USO COMBINADO DOS ÍNDICES SPI, SSMI E STI NA ANÁLISE DE SECAS NO MUNICIPIO DE PETROLINA-PE

Gabriel Graciano de Mendonça [1]; Ivanildo Batista da Silva Júnior [2];Luis Felipe Francisco Ferreira da Silva [3] & Antonio Samuel Alves da Silva [4]

RESUMO – A seca é considerada um dos piores desastres naturais, impactando um número significativo de pessoas em diferentes regiões do mundo. Diversos índices têm sido desenvolvidos para analisar diferentes tipos de secas, e a utilização conjunta desses índices permite uma avaliação mais completa desses eventos em diferentes escalas temporais e sob diferentes condições climáticas. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar o comportamento das secas no município de Petrolina-PE por meio dos índices *Standardized Precipitation Index, Standardized Soil Moisture Index* e *Standardized Temperature Index*, associados os níveis de precipitação, umidade do solo e temperatura, respectivamente, além de identificar a correlação entre esses índices. Os resultados evidenciaram a ocorrência de eventos de seca e de calor mais prolongados durante as décadas de 1990 e de 2010, além disso foram identificadas tendências estatisticamente significativas associadas a intensificação dos índices ao longo do tempo. Verificou-se também altas correlações entre os índices, sugerindo uma associação entre eles. Dessa forma, os resultados obtidos destacam a importância do monitoramento integrado dos índices de seca, como uma ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos, visando a redução dos impactos relacionados aos eventos de seca.

ABSTRACT – Drought is considered one of the worst natural disasters, impacting a significant number of people in different regions of the world. Therefore, various indices have been developed to analyze different types of droughts, and the combined use of these indices allows for a more complete assessment of these events at different temporal scales and under different climatic conditions. In this context, the present study aimed to analyze the behavior of droughts in the municipality of Petrolina-PE using the *Standardized Precipitation Index, Standardized Soil Moisture Index*, and *Standardized Temperature Index* indices, associated with precipitation levels, soil moisture, and temperature, respectively, as well as to identify the correlation between these indices. The results showed the occurrence of more prolonged drought and heat events during the 1990s and 2010s. Furthermore, statistically significant trends associated with the intensification of the indices over time were identified. High correlations between the indices were also found, suggesting an association between them. Thus, the results obtained highlight the importance of integrated monitoring of drought indices as a tool to support water resource management, aiming to reduce the impacts related to drought events.

Palavras-Chave – Precipitação, Umidade do solo e Temperatura média.

[1]) Programa de Pós Graduação em Biometria e Estatística Aplicada – PPGBEA - UFRPE, Rua Dom Manuel de Medeiros, S/N - Dois Irmãos, Recife – PE, (83) 9 9628-6658, gabriel.gracianom@ufrpe.br
[2]) Programa de Pós Graduação em Biometria e Estatística Aplicada – PPGBEA - UFRPE, Rua Dom Manuel de Medeiros, S/N - Dois Irmãos, Recife – PE, ivanildo.batista13@gmail.com
[3]) Programa de Pós Graduação em Biometria e Estatística Aplicada – PPGBEA - UFRPE, Rua Dom Manuel de Medeiros, S/N - Dois Irmãos, Recife – PE, luis.francisco@ufrpe.br
[4]) Programa de Pós Graduação em Biometria e Estatística Aplicada – PPGBEA - UFRPE, Rua Dom Manuel de Medeiros, S/N - Dois Irmãos, Recife – PE, antonio.sasilva@ufrpe.br

INTRODUÇÃO

A seca é considerada um dos desastres naturais mais complexos e severos, afetando diretamente a população por meio de seus efeitos sobre os recursos hídricos, a produção agricultura e o abastecimento de água, causando graves prejuízos socioeconômicos (Rajsekhar et al. (2015)). Existem diferentes tipos de seca, na qual podem coexistir e se propagar de um tipo para outro (Ding et al. (2021)). As secas meteorológicas, associadas à redução dos níveis de precipitação, podem desencadear secas agrícolas, relacionadas à diminuição da umidade do solo, bem como secas hidrológicas, caracterizadas pela redução da disponibilidade de água nos reservatórios e rios (Misha e Singh (2010)). Além disso, o aumento das temperaturas também pode intensificar os eventos de seca. Devido a essa complexibilidade diferentes índices têm sido desenvolvidos para a análise dos eventos de seca, tendo em vista que um único índice baseado em apenas uma variável pode não ser suficiente para quantificar e caracterizar esses eventos (Muthuvel, D., & Mahesha, A. (2021)).

Nesse contexto, destacam-se o *Standardized Precipitation Index* (SPI) (McKee et al. (1993)), utilizado na avaliação de secas meteorológica com base na variabilidade dos níveis de precipitações, o *Standardized Soil Moisture Index* (SSMI)(Hao e AghaKouchak (2013)), aplicado para identificação das secas agrícolas relacionadas à disponibilidade de água no solo, e o *Standardized Temperature Index* (STI) (Zscheischler et al. 2014), utilizado para analisar a influência da temperatura e identificar eventos de calor que podem intensificar o déficit hídrico e os níveis de evapotranspiração. A utilização conjunta desses índices possibilita uma análise mais abrangente das secas, permitindo compreender a interação entre precipitação, umidade do solo e temperatura na dinâmica dos eventos de seca (Muthuvel, D. & Mahesha, A. (2021)).

O estado de Pernambuco, localizado no Nordeste brasileiro é frequentemente afetado por episódios de seca, principalmente na região do Sertão (Silva Junior et al. (2024)). Nesse cenário o município de Petrolina se destaca como uma área de grande relevância para estudos relacionados à seca, dado suas características climáticas e por estar em uma região semiáridas. Apresentando alta variabilidade nos níveis precipitação e elevadas temperaturas, contribuído para a ocorrência frequente de eventos de seca, impactando diretamente nos recursos hídricos. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar o comportamento das secas no município de Petrolina-PE por meio da utilização do *Standardized Precipitation Index* (SPI), *Standardized Soil Moisture Index* (SSMI) e *Standardized Temperature Index* (STI), visando compreender a variabilidade temporal dos eventos

de seca em diferentes escalas, identificar a presença de tendências temporais e verificar a correlação entre os índices utilizados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e conjunto de dados

Os dados utilizados nesse trabalho foram obtidos por meio do pacote brclimr (Saldanha et al. 2024) do software R, na qual disponibiliza a média mensal de diversas variáveis climáticas para todos os municípios brasileiros, abrangendo o período de 1958 a 2021, com base nos dados do TerraClimate. A área de estudo, por sua vez, corresponde ao município de Petrolina, localizado na região do Sertão pernambucano, área caracterizada por condições climáticas semiáridas e frequentemente sujeita à ocorrência de eventos de seca. Todas as análises foram realizadas no ambiente computacional R (R Core Team (2024)).

Standardized Precipitation Index

O primeiro passo para o cálculo do SPI (McKee et al. (1993)), consiste no ajuste dos dados de precipitação a uma função de densidade de probabilidade (fpd). A organização meteorológica mundial recomenda o uso da distribuição gama para seu cálculo, por apresentar melhor ajuste aos dados de precipitação. Dessa forma, a fdp da distribuição gama é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, x > 0 \quad (1)$$

onde $\alpha > 0$ representa o parâmetro de forma, $\beta > 0$ representa o parâmetro de escala e x é a valor da variável a ser analisada. Como os dados analisados podem apresentar valores iguais a zero, a probabilidade acumulada da função gama é denotada por:

$$H(x) = q + (1 - q)F(x) \quad (2)$$

onde F(x) é a distribuição acumulada, $q = m/n$, m sendo o número de zeros na série temporal, n o número de observações. Por fim, a probabilidade acumulada H(x) é padronizada por meio da distribuição normal padrão $\phi(.)$, resultando em índices padronizados. Os índices SSMI (Hao e AghaKouchak (2013)) e STI (Zscheischler et al. 2014) podem ser calculados de maneira análoga, diferenciando apenas na variável de entrada, sendo elas umidade do solo e temperatura média.

A utilização dos índices padronizados possibilita a comparação e a análise de múltiplas escalas temporais em diferentes regiões, permitindo uma avaliação mais detalhada da variabilidade e intensidade dos eventos de seca. Valores positivos do SPI (ou SSMI) indicam condições de umidade, enquanto valores negativos indicam condições secas (McKee et al. (1993)), já para o STI, valores

negativos caracterizam eventos de frio, enquanto valores positivos indicam eventos de calor (Muthuvel, D., & Mahesha, A. (2021)).

Mann Kendall Modificado e Sen`s Slope

Para a análise de tendências temporais, foi aplicado o teste de Mann-Kendall Modificado - MMK (Mann (1945); Kendall e Gibbons (1962)), uma adaptação do teste de Mann-Kendall, na qual incorpora uma correção no efeito da autocorrelação da série temporal. Essa correção ajusta a variância da estatística do teste por meio do cálculo do número efetivo de observações independentes, reduzindo a influência da dependência temporal dos dados. O teste tem como hipótese nula a ausência de tendência temporal, e nesse estudo foi utilizado o nível de significância de 5%, de modo que as tendências foram consideradas estatisticamente significativas quando o p valor foi inferior a 0,05.

Em conjunto com o teste MKM, foi utilizado o Sen`s Slope (Sen (1968)) com o objetivo de quantificar a magnitude das tendências. Embora o teste de MMK permita verificar a existência tendências estatisticamente significativas, ele não fornece informações relacionadas a sua intensidade, tendo seu cálculo baseado na mediana da série temporal dos dados.

RESULTADOS

Inicialmente, analisou-se o comportamento temporal das variáveis utilizadas no cálculo dos índices de seca, sendo elas precipitação, umidade e temperatura média. A série temporal dessas variáveis é apresentada na Figura 1, permitindo uma análise preliminar da variabilidade dos principais fatores que influenciam a ocorrência dos eventos de seca. Em relação à precipitação, observaram-se valores variando entre 0 e 364,01 $mm.mes^{-1}$, com média de 41,67 $mm.mes^{-1}$. Ao longo do período estudado, destacam-se os menores níveis de precipitação ao longo da década de 1990 e 2010. Para a umidade do solo, verificou-se uma variação de 1,92 a 99,72 $mm.mes^{-1}$, com média de 16,38 $mm.mes^{-1}$. A série temporal apresentou um comportamento sazonal ao longo dos anos, com uma redução acentuada dos níveis de umidade durante a década de 1990, seguidas por uma recuperação na década de 2000 e posteriormente uma leve redução. A temperatura média, por sua vez, apresentou valores entre 21,28 °C e 29,65 °C por mês e média de 25,52 °C. A análise da série temporal evidenciou um comportamento sazonal ao longo dos anos, com um aumento gradual da temperatura média.

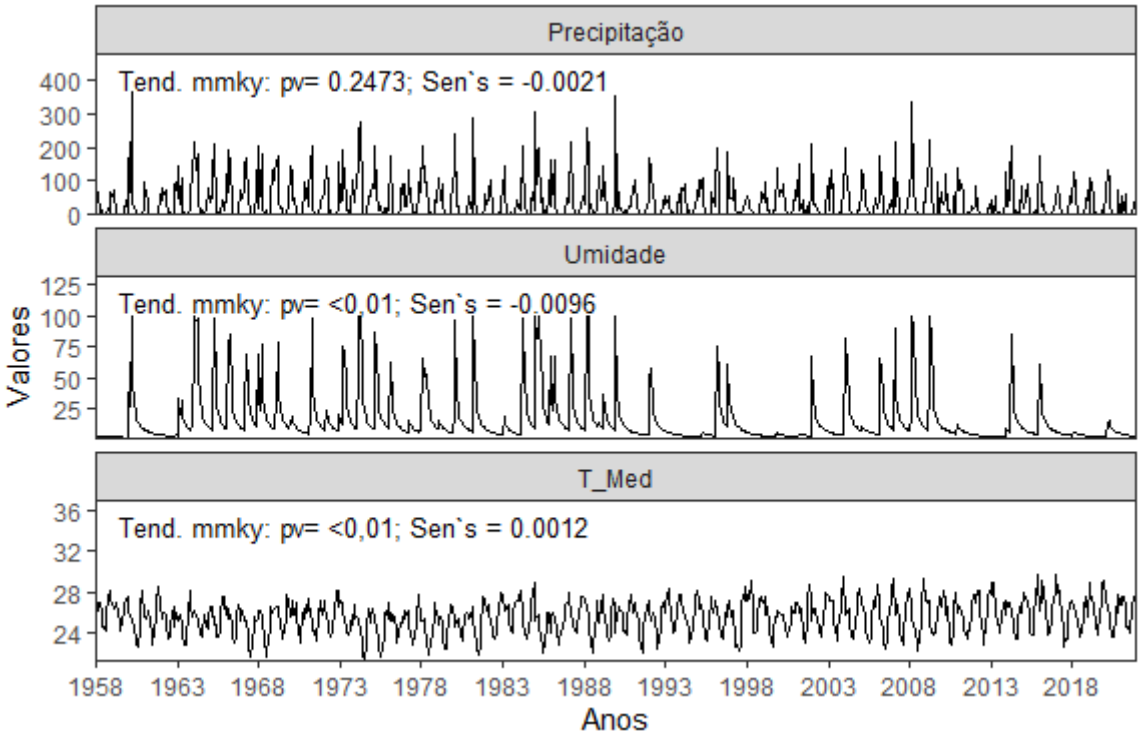


Figura 1 – Série temporal e tendência das variáveis Precipitação, Umidade e Temperatura média para o município de Petrolina

Ao aplicar o teste de MMK foram identificadas tendências estatisticamente significativas para a umidade do solo e a temperatura média. Já em relação ao Sen`s Slope identificou-se uma redução de -0,096 por mês nos níveis da umidade do solo, indicando uma predisposição para a ocorrência déficits hídricos ao longo do tempo. Em relação a temperara média, observou-se o Sen`s Slope de 0,0012, indicando uma tendência de aumento da temperatura ao longo do tempo, conforme também foi possível observa na série temporal.

Com base nas variáveis climáticas analisadas, foram calculados os índices SPI, SSMI e STI, nas escalas mensal (SPI-1, SSMI-1, STI-1), sazonal (SPI-3, SSMI-3, STI-3) e anual (SPI-12, SSMI-12, STI-12). O comportamento desses índices na escala mensal é apresentado na Figura 2. Observou-se que o SPI na escala mensal (SPI-1) apresentou uma grande variabilidade, tal comportamento está associado ao fato da escala mensal levar em consideração apenas condições de curto prazo. Apesar dessa variabilidade, destaca-se a predominância de valores negativos a partir da década de 1980, indicando maior frequência de eventos de seca. O SSMI-1, por sua vez, identificou períodos prolongados de eventos de seca, sendo eles de 1958 a 1963, entre os anos de 1988 e 2004, e de 2010 até 2021. Em relação ao STI-1, verificou-se eventos de calor de 1958 a 1960, bem como uma predominância de valores positivos a partir da década de 1990, embora ainda ocorram eventos esporádicos de frio. Em relação a tendência, notou-se tendências estatisticamente significativas para

todos os índices, com Sen`s Slope de -0,0003, para o SPI-1, -0,0014, para o SSMI-1, e 0,0012, para o STI-1.

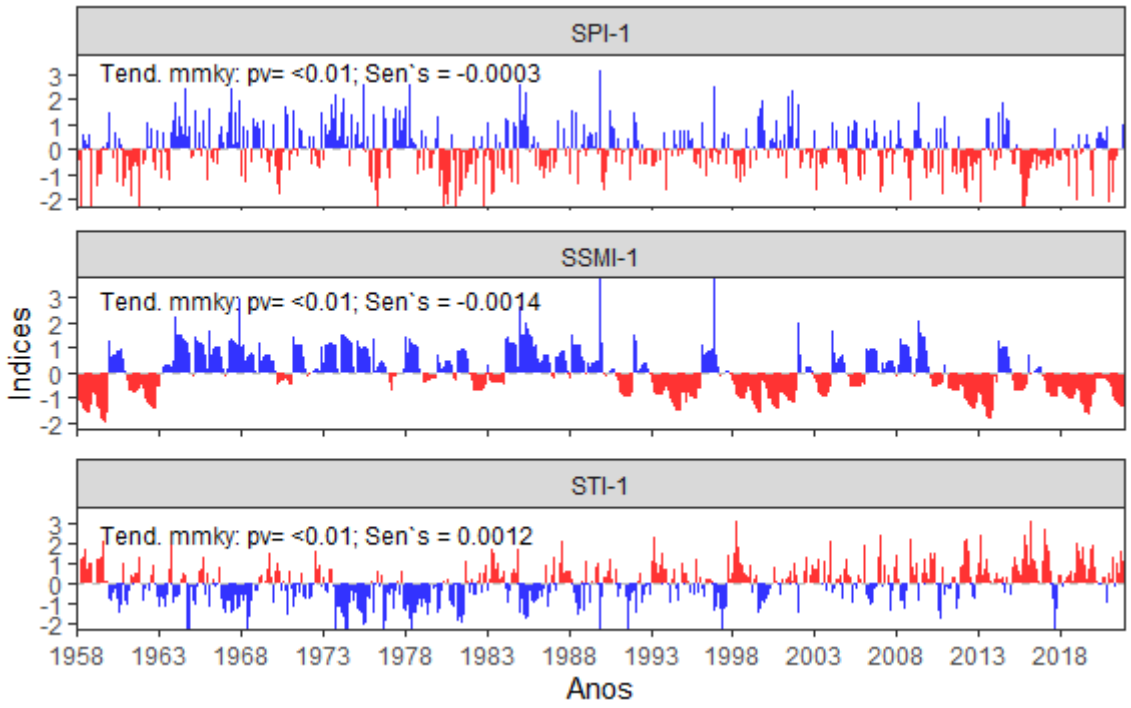


Figura 2 – Série temporal e tendência dos índices SPI, SSMI e STI na escala mensal

A série temporal dos índices em análise na escala sazonal é ilustrado na Figura 3. Em comparação à escala mensal, observa-se uma redução da variabilidade de curto prazo. Para o SPI-3, identificou-se eventos secos mais prolongados entre 1958 e 1963, entre 1980 e 1985 e, principalmente, no período de 2010 a 2021. O SSMI-3 apresentou comportamento semelhante ao observado na escala mensal, confirmando a persistência de períodos de baixa umidade do solo. Já o STI-3 evidenciou de forma mais nítida a predominância de condições de calor a partir da década de 1990. Verificou-se a presença de tendências estatisticamente significativas para todos os índices analisados. Os valores de Sen`s Slope foram de -0,0007 para o SPI-3, -0,0015 para o SSMI-3, e 0,0016 para o STI-3, apresentando magnitudes superiores a escala mensal, evidenciando a intensificação dos eventos de seca e de calor ao considerar períodos mais longos.

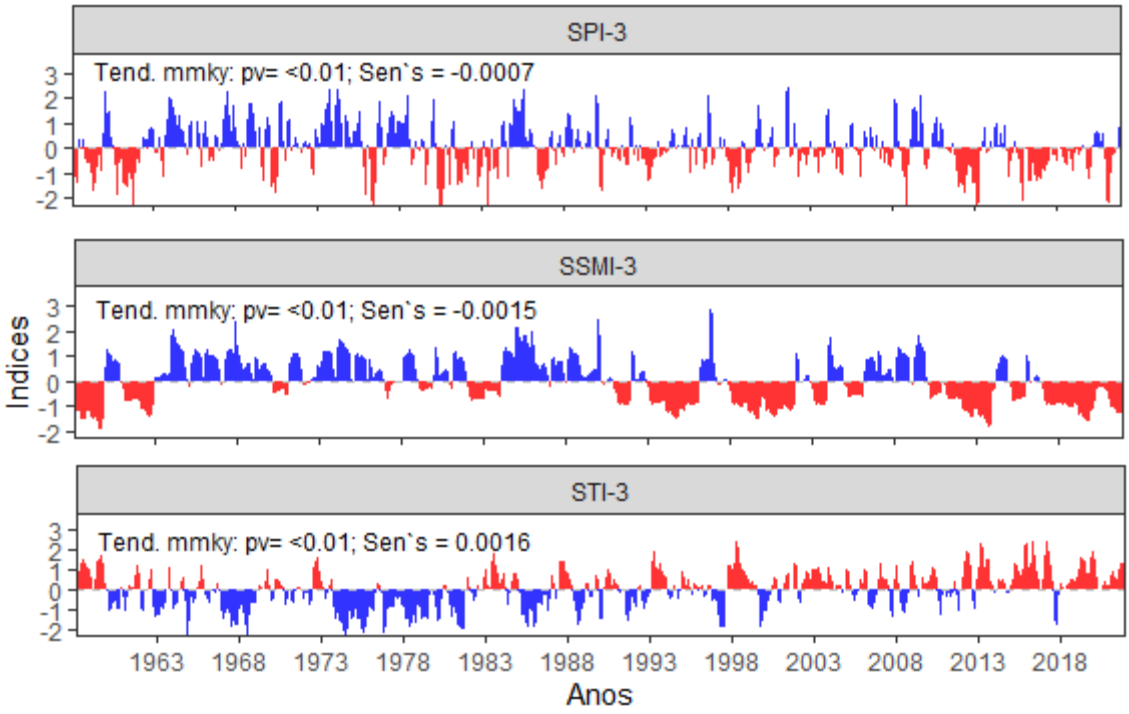


Figura 3 – Série temporal e tendência dos índices SPI, SSMI e STI na escala sazonal

A Figura 4 apresenta o comportamento dos índices SPI-12, SSMI-12 e STI-12 na escala anual. Essa escala possibilita uma visualização mais clara da persistência das condições climática ao longo do período de estudo. Para o SPI-12, identificou-se o predomínio de condições secas a partir da década de 1990, interrompidas durante os anos de 2008 a 2010, e após esse intervalo, verificou-se uma intensificação dos eventos de seca até o fim do período analisado. Em relação ao SSMI-12, destacam-se os eventos de seca durante 1958 a 1963, 1993 a 2003 e, mais recentemente, de 2010 até o final da série temporal. Em contrapartida, durante o período de 1963 a 1990 predominaram condições de umidade, refletindo maior disponibilidade de água no solo durante esse período, conforme visualizado na Figura 1. Para o STI-12, observou-se eventos de frio de 1958 até 1983, a partir desse período verificou-se um comportamento de alternância entre eventos de frio e de calor até 2000, e após esse período os eventos de calor se intensificaram e persistiram até o 2021. O teste de MMK indicou novamente tendências estatisticamente significativas para os três índices, com um leve aumento das magnitudes do Sen` Slope, sendo de -0,0017 para o SPI, -0,0018 para o SSMI e de 0,0024 para o STI. Tais resultados evidenciam a intensificação dos eventos de seca associado aos níveis de precipitação e da umidade do solo, bem como do aumento da temperatura ao longo do período estudado.

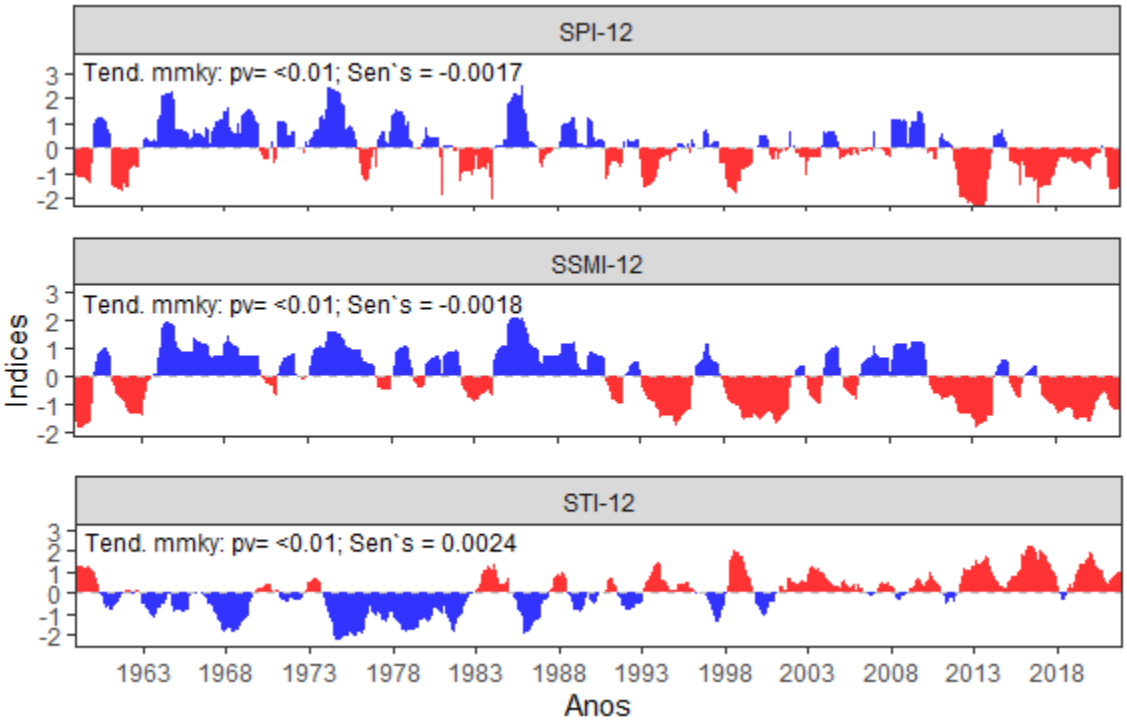


Figura 4 – Série temporal e tendência dos índices SPI, SSMI e STI na escala anual

Observou-se também que os resultados apresentados nas Figuras 2, 3 e 4 conseguiram capturar os períodos associados à ocorrência eventos de El Niño. Esses eventos são conhecidos por reduzir os níveis de precipitação no Norte e Nordeste brasileiro, intensificando a ocorrência de secas. Conforme apresentado por Monteiro et al.(2022), os anos de 1957-1958, 1991-1992, 1997- 1998, e de 2014 a 2016, foram marcados por fortes eventos de El Niño.

Afim de analisar a relação entre os índices analisados foi realizado a análise de correlação, conforme ilustrado na Figura 5. Pode-se observar, em todas as escalas consideradas, a presença de correlação positiva entre o SPI e SSMI, indicando comportamento semelhantes entre as condições de precipitação e da umidade do solo, sugerindo que os valores dos índices de umidade do solo tendem acompanhar o da precipitação, evidenciando uma associação entre os tipos de seca. Por outro lado, o STI apresentou correlações negativas com o SPI e o SSMI nas escalas avaliadas. Entretanto, deve-se ressaltar que a interpretação desses índices ocorre em sentidos opostos, enquanto valores negativos de SPI e SSMI estão associados a condições de seca, valores positivos de STI indicam eventos de calor. Dessa forma, a correlação negativa observada evidencia que o aumento dos eventos de calor tende a ocorrer simultaneamente com o aumento dos eventos de seca meteorológicas e agrícolas. Resultados semelhantes foram encontrados por Muthuvel e Mahesha (2021), na qual analisaram a relação entre SPI, SSMI e STI na Índia, destacando a associação entre os diferentes tipos de seca.

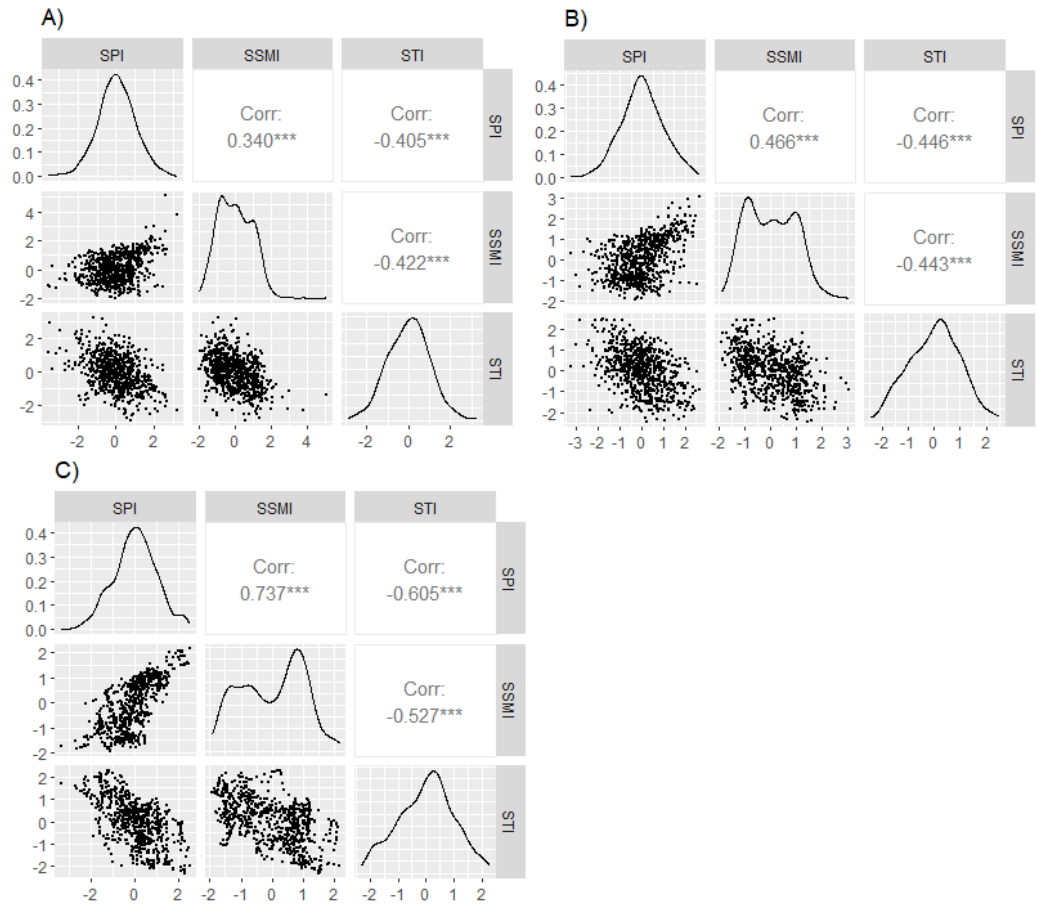


Figura 5 – Correlação entre os índices em análise, A) em escala mensal, B) em escala sazonal e C) em escala anual

CONCLUSÃO

A análise conjunta dos índices SPI, SSMI e STI possibilita uma avaliação integrada das secas agrometeorologias, permitindo um entendimento simultâneo das secas associadas aos déficits de precipitação, a redução da umidade do solo e o aumento da temperatura. Os resultados evidenciaram a predominância de condições de seca e de eventos de calor a partir da década de 1990, acompanhadas de tendências temporais estatisticamente significativas indicando uma intensificação dessas condições ao longo do tempo. Além disso, foi observada correlação significativa entre os índices. Desta forma, o presente estudo reforça a importância da utilização conjunta de múltiplos índices para a avaliação e monitoramento dos eventos de seca e das condições climáticas para o município de Petrolina-PE, contribuindo para o planejamento de estratégia na gestão de recursos hídricos visando a redução dos seus impactos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de pós graduação e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa por meio da bolsa de produtividade em pesquisa nº 306590/2024-7.

REFERÊNCIAS

DING, Y.; GONG, X.; XING, Z. et al. (2021). *"Attribution of meteorological, hydrological and agricultural drought propagation in different climatic regions of China"*. Agricultural Water Management, 255, 106996.

HAO, Z. & AGHAKOUCHAK, A. (2013). *"Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model"*. Advances in water resources, 57, 12-18.

KENDALL, M.G. & GIBBONS, J. D. (1962). *"Rank correlation methods"*.

MANN, H. B. (1945). *"Nonparametric tests against trend"*. Econometrica: Journal of the econometric society, 245-259.

MCKEE, T.B.; DOESKEN, N. J. & KLEIST, J. (1993). *"The relationship of drought frequency and duration to time scales"*. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology Vol. 17, No. 22, pp. 179-183.

MISHA, A. K. & SINGH, V.P. (2010). *"A review of drought concepts"*. Journal of hydrology, 391(1-2), 202-216.

MUTHUVEK, D.; MAHESHA, A. (2021). "*Spatiotemporal analysis of compound agrometeorological drought and hot events in India using a standardized index"*. Journal of Hydrologic Engineering, 26(7).

R Core Team. *R: "A Language and Environment for Statistical Computing"*. Vienna, Austria, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RAJSEKHAR, D.; SINGH, V.P. & MISHA, A.K.(2015). *"Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment"*. Journal of Hydrology, 526, 164-182.

SALDANHA, R.; AKBARINIA, R.; VALDURIEZ, P. et al. (2024). *"brclimr: Fetch Zonal Statistic s of Weather Indicators for Brazilian Municipalities"*. R package version 0.2.0.

SEN, P. K. (1968). "*Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau"*. Journal of the American statistical association, 63(324), 1379-1389.

SILVA JUNIOR, I. B.; SILVA ARAUJO, L.; STOSIC, T., et al. (2024). *"Space-time variability of drought characteristics in Pernambuco"*, Brazil. Water, 16(11), 1490.

SILVA MONTEIRO, L.; OLIVEIRA-JUNIOR, J. F.; GHAFFAR, B., et al. (2022). *"Rainfall in the urban area and its impact on climatology and population growth*". Atmosphere, 13(10), 1610.

ZSCHEISCHLER, J.; MICHALAK, A. M.; SCHWALM, C. et.al (2014). *"Impact of large-scale climate extremes on biospheric carbon fluxes: An intercomparison based on MsTMIP data"*. Global Biogeochemical Cycles, 28(6), 585-600.