

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS DE MUDANÇAS A PARTIR DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS DAS REGIÕES INTERMEDIÁRIAS DO ESTADO DE PERNAMBUCO

Ester Milena dos Santos

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil
ester.milena@ufpe.br

Alfredo Ribeiro Neto

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil
alfredo.ribeiro@ufpe.br

Jocimar Coutinho Rodrigues Junior

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil
jocimar.junior@ufpe.br

Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil
anderson.paiva@ufpe.br

RESUMO

A intensificação das dinâmicas antrópicas impacta os recursos ambientais e necessita do uso de ferramentas de geoprocessamento para captar a extensão e a periodicidade das mudanças territoriais e auxiliar monitoramento das modificações. Realizou-se um monitoramento das mudanças biofísicas em três Regiões Intermediárias do estado de Pernambuco, Brasil, no período de 1985 a 2022 pela estatística de tendências Mann-Kendall. Foram analisados parâmetros como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), bem como dados de precipitação. Os resultados apontaram tendências distintas nas três regiões. Na Região Intermediária de Serra Talhada e Petrolina, observou-se um aumento no NDVI, sugerindo um possível crescimento da biomassa vegetal, embora o percentual de vegetação estimado tenha diminuído. Na Região Intermediária de Caruaru, o NDVI também aumentou, indicando um adensamento da vegetação, enquanto o NDWI mostrou uma tendência de decréscimo, possivelmente devido a mudanças no uso da terra. Na Região Intermediária de Recife, houve um aumento no NDVI, sugerindo uma expansão da vegetação, mas o NDWI apontou uma tendência de redução de áreas de corpos d'água, provavelmente relacionada ao desenvolvimento urbano e industrial. Destacam a importância do monitoramento de parâmetros biofísicos para entender as mudanças nas paisagens regionais.

Palavras-chave: Classes MapBiomass. Índices espectrais. Mapeamento do solo. Messorregião. Tendência Mann-Kendall.

TREND ANALYSIS OF CHANGES BASED ON BIO-PHYSICAL PARAMETERS OF INTERMEDIATE REGIONS IN THE STATE OF PERNAMBUCO

ABSTRACT

The intensification of anthropogenic dynamics has an impact on environmental resources and requires the use of geoprocessing tools to capture the extent and periodicity of territorial changes and help monitoring changes. This study monitored biophysical changes in three Intermediate Regions in the state of Pernambuco, Brazil, over the period from 1985 to 2022 using Mann-Kendall trend statistics. Parameters such as the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), the Normalised Difference Water Index (NDWI) and precipitation data were analysed. The results showed different trends in the three regions. In the Intermediate Region of Serra Talhada and Petrolina, an increase in NDVI was observed, suggesting a possible increase in plant biomass, although the estimated percentage of vegetation decreased. In the Intermediate Region of Caruaru, the NDVI also increased, indicating a densification of vegetation, while the NDWI showed a downward trend, possibly due to changes in land use. In the Intermediate Region of Recife, there was an increase in NDVI, suggesting an expansion of vegetation, but the NDWI pointed to a downward trend in water body areas, probably related to urban and industrial development. These findings

highlight the importance of monitoring biophysical parameters to understand changes in regional landscapes.

Keywords: MapBiomass classes. Spectral indices. Soil mapping. Mann-Kendall trend. Mesoregions.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, à medida que as preocupações ambientais se intensificaram, cresce a relevância do uso de técnicas de geoprocessamento como ferramentas que possibilitem estudar mudanças no uso da terra de modo a compreender as dinâmicas da influência antrópica nos ecossistemas. Dentre essas técnicas enquadra-se o sensoriamento remoto que vem ocupando espaço em análises de monitoramento ambiental (Liu *et al.*, 2018).

O sensoriamento remoto consiste na aquisição de informações sobre a superfície terrestre por meio da análise de dados provenientes de satélites, drones, aeronaves ou outras fontes remotas. Com a capacidade de obter dados em larga escala e de forma regular, essa tecnologia permite a obtenção de informações geoespaciais para uma variedade de aplicações, incluindo agricultura, monitoramento de desastres naturais, planejamento urbano, conservação da biodiversidade entre outras (Andrade Silva; Farias, 2021; Rivera-Marin; Dash; Ogutu, 2022; Ewane *et al.*, 2023; Kamran; Yamamoto, 2023).

Advindos de relações de produtos do sensoriamento remoto, os índices biofísicos são parâmetros que descrevem características da superfície terrestre, como a vegetação, a umidade do solo e a temperatura da superfície (Inocêncio; Ribeiro Neto; Souza, 2020; Melo *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023). Tais índices são usados para avaliar a saúde dos ecossistemas, monitorar mudanças no uso da terra e prever eventos climáticos extremos, que apresentam como exemplo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI).

A importância da aplicação dessas técnicas está relacionada à sua capacidade de fornecer dados precisos e consistentes ao longo do tempo, permitindo que os cientistas e os tomadores de decisão monitorem tendências ambientais, avaliem o impacto das atividades humanas e adotem medidas adequadas de mitigação (Kamran; Yamamoto, 2023). Além disso, o sensoriamento remoto e os índices biofísicos desempenham um papel crucial na pesquisa sobre as mudanças climáticas, uma vez que permitem o acompanhamento de variáveis climáticas, como o aumento da temperatura global e as mudanças nos padrões de precipitação (Rivera-Marin; Dash; Ogutu, 2022).

O estado de Pernambuco, situado na região Nordeste do Brasil, é uma região de grande diversidade geográfica, com suas regiões apresentando características únicas em termos de clima, cobertura de solo e ocupação humana. Este artigo se concentra em analisar a dinâmica da vegetação, corpos d'água e precipitação em três Regiões Intermediárias do Estado: Região Intermediária de Recife (RIR), Região Intermediária de Caruaru (RIC) e Região Intermediária de Serra Talhada e Petrolina (RISTP). Cada uma dessas regiões possui suas particularidades em relação ao uso da terra e às condições climáticas, o que as torna alvos ideais para um estudo abrangente sobre as mudanças biofísicas ao longo do tempo.

A RIR é caracterizada por seu clima tropical litorâneo úmido e densidade populacional significativa. A RIC, por sua vez, possui um certo dinamismo industrial e características de área de transição de clima tropical subúmido para semiárido. Já a RISTP, no extremo oeste do Estado, enfrenta condições climáticas de semiárido com altas temperaturas e chuvas escassas. As diferentes características de ocupação, atividades econômicas e padrões climáticos nessas regiões oferecem um cenário ideal para a análise das tendências em índices biofísicos (Alvares *et al.*, 2013; Bezerra *et al.*, 2021).

Este estudo utiliza dados de satélite e informações de precipitação ao longo de um período que abrange quase quatro décadas, de 1985 a 2022, para avaliar as tendências nessas regiões. Além disso, aplicou-se o teste estatístico de Mann-Kendall para identificar qualquer tendência significativa nos índices espectrais e percentuais de vegetação e corpos d'água. Os resultados deste estudo fornecem *insights* valiosos sobre como a vegetação, a disponibilidade de água e as condições climáticas evoluíram ao longo do tempo em Pernambuco, com implicações importantes para o manejo sustentável da terra e a compreensão das mudanças ambientais na região.

A compreensão dessas tendências nos permite avaliar o impacto das atividades humanas, como a urbanização e a agricultura, nas paisagens naturais e na sustentabilidade dos ecossistemas locais. Além disso, as considerações deste estudo podem ser usadas para orientar políticas de manejo de recursos

naturais e estratégias de adaptação às mudanças climáticas em Pernambuco e em regiões semelhantes no Nordeste do Brasil.

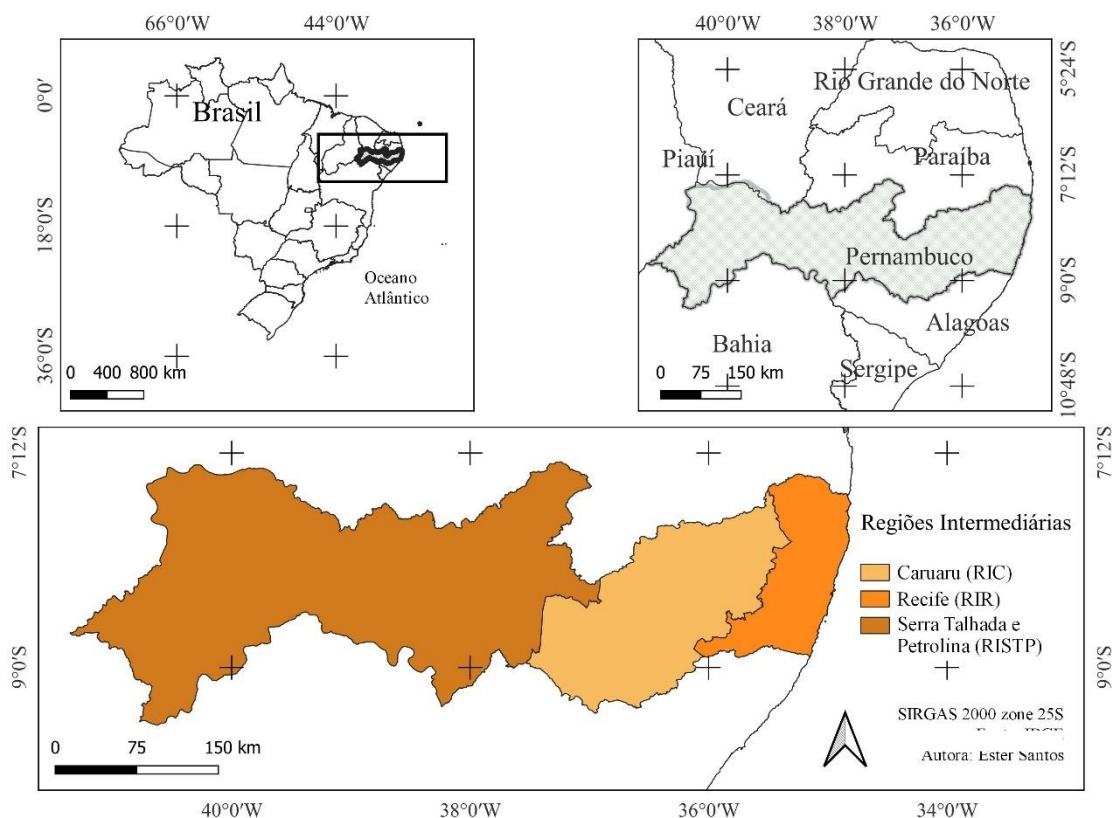
METODOLOGIA

Área de estudo

O estado de Pernambuco localiza-se no centro leste da Região Nordeste brasileira, sua costa é banhada pelo Oceano Atlântico e tem limite ao norte com o Estado da Paraíba, iniciando seu litoral no Município de Goiana, já ao Sul faz divisa com o estado de Alagoas, finalizando no município de São José da Coroa Grande.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), as antigas mesorregiões (Zona da Mata que contempla as mesorregiões da Mata e Metropolitana; Agreste; e o Sertão que abrange Sertão Pernambucano e Sertão do São Francisco) (IBGE, 1990), atualmente denominadas de Regiões Intermediárias, têm identidade regional sendo definidas segundo as seguintes dimensões: a dimensão determinante sendo o processo social; a condicionante sendo o quadro natural; e a rede de comunicação e de lugares, como elemento da articulação espacial. O estado de Pernambuco possui cinco Regiões Intermediárias, que para esse estudo foram agrupadas em três, conforme ilustrado na Figura 1, sendo: Região Intermediária de Recife (RIR) antigas mesorregiões da Mata e Metropolitana; Região Intermediária de Caruaru (RIC), antiga mesorregião do Agreste; e o Região Intermediária de Serra Talhada e Petrolina (RISTP) as antigas mesorregiões do Sertão Pernambucano e do Sertão do São Francisco.

Figura 1 - Divisão das Regiões Intermediárias no estado de Pernambuco



Fonte: IBGE (1990). Elaboração: Os Autores (2023).

A RISTP possui 56 municípios, área territorial de 62.374,33 km², com população de 1.884.954 habitantes, tem como característica de ocupação áreas urbanas de alta densidade de edificações junto a alguns aglomerados rurais, lugarejos e povoados, predominância do clima tropical semiárido com

altas temperaturas, chuvas escassas e mal distribuídas, com longos períodos de estiagem (IBGE, 2022).

Já a RIC possui 71 municípios, área territorial de 24.512,33 km², com população de 2.443.953 habitantes, tem como característica além da ocupação com áreas urbanas de alta densidade de edificações, alguns aglomerados rurais, sendo uma zona de transição de clima semiárido para nnnnnnnhbcc c hhtropical subúmido apresentando uma estação seca de pequena duração que é compensada pelos totais elevados de precipitação (IBGE, 2022).

Por fim, a RIR possui 58 municípios, área territorial de 11.181,20 km², com população de 5.116.294 habitantes, tem como característica de cupação áreas urbanas de alta densidade de edificações, predominância do clima tropical litorâneo úmido sendo quente e úmido apresentando amplitude térmica maior e regimes de chuvas melhor distribuídos acima dos 1.000 mm anuais (IBGE, 2022).

Na RISTP, há o desenvolvimento de atividades pecuárias e agrícolas, em especial de subsistência, junto à expansão de grandes projetos agrícolas de frutas e hortaliças. A RIC apresenta um certo dinamismo industrial com fábricas de grande porte e elevada tecnologia, além do desenvolvimento de atividades agropecuárias. A RIR é a região mais dinâmica apresentando a maior concentração populacional, importantes pólos industriais, intensa concentração e diversificação das atividades de comércio e serviços (Bezerra *et al.*, 2021).

Classes do MapBiomas

Utilizaram-se informações provenientes do projeto MapBiomas, especificamente a coleção 7.0. Essa coleção apresenta ampla série de dados anuais sobre a cobertura e o uso da terra, resultado de uma análise que emprega a classificação pixel a pixel de imagens dos satélites *Landsat*, por meio de algoritmos de aprendizagem de máquina em conjunto com a plataforma *Google Earth Engine (GEE)*, de grande capacidade de processamento em nuvem. No presente estudo, foram adquiridos dados de área dos anos de 1985 a 2022, abrangendo classes representativas de vegetação (incluindo formações florestais, savânicas, mangues, campos alagados e áreas pantanosas) e de corpos d'água. Para o trabalho, optou-se por utilizar valores percentuais das referidas classes, calculados a partir da relação da área da classe pela área total da respectiva região.

Índices espectrais

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) são utilizados no sensoriamento remoto para a avaliação de recursos naturais, como vegetação e água. O NDVI é um índice que avalia a saúde e a densidade da vegetação a partir de dados de sensoriamento remoto sendo expresso na escala de -1 a 1. Valores muito baixos de NDVI (abaixo ou iguais a 0,1) correspondem a áreas áridas de rocha, areia ou neve, valores moderados (entre 0,2 e 0,3) representam arbustos e pastagens, enquanto valores altos (entre 0,6 e 0,8) indicam florestas temperadas e tropicais (Weier; Herring, 2000). Já o NDWI é um índice que avalia a presença de água em uma determinada área a partir de dados de sensoriamento remoto, seu resultado também varia entre -1 e 1, em que valores positivos de +0,2 a +1,0 representam áreas de águas; de 0 a +0,2 indicariam áreas alagadas e com alta umidade; de -0,3 a 0,0 correspondem ao solo com seca moderada e superfícies não aquáticas; e de -1,0 a -0,3 seriam terras áridas, secas e superfícies não aquáticas (Lemenkova; Debeir, 2023).

O cálculo desses dois índices tem por base valores das reflectâncias de imagens de satélites. O NDVI é dado com base na diferença normalizada, Equação 1, entre a reflectância na faixa do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED) do espectro eletromagnético (Kriegler, 1969; USGS, 2023a). O NDWI é determinado com base na diferença normalizada, Equação 2, entre a faixa de verde visível (GREEN) e do infravermelho próximo (NIR) (Mcfeeters, 1996; USGS, 2023b).

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (1)$$

$$\text{NDWI} = (\text{GREEN} - \text{NIR}) / (\text{GREEN} + \text{NIR}) \quad (2)$$

A coleção de imagens de satélite utilizadas adveio dos produtos da missão *Landsat* desenvolvido pela Agência Espacial Americana que teve início na década de 1960 e que ao longo dos anos vem aprimorando e ampliando seus produtos. Para o estudo, utilizaram-se imagens dos projetos *Landsat 5*, *Landsat 7* e *Landsat 8* para cobrir o recorte temporal de 1985 a 2022 com resolução espacial de 30 m

(EMBRAPA, 2023). As imagens foram obtidas e processadas por meio da plataforma do GEE, no Quadro 1 tem-se as características das imagens dos projetos utilizados que já possuem reflectância calibrada no topo da atmosfera. Para a RISTP e a RIC, optou-se por percentuais de cobertura de nuvens de 10%. No entanto, dado o pouco número de imagens para esse valor na RIR utilizou-se o percentual de 30%. Para calcular o NDVI, foram utilizadas as bandas B4 (NIR) e B3 (RED) para Landsat 5 e 7 e bandas B5 (NIR) e B4 (RED) para Landsat 8, ao passo que para o NDWI foram usadas as bandas B2 (GREEN) e B4 (NIR) para Landsat 5 e 7 e bandas B3 (GREEN) e B5 (NIR) para Landsat 8.

Quadro 1 - Características das imagens da coleção Landsat no GEE, para as Regiões Intermediárias de Pernambuco

Satélite	Sensor	ID GEE	Período	REGIÃO	Nº de imagens
Landsat 5	Thematic Mapper	LANDSAT/LT05 /C02/T1_TOA	1985 - 1999	RIC	51
				RISTP	349
				RIR	67
Landsat 7	Enhanced Thematic Mapper Plus	LANDSAT/LE07 /C02/T1_TOA	2000 - 2013	RIC	94
				RISTP	374
				RIR	77
Landsat 8	Operational Land Imager	LANDSAT/LC08 /C02/T1_TOA	2014 - 2022	RISTP	181
				RISTP	430
				RIR	77
TOTAL DE IMAGENS					1700

Legenda: Região Intermediária de Caruaru (RIC), Região Intermediária de Serra Talhada e Petrolina (RISTP), Região Intermediária de Recife (RIR).

Fonte dos Dados: GEE (2023). Elaboração: Os Autores (2023).

O processamento no GEE tanto para o NDVI quanto para o NDWI deu-se pelas seguintes etapas:

1º Etapa: Agrupou-se a coleção Landsat com filtros para o respectivo período e percentual de cobertura de nuvens, assim são selecionadas imagens para os filtros informados. Nessa etapa também se utilizou um pré-filtro para mascarar nuvens usando a banda de avaliação de qualidade da coleção que possibilita otimizar valores de pixels de forma a utilizar condições mais claras;

2º Etapa: A partir da coleção filtrada, adicionou-se em cada imagem uma banda intitulada NDVI e NDWI por suas respectivas diferenças normalizadas;

3º Etapa: Reduziram-se as informações das bandas criadas anteriormente a média dos pixels das regiões pernambucanas para os dias do recorte temporal;

4º Etapa: Após exportação das informações, em planilha de cálculo, os dados foram agrupados para filtrar a média de cada ano.

O estudo tem por escopo uma análise interanual entre os períodos de 1985 a 2022. Embora o NDVI e o NDWI possam ser calculados por estações climáticas e podendo ser influenciados pela maior e menor precipitação, como os dados utilizados do MapBiomas, vegetação e corpos d'água, são disponibilizados anualmente, logo optou-se por se padronizar a um recorte temporal anual. Para manter a compatibilidade do banco de dados, os dados de NDVI e NDWI são resultados das médias dos meses ao longos de cada ano d período analisado.

Precipitação

A informações de precipitação foram extraídas do produto Daily Weather Gridded Data (DWGD) (Xavier *et al.*, 2022). Trata-se de uma grade com uma resolução espacial de 0,1° para o território brasileiro, conforme descrito por Xavier *et al.* (2022), desempenhou o papel de conjunto de dados de referência. Este conjunto de dados de precipitação diária baseou-se em dados obtidos de aproximadamente 11.473 pluviômetros da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no período de janeiro de 1961 a julho de 2020. A geração dos dados de

precipitação observada em grade foi realizada utilizando o método de Ponderação pela Distância Angular (Angular Distance Weighting - ADW).

Foram processadas as informações da grade por meio do GEE, utilizando como coleção o produto DWGD, realizando a correção de fatores de escala para a banda de precipitação. Em seguida, foram filtradas a coleção de imagens para o recorte temporal, seguindo, com a redução a média de dados de precipitação anual para cada região intermediária pernambucana.

Análises estatísticas

Diante do conjunto amostral disponível, prosseguiu-se com a análise do comportamento da série temporal e, de modo a qualificar esse comportamento, optou-se por utilizar a estatística não-paramétrica de tendências, o teste de Mann-Kendall, que envolve duas hipóteses:

H_0 : As observações da série são independentes e identicamente distribuídas (não há tendência presente nos dados);

H_1 : As observações possuem tendência monotônica no tempo (há tendência nos dados).

Ao realizar o teste de Mann-Kendall, a análise estatística visa determinar se há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula em favor da hipótese alternativa. Se o teste resultar em um valor-p menor que um nível de significância pré-definido, a hipótese nula é rejeitada, indicando a presença de tendência estatisticamente significativa na série temporal. É importante observar que o teste de Mann-Kendall não indica a direção (crescente ou decrescente) da tendência, apenas se há tendência significativa. A direção da tendência é geralmente interpretada observando-se o sinal da estatística de teste, mas isso não é diretamente incorporado nas hipóteses do teste em si. O cálculo baseia-se no conceito de ranqueamento dos valores na série temporal e compara cada valor com todos os valores subsequentes, atribuindo classificações de acordo com a direção da tendência (se crescente ou decrescente). A partir desses ranques, são calculadas estatísticas que avaliam se há tendência significativa nos dados.

A estatística de teste de Mann-Kendall, chamada de estatística "S", é calculada somando os valores dos sinais dos produtos das diferenças entre os pares de valores da série. Se "S" for significativamente diferente de zero, isso indica há tendência. Em linhas gerais, a estatística do teste (S) resulta na comparação dos valores da série temporal ao longo do tempo, conforme Equação 3, ou seja, dada a série ordenada, cada valor é comparado com todos os subsequentes, caso esse dado seja maior que o posterior, a estatística incrementa em 1, se contrário, é reduzida em 1, sendo que as somas ou reduções desses incrementos levam ao valor da estatística (Trindade *et al.*, 2017). Conforme Fernandes *et al.* (2022), quando existe um número alto de observações (n), a distribuição de probabilidade S tende para uma distribuição normal, com média zero e variância dada pela Equação 4. A interpretação do valor resultante (Z), Equação 5, proporciona uma diretriz clara: valores positivos denotam tendência ascendente, enquanto valores negativos indicam tendência descendente. Nesse contexto, a hipótese nula, que postula a ausência de tendência nos valores em relação a T, é rejeitada quando o valor resultante demonstra significativa discrepância em relação a zero (Ye; Kameyama, 2020).

$$S = \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \text{sinal}(x_i - x_j) \quad (3)$$

Em que x são os dados estimados da sequência de valores.

$$\text{Var}(T) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$Z \text{ assume:} \quad (5)$$

$$Z = \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}[S]}}, \text{ para } S > 0 \quad (5.1)$$

$$Z = 0, \text{ para } S = 0 \quad (5.2)$$

$$Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}[S]}}, \text{ para } S < 0 \quad (5.3)$$

Para este estudo, o nível de significância adotado foi estabelecido em 0,05. Em outras palavras, p-valores que não ultrapassam esse limiar indicam que os conjuntos de dados exibem um padrão de tendência. O procedimento do teste de Mann-Kendall foi executado utilizando a linguagem de programação R, por meio da utilização do pacote “trend”. Adicionalmente, a análise gráfica complementar foi realizada empregando o pacote “ggplot2”, oferecendo uma representação visual elucidativa das tendências identificadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 observa-se as estatísticas descritivas dos parâmetros biofísicos avaliados junto com os resultados de inferência do teste Mann-Kendall. Da estatística, as médias dos índices espectrais para as três regiões foram valores próximos entre 0,25 e 0,45 para o NDVI e entre -0,40 e -0,30 para o NDWI. Os percentuais de vegetação foram maiores na RISTP e menores na RIR, já os percentuais de corpos d’água foram menores na RIC que se destoa da RIR e da RISTP SE. Em relação a precipitação, a média anual da RIR é bem maior que as demais regiões que possuem esses valores próximos.

Tabela 1 - Resumo dos parâmetros biofísicos das regiões intermediárias pernambucanas para o intervalo de 1985 a 2022

MESOR-REGIÃO	PARÂMETRO BIOFÍSICO	Média ± Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Teste Mann-Kendall	p-Valor	Tendência
RIR	NDVI	0,44 ± 0,071	16,2	1,46	1,45e-1	Não há
	VEGETAÇÃO (%)	14,90 ± 1,720	14,6	6,19	6,20e-10	Crescente
	NDWI	-0,38 ± 0,055	19,1	-1,31	1,91e-1	Não há
	CORPOS D’ÁGUA (%)	1,40 ± 0,086	6,2	-4,07	4,64e-5	Decrescente
	PRECIPITAÇÃO	1415,0 ± 324,0	22,9	-0,86	3,93e-1	Não há
RIC	NDVI	0,37 ± 0,092	25,0	1,82	6,91e-2	Não há
	VEGETAÇÃO (%)	32,00 ± 1,450	4,5	1,27	2,05e-1	Não há
	NDWI	-0,37 ± 0,067	18,1	-2,73	6,27e-3	Decrescente
	CORPOS D’ÁGUA (%)	0,22 ± 0,066	29,6	0,14	8,86e-1	Não há
	PRECIPITAÇÃO	747,0 ± 209,0	28,0	0,35	7,24e-1	Não há
RISTP	NDVI	0,30 ± 0,051	17,0	1,91	5,60e-2	Não há
	VEGETAÇÃO (%)	66,20 ± 3,990	6,0	-8,60	8,03e-18	Decrescente
	NDWI	-0,34 ± 0,040	12,9	-4,25	2,15e-5	Decrescente
	CORPOS D’ÁGUA (%)	1,50 ± 0,194	12,9	-1,38	1,67e-1	Não há
	PRECIPITAÇÃO	571,0 ± 201,0	35,2	-0,86	3,93e-1	Não há

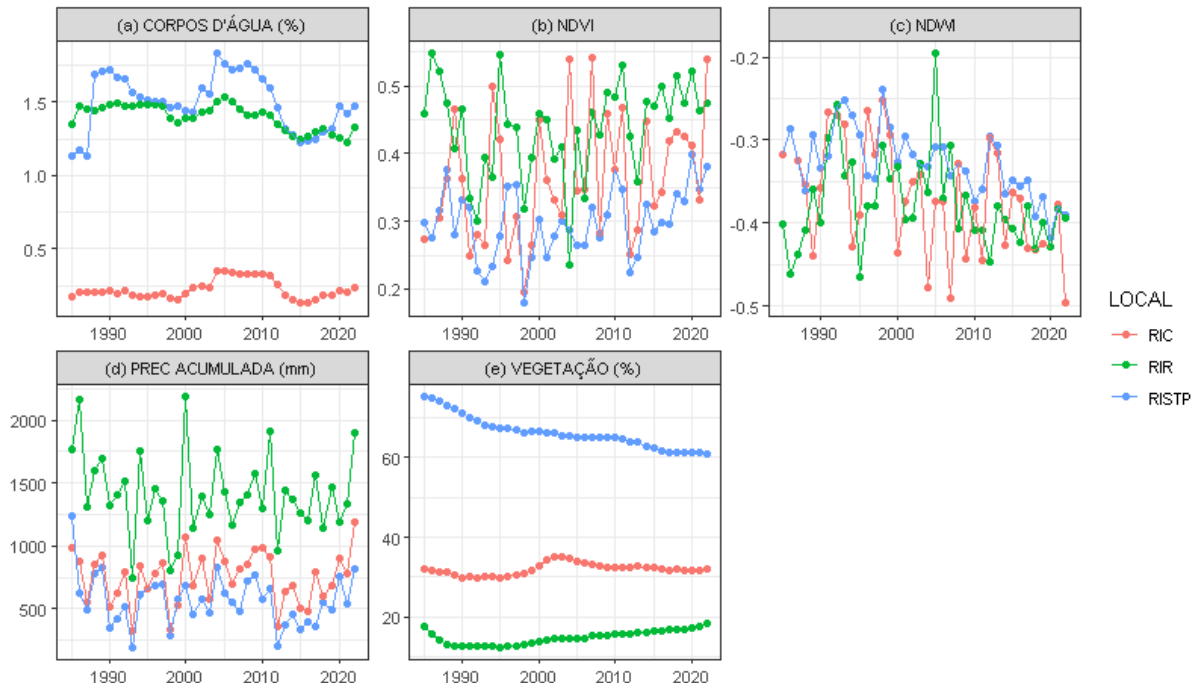
Fonte: Os Autores (2023).

Quanto às tendências, para todas as regiões não foi observada uma tendência significativa para a precipitação e NDVI. Na RIR houve tendências para redução dos corpos d’água e aumento para vegetação. Tanto na RIC quanto na RISTP há uma tendência de redução para o NDWI e na RISTP nota-se uma tendência de decréscimo para o percentual de vegetação.

Utilizando a classificação de Weier e Herring (2000) para NDVI, tanto na RIC quanto na RISTP os resultados do conjunto amostral indicam uma predominância de áreas arbustivas e pastagens. Já o NDWI, conforme classificação de Lemenkova e Debeir (2023), na RIC, na RISTP e na RIR os valores da amostra apontam a predominância de superfícies não aquáticas de terras áridas e secas, em torno dos 60%, mas há também indícios, 20%, de superfícies não aquáticas em solo com seca moderada.

Conforme observado na Figura 2, embora não ocorreu tendências significativas, os índices espectrais NDVI (Figura 2b) e NDWI (Figura 2c) apresentam comportamento de aumento e redução em suas respectivas séries temporais que podem estar associadas às mudanças do uso da terra bem como fenômenos climáticos que se prologaram durante o período avaliado que serão discutidos ao longo dessa seção.

Figura 2 - Série temporal, 1985-2022, dos parâmetros biofísicos para as regiões pernambucanas. (a) Percentual de corpos d'água. (b) NDVI. (c) NDWI. (d) Precipitação anual acumulada. (e) Percentual de vegetação



Fonte: Os Autores (2023).

Conforme observa-se na Figura 2, ao longo do período analisado, a faixa do NDVI entre 0,2 e 0,4 para a RISTP aponta indícios a uma área de arbusto e pastagem, o que é característico dessa região com predominância de solo exposto e vegetação rasteira, junto a baixas médias de precipitação anual. Em geral, anos que apresentaram médias mensais de precipitações baixas resultaram em médias de NDVI baixas para a região a exemplo de 1993, 1998 e 2012, que tiveram precipitações médias anuais de 199,3 mm; 289,9 mm e 208,3 mm e NDVI de 0,21; 0,17 e 0,22, respectivamente.

No estudo de Ribeiro *et al.* (2015), na região da bacia hidrográfica do Rio Pajeú, a partir dos resultados de NDVI pode-se inferir que áreas onde há maior índice de precipitação tem-se altos valores de NDVI e locais de menor precipitação com baixos valores de NDVI, resultado da resiliência da vegetação do bioma Caatinga que responde a eventos de chuvas de forma a um maior desenvolvimento de biomassa. Andrade *et al.* (2018), analisando dois municípios na região por meio dos resultados apontados pelo NDVI, corroboram com a predominância de solo exposto e vegetação rasteira diante dos valores que estão na faixa entre 0,17 e 0,41.

Na RISTP, as mudanças do uso da terra podem decorrer da substituição da vegetação nativa de caatinga para cultivos e manejo animal, conforme aponta os resultados de Silva *et al.* (2023) que indicam uma redução nas formações florestais e aumento da classe de agricultura e pecuária. Na Figura 2e, observa-se uma redução percentual da vegetação ao longo dos anos, sendo significativa conforme mostra a Tabela 1, logo, a intensificação de práticas agropecuárias pode estar auxiliando no alto desmatamento no período.

Na RIC, conforme observado na Tabela 1, nota-se decréscimo do NDWI. Com a série histórica de valores de NDVI variando em média entre 0,2 e 0,5, essa faixa aponta características da predominância de cobertura de solo formada por espécies arbustivas e pastagens. Nessa área, o bioma de Caatinga sofre por ameaça das modificações dos solos para uso agrícola e de pastagem, mas segue resiliente quanto aos impactos sofridos. Melo *et al.* (2022) apontaram, em uma bacia leiteira no agreste pernambucano, a substituição da vegetação nativa de Caatinga por cactáceas para a produção de forragem associada a pecuária por meio de outros índices espectrais. Os resultados de Silva *et al.* (2023), em análise entre os anos de 2014 e 2021 na região do Vale do Ipojuca, mostraram por meio do uso do NDVI que o bioma de

Caatinga em dados anos tendiam a reduzir, mas ao final dos três anos houve um aumento significativo, mostrando uma certa resiliência às ameaças nesse bioma.

A RIR foi a única região em que os índices espectrais e classes tiveram resultados de tendências, com o percentual de vegetação a uma tendência de aumento, já o NDWI e o percentual de corpos d'água apontando um decréscimo. Apesar dos resultados de tendências de os índices espectrais seguirem a inclinação dos principais alvos de suas aplicações, importante ressaltar que essa região dentre as três avaliadas é a menor e por se localizar próximo ao litoral as imagens utilizadas tiveram percentuais significativos de nuvens que podem ter afetado os cálculos dos índices.

Essa região é a que dentre as demais apresenta uma maior densidade populacional e setores econômicos secundários e terciários ativos, sendo local de importantes municípios pernambucanos, como Recife, a capital. Ao mesmo tempo, o desenvolvimento urbano, industrial, serviços e comércio afetam os ecossistemas locais, impactando no bioma que predominantemente caracteriza-se como de Mata Atlântica.

Alguns estudos têm por objeto impactos em manguezais nessa área, ecossistema encontrado nas áreas estuarinas desse bioma caracterizado pela vegetação de mangue, de alta produtividade e resiliência. Ferreira *et al.* (2013), por exemplo, no setor sul da costa pernambucana, avaliando manguezais nos arredores das instalações do complexo industrial e portuário de Suape, encontrou correlação entre manguezais e NDWI indicando uma diminuição da umidade como também a possibilidade de sedimentos nos corpos superficiais ou influência de aterros possivelmente pela expansão das instalações. Quanto ao NDVI, os autores observaram uma atenuante diminuição de valores maiores que 0,76 para em torno de 0,60, associando à redução da vegetação de mangue e vegetações adjacentes.

Em estudo em um conjunto de bairros da cidade do Recife, Oliveira *et al.* (2014) apontaram diferenças dos valores de NDWI em locais com a presença de vegetação e áreas urbanizadas. Segundo resultados desse estudo, áreas de mata ciliar cujo valor de umidade tende a ser elevado apresentaram NDWI maior que 0,71, além disso, as imagens avaliadas de 1989 e 1991 apresentaram NDWI com valores variando entre 0,01 e 0,30, já resultados com a imagem de 2006, o NDWI em sua maioria foi menor que 0. Os autores atribuem essa mudança à substituição da cobertura vegetal por outras classes diante do avanço da urbanização.

Embora a região RIR tenha menor percentual de vegetação dentre as três, abaixo dos 20%, fruto da intensa ocupação e desenvolvimento das cidades, quando observa a Tabela 1, nota-se que o teste aponta um crescimento do percentual de vegetação na RIR, mas conforme mostra a Figura 2e esse aumento não foi em todo o período de estudo, com um leve decréscimo até os anos de 2000, podendo estar associados à estabilização do crescimento urbano e preservação da vegetação.

Não somente mudanças do uso da terra influenciaram a variação dos índices biofísicos. Nota-se na Figura 2, uma redução dos valores do percentual de corpos d'água, da precipitação anual acumulada e do NDWI, a partir do período de 2010, em todas as regiões. Especificamente por volta do período de 2012 a 2018, a região nordeste brasileira sofreu os reflexos de um longo período de seca, que teve as regiões de semiáridos umas das regiões mais afetadas e o estado de Pernambuco sofreu reflexos desse período (Alvala *et al.*, 2017).

Outros trabalhos também corroboram mostrando o quanto esse período de seca extrema afetou as regiões. Inocêncio, Ribeiro Neto, Souza (2020), utilizando índices associados a umidade dos solos, concluem que as áreas são afetadas de modos diferentes com a RISTP e a RIC sofrendo de forma mais crítica por apresentarem precipitações abaixo da média histórica, solos de profundidade raso e cobertura do solo pelo bioma Caatinga. Souza *et al.* (2018) utilizando também como variável sensor que estima umidade do solo apontaram que o ano de 2012 foi o mais seco para todas as regiões.

A periodicidade de eventos de seca necessita de uma maior atenção em relação a análise de sua frequência e intensidade. Em especial, no estado de Pernambuco em que a realidade demonstra não somente impactos em zonas que já convivem como esse fenômeno como o RISTP e RIC, mas também, ao longo dos anos o abastecimento das áreas próximas à costa, a RIR vem sendo afetada (Bezerra *et al.*, 2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo avaliou, o comportamento das características biofísicas das três Regiões Intermediárias do estado de Pernambuco, ao longo do período de 1985 a 2022. Da análise temporal, a variável precipitação foi a única que não apontou nenhuma tendência de aumento ou redução significativa para as três Regiões Intermediárias. Já as demais variáveis analisadas (vegetação, corpos d'água, NDVI e NDWI) os resultados do teste de Mann-Kendall apontaram tendências significativas para algumas regiões

Para a RISTP observou-se uma tendência de percentual da classe de vegetação reduzindo ao longo dos anos, o que pode indicar mudanças no uso da terra com a substituição do Bioma Caatinga por áreas de agricultura e pecuária. Já na RIR os resultados apontam influência de outros setores impactando os ecossistemas locais, dado pelo setor de indústria e serviços, além do desenvolvimento urbano. A partir do mapeamento da série também foi possível perceber os impactos do evento extremo de seca nas variáveis de corpos d'água, precipitação e NDWI o que podem auxiliar na gestão desses eventos em casos futuros. Para a RIC, somente observou-se reduções significativas para os valores de NDWI.

Os resultados apontam para a importância do monitoramento de parâmetros biofísicos, como os índices NDVI e NDWI, para avaliar mudanças no uso e ocupação da terra e seus impactos nos ecossistemas. As tendências observadas podem ter implicações para a gestão ambiental e o planejamento do uso da terra nas regiões estudadas.

É importante ressaltar que este estudo se baseou em análises temporais de dados biofísicos, e os resultados devem ser interpretados considerando a complexidade das interações entre os fatores naturais e humanos que influenciam o ambiente. Portanto, pesquisas futuras podem aprofundar a compreensão das mudanças observadas e investigar as causas subjacentes, bem como avaliar o impacto dessas mudanças nos ecossistemas e na sociedade.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de doutorado ao primeiro e terceiro autores deste trabalho sob o processo IBPG-1279-3.01/22 (FACEPE) e o Processo 88887.814388.2023-00 (CAPES).

REFERÊNCIAS

- ALVALA, R.C.S.; CUNHA, A.P.M.A.; BRITO, S.S.B.; SELUCHI, M.E.; MARENGO, J.A.; MORAES, O.L.L.; CARVALHO, M.A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, 2017. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANDRADE, C.B.; OLIVEIRA, L.M.M.; OMENA, J.A.M.; GUSMÃO, A.C.V.L.; RODRIGUES, D.F.B. Avaliação de índices de vegetação e características fisiográficas no Sertão Pernambucano. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 4, n. 1, p. 97-107, 2018.
- ANDRADE SILVA, G.; FARIAS, C.W.L.A. Análise espaço-temporal da vegetação no semiárido do Nordeste brasileiro utilizando parâmetros biofísicos. **Revista Semiárido de Visu**, v. 9, n. 3, p. 195-203, 9 dez. 2021. <https://doi.org/10.31416/rsdv.v9i3.232>
- BEZERRA, A.C.; COSTA, S.A.T.; SILVA, J.L.B.; ARAÚJO, A.M.Q.; MOURA, G.B.A.; LOPES, P.M.O.; NASCIMENTO, C.R. Annual rainfall in Pernambuco, Brazil: Regionalities, regimes, and time trends. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 403-414, 2021. <https://doi.org/10.1590/0102-77863630129>
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Satélites de monitoramento missão Landsat. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>. Acesso em: 01 dez. 2023.
- EWANE, E.B.; BAJAJ, S.; VELASQUEZ-CAMACHO, L.; SRINIVASAN, S.; MAENG, J.; SINGLA, A.; LUBER, A.; MIGUEL, S.; RICHARDSON, G.; BROADBENT, E.N.; CARDIL, A.; JAAFAR, W.S.W.M.; ABDULLAH, M.; CORTE, A.P.D.; SILVA, C.A.; COAEMO, W.; MOHAN, M. Influence of urban forests on residential property values: A systematic review of remote sensing-based studies. **Heliyon**, e20408 [S. l.], 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20408>
- FERNANDES, A.C.G.; BORGES, I.M.S.; SILVA, J.A.; SILVA, E.C.B.; SANTOS, M.J.R.; PESSOA, D.S.; MARTINS, M.S.; SILVA, J.A.; CAMPOS, J.O.; MEDEIROS, L.R.A. The use of the Mann-Kendall test for detection of precipitation trends in a semi-arid region of Pernambuco. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 11, p. e546111133925, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33925>

FERREIRA, J.M.S.; FERREIRA, P.S.; MORAIS, Y.C.B.; GOMES, V.P.; FRANÇA, L.M.A.; GALVÍNCIO, J.D. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na detecção de mudanças espaço-temporais das áreas de vegetação de mangue em Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 3, 2013. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20130043>

GEE. Google Earth Engine. 2023. Disponível em: <<https://earthengine.google.com>>. Acesso em: 01 dez. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Brasileiro de 1990. Disponível em: <<https://censoagro2017.ibge.gov.br/1992-novo-portal/edicao/16163-divisoes-regionais-do-brasil-1-5-000-000-divisoesregionaisdobrasil.html>>. Acesso em: 01 dez. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Brasileiro de 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=35938>. Acesso em: 29 jun. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE divulga nova divisão territorial com foco nas articulações regionais. 2017. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/10515-ibge-divulga-nova-divisao-territorial-com-foco-nas-articulacoes-regionais> Acesso em: 23 out. 2024.

INOCÊNCIO, T.M.; RIBEIRO NETO, A.; SOUZA, A.G.S.S. Soil moisture obtained through remote sensing to assess drought events. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 9, p. 575–580, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n9p575-580>

KAMRAN, M.; YAMAMOTO, K. Evolution and use of remote sensing in ecological vulnerability assessment: A review. **Ecological Indicators**, v. 148, 110099, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110099>

KRIEGLER, F.J. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment. 1969. p. 97-131. **Anais**, 1969.

LEMENKOVA, P.; DEBEIR, O. R Libraries for Remote Sensing Data Classification by K-Means Clustering and NDVI Computation in Congo River Basin, DRC. **Applied Sciences**, v. 12, n. 24, p. 12554, 2022. <https://doi.org/10.3390/app122412554>

LIU, X.; HU, G.; CHEN, Y.; LI, X.; XU, X.; LI, S.; PEI, F.; WANG, S. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform. **Remote Sensing of Environment**, v. 209, p. 227–239, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.055>

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

MELO, M.V.N.; OLIVEIRA, M.E.G.; ALMEIDA, G.L.P.; GOMES, N.F.; MORALES, K.R.M.; SANTANA, T.C.; SILVA, P.C.; MORAES, A.S.; PANDORFI, H.; SILVA M.V. Spatiotemporal characterization of land cover and degradation in the Agreste region of Pernambuco, Brazil, using cloud geoprocessing on Google Earth Engine. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 26, 1 abr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100756>

OLIVEIRA, T.; DANTAS, J. G.; GALVÍNCIO, J. D.; PIMENTEL, R. D. M.; BOTLER, M. Análise da variação espaço-temporal das áreas verdes e da qualidade ambiental em áreas urbanas, Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n.6, p. 1196-1214.

RIBEIRO, E.P.; NÓBREGA, R.S.; MOTA FILHO, F.O.; MOREIRA, E.B.M. Parâmetros biofísicos na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do Rio Pajeú. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 32, n. 1, p. 221-246, 2015.

RIVERA-MARIN, D.; DASH, J.; OGUTU, B. The use of remote sensing for desertification studies: A review. **Journal of Arid Environments**, v. 206, 104829, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104829>

SILVA, J.B.A.; ALMEIDA, G.L.P.; SILVA, M.V.; OLIVEIRA-JUNIOR, J.F.; PANDORFI, H.; SOUSA, A.M.O.; MARINHO, G.T.B.; GIONGO, P.R.; FERREIRA, M.B.; SOUSA, J.S.; MESQUITA, M.; ALMEIDA, A.C.S. Characterization of water status and vegetation cover change in a watershed in Northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 130, 104546, 2023.

SOUZA, A.G.S.S.; RIBEIRO NETO, A.; ROSSATO, L.; ALVALÁ, R.C.S.; SOUZA, L.L. Use of SMOS L3 soil moisture data: Validation and drought assessment for Pernambuco State, Northeast Brazil. **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1314, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10081314>

TRINDADE, A.L.C.; ALMEIDA, K.C.B.; BARBOSA, P.E.; OLIVEIRA, S.M.A.C. Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do rio das velhas, estado de minas gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 13–24, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016131457>

USGS. United States Geological Survey. Normalized difference vegetation index (NDVI). 2023a. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>. Acesso em: 01 dez. 2023.

USGS. United States Geological Survey. What are the band designations for the Landsat satellites? 2023b. Disponível em: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>. Acesso em: 01 dez. 2023.

XAVIER, A.C.; SCANLON, B.R.; KING, C.W.; ALVES, A.I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>

WEIER, J.; HERRING, D. Measuring vegetation (NDVI & EVI). NASA Earth Observatory. 2000. Disponível em: https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php. Acesso em: 10 maio. 2023.

YE, F.; KAMEYAMA, S. Long-term spatiotemporal changes of 15 water-quality parameters in Japan: An exploratory analysis of countrywide data during 1982–2016. **Chemosphere**, v. 242, 1 mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125245>

Recebido em: 04/03/2024
Aceito para publicação em: 21/11/2024