IMPACTO ECONÔMICO DAS SECAS NO CEARÁ A PARTIR DA ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

Tatiane Lima Batista [1]; José Kerlly Soares de Araújo [2]; Francisco Halysson Vieira [3]; Samiria Maria Oliveria da Silva [4] & Francisco de Assis de Souza Filho [†]

RESUMO – As secas representam um dos principais desafios ambientais, sociais e econômicos nas regiões semiáridas. Este estudo analisa os impactos das secas no estado do Ceará a partir da relação entre o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e o Produto Interno Bruto (PIB) municipal, no período de 2002 a 2021. Utilizou-se análise estatística e espacial para avaliar a correlação entre SPI e PIB, destacando diferenças conforme condições climáticas (anos secos e anos normais). Além disso, aplicou-se a técnica de detecção de pontos de mudança (change points) na série anual do SPI para investigar possíveis alterações estruturais na variabilidade climática. Os resultados indicam que, nos anos secos, há maior variabilidade e intensidade nas correlações, com destaque para municípios do centro-oeste do estado. A análise evidencia que os efeitos das secas sobre a economia local não são uniformes, sendo modulados por fatores como disponibilidade hídrica subterrânea e estrutura socioeconômica. A identificação de rupturas na série do SPI também sugere mudanças importantes no regime climático da região, com implicações para políticas públicas de mitigação e adaptação.

ABSTRACT– Droughts are among the main environmental, social, and economic challenges in semi-arid regions. This study analyzes the impacts of drought in the state of Ceará, Brazil, by examining the relationship between the Standardized Precipitation Index (SPI) and municipal Gross Domestic Product (GDP) from 2002 to 2021. Statistical and spatial analyses were conducted to evaluate the correlation between SPI and GDP, highlighting differences under distinct climatic conditions (dry vs. normal years). Additionally, change point detection techniques were applied to the annual SPI series to identify structural shifts in climatic variability. The results show that during dry years, correlations are more variable and often stronger, especially in municipalities located in the central and west parts of the state. The findings indicate that the economic impacts of droughts are uneven across municipalities, influenced by factors such as groundwater availability and local socioeconomic structures. Detected change points in the SPI series suggest significant shifts in climate regimes, with implications for drought preparedness and adaptation policies.

Palavras-Chave – Seca; Índice Padronizado de Precipitação (SPI); Produto Interno Bruto (PIB).

[1]) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400- 900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: tatiane@crateus.ufc.br
[2]) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400- 900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: josekerlly@alu.ufc.br
[3]) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400- 900. Fortaleza – Ceará, Brasil.
[4]) Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713. Cep: 60400- 900. Fortaleza – Ceará, Brasil. E-mail: samiriamaria@ufc.br
†) Falecido em 2026. O Prof. Assis contribuiu significativamente para a concepção, desenvolvimento e orientação deste estudo antes de seu falecimento.

INTRODUÇÃO

As secas impõem efeitos sociais e ambientais de grande alcance em diversas regiões. Estudos relatam que a redução da disponibilidade de água e a queda na produtividade agrícola levam à insegurança alimentar e à interrupção dos meios de subsistência (Lottering *et al*., 2020). No Irã e na África do Sul, condições de seca resultaram em perdas agrícolas significativas, que desencadearam pobreza e forçaram a migração (Motamed e Devisti, 2012). Conforme apontado por Sugg *et al*. (2020), pesquisas realizadas em regiões como África Ocidental, Austrália, Espanha e América do Norte revelam problemas severos. Entre eles destacam-se o crescimento da mortalidade, quadros de desnutrição e prejuízos à saúde mental, somados ao esgotamento dos sistemas de saúde devido à alta demanda.

Os impactos ambientais incluem escassez hídrica severa, que limita o abastecimento doméstico, a geração de energia e a saúde dos ecossistemas. Pesquisas documentam a degradação do solo, a perda de biodiversidade e o aumento na incidência de incêndios florestais e mortalidade de florestas (Fleming-Muñoz *et* al., 2023).

Em regiões semiáridas, o efeito das secas é significativo, causando quebras de safra, escassez de água e insegurança alimentar (Mdemu, 2021; Ntali e Lyimo, 2022). No semiárido do Nordeste brasileiro, as secas correspondem à metade de todos os desastres naturais, afetando indicadores de saúde e bem-estar (Sena *et al*., 2014). A vulnerabilidade à seca é influenciada por condições sociais, posse de recursos e fontes de renda (Mdemu, 2021). No Brasil, esforços de monitoramento reúnem informações de diversas fontes para identificar os municípios impactados e apoiar ações emergenciais (Alvalá *et al*., 2017). Para aumentar a resiliência, recomenda-se investir em educação e culturas resistentes à seca, além da melhoria dos sistemas de alerta precoce e dos serviços de extensão rural (Mdemu, 2021; Ntali e Lyimo, 2022).

A análise de secas utilizando o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) é uma abordagem comum para a avaliação das condições de escassez hídrica. Diversos estudos aplicaram o SPI em diferentes regiões, incluindo Austrália, Índia, Irã e Indonésia, para analisar padrões e tendências de seca (Rahmat *et al*., 2012; Kamani *et al*., 2021; Javanmard *et al*., 2017; Maipauw *et al*., 2020). Esses estudos utilizaram diferentes escalas temporais, como SPI de 3, 9 e 12 meses, a fim de captar eventos de seca de curto e longo prazo.

A análise de tendências, por meio de testes não paramétricos, revelou quedas significativas nos valores de SPI, indicando condições progressivamente mais secas em algumas regiões (Rahmat *et al*., 2012). A análise espaço-temporal dos eventos de seca permitiu identificar anos e áreas específicas que enfrentaram condições severas de estiagem (Javanmard *et al*., 2017; Kamani *et al*., 2021). Alguns

pesquisadores combinaram o SPI com outros métodos, como interpolação por distância inversa (IDW) e análise de imagens de satélite, para aprimorar a capacidade de avaliação e previsão das secas (Maipauw *et al*., 2020). Esses estudos demonstram a versatilidade e a eficácia do SPI na análise de secas em diversos contextos geográficos.

Este estudo tem como objetivo principal analisar os impactos econômicos das secas no estado do Ceará, Brasil, a partir da relação entre o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e o Produto Interno Bruto (PIB) municipal. Especificamente, busca-se: (a) Avaliar a correlação entre os valores de SPI e PIB nos municípios cearenses, considerando diferentes condições climáticas (anos secos e anos normais); (b) Investigar a variação espacial dessa correlação ao longo do território estadual, por meio de representação cartográfica; (c) Identificar possíveis mudanças estruturais na variabilidade climática por meio da detecção de pontos de mudança (change points) na série temporal agregada de SPI.

O estado do Ceará, localizado na região semiárida do Nordeste brasileiro, é historicamente afetado por secas recorrentes que comprometem a segurança hídrica, a produção agrícola e o desenvolvimento socioeconômico local. Apesar da ampla documentação dos impactos físicos e sociais da seca, ainda são importantes as análises quantitativas que relacionam indicadores climáticos, como o SPI, a variáveis econômicas municipais de forma sistemática e espacialmente desagregada. Compreender como as variações na precipitação influenciam diretamente a atividade econômica é fundamental para o planejamento de ações mais eficazes de mitigação e adaptação aos efeitos da seca. Assim, este estudo se justifica pela importância de integrar informações climáticas e econômicas em análises que apoiem decisões para o gerenciamento dos recursos hídricos do semiárido cearense.

METODO DE PESQUISA

Fonte, tratamento e organização dos dados

A base de dados deste estudo foi construída a partir do pareamento anual de indicadores econômicos e climáticos para os 184 municípios do estado do Ceará, abrangendo o período de 2002 a 2021. As informações foram organizadas por município e ano, permitindo a análise conjunta da evolução temporal dessas variáveis.

Os dados econômicos correspondem à série do Produto Interno Bruto (PIB) municipal, disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para garantir a comparabilidade temporal dos valores, o PIB nominal foi deflacionado utilizando o deflator implícito do PIB, adotando-se 2010 como ano-base. Dessa forma, todos os valores foram convertidos para preços constantes de 2010. A escolha desse ano-base deve-se à necessidade de utilizar um período de referência anterior aos efeitos econômicos atípicos observados durante a pandemia de COVID-19.

A variável climática foi representada pelo Índice Padronizado de Precipitação na escala de 12 meses (SPI-12), indicador amplamente utilizado para o monitoramento de secas e anomalias de precipitação. Os dados de precipitação foram obtidos junto à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), utilizando registros históricos de 265 estações pluviométricas.

O SPI-12 foi calculado individualmente para cada estação a partir das séries mensais de precipitação acumulada. Posteriormente, os valores foram espacializados por meio da interpolação Inverse Distance Weighting (IDW), permitindo a obtenção de uma superfície contínua do índice em toda a área de estudo. Por fim, para cada município, calculou-se a média dos valores interpolados de SPI-12, resultando em uma medida representativa da condição hídrica anual municipal.

Análises estatísticas

Inicialmente, foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre SPI e PIB para cada município considerando três condições distintas: (i) todos os anos da série; (ii) apenas os anos classificados como secos (SPI $\leq$ -0,7); e (iii) anos considerados normais (SPI > -0,7). Essa abordagem permitiu avaliar se os padrões de correlação variam conforme a condição climática. As correlações foram obtidas com base nos dados completos, excluindo observações ausentes. A distribuição das correlações entre os municípios foi comparada graficamente por meio de diagramas de caixa (boxplots), o que permitiu uma análise exploratória das variações nas relações SPI × PIB sob diferentes condições de seca.

Representação espacial

Para explorar a dimensão territorial das relações entre variáveis, foi gerado um mapa temático com a distribuição espacial dos coeficientes de correlação SPI × PIB referentes aos anos secos. A base cartográfica dos municípios do Ceará foi obtida a partir do pacote geobr, com os limites administrativos referentes ao ano de 2020.

Detecção de Pontos de Mudança na Variância da Série SPI

Com o objetivo de identificar mudanças estruturais na variabilidade climática do Ceará ao longo do tempo, foi realizada uma análise de detecção de pontos de mudança (change points) na série temporal anual do Índice Padronizado de Precipitação (SPI). Para isso, os dados de SPI foram inicialmente agregados por ano, considerando a média dos valores dos municípios do estado em cada ano do período analisado (2002–2021). A detecção dos pontos de mudança foi realizada por meio do algoritmo PELT (Pruned Exact Linear Time), implementado (Killick *et al*., 2012) no ambiente R. Esta abordagem permite identificar mudanças simultâneas na média e na variância da série temporal, sendo adequada para séries com possíveis alterações na distribuição ao longo do tempo. Os pontos

de mudança identificados pelo modelo foram mapeados para os respectivos anos da série e posteriormente representados graficamente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Avaliação da correlação entre SPI e PIB no Ceará

Ao considerar apenas os anos classificados como secos (SPI ≤ -0,7), observa-se uma predominância de correlações positivas entre SPI e PIB na maior parte dos municípios cearenses (Figura 1). Os coeficientes positivos mais elevados, representados pelas tonalidades azul-escuras, concentram-se sobretudo no oeste e em parte da região central do estado, com destaque para alguns municípios localizados nas regiões hidrográficas dos Sertões de Crateús, do Banabuiú e do Alto Jaguaribe. Em contraste, áreas do litoral norte e parte da porção sul do Ceará apresentam correlações mais fracas ou negativas.

Esse padrão espacial pode estar associado às diferentes formas de disponibilidade hídrica entre as regiões do estado. Em parte da região sul, por exemplo, o maior acesso a recursos hídricos subterrâneos pode reduzir a dependência direta das atividades econômicas em relação às variações da precipitação, contribuindo para correlações mais fracas entre SPI e PIB. De modo semelhante, em áreas litorâneas, a maior diversificação econômica e a menor dependência das atividades agropecuárias podem atenuar os impactos das condições climáticas sobre o desempenho econômico municipal.

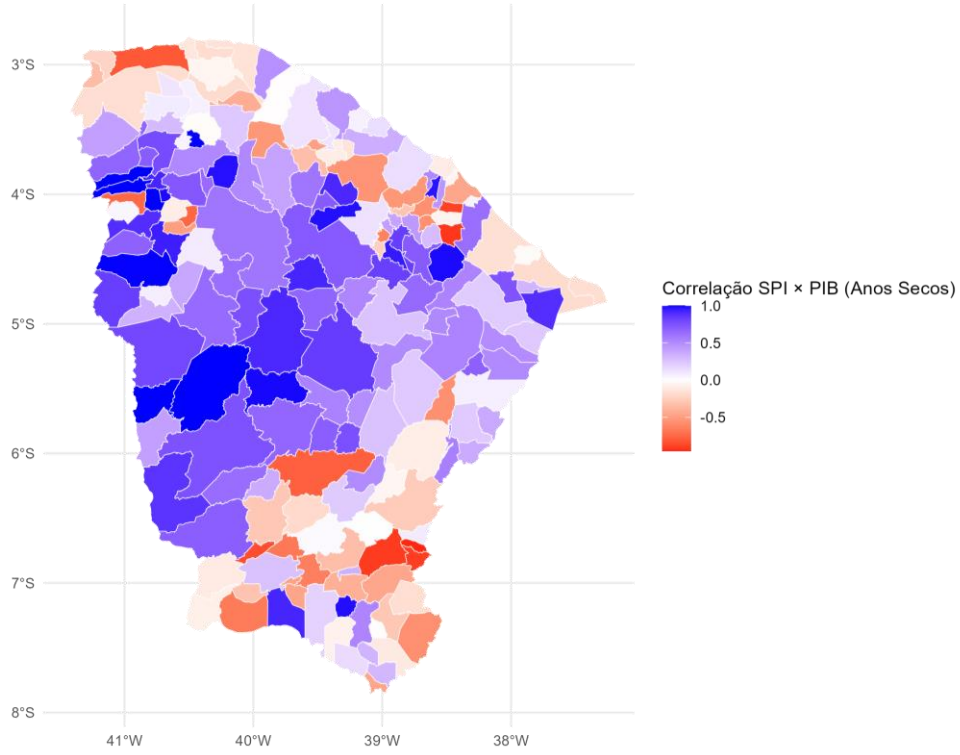


Figura 1 - Correlação SPI x PIB nos municípios do Ceará para anos secos (SPI <-0,7)

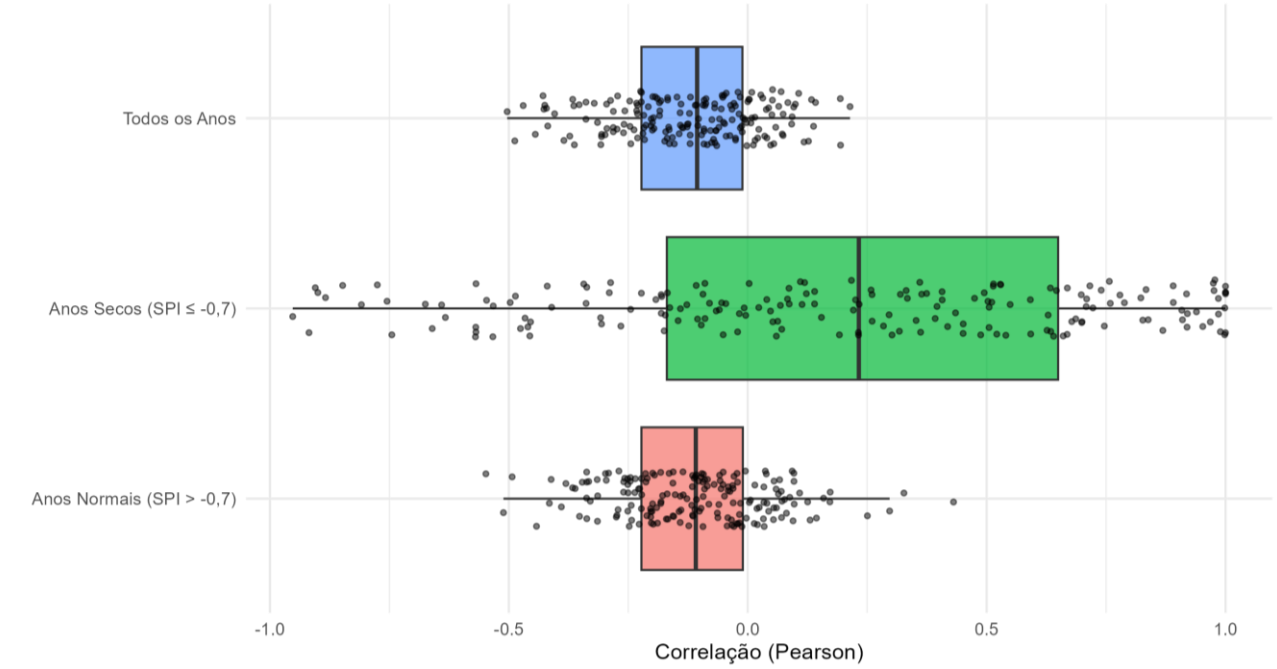


Figura 2 - Distribuição das correlações SPI x PIB para os municípios do Ceará

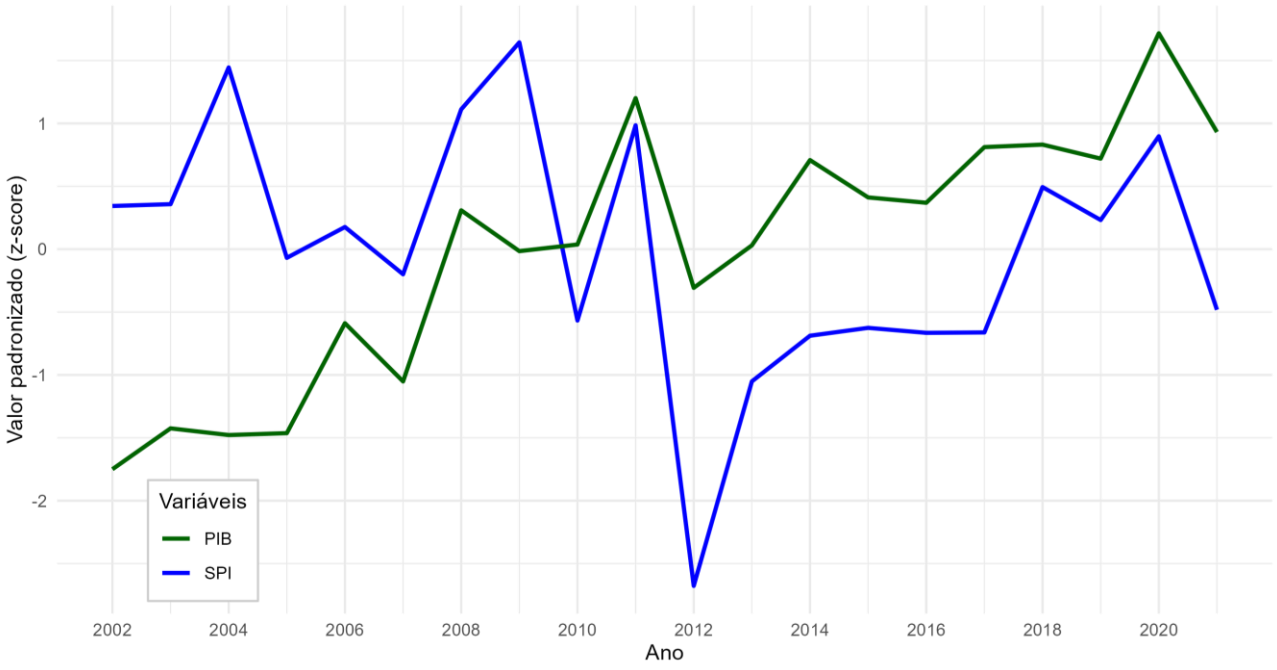


Figura 3 - Gráfico da série temporal de SPI e de PIB para o município de Independência

Quando se considera toda a série temporal (2002–2021), as correlações entre SPI e PIB nos municípios do Ceará apresentam-se mais concentradas e homogêneas, com mediana negativa próxima de zero (Figura 2). Por outro lado, ao analisar exclusivamente os anos classificados como

secos, observa-se uma maior dispersão dos coeficientes no intervalo entre -1 e 1, com predominância de valores positivos. Esse comportamento sugere que, em anos de seca, há uma intensificação da relação entre as variações no SPI e no PIB em determinados municípios, indicando que a seca pode afetar diretamente a atividade econômica local.

No entanto, é importante destacar que o PIB municipal é influenciado por múltiplos fatores como estrutura produtiva, políticas públicas e acesso a recursos hídricos, portanto, análises adicionais são necessárias para uma compreensão mais abrangente dessas dinâmicas. Como ilustração, a Figura 3 apresenta a série temporal do SPI e do PIB para o município de Independência, que exibiu uma das correlações mais fortes e positivas ao longo dos anos secos.

O município de Independência foi selecionado como estudo de caso por apresentar correlação fortemente positiva entre SPI e PIB durante os anos secos. A série temporal mostra que, em alguns períodos de redução do SPI, especialmente em 2012, início da mais recente e prolongada seca registrada no estado, observa-se também uma diminuição do PIB em relação ao ano anterior. Esse comportamento sugere que as condições de precipitação podem ter influenciado a dinâmica econômica local, embora a intensidade dessa relação varie ao longo da série.

Avaliação do Change point na série de SPI

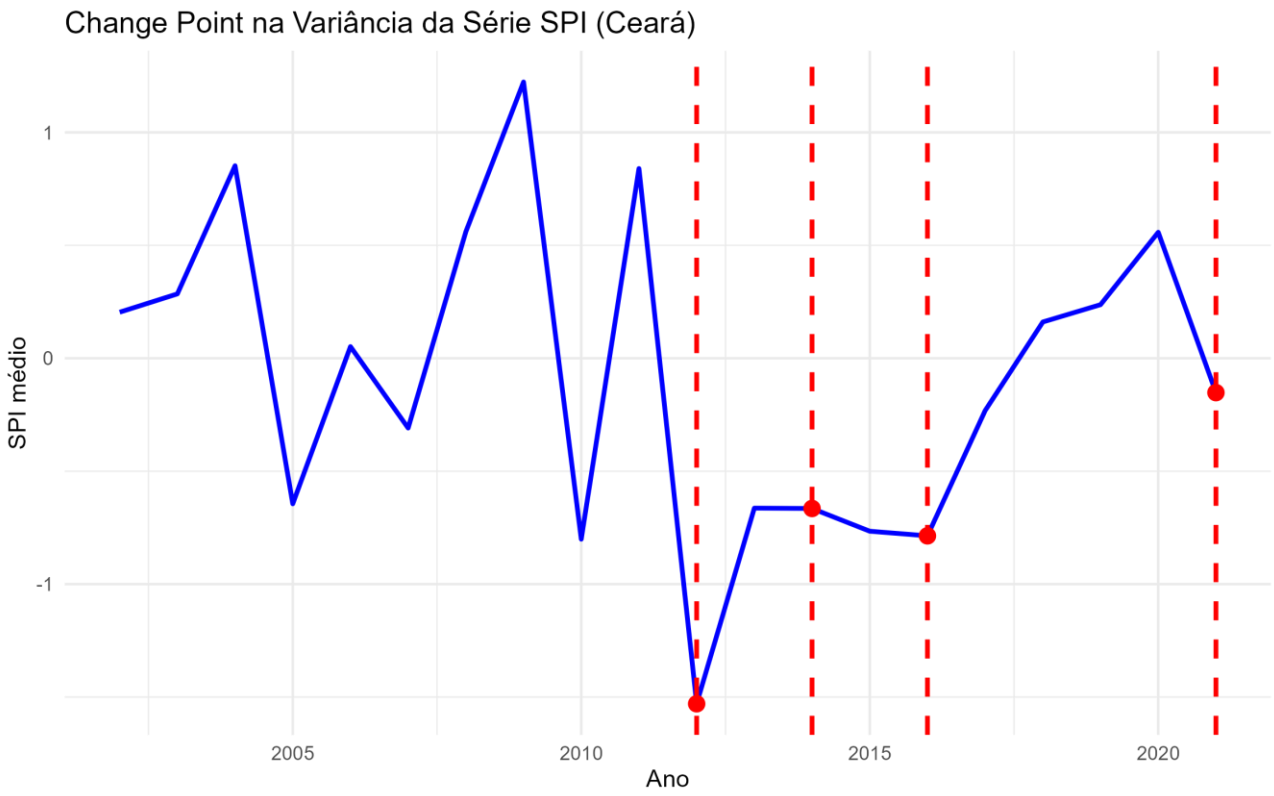


Figura 4 - Detecção de pontos de mudança na série temporal do SPI médio do Ceará

Os resultados deste estudo demonstram que os impactos econômicos das secas no Ceará não são homogêneos entre os municípios. A forte correlação positiva entre SPI e PIB em determinados locais, especialmente em anos secos, aponta para a dependência de algumas economias locais da regularidade das chuvas.

A heterogeneidade espacial observada no mapa de correlações pode estar relacionada a características como acesso à água subterrânea, presença de políticas públicas locais, grau de urbanização e diversificação econômica. Além disso, a análise dos pontos de mudança (Figura 4) na série do SPI indica que houve alterações relevantes na variabilidade climática ao longo do período. Essas mudanças podem refletir tanto fenômenos naturais de variabilidade climática quanto os efeitos das mudanças climáticas globais. No entanto, é importante destacar que a extensão relativamente curta da série temporal limita a robustez da análise de pontos de mudança, dificultando a distinção entre alterações estruturais persistentes e oscilações pontuais associadas à variabilidade natural do clima. Além disso, as correlações observadas entre o SPI e o PIB devem ser interpretadas como associações estatísticas, não implicando relações causais. Estudos futuros podem ampliar a análise com a inclusão de novas variáveis e modelos.

CONCLUSÕES

A análise integrada de séries temporais de SPI e PIB permitiu evidenciar que as secas se relacionam com a economia de forma diferenciada nos municípios cearenses. Os resultados indicam que, nos anos secos, há maior frequência de correlações positivas significativas, sugerindo que variações no SPI influenciam a dinâmica econômica de vários municípios. A detecção de pontos de mudança na série do SPI revela possíveis alterações estruturais no clima da região, reforçando a importância de mecanismos de monitoramento climático contínuo.

Este estudo contribui para o entendimento dos efeitos das secas sobre a economia regional e oferece subsídios para o aprimoramento de políticas públicas direcionadas à mitigação de impactos e à adaptação climática. Futuros trabalhos podem explorar a incorporação de defasagens temporais (lags) entre SPI e PIB, a fim de captar efeitos econômicos retardados das secas sobre os municípios. Também é recomendável avaliar a influência de diferentes escalas temporais do SPI (como SPI-3, SPI-6 e SPI-12) na correlação com indicadores econômicos e sociais. Outra possibilidade promissora é integrar dados sobre infraestrutura hídrica, uso do solo, agricultura irrigada e fontes alternativas de abastecimento para explicar as variações espaciais observadas nas correlações. Por fim, análises multivariadas e técnicas de aprendizado de máquina podem contribuir para uma compreensão mais robusta e preditiva dos impactos das secas sobre a economia local, apoiando decisões estratégicas para a gestão de riscos climáticos em regiões semiáridas.

REFERÊNCIAS

ALVALÁ, Regina C. S. *et al*. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 91, n. supl. 1, p. e20170209, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170209. Acesso em: 1 ago. 2025.

ALVALÁ, Regina CS et al. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 91, n. suppl 1, p. e20170209, 2017.

FLEMING-MUÑOZ, D. A.; WHITTEN, S.; BONNETT, G. D. The economics of drought: A review of impacts and costs. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, v. 67, n. 4, p. 501–523, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1111/1467-8489.12527. Acesso em: 1 ago. 2025.

JAVANMARD, S. et al. Spatial-temporal analysis of drought in Iran using SPI during a long-term period. Earth Sciences, v. 6, n. 2, p. 15–29, 2017.

KAMANI, G. J.; PAMPANIA, N. K.; CHINCHORKAR, S. S. Analysis of Drought Investigation Using Standard Precipitation Index (SPI) of Historical Rainfall Data (1979–2013) Under Temperate Conditions Over Anand. Gujarat, India.

KILLICK, R.; FEARNHEAD, P.; ECKLEY, I. A. Optimal detection of changepoints with a linear computational cost. Journal of the American Statistical Association, v. 107, n. 500, p. 1590–1598, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01621459.2012.737745. Acesso em: 1 ago. 2025.

LOTTERING, S. J.; MAFONGOYA, P.; LOTTERING, R. The impacts of drought and the adaptive strategies of small-scale farmers in uMsinga, KwaZulu-Natal, South Africa. Journal of Asian and African Studies, v. 56, n. 2, p. 267–289, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0021909620916898. Acesso em: 1 ago. 2025.

MAIPAUW, Musa Marsel; SEDIYONO, Eko; PRASETYO, Sri Yulianto Joko. Drought analysis and forecast using landsat-8 sattelite imagery, standardized precipitation index and time series. Khazanah Informatika: Jurnal Ilmu Komputer dan Informatika, v. 6, n. 1, p. 58–65, 2020.

MDEMU, M. V. Community's vulnerability to drought-driven water scarcity and food insecurity in central and northern semi-arid areas of Tanzania. Frontiers in Climate, v. 3, 737655, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fclim.2021.737655. Acesso em: 1 ago. 2025.

MOTAMED, M.; DEVISTI, H. Environmental and socio-economic impacts of drought from the viewpoint of Guilan paddy farmers, North of Iran. [S.l.: s.n.], 2012.

NTALI, Yeluma Mary; LYIMO, James G. Community livelihood vulnerability to drought in semi-arid areas of northern Cameroon. Discover Sustainability, v. 3, n. 1, p. 22, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s43621-022-00089-4. Acesso em: 1 ago. 2025.

RAHMAT, S. N.; JAYASURIYA, N.; BHUIYAN, M. Trend analysis of drought using standardised precipitation index (SPI) in Victoria, Australia. Hydrology and Water Resources Symposium 2012. Engineers Australia, p. 441, 2012.

SENA, Aderita et al. Managing the health impacts of drought in Brazil. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 11, n. 10, p. 10737–10751, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijerph111010737. Acesso em: 1 ago. 2025.

SUGG, M. et al. A scoping review of drought impacts on health and society in North America. Climatic Change, v. 162, n. 3, p. 1177–1195, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10584-020-02848-6. Acesso em: 1 ago. 2025.