



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
TECNOLOGIA EM GEOPROCESSAMENTO**

VIRGÍLIO CARDOZO DA SILVA NETO

**ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA SECA NA BACIA DO RIO PARNAÍBA (1985 –
2024) COM BASE EM ÍNDICES ESPECTRAIS E COMPUTAÇÃO EM NUVEM**

TERESINA

2025

VIRGÍLIO CARDOZO DA SILVA NETO

ANÁLISE ESPAÇO TEMPORAL DA SECA NA BACIA DO RIO PARNAÍBA (1985 –
2024) COM BASE EM ÍNDICES ESPECTRAIS E COMPUTAÇÃO EM NUVEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Tecnologia em Geoprocessamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. Dr. Reurysson Chagas de Sousa Morais.

TERESINA

2025

ANALISE ESPAÇO TEMPORAL DA SECA NA BACIA DO RIO PARNAÍBA (1985 – 2024) COM BASE EM ÍNDICES ESPECTRAIS E COMPUTAÇÃO EM NUVEM

Virgílio Cardozo da Silva Neto ¹
Prof. Dr. Reurysson Chagas de Sousa ²

RESUMO

O artigo apresenta uma análise espaço-temporal da seca na Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba cobrindo o período de 1985 a 2024. Utilizando sensoriamento remoto e a plataforma Google Earth Engine, foi aplicado o Índice de Vegetação Padronizado, para monitorar o vigor da vegetação e as anomalias hídricas na bacia. A série histórica do índice revelou uma clara transição de regime ao longo das quatro décadas. O período de 1985 até 2009 foi caracterizado por uma alta frequência e severidade da seca, com valores de predominantemente negativos, indicando estresse hídrico e alta vulnerabilidade do ecossistema. Em contraste, o período mais recente, de 2010 a 2024, demonstrou uma significativa recuperação e uma melhoria consistente nas condições de umidade, marcada pela ascensão do índice de Vegetação para a faixa positiva. Os resultados, confirmados pela distribuição espacial, indicam uma substituição das extensas áreas de seca por condições normais a úmidas nos anos mais recentes. O estudo conclui que a metodologia com o método é eficiente para o monitoramento da seca do Parnaíba, fornecendo dados essenciais para o planejamento hídrico e a gestão ambiental na região.

Palavras-chave: svi; seca; parnaíba; gee.

ABSTRACT

The article presents a spatio-temporal analysis of drought in the Parnaíba River Hydrographic Basin covering the period from 1985 to 2024. Utilizing remote sensing and the Google Earth Engine platform, the Standardized Vegetation Index was applied to monitor vegetation vigor and water anomalies in the basin. Keywords: Tradução dos termos descritores para o inglês. The historical series of the index revealed a clear regime transition over the four decades. The initial period, from 1985 to 2009, was characterized by a high frequency and severity of drought, with predominantly negative values, indicating water stress and high ecosystem vulnerability. In contrast, the most recent period, from 2010 to 2024, demonstrated a significant recovery and a consistent improvement in moisture conditions, marked by the index's ascent to the positive range. The results, confirmed by the spatial distribution, indicate a replacement of extensive drought areas with normal to humid conditions in recent years. The study concludes that the methodology is efficient for monitoring drought in the Parnaíba basin, providing essential data for water planning and environmental management in the region.

Keywords: svi; drought; Parnaíba; gee.

15/12/2025

¹ Graduando em Geoprocessamento. IFPI. virgiliocardozo2018@gmail.com.

² Dr. em Meio Ambiente. IFPI. reurysson@ifpi.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno global frequentemente associado às mudanças climáticas, ocorrendo em diferentes escalas espaciais e temporais. Pode ser classificada em tipos meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica (Gonçalves *et al.*, 2021). Dada sua complexidade multifatorial, a seca afeta distintos aspectos da sociedade e do ambiente, acarretando perdas econômicas nos setores produtivos, transformações ambientais significativas e, principalmente, impactos sobre os recursos hídricos (Fernandes *et al.*, 2021).

No Brasil, especialmente na região Nordeste, a seca representa um desafio histórico, com efeitos significativos sobre a agropecuária, os recursos hídricos e as populações locais (Marengo *et al.*, 2013; Santana; Santos, 2020). Suas causas estão associadas a fenômenos climáticos em diferentes escalas, do local ao global (Buriti *et al.*, 2020; Magalhães, 2016).

A bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, a maior bacia inteiramente nordestina, tem vivenciado transformações socioespaciais impulsionadas pelo agronegócio, o que gera preocupações quanto aos impactos ambientais, sobretudo sobre rios e reservatórios artificiais (Chagas; Lizandro, 2021; Moraes, 2023). Nessa região, a seca é reconhecida como a principal responsável por prejuízos agrícolas e pela redução da disponibilidade hídrica superficial.

O monitoramento da seca tem se beneficiado dos avanços no sensoriamento remoto e na computação em nuvem, especialmente no uso de índices espectrais aplicados à vegetação e aos recursos hídricos. Plataformas como o Google Earth Engine (GEE) possibilitam a análise de grandes volumes de dados geoespaciais, viabilizando estudos multiescalares e temporais (Bacani *et al.*, 2015; Lü *et al.*, 2019)

. Entre os índices mais utilizados destaca-se o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Rouse *et al.*, 1973), que normaliza a refletância da vegetação e indica o nível de presença de clorofila. Trata-se de um dos índices mais antigos e mais utilizados em estudos de vegetação.

Outro índice relevante é o Standardized Vegetation Index (SVI), apresentado por Peters *et al.* (2002), que se baseia em médias históricas para analisar anomalias na vegetação e tem sido amplamente aplicado em análises temporais de seca. (Rotjanakusol; Laosuwan, 2019), por exemplo, aplicaram o SVI na avaliação de eventos de seca na Tailândia entre 2014 e 2016 e concluíram que a metodologia é eficiente, após validação com dados de precipitação.

No Brasil, (Leivas *et al.*, 2014) concluíram que o SVI pode ser utilizado como indicador de estiagem e apresenta potencial para subsidiar a tomada de decisão no setor agrícola. Devido aos bons resultados obtidos, essa metodologia passou a ser recomendada pela United Nations

Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response (UN-SPIDER, 2020).

Apesar do avanço desses métodos, ainda são escassos os estudos que aplicam a estatística espacial de forma sistemática para compreender a dinâmica da seca na bacia do Rio Parnaíba.

Assim, este estudo tem como objetivo analisar a dinâmica da seca na bacia do Rio Parnaíba entre 1985 e 2024, utilizando índices de vegetação derivados de imagens de satélite e técnicas de estatística espacial para identificar correlações com variáveis climáticas, como temperatura, precipitação e evapotranspiração. Pretende-se contribuir para o planejamento estratégico do uso dos recursos naturais e subsidiar ações de adaptação e mitigação dos efeitos da seca na região.

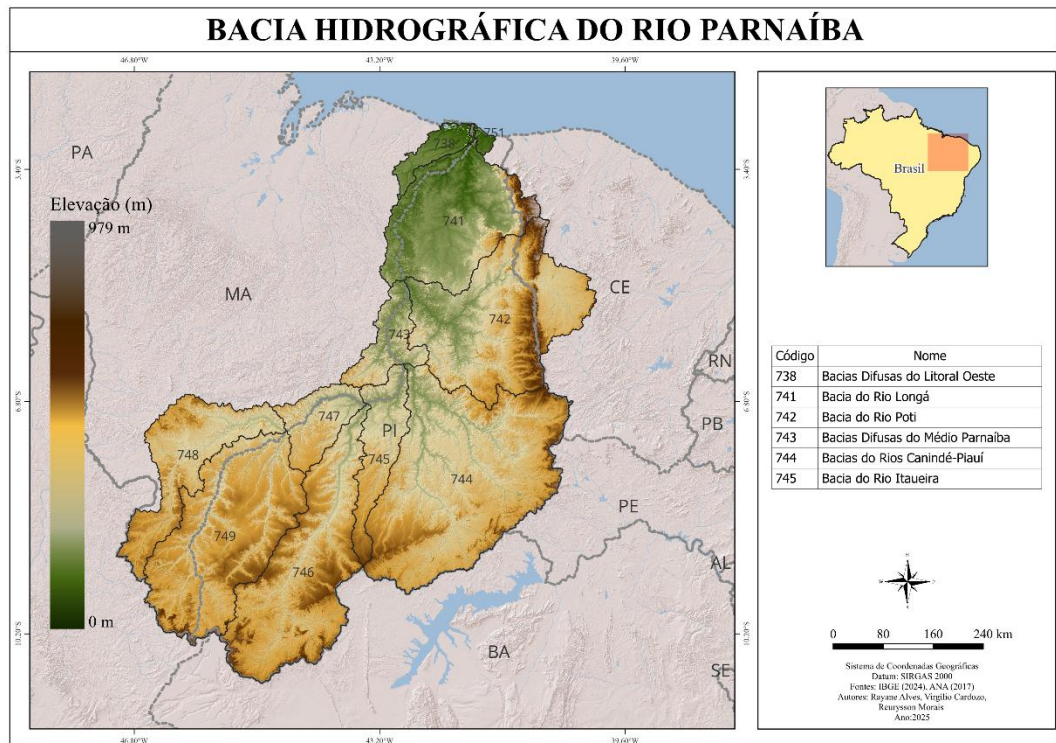
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba (BHRP) é a maior bacia originalmente nordestina com aproximadamente 333,920 km². Fica localizada entre as coordenadas 2°21'S e 11°06'S de latitude e 47°21'W e 39°44'W de longitude. Estende-se por três estados da região Nordeste, com aproximadamente 25% de sua área pertencente ao Maranhão, 5% ao Ceará e 75% ao Piauí. O rio Parnaíba, que separa os estados do Piauí e Maranhão, tem suas principais nascentes localizadas na chapada das mangabeiras, na região de tríplice fronteira entre os estados do Piauí, Maranhão e Tocantins. Possui cerca de 1.344 km de extensão até desaguar no Oceano Atlântico em forma de delta.

Seus principais afluentes são os rios Longá, Poti, Canindé e Gurguéia, todos situados em sua margem direita. Dentre eles, o rio Poti é o único que nasce em outro estado, o Ceará. Já na margem esquerda, destaca-se o rio das Balsas, principal afluente da porção maranhense da bacia, caracterizado por um expressivo potencial aquífero (Filho *et al.*, 2017). A Figura 1 traz a localização da bacia e suas subdivisões.

Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Parnaíba, com representação da altimetria e das subdivisões hidrográficas.



Fonte: Autores (2025)

A Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba (BHRP) abrange 277 municípios em seu território, total ou parcialmente, sendo 223 piauienses, 35 maranhenses e 19 cearenses. O estado do Piauí está quase integralmente inserido na bacia, com exceção de uma pequena faixa litorânea. A maior parte dos municípios cearenses incluídos localiza-se em áreas de litígio com o Piauí. Os principais aglomerados urbanos correspondem às cidades de Teresina (PI) e Timon (MA), que são cidades vizinhas separadas pelo rio Parnaíba e juntas somam quase 1 milhão de habitantes, sendo Teresina responsável pela maior parcela, com mais de 866 mil moradores, segundo o Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022). De forma geral, a bacia apresenta uma expressiva população em seus limites territoriais, estimada em mais de 3,5 milhões de habitantes (CBH Parnaíba, 2025).

Devido à sua grande extensão territorial, a Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba apresenta ampla diversidade ambiental, especialmente em relação ao relevo, ao clima e à vegetação. A região caracteriza-se por diferentes regimes climáticos: semiárido em sua porção leste, subúmido na porção oeste e úmido na porção sudoeste da bacia. Essa variabilidade reflete-se na heterogeneidade de seus biomas, que incluem áreas de Cerrado, Caatinga, bioma costeiro e zonas de transição, como Caatinga–Cerrado e Caatinga–Amazônia, especialmente no estado do Maranhão (Macedo; Santos; Sousa, 2017).

Os solos da região são majoritariamente formados por latossolos, que, em virtude de sua composição química, apresentam elevada fertilidade e são propícios à atividade agrícola, como ocorre no sul do estado do Piauí, onde a produção agrícola de alta precisão constitui o principal agente econômico regional. Os principais usos desse tipo de solo incluem a agricultura, a pecuária e a urbanização (Brasil, 2006).

A variação altimétrica da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba é apresentada na Figura 1. As maiores elevações, atingindo cotas em torno de 800 m, concentram-se na porção leste, em uma estreita e alongada faixa correspondente ao Planalto da Ibiapaba, localizado na divisa entre os estados do Piauí e Ceará. Essa formação exerce forte influência sobre os ventos de baixa altitude provenientes do Oceano Atlântico, que se deslocam em direção ao interior da bacia. As áreas de menor altitude, por sua vez, situam-se no extremo norte, onde o rio Parnaíba se ramifica para formar o delta, antes de desaguar no oceano, chegando ao nível do mar, enquanto a porção central caracteriza-se por um relevo mais plano.

De acordo com Rivas (1996), o relevo da bacia apresenta um padrão geral de inclinação no sentido sul–norte, acompanhando o gradiente altimétrico que orienta o fluxo do rio Parnaíba em direção ao Atlântico. Destacam-se as ocorrências de planaltos ao sul, como a Chapada das Mangabeiras, onde o rio Parnaíba tem suas nascentes na cota de 700 m, associadas às cabeceiras dos principais afluentes, e a presença da Depressão Sertaneja na porção sudeste, que configura uma extensa área de relevo suavemente ondulado e altitudes intermediárias. Esse conjunto geomorfológico influencia diretamente os processos de escoamento superficial, erosão e deposição de sedimentos ao longo da bacia.

As maiores elevações na bacia (entre 600 m e 800 m) são encontradas nas Chapadas do Alto Parnaíba e Chapada das Mangabeiras, sendo a nascente do rio Parnaíba na Chapada das Mangabeiras na cota de 700 m, e a Chapada do Araripe (na porção sudeste/leste) com cotas em torno de 800 m.

2.2 Base de Dados e Procedimentos de Análise

A análise espacial e temporal da seca na Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba teve como objetivo avaliar o comportamento da vegetação diante da possível influência do déficit hídrico anual, tanto em relação às águas superficiais quanto às precipitações pluviais, identificando suas distribuições espaciais, níveis de severidade e zonas de maior recorrência da seca. Para isso, foram analisadas as médias anuais de seca com base na reflectância da vegetação, considerando uma série histórica de 1985 a 2024, a fim de identificar padrões temporais e espaciais de ocorrência. Ressalta-se que não foram utilizados dados pluviométricos neste estudo.

Para este estudo foram utilizados conjuntos de imagens dos satélites Landsat 5 (Nível 2, Coleção 2, *Tier 1*) e Landsat 8 (Nível 2, Coleção 2, *Tier 1*). As imagens do Landsat 5 compreendem o período de 1985 a 2011, correspondente à sua disponibilidade temporal, uma vez que o satélite foi desativado em 2012. Já para o período de 2014 a 2024, empregaram-se imagens do Landsat 8. Ambos os satélites são operados pelo United States Geological Survey (USGS), órgão responsável pelo serviço geológico dos Estados Unidos.

Esses conjuntos de dados fornecem reflectância de superfície corrigida atmosféricamente, o que reduz a ocorrência de valores espúrios nas imagens. As informações foram adquiridas a partir dos sensores TM (Thematic Mapper) e OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor), respectivamente. Apesar da resolução espacial nativa de 30 m, as análises foram realizadas em escala de 500 m, devido à grande extensão territorial da bacia.

As imagens da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba (BHRP) foram disponibilizadas em formato GeoTIFF por meio do Google Earth Engine (GEE). Mesmo com as correções atmosféricas aplicadas, as imagens passaram por um processo adicional de remoção de nuvens e sombras, utilizando a banda QA_PIXEL, que contém valores de qualidade previamente identificados. A partir dessa banda, foi gerada uma máscara de pixels válidos, excluindo áreas comprometidas.

Para cada ano do período analisado, foram selecionadas imagens correspondentes aos respectivos satélites, restritas à área da bacia e já corrigidas com base no bitmask da banda QA_PIXEL. Em seguida, foram extraídas as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, correspondentes às bandas SR_B3 e SR_B4 no Landsat 5 TM e às bandas SR_B4 e SR_B5 no Landsat 8 OLI. A partir dessas imagens corrigidas, foi gerada uma composição anual utilizando a função mosaic quality do GEE, que prioriza os pixels de melhor qualidade entre as cenas disponíveis, reduzindo a interferência de ruídos, nuvens e valores inconsistentes. Por fim, foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Eq.1).

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde NIR representa a banda do infravermelho e RED corresponde à banda do vermelho.

O NDVI baseia-se no princípio de que vegetações saudáveis refletem intensamente a radiação do infravermelho próximo (NIR) e absorvem grande parte da radiação do vermelho (RED), enquanto áreas com pouca ou nenhuma vegetação apresentam o comportamento inverso. Os valores do índice variam de -1 a 1, sendo que valores próximos de 1 indicam

vegetação densa e saudável, próximos de 0 correspondem a solos expostos ou vegetação esparsa, e valores negativos representam superfícies sem clorofila, como água, nuvens ou sombras (Silva; Francisco; Devide, 2025).

Com os valores anuais do NDVI obtidos para o período de 1985 a 2024, foram calculadas a média e o desvio padrão da série temporal. A partir desses dados, aplicou-se o Índice de Vegetação Padronizado (SVI), proposto por Peters, Lei Ji e Michael Hayes (2002). [], com o objetivo de identificar anomalias no vigor vegetativo em relação à média histórica. O SVI quantifica desvios padronizados do NDVI, permitindo comparar o comportamento da vegetação ao longo do tempo e detectar períodos de seca ou umidade acima do normal (Leivas *et al.*, 2014).

O cálculo do SVI foi realizado pixel a pixel, utilizando o NDVI previamente corrigido para efeitos atmosféricos e de nuvens, a partir de todas as imagens disponíveis dos satélites Landsat 5 e Landsat 8. Esse procedimento permitiu avaliar variações espaciais e temporais do vigor vegetativo em toda a extensão da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba.

A expressão do Índice de Vegetação Padronizado (SVI) está apresentada na Eq.2, e a classificação dos valores é exibida na Tabela 1, na qual os valores inferiores a -2,0 indicam condições extremamente secas e os superiores a 2,0, condições extremamente úmidas.

$$SVI_{ij} = \frac{(NDVI_{ij} - \overline{NDVI}_i)}{\sigma_{NDVI_i}} \quad \text{Eq. 2}$$

onde:

- $NDVI_{ij}$ é o valor do NDVI do pixel i no ano j;
- $\overline{NDVI}_i$ representa a média histórica do NDVI para o mesmo pixel;
- σ_{NDVI_i} é o desvio padrão do NDVI histórico do pixel, indicando a variação em torno da média.

Ressalta-se que os dados de NDVI referentes aos anos de 2002, 2012 e 2013 foram excluídos do cálculo da média e do desvio padrão utilizados na padronização do SVI, uma vez que as imagens de satélite apresentaram falhas e perda de pixels nessas datas, impossibilitando sua avaliação confiável.

Tabela 1. Classificação dos valores do Índice de Vegetação Padronizado (SVI)

	Extremamente Úmido	$SVI > 2,0$
	Severamente Úmido	$1,5 < SVI \leq 2,0$
	Moderadamente Úmido	$1,0 < SVI \leq 1,5$
	Normal	$-1,0 \leq SVI \leq 1,0$
	Moderadamente Seco	$-1,5 \leq SVI < 1,0$
	Severamente Seco	$-2,0 \leq SVI < -1,5$
	Extremamente seco	$SVI \leq -2,0$

Fonte: Autores (2025).

Essa metodologia foi adotada por basear-se no conceito estatístico de normalização por z-score, que transforma os valores do índice de vegetação em uma escala padronizada. Nessa escala, os valores dos pixels indicam quantos desvios padrão estão acima ou abaixo da média histórica, representando assim anomalias de vegetação. Esse procedimento permite avaliar a distribuição espacial e temporal da seca em relação a cada ano ou intervalo específico, conforme aplicado por Rotjanakusol; Laosuwan (2019).

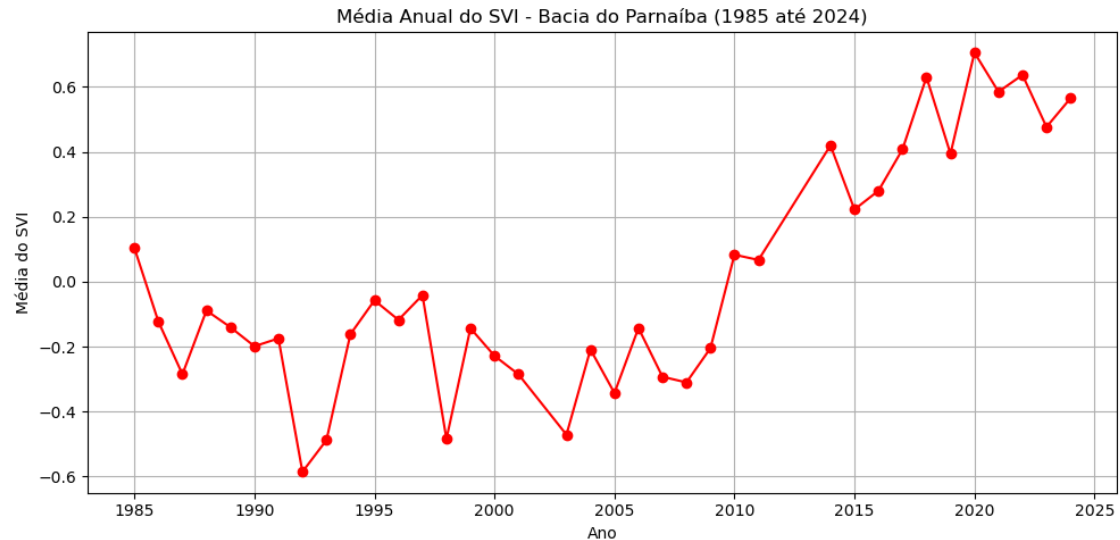
Por fim, a imagem composta, formada pelas bandas do SVI correspondentes a cada ano, foi exportada para o ambiente Python, no *software* Jupyter Notebook, onde ocorreu a separação das imagens anuais, a organização dos respectivos dados e a geração de mapas contínuos para visualização e comparação dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCURSÕES

Com base na série histórica do SVI com auxílio do NDVI, entre 1985 e 2024, foi possível identificar a variabilidade da seca na Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba. Revelando uma tendência geral de recuperação da saúde da vegetação e de diminuição da severidade da seca ao longo das quase quatro décadas de imagens.

A figura 4 com o gráfico da média anual do SVI mostra claramente uma transição de um período predominantemente com valores negativos, indicativos de seca e estresse hídrico na vegetação para um período com valores majoritariamente positivos que são indicativos de condições normais a úmidas.

Figura 4 – Distribuição temporal do Índice de Vegetação Padronizado (SVI) na Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba entre 1985 e 2024.



Autores, 2025

A Média Anual do SVI é a uma evidência da transição de regime. A série temporal pode ser amplamente dividida em dois períodos distintos, demarcados pela persistência dos sinais de seca e da recuperação hídrica com valores de SVI positivo.

Entre 1985 até 2009 esse período inicial é caracterizado pela prevalência de valores de SVI negativos e pela alta oscilação interanual. A vegetação da bacia demonstrou maior suscetibilidade a períodos de déficit hídrico, com a média anual do SVI frequentemente situando-se abaixo de zero.

Observa-se a ocorrência de episódios de seca extrema, onde o SVI atingiu seus valores mais negativos próximos ou abaixo de -0.4, indicando um severo estresse vegetal e uma significativa redução na biomassa. Estes eventos não foram isolados, mas parte de uma fase em que o sistema hídrico e a cobertura vegetal da bacia estavam mais propensos a condições de seca. O regime climático desse período impôs períodos de recuperação mais curtos ou incompletos entre os eventos de seca.

Mas em contraste entre os anos de 2010 e 2024, a partir da virada da década, a série histórica demonstra uma mudança consistente em direção a valores de SVI positivos e elevados, indicando uma melhoria substancial nas condições de umidade e saúde da vegetação. Esta fase sugere uma tendência de redução da frequência e intensidade média da seca em escala anual e um período de recuperação da seca após anos de stress vegetal e hídrico.

Esse recorte recente tem apresentado alguns dos valores de SVI mais altos de todo o registro, superando consistentemente 0.4 e chegando perto de 0.7. Isso sugere não apenas o intervalo ou diminuição dos períodos de seca extrema, mas também a ocorrência de anos acima da média em termos de disponibilidade hídrica e vigor vegetal. Embora a variabilidade interanual continue presente, os períodos com SVI negativo tornam-se menos frequentes e menos intensos nesta fase, reforçando a ideia de uma maior resiliência do ecossistema e/ou uma alteração nos padrões de precipitação que favorecem o acúmulo de água.

A análise espacial dos mapas de SVI anuais que se apresenta na figura 5 oferece um complemento crucial à análise temporal, revelando como a distribuição da seca se alterou geograficamente nos anos de 1985 até 2014, permitindo a visualização da seca nos seus respectivos anos e a corroboração com o gráfico.

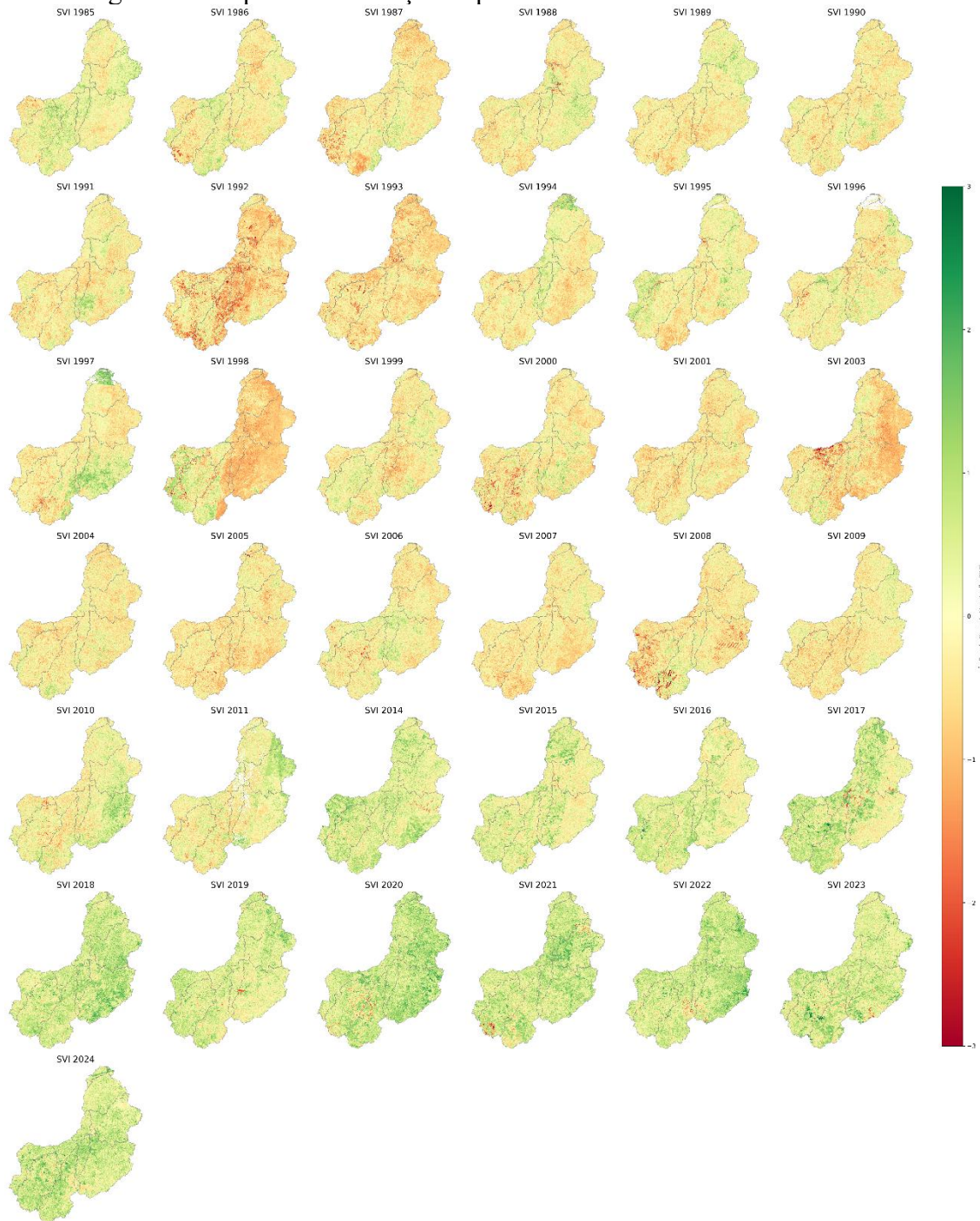
Como ficou evidente no gráfico os anos de 1985 até 2009 foram os anos mais intensos de seca, com a sua distribuição por quase toda a bacia exceto em alguns anos com a presença esparsa de vegetação saudável em algumas áreas, tendo o ano de 1992 como o mais grave com a seca com valores extremos se apresentando em quase toda extensão, principalmente na região central, o único ano desse recorte da primeira fase que está acima da média histórica é o ano de 1985 que se apresenta com ótimos valores de SVI da vegetação positivo.

As manchas de cores quentes como vermelho e laranja, indicam SVI de > -3.0 a -1.0 e como são mais difusas e abrangentes por toda a bacia. Isso aponta para uma seca de caráter regional e generalizado, afetando grandes extensões territoriais da Bacia do Parnaíba. Nesse período a seca não apresenta um padrão de distribuição, ocorrendo em praticamente em todas as regiões.

Entre 2010 e 2024 no período mais recente, as áreas em estresse hídrico com cores alaranjadas e vermelhas diminuem drasticamente em extensão que correspondem a áreas de seca, tornando-se mais localizadas e pontuais, enquanto a vasta maioria da bacia é coberta por tons de verde indicando SVI positivo, de > 0.0 a 3.0 . Tal distribuição geográfica corrobora a recuperação observada na média anual, sugerindo que as condições favoráveis à vegetação se estabeleceram de forma generalizada na bacia, com os maiores picos de SVI positivo entre 2018 e 2024 como fica amostra na figura 5 com grandes áreas em verde e no gráfico da média anual.

Em síntese, a evolução histórica do SVI na Bacia do Parnaíba demonstra uma clara inversão de polaridade ao longo de quatro décadas, de um regime onde a seca era um evento frequente, severo e geograficamente disperso, para um regime recente onde o vigor vegetal é predominante, e os eventos de seca, quando ocorrem, são de menor magnitude e abrangência.

Figura 5 – Mapa da distribuição Espacial do SVI nos anos de 1985 a 2024



Fonte: Autores, 2025

4 CONCLUSÃO

A análise da série histórica de 1985 a 2024, empregando o SVI, derivado do sensoriamento remoto e do NDVI, revelou padrões cruciais na dinâmica da seca e do estresse hídrico na Bacia do Parnaíba. A integração da análise temporal do SVI médio anual e da sua distribuição espacial permitiu identificar uma clara transição de regime ao longo das quase quatro décadas de observação.

As conclusões indicam que o período inicial, que se estende aproximadamente de 1985 até o final da primeira década do século 21, foi caracterizado pela recorrência e severidade da seca, com valores de SVI predominantemente negativos, refletindo uma alta vulnerabilidade do ecossistema e estresse prolongado na vegetação.

Em contraste, o período subsequente, iniciado por volta de 2010 e estendendo-se até o presente, demonstrou uma significativa recuperação nas condições hídricas e de vigor da vegetação, marcada pela ascensão consistente do SVI médio anual para a faixa positiva. Essa mudança é visualmente reforçada nos mapas de SVI, que mostram a substituição das extensas áreas de seca por uma dominância de condições normais a úmidas nos anos mais recentes.

Em suma, os dados de sensoriamento remoto não apenas confirmam a ocorrência de longos e severos períodos de seca no passado da bacia, mas também apontam para uma tendência atual de maior resiliência e melhores condições de saúde da vegetação, um resultado que é vital para o planejamento hídrico e a gestão ambiental na Bacia do Parnaíba.

O SVI funcionou como uma atividade eficiente para a identificação da seca na bacia do Parnaíba, permitindo a detecção precisa de áreas de seca valores negativos e de recuperação valores positivos.

O emprego de longas séries temporais de dados de satélite na Bacia do Parnaíba possibilitou a identificação dos padrões espaciais de vulnerabilidade nas diferentes sub-regiões e a quantificação de longos períodos de seca e sua tendência de recuperação fornecendo informações para análise e monitoramento da bacia e seus padrões recentes de comportamento vegetal e hídrico. A abordagem baseada em sensoriamento remoto, portanto, é indispensável para estudos que buscam mapear a variabilidade climática em escalas regionais.

REFERÊNCIAS

BACANI, V. M. *et al.* REMOTE SENSING AND GIS APPLIED TO ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL FRAGILITY IN THE RIVER BASIN. **Mercator**, [s. l.], v. 14, n. 02, p. 119–135, 2015.

BRASIL. **Caderno da Região Hidrográfica do Parnaíba**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. (Caderno da Região Hidrográfica . Caderno da Região Hidrográfica).

BURITI, C. D. O. *et al.* Un Siglo de Sequías: ¿Por qué las Políticas de Agua no Desarrollaron la Región Semiárida Brasileña?. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 683–688, 2020.

CHAGAS, R.; LIZANDRO. ANÁLISE ESPACIAL DA VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARNAÍBA, NORDESTE DE BRASIL. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, [s. l.], v. 2, n. 2, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpi.br/index.php/acipi/article/view/902/811>. Acesso em: 3 set. 2025.

FILHO, F. C. *et al.* MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA Ministro de Estado. **Relatório Situacional dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba**, [s. l.], p. 16, 2017.

GONÇALVES, S. T. N. *et al.* Índices e Metodologias de Monitoramento de Secas: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 36, n. 3 suppl, p. 495–511, 2021.

LEIVAS, J. F. *et al.* AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO PADRONIZADO NO MONITORAMENTO INDICATIVO DE ESTIAGENS EM PERÍODOS CRÍTICOS DA SOJA NO SUL DO BRASIL. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 66, n. 5, 2014. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44704>. Acesso em: 8 set. 2025.

LÜ, G. *et al.* Reflections and speculations on the progress in Geographic Information Systems (GIS): a geographic perspective. **International Journal of Geographical Information Science**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 346–367, 2019.

MACEDO, M. J. H.; SANTOS, F. A. C.; SOUSA, F. D. A. S. D. Geoprocessamento aplicado as características físicas e biofísicas da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba. **Revista de Geografia**, [s. l.], v. 34, n. 2, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229257>. Acesso em: 3 set. 2025.

MAGALHÃES. **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. [S. l.]: Cgee, 2016.

MARENGO, J. A. *et al.* Two Contrasting Severe Seasonal Extremes in Tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and Drought in Northeast Brazil. [s. l.], 2013. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/26/22/jcli-d-12-00642.1.xml>. Acesso em: 26 abr. 2025.

MORAIS, R. C. D. S. Monitoramento mensal de reservatórios hídricos superficiais do estado do Piauí (Brasil) utilizando imagens de satélite e computação em nuvem (2015 – 2021). **Caminhos de Geografia**, [s. l.], v. 24, n. 95, p. 131–144, 2023.

MORAIS, R. C. de S.; ABREU, L. P. de. Análise espacial da variabilidade de precipitação na bacia hidrográfica do rio Parnaíba, nordeste de Brasil. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, [s. l.], v. 2, n. 2, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpi.br/index.php/acipi/article/view/902/811>. Acesso em: 4 abr. 2024.

PETERS, E. A. W.-S.; LEI JI, A. V.; MICHAEL HAYES, M. D. S. Drought Monitoring with NDVI-Based Standardized Vegetation Index. [s. l.], v. 68, p. 71–75, 2002.

RIVAS, M. P. **Macrozoneamento geoambiental da bacia hidrográfica do rio Parnaíba**. Rio de Janeiro: IBGE, Primeira Divisão de Geociências do Nordeste, 1996. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=284769&view=detalhes>.

ROTJANAKUSOL, T.; LAOSUWAN, T. Drought Evaluation with NDVI-Based Standardized Vegetation Index in Lower Northeastern Region of Thailand. **Geographia Technica**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 118–130, 2019.

SANTANA, A. S. D.; SANTOS, G. R. D. Impactos da seca de 2012-2017 na região semiárida do Nordeste: notas sobre a abordagem de dados quantitativos e conclusões qualitativas. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental (BRUA)**: n. 22, [s. l.], v. 22, p. 119–129, 2020.

SILVA, D. G. D. O.; FRANCISCO, C. N.; DEVIDE, A. C. P. Análise dos sistemas agroflorestais pelo índice espectral de vegetação em assentamento rural. **Revista NERA**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. e9985, 2025.

BRASIL Comitê da bacia hidrográfica do parnaíba. **CBH Parnaíba**. 2023. Disponível em: <https://parnaiba.cbh.gov.br/>. Acesso em: 6 set. 2025.

GOOGLE EARTH ENGINE. 2010. Disponível em: <https://earthengine.google.com/>. Acesso em: 5 fevereiro. 2024.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Latest Earthquakes**. 2000. Disponível em: <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/latest-earthquakes>. Acesso em: 10 set. 2025.