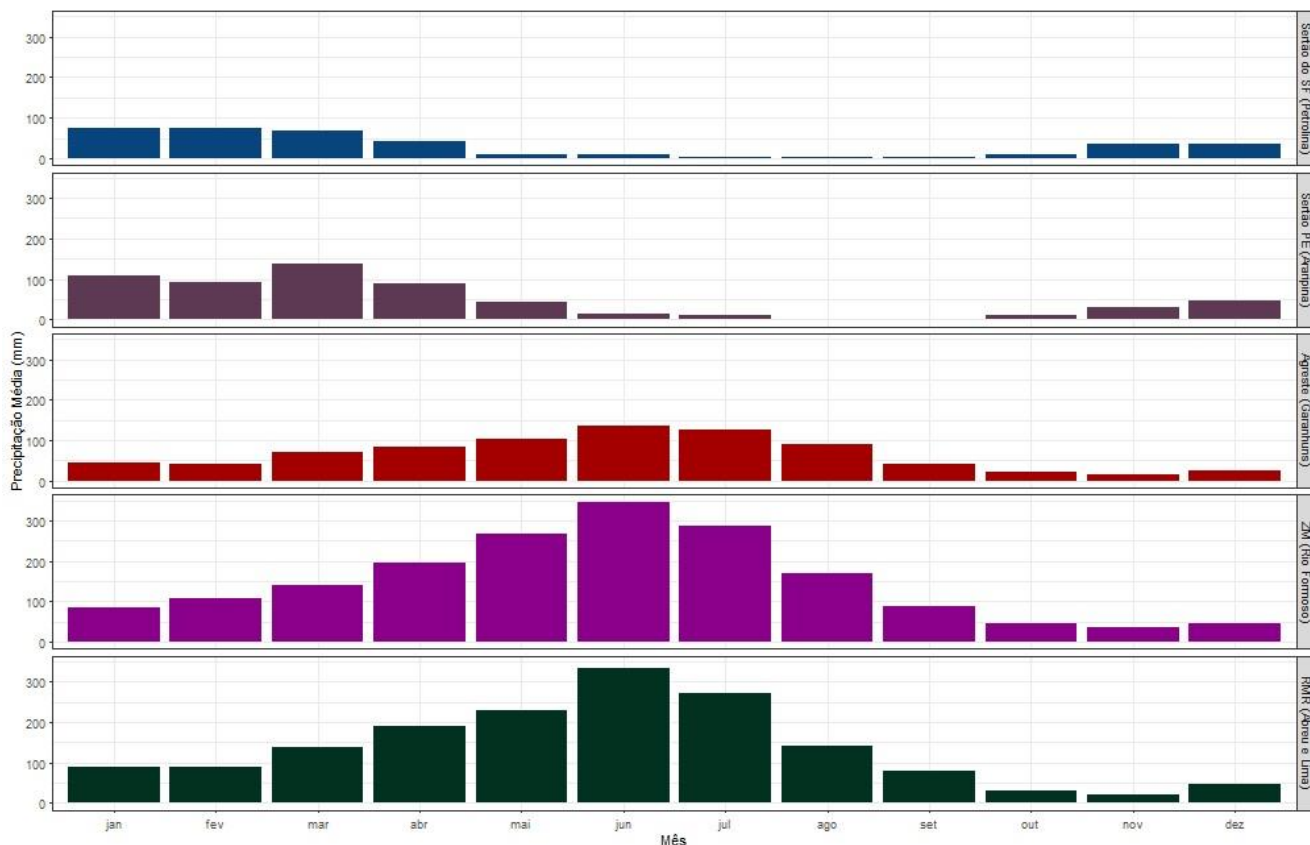
Figura 2 - Precipitação anual acumulada nas estações meteorológicas da APAC utilizadas nas mesorregiões Sertão do São Francisco (Petrolina), Sertão pernambucano (Araripina), Agreste (Garanhuns), Zona da Mata (Rio Formoso) e Metropolitana do Recife (Abreu e Lima).



Fonte: Elaborada pelos Autores.

Comparando as mesorregiões de Pernambuco com base no comportamento da precipitação anual exibido na Figura 2, observa-se que os municípios escolhidos para análise representam bem o que foi mencionado sobre a variabilidade pluviométrica do estado, pois, em média, há um claro aumento do acúmulo anual da precipitação entre o Sertão do SF em direção à Zona da Mata, passando pelo Sertão do estado e pelo Agreste, exceto para o ano de 1998, quando todos os municípios apresentaram a precipitação anual mais baixa do período (abaixo de 250 mm, com exceção do município de Rio Formoso, na Zona da Mata). De fato, o ano de 1998 foi um marco na década de 1990, período em que o NEB enfrentou uma de suas piores secas (Marengo et al., 2017). As mesorregiões Zona da Mata e Metropolitana do Recife apresentaram o maior registro de chuva anual ao longo do período, com maior acúmulo nos anos 2000 e 2004.

Figura 3 - Precipitação mensal média do período para as estações meteorológicas da APAC localizadas em Petrolina (Sertão do São Francisco), Araripina (Sertão pernambucano), Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata), e Abreu e Lima (Metropolitana do Recife).



Fonte: Elaborada pelos Autores.

A comparação entre as mesorregiões de PE com base na média mensal de precipitação dos municípios considerados (Figura 3) não só confirma o que já foi mencionado em relação à Figura 2, como também exhibe os contrastes entre os regimes pluviométricos das regiões: os 6 meses mais úmidos concentrados entre novembro e abril no Sertão SF, entre dezembro e maio no Sertão PE, e entre março e agosto (com média mensal máxima no mês de junho) nas mesorregiões Agreste, Zona da Mata e Metropolitana do Recife. A comparação confirma ainda o comportamento transicional do Agreste.

2.2 Método da sazonalidade

O método utilizado neste trabalho baseia-se na técnica desenvolvida por (Walsh & Lawler, 1981), com que se pode classificar o regime anual de chuva e investigar a sua variabilidade, bem como classificar o regime médio de chuva do período e obter o seu grau de replicabilidade. Os índices pluviométricos utilizados como parâmetros de análise são o índice de sazonalidade individual (SI_i), o índice de sazonalidade geral (\overline{SI}) e o índice de replicabilidade (RI), a serem descritos a seguir. Os testes estatísticos Mann-Kendall e Sen's slope, utilizados para verificar tendências nas séries temporais de SI_i , também serão descritos (de forma resumida) nesta seção.

2.2.1 Índice de sazonalidade individual

Utilizado para identificar contrastes mensais na sazonalidade da chuva, este índice permite classificar o regime de chuva de cada ano e avaliar sua variabilidade. O índice de sazonalidade individual SI_i é assim obtido:

$$SI_i = \frac{1}{R_i} \sum_{n=1}^{12} \left| x_{n,i} - \frac{R_i}{12} \right|, \quad (1)$$

onde $x_{n,i}$ é a precipitação mensal acumulada no mês n e R_i é a precipitação anual acumulada, ambas no ano i .

2.2.2 Índice de sazonalidade geral

O índice de sazonalidade geral possibilita a detecção de contrastes nos padrões anuais de sazonalidade pluviométrica e serve como parâmetro de classificação do regime médio de chuva de um período. Ele é assim definido:

$$\overline{SI} = \frac{1}{\overline{R}} \sum_{n=1}^{12} \left| \overline{x}_n - \frac{\overline{R}}{12} \right|, \quad (2)$$

em que, considerando um período de N anos, $\overline{x}_n = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N x_{n,i}$ é a precipitação média do mês n e $\overline{R} = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N R_i$ é a precipitação anual média.

2.2.3 Classificação dos regimes de chuva

Em teoria, ambos os índices SI_i e \overline{SI} podem variar de 0 (toda a chuva distribuída igualmente entre os meses de cada ano) a 1,83 (sazonalidade extrema – toda a ocorrência de chuva em um único e mesmo mês para \overline{SI} , e um único e qualquer mês para SI_i). Entre esses dois valores extremos, definem-se as classes do regime de chuva conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classes do regime de chuva quanto aos Índices de Sazonalidade - SI: geral (\overline{SI}) e individual (SI_i).

SI	Regime de chuva	Classe
≤ 0.19	Muito equilibrado	I
(0.19, 0.39]	Uniforme, mas com uma estação mais chuvosa definida	II
(0.39, 0.59]	Bastante sazonal com curta estação seca	III
(0.59, 0.79]	Sazonal	IV
(0.79, 0.99]	Marcadamente sazonal com longa estação seca	V
(0.99, 1.19]	Maior precipitação concentrada em no máximo 3 meses	VI
> 1.19	Extremamente sazonal - quase toda a ocorrência de chuva entre 1 e 2 meses	VII

Fonte: Adaptada de (da Silva Araújo et al., 2023; Walsh & Lawler, 1981).

2.2.4 Índice de replicabilidade

O índice de replicabilidade (RI) é uma medida estatística usada para avaliar a replicabilidade do regime de chuva do período analisado. Esse índice é obtido por

$$RI = \frac{\overline{SI}}{\overline{SI_i}}, \quad (3)$$

onde $\overline{SI_i}$ é o índice de sazonalidade individual médio, dado por

$$\overline{SI_i} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N SI_j, \quad (4)$$

em que N representa o número de anos do período analisado. Regimes anuais de chuva com alta sazonalidade (altos valores de SI_i) e baixa variabilidade (intervalo de valores de SI_i compreendido entre poucas classes do regime de chuva) possuem alta replicabilidade (da Silva Araújo et al., 2023; Walsh & Lawler, 1981). Regimes pluviométricos de baixa sazonalidade, por outro lado, tendem a exibir baixa replicabilidade.

2.3 Testes estatísticos de tendência

Para detectar possíveis tendências na sazonalidade pluviométrica dos dados analisados, aplica-se às séries temporais do índice de sazonalidade individual SI_i o teste de Mann-Kendall. De forma complementar, para determinar a magnitude das tendências, utiliza-se o estimador de Sen's slope. Ambos os testes são brevemente descritos a seguir.

2.3.1 Método de Mann-Kendall

O teste de tendência de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) é um método estatístico não paramétrico (não exige que os dados sigam alguma distribuição específica) utilizado para identificar se uma série temporal apresenta tendência monotônica de crescimento ou decrescimento. O processo é baseado em classificação e é propriamente adequado para dados que não seguem distribuição normal, dados contendo *outliers* e tendências não lineares (Birsan et al., 2014), o que faz do método uma ferramenta eficaz na análise de variáveis climáticas, hidrológicas e ambientais. A ideia básica do teste de Mann-Kendall é comparar as diferenças de classificação entre os pares de observações consecutivas na série temporal. Se a maioria das diferenças for positiva (ou negativa), isso indica uma tendência ascendente (ou descendente). Isto é: se uma série temporal é representada por x_1, x_2, \dots, x_n , o teste de Mann-Kendall usa a seguinte estatística:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \quad (5)$$

onde x_i e x_j são os valores de dados sequencias, n é o comprimento do conjunto de dados e $\text{sgn}(\cdot)$ é dado por:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{se } x_j > x_i \\ 0, & \text{se } x_j = x_i \\ -1, & \text{se } x_j < x_i \end{cases} \quad (6)$$

Tendo como pressuposto serem os dados independentes e igualmente distribuídos (hipótese nula), a estatística S tem média zero, $E(S) = 0$, e a variância dada por:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right], \quad (7)$$

onde q é o número de grupos empatados e t_p é o número de observações no p -ésimo grupo. A estatística de teste Z , que tem a distribuição normal, é calculada com base nos valores de S e $\text{Var}(S)$ por:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

em que os valores positivos (negativos) de Z indicam tendências crescentes (decrescentes). Por fim, para o teste de significância, o p -valor (pv) é calculado da seguinte forma:

$$pv = 2 \min[\phi(Z), 1 - \phi(Z)], \quad (9)$$

onde $\min(\cdot)$ representa o valor mínimo entre os dois argumentos e ϕ é a função de distribuição acumulada da normal padrão. Rejeita-se a hipótese nula quando o valor p da estatística padronizada de teste Z é menor que o nível de significância escolhido. Logo, considera-se que a tendência, seja ela crescente ou decrescente, é estatisticamente significativa se p_v for menor que α . Neste artigo, foi utilizado o nível de significância $\alpha = 0,05$, que é o valor comumente adotado na análise de dados climáticos (da Silva Araújo et al., 2023; Gocic & Trajkovic, 2013; Raziei et al., 2014; Silva et al., 2020).

2.3.2 Estimador de Sen's slope

O teste de Sen's slope (Sen, 1968) é uma medida estatística utilizada para estimar a taxa de mudança (ou inclinação de tendência) em uma série temporal. O método consiste em uma abordagem não paramétrica que é robusta a valores extremos ou discrepantes nos dados, e sua estatística é calculada da seguinte forma:

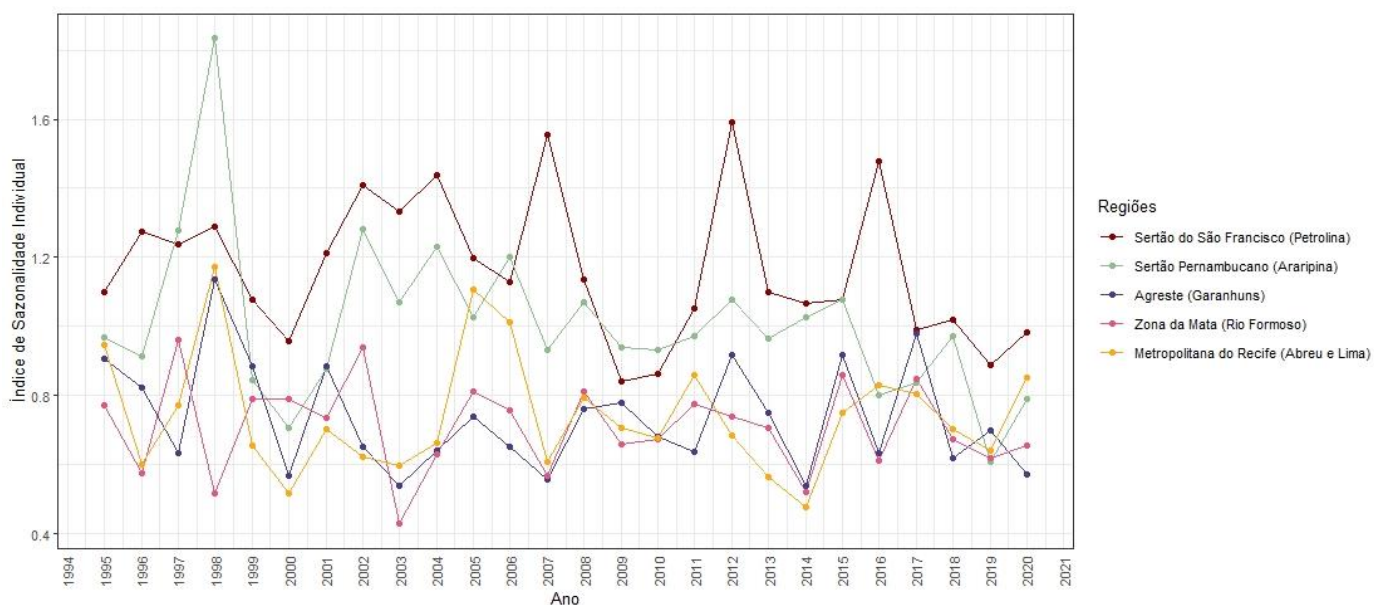
$$\Delta = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad i < j, \quad (10)$$

em que x_j e x_i são os valores dos dados nos tempos j e i , respectivamente. O valor de Δ indica a magnitude (ou inclinação) da tendência, que será considerada ascendente (descendente) se o sinal de Δ for positivo (negativo), como no teste de Mann-Kendall.

3. Resultados e Discussão

A Figura 4 exibe as séries temporais obtidas para o índice de sazonalidade individual com base nos dados pluviométricos dos municípios de Petrolina (Sertão do São Francisco), Araripina (Sertão Pernambucano), Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) e Abreu e Lima (Metropolitana do Recife) para os anos de 1995 a 2020.

Figura 4 - Séries temporais do índice de sazonalidade individual SI_i para as estações da APAC utilizadas em cada mesorregião de Pernambuco: Araripina (Sertão pernambucano), Petrolina (Sertão do São Francisco), Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata), Abreu e Lima (Metropolitana do Recife).



Fonte: Elaborada pelos autores.

Analisando os resultados da Figura 4, observa-se que em quase todo o período o regime de chuva de Petrolina (Sertão do São Francisco) apresentou picos de sazonalidade extrema (classe VII). Em 2003, por outro lado, o valor de SI_i para a estação de Rio Formoso (Zona da Mata) indicou um regime de chuva uniforme (classe II). A estação de Araripina (Sertão de Pernambuco) apresentou em 1998 o maior valor para SI_i de toda a série, indicando sazonalidade extrema (classe VII). As estações de Abreu e Lima (Metropolitana do Recife), Rio Formoso (Zona da Mata) e Garanhuns (Agreste) apresentaram semelhança nos regimes médios de chuva do período analisado, com SI_i variando entre as classes III (bastante sazonal com curta estação de seca) e V (maior precipitação concentrada em no máximo três meses).

Para verificar se houve tendência de aumento ou diminuição na sazonalidade dos regimes anuais de chuva dos municípios e determinar a magnitude dessas tendências, aplicaram-se às séries temporais de SI_i (Figura 4) os testes não paramétricos de Mann-Kendall e Sen's slope, respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados do teste de Mann-Kendall e Sen's slope para as séries temporais de SI_i .

Mesorregião	Município	Cód. Estação APAC	Mann-Kendall			Sen's slope
			Z	p-valor	Resultado da tendência	Δ
Sertão São Francisco	Petrolina	4	-1,81	0,07	Não-significativa	-0,01050
Sertão PE	Araripina	3	-1,59	0,11	Não-significativa	-0,01179
Agreste	Garanhuns	19	-0,75	0,45	Não-significativa	-0,00287
Zona da Mata	Rio Formoso	102	-0,68	0,49	Não-significativa	-0,00376
Metropolitana	Abreu e Lima	198	0,13	0,89	Não-significativa	0,00092

Fonte: Elaborada pelos autores.

Observa-se da Tabela 2 que não houve tendência estatisticamente significativa ao nível de 5% para nenhuma das estações meteorológicas, conforme indica o p -valor ($pv > \alpha$). Examinando, entretanto, o sinal de Z, observa-se que apenas o município de Abreu e Lima, localizado na região Metropolitana do Recife, apresentou tendência positiva – embora não-significativa. Os resultados do teste de Sen's slope estão em conformidade com os do teste de Mann-Kendall, visto que o sinal da magnitude Δ das tendências correspondem ao dos valores de Z. Estudo recente (da Silva Araújo et al., 2023) acerca da sazonalidade em todo o estado de Pernambuco para o período de 1953 a 2012 (60 anos de dados) revelou tendência estatisticamente significativa de redução nos valores de SI_i para os municípios Rio Formoso (Zona da Mata) e Abreu e Lima (Metropolitana do Recife). Esses resultados não invalidam, entretanto, os que foram obtidos neste trabalho, pois, no presente caso, o período observado foi de 1995 a 2020 (26 anos de dados).

A Tabela 3 exhibe os valores obtidos para os índices de sazonalidade \overline{SI} e \overline{SI}_i , e o índice de replicabilidade (RI), bem como as classes do regime de chuva em cada município considerado.

Tabela 3 - Valores obtidos para o índice de sazonalidade individual médio \overline{SI}_i , o índice de sazonalidade geral \overline{SI} , o índice de replicabilidade RI e a classificação do regime médio de chuva do período para as estações pluviométricas da APAC utilizadas em cada mesorregião de Pernambuco: Petrolina (Sertão do São Francisco), Araripina (Sertão pernambucano), Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata), Abreu e Lima (Metropolitana do Recife – MR).

Município/Mesorregião da estação APAC	\overline{SI}	Classe do regime de chuva*	\overline{SI}_i	$RI = \overline{SI}/\overline{SI}_i$
Petrolina (São Francisco)	0,81	V	1,17	0,69
Araripina (Sertão PE)	0,79	V	1,01	0,78
Garanhuns (Agreste)	0,52	III	0,73	0,71
Rio Formoso (Mata)	0,57	III	0,71	0,80
Abreu e Lima (MR)	0,57	III	0,74	0,77

*Conforme Tabela 1: classe III – bastante sazonal com curta estação seca; classe V – marcadamente sazonal com longa estação seca. Fonte: Elaborada pelos autores.

De acordo com a Tabela 3 e a classificação dos regimes de chuva apresentados na Tabela 1, os resultados obtidos para o índice de sazonalidade geral \overline{SI} indicam que os dados de precipitação registrados nas estações Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) e Abreu e Lima (Metropolitana do Recife) foram gerados por um regime pluviométrico bastante sazonal com curta estação seca (classe III), enquanto que nas estações de Araripina (Sertão de Pernambuco) e Petrolina (Sertão do São Francisco), os dados exibiram comportamento típico de um regime de chuva marcadamente sazonal com longa estação seca (classe V). Quanto aos valores de \overline{SI}_i , observa-se uma elevação em relação aos de \overline{SI} , o que se encontra dentro dos padrões esperados, produzindo valores de $RI < 1$. Observa-se, ainda, que os municípios estudados possuem regimes pluviométricos de replicabilidade consideravelmente alta, com destaque para Petrolina (Sertão São Francisco), que exibiu o menor valor de $RI (= 0,69)$, e Rio Formoso (Zona da Mata), com maior valor ($RI = 0,80$).

4. Conclusões e Considerações Finais

Este trabalho investigou a sazonalidade pluviométrica e sua variabilidade durante o período de 1995 a 2020 em cinco importantes municípios para o cenário agrícola do estado de Pernambuco, cada um localizado em uma de suas mesorregiões: Araripina (Sertão pernambucano), Petrolina (Sertão do São Francisco), Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) e Abreu e Lima (Metropolitana do Recife). O método de análise utilizado baseou-se no cálculo do índice de sazonalidade geral \overline{SI} (usado para classificar o regime médio de chuva do período), do índice de sazonalidade individual SI_i (com que são classificados os regimes anuais de chuva), do índice de replicabilidade RI (para avaliar o grau de replicabilidade dos regimes de chuva), bem como na aplicação dos testes de tendência de Mann-Kendall e Sen's slope, às séries temporais de SI_i para detectar tendência e magnitude de aumento ou diminuição da sazonalidade nos regimes anuais de chuva do período considerado. De acordo com os resultados da análise, pode-se concluir que:

1. Durante o período investigado, os municípios de Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) e Abreu e Lima (Metropolitana do Recife) apresentaram regime médio de chuva bastante sazonal com curta estação seca (classe III), enquanto que os municípios de Araripina (Sertão pernambucano) e Petrolina (Sertão do São Francisco) experimentaram um regime médio de chuva marcadamente sazonal com longa estação seca (classe V).
2. Todos os municípios apresentaram um grau de replicabilidade consideravelmente alto em seus regimes de chuva – indicado pelo valor de RI , que variou entre 0,69 em Petrolina (Sertão do São Francisco) e 0,80 em Rio Formoso (Zona da Mata).

3. Os municípios de Garanhuns (Agreste), Rio Formoso (Zona da Mata) e Abreu e Lima (Metropolitana do Recife) apresentaram regimes anuais de chuva com variabilidade bastante semelhante, o que ocorreu entre as classes III e V para a maioria dos anos. Os dados de precipitação das estações de Araripina (Sertão pernambucano) e Petrolina (Sertão do São Francisco), por outro lado, exibiram alta variabilidade na sazonalidade dos regimes anuais de chuva, que se deu entre as classes IV (sazonal) e VII (extremamente sazonal) para a primeira, e entre V e VII para a segunda, que também se destacou por exibir valores mais altos de SI_i e com maiores oscilações na maioria dos anos.
4. Não houve tendência estatisticamente significativa de aumento ou diminuição na sazonalidade dos regimes anuais de chuva.

O estudo aqui realizado extraiu informações relevantes para os setores agrícola e de infraestrutura das regiões em análise quanto ao melhor uso dos recursos hídricos, visto que foi possível identificar os diferentes contrastes de sazonalidade entre os municípios de cada mesorregião e classificar seus regimes de chuva em escala anual e global (para o período). Com isso, demonstrou-se que o método adotado constitui uma ferramenta promissora de auxílio na tomada de decisão para a elaboração de políticas públicas voltadas para a correção de problemas causados tanto pelo excesso quanto pela escassez de chuva no estado de Pernambuco.

Como trabalho futuro, sugere-se analisar um período de pelo menos 60 anos para uma melhor análise da tendência da sazonalidade pluviométrica anual, bem como para avaliar as mudanças nos regimes de chuva entre décadas e entre subperíodos de 30 anos.

O presente trabalho constitui um projeto da disciplina de Métodos Quantitativos Aplicados a Ciências Agrárias oferecida pelo Programa de Pós-graduação em Biometria e Estatística Aplicada (PPGBEA) da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE.

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências brasileiras de fomento CNPq, CAPES e FACEPE pelo apoio financeiro junto ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada da UFRPE.

Referências

- Asfora, M. C., Lima, M., & Lacerd, M. R. de S. (2017). Diagnóstico da seca 2011-2016 em Pernambuco: impactos e políticas de mitigação. *Parcerias Estratégicas*, 22(44), 247–273.
- Bari, S. H., Hussain, M. M., & Husna, N.-E.-A. (2017). Rainfall variability and seasonality in northern Bangladesh. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3–4), 995–1001. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1823-9>
- Barros, V. da S., Gomes, V. K. I., Silva Júnior, I. B. da, Silva, A. S. V. da, Silva, A. S. A. da, Bejan, L. B., & Stosic, T. (2021). Análise de tendência do índice de precipitação padronizado em Recife–PE. *Research, Society and Development*, 10(8), e52310817458. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17458>
- Birsan, M.-V., Dumitrescu, A., Micu, D. M., & Cheval, S. (2014). Changes in annual temperature extremes in the Carpathians since AD 1961. *Natural Hazards*, 74(3), 1899–1910. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1290-5>
- da Silva, A. S. A., Stosic, B., Menezes, R. S. C., & Singh, V. P. (2019). Comparison of Interpolation Methods for Spatial Distribution of Monthly Precipitation in the State of Pernambuco, Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001743](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001743)
- da Silva Araújo, L., da Silva, A. S. A., Menezes, R. S. C., Stosic, B., & Stosic, T. (2023). Analysis of rainfall seasonality in Pernambuco, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04462-9>
- Dos Santos, W. M., Silva Souza, R. M., De Souza, E. S., De Almeida, A. Q., & Dantas Antonino, A. C. (2017). Variabilidade espacial da sazonalidade da chuva no semiárido brasileiro. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 2(4), 368–376. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1466.368-376>
- Doyle, M. E. (2020). Observed and simulated changes in precipitation seasonality in Argentina. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1716–1737. <https://doi.org/10.1002/joc.6297>

- Garrick, D., & Hall, J. W. (2014). Water Security and Society: Risks, Metrics, and Pathways. *Annual Review of Environment and Resources*, 39(1), 611–639. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-013012-093817>
- Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100, 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.014>
- Hoekstra, A. Y., Buurman, J., & van Ginkel, K. C. H. (2018). Urban water security: A review. *Environmental Research Letters*, 13(5), 053002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaba52>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. Charles Griffin.
- Kilimani, N., van Heerden, J., Bohlmann, H., & Roos, L. (2018). Economy-wide impact of drought induced productivity losses. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 27(5), 636–648. <https://doi.org/10.1108/DPM-05-2018-0155>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
- Marengo, J. A., Galdos, M. V., Challinor, A., Cunha, A. P., Marin, F. R., Vianna, M. dos S., Alvala, R. C. S., Alves, L. M., Moraes, O. L., & Bender, F. (2022). Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. *Climate Resilience and Sustainability*, 1(1). <https://doi.org/10.1002/cli2.17>
- Marengo, J. A., Torres, R. R., & Alves, L. M. (2017). Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3–4), 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- Rai, P., & Dimri, A. P. (2020). Changes in rainfall seasonality pattern over India. *Meteorological Applications*, 27(1), 1–6. <https://doi.org/10.1002/met.1823>
- Raziei, T. (2018). An analysis of daily and monthly precipitation seasonality and regimes in Iran and the associated changes in 1951–2014. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(3–4), 913–934. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2317-0>
- Raziei, T., Daryabari, J., Bordi, I., & Pereira, L. S. (2014). Spatial patterns and temporal trends of precipitation in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(3–4), 531–540. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0919-8>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Source: Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
- Sharma, S., & Singh, P. K. (2019). Spatial trends in rainfall seasonality: a case study in Jharkhand, India. *Weather*, 74(1), 31–39. <https://doi.org/10.1002/wea.3231>
- Silva, A. S. A., Cunha Filho, M., Menezes, R. S. C., Stosic, T., & Stosic, B. (2020). Trends and Persistence of Dry–Wet Conditions in Northeast Brazil. *Atmosphere*, 11(10), 1134. <https://doi.org/10.3390/atmos11101134>
- Walsh, R. P. D., & Lawler, D. M. (1981). Rainfall seasonality spatial patterns and change through time. *Weather*, 36(7), 201–208. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1981.tb05400.x>