



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Impactos dos Extremos Climáticos de Precipitação Pluviométrica no Uso e Cobertura do Solo no Agreste de Pernambuco

Maendra Pollinne Arcoverde Soares¹, Genária da Silva Andrade², Freds Fernando Alves de Almeida³, Anderson Santos da Silva⁴, Josicléda Domiciano Galvêncio⁵, Werônica Meira de Souza⁶

¹Discente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais-PPCIAM da Universidade Federal do Agreste de Pernambuco-UFPE, Garanhuns, Brasil, maendra.arcoverde@gmail.com. ²Discente do PPCIAM/UFPE, andradejenaria@gmail.com. ³Pós-Doc do PPCIAM/UFPE, fredsfernando@hotmail.com. ⁴Prof. da UFPE, anderson.silva@ufpe.edu.br. ⁵Profa. da Universidade Federal de Pernambuco e do PPCIAM/UFPE, josicleda.galvencio@ufpe.br. ⁶Professora do PPCIAM/UFPE, weronicameira@gmail.com

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos dos extremos climáticos de precipitação pluviométrica no uso e cobertura do solo em Tupanatinga, localizada no Agreste de Pernambuco. A metodologia se baseou em três etapas: na avaliação dos índices de extremos climáticos PRCPTOT e CDD utilizando-se o software RCLimindex e do Índice Acumulado de Chuva (IAC), a partir da série histórica de precipitação diária de 1963 a 2022, cujos dados foram obtidos junto à Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC); na análise da dinâmica do uso e cobertura do solo utilizando o Google Earth Engine (GEE), para determinar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI); e nos desastres decorrentes dos extremos climáticos observados na região, cujos dados foram obtidos no Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional de 1993 a 2022. Os resultados da análise dos índices de extremos climáticos indicaram aumento do número de dias consecutivos secos com significância estatística a 95%, evidenciando um aumento da frequência de anos secos, como também a presença de um novo padrão climático a partir década de 1990 com anos mais secos. Baseado no IAC, foram analisados os impactos da variabilidade das chuvas sobre o uso e ocupação solo, representados pelo NDVI, com os anos mais secos apresentando valores mais baixos de NDVI, demonstrando que a vegetação da região é fortemente afetada pela alta variabilidade das chuvas, principalmente quanto a frequência e distribuição. As maiores perdas econômicas estiveram associadas aos desastres decorrentes das secas e estiagens recorrentes, com os maiores prejuízos registrados na agricultura e nos serviços da cidade. Portanto, concluiu-se que além da alta variabilidade das chuvas na região, houve aumento na frequência de períodos secos ao longo dos anos, afetando diretamente a disponibilidade dos recursos hídricos e as atividades agrícolas da região.

Palavras-chave: Chuva, IAC, GEE, RCLimindex, Semiárido.

Impacts of Extreme Rainfall Events on Land Use and Cover in the Agreste Region of Pernambuco

ABSTRACT

This work aims to evaluate the impacts of climatic extremes in rainfall on land use and cover in Tupanatinga, located in the Agreste of Pernambuco. The methodology was based on three stages: on the evaluation of the PRCPTOT and CDD climate extreme indices using the RCLimindex software and the Accumulated Rain Index (IAC), based on the historical series of daily precipitation from 1963 to 2022, whose data were obtained from the Pernambuco Water and Climate Agency (APAC); in the analysis of the dynamics of land use and cover using the Google Earth Engine (GEE), to determine the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); and in disasters resulting from climatic extremes observed in the region, whose data were obtained from the Ministry of Integration and Regional Development from 1993 to 2022. The results of the analysis of climate

extreme indices indicated an increase in the number of consecutive dry days with statistical significance at 95 %, showing an increase in the frequency of dry years, as well as the presence of a new climate pattern from the 1990s onwards with drier years. Based on the IAC, the impacts of rainfall variability on land use and occupation were analyzed, represented by NDVI, with drier years presenting lower NDVI values, demonstrating that the region's vegetation is strongly affected by high rainfall variability, mainly regarding frequency and distribution. The greatest economic losses were associated with disasters resulting from recurring droughts and droughts, with the greatest losses recorded in agriculture and city services. Therefore, it was concluded that in addition to the high variability of rainfall in the region, there was an increase in the frequency of dry periods over the years, directly affecting the availability of water resources and agricultural activities in the region.

Keywords: Rain, IAC, GEE, RCLimindex, Semiarid.

Introdução

Os eventos associados às mudanças climáticas, com destaque para os eventos extremos de precipitação, têm se tornado mais frequentes e intensos nas últimas décadas em todo o planeta, impactando negativamente os recursos hídricos e consequentemente toda a sociedade e suas atividades econômicas. O sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022) alerta para grandes impactos ao planeta com destaque para eventos climáticos extremos, incluindo extremos de temperatura na terra e oceanos e precipitações intensas e secas.

O Semiárido Brasileiro é considerado uma das regiões mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas na América Latina (Marengo et al., 2018; Silva et al., 2020) por apresentar características como uma intensa variabilidade climática natural, com chuvas irregulares, longos períodos de estiagens e secas recorrentes, alto potencial para evaporação da água, em função da enorme disponibilidade de energia solar e altas temperaturas. (Marengo, 2008; Marengo et al., 2011). Além dos fatores climáticos, a região se destaca negativamente pelos altos índices de vulnerabilidade socioeconômica e baixo índice de desenvolvimento humano devido à grande pobreza na área, aumentando o potencial migratório (Nobre et al., 2019; Galvão et al., 2020). Quanto a isso, mudanças climáticas em regiões como esta, afetará principalmente a disponibilidade hídrica (IPCC, 2007).

Com um sistema hídrico frágil, o semiárido convive com altos registros de temperaturas (23°C - 30 °C), e as projeções futuras em escala global, segundo IPCC (2007) indicam que a temperatura do planeta aumentará cerca de 1°C até 2100, com projeções de até 4,5°C no pior cenário, uma das consequências esperadas do aquecimento global é que o aumento da temperatura superficial levaria a um aumento da evaporação (Sun et al., 2013; Huang et al., 2021). O Quinto Relatório (IPCC,

2014) projetou que com o aumento na frequência de eventos extremos nas regiões semiáridas do planeta, haverá secas mais prolongadas como consequência da redução das chuvas, bem como o aumento das temperaturas nas próximas décadas. O resultado disso será aumento da evapotranspiração, enquanto a disponibilidade hídrica diminuirá (Sobral et al., 2018; Cardoso et al., 2019; Santos et al., 2019).

A sustentabilidade dos recursos hídricos é uma preocupação crescente, exigindo estimativas precisas dos processos ambientais para a tomada de decisão na gestão municipal, estadual e federal. As projeções dos impactos das alterações climáticas nos processos hidrológicos são altamente importantes para apoiar o planejamento hídrico, a tomada de decisões, otimização da alocação do uso da água, contribuindo para a implementação de medidas adaptativas que possam minimizar os efeitos críticos das mudanças climáticas nos recursos hídricos e na agricultura (Lins et al., 2024).

A irregularidade das chuvas, assim como a baixa disponibilidade de água afeta diretamente agricultura e pecuária, uma das principais atividades econômicas e de subsistência na região Nordeste, e que são altamente dependentes dos recursos hídricos. Uma maior frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação impacta negativamente estas atividades, ameaçando a economia e a saúde da população.

A região Agreste de Pernambuco, está localizada entre as regiões da Zona da Mata (que concentra maiores índices pluviométricos e as temperaturas mais amenas) e região do Sertão (que apresenta menores índices pluviométricos e temperaturas mais elevadas), lhe conferindo características de transição, porém a maior parte do seu território está inserida na região semiárida, apresentando predominantemente características climáticas desta região, ou seja, clima tropical quente e seco, tropical quente ou sub-úmido seco, e apenas em pequenas áreas se apresentam os

climas tropical quente e úmido e tropical de altitude, este ocorrendo apenas em áreas elevadas acima de 1000 m, onde ocorrem particularidades como a diminuição da temperatura, o aumento da umidade relativa do ar e da pluviosidade (Souza et al. 2023).

Mesmo apresentando tamanha suscetibilidade aos efeitos do clima, a região Nordeste necessita de investigações mais localizadas, por municípios. De acordo com Souza (2023) a maioria dos estudos para avaliação das mudanças climáticas no Brasil ainda se encontra nas regiões Sul e Sudeste, por apresentarem maior quantidade de estações e séries com melhor qualidade e intervalo de dados. Estes estudos passaram a ser desenvolvidos no Nordeste mais profundamente, a partir dos estudos de Santos et al. (2006) e Silva et al. (2007). Estes autores ressaltam a importância de trabalhos utilizando índices de extremos pois representam uma contribuição aos estudos das análises de tendências de mudanças climáticas, auxiliando nas ações de manejo de recursos hídricos, planejamento das atividades agrícolas, dentre outras, as quais devem ser realizadas com esta previsão de aquecimento e de alterações nos padrões de precipitação.

A precipitação é um dos parâmetros mais importantes se tratando de mudanças climáticas e eventos extremos, e uma alteração desta variável é considerada indicativo de mudanças no clima (Rana et al., 2016; Abbasnia & Toros, 2018). Dessa forma, com base em dados diários de observação meteorológica dessa variável são extraídos os índices extremos climáticos (Zhang et al., 2011), que nesse contexto, são projetados para representar alguns dos desafios mais críticos para os limites fisiológicos humanos, social, de infraestrutura, e do ambiente natural, e aplicados para avaliação de eventos climáticos extremos em escalas local, regional, nacional e global (Donat et al., 2013; Dunn et al., 2020).

Muitos estudos abordando índices de detecção de extremos climáticos têm sido desenvolvidos em diversas regiões do mundo: na Ásia Meridional (Ahmed et al., 2022; Panditharathne et al., 2022), no Equador (Andrango & Rios, 2022), na China (Wu et al., 2024); na África (Berhane et al., 2020), na Índia (Deshmukh et al., 2020), na Nigéria (Ogunjo et al., 2021), México (Lazcarro et al., 2020) e Iran (Malboosi et al., 2023). No Brasil: na região Sudeste (Regueira & Wanderley, 2022; Roza et al., 2023), na região Norte (Terassi et al., 2023), Centro-oeste (Santos et al., 2023). e Nordeste (Costa et al., 2020; Reis et al., 2020; Assis et al., 2021; Siqueira et al., 2024).

Soares, M. P. A, Andrade, G. S, Almeida, F. F. A, Silva, A. S, Galvêncio, J. D., Souza, W. M.

Concomitantemente, o Índice de Anomalia de Chuva (IAC) se apresenta como uma importante abordagem nas investigações que envolve análises temporais da precipitação pluvial, de modo a compreender a dinâmica climática de uma determinada região. Este índice foi proposto inicialmente por Rooy (1965) para classificar como positivas ou negativas as anomalias, assim como seu grau de severidade. Pereira et al., (2017) ao estudar a variabilidade climática de 14 localidades do Agreste de Pernambuco, verificou a predominância de anomalias negativas de precipitação nessa região, resultando em desastres decorrentes de longas estiagens e secas, ressaltando a eficiência deste método na análise da distribuição e intensidade desses eventos.

As ferramentas de processamento digital de imagens de satélite se apresentam como cruciais nos estudos climáticos e têm facilitado as análises que envolve mudanças no uso e cobertura do solo, detectando e prevenindo o uso inadequado desse recurso natural. O Google Earth Engine (GEE) tem se destacado entre essas ferramentas geotecnológicas, sendo uma plataforma computacional inovadora de processamento para o sensoriamento remoto em nuvem, desenvolvida pela empresa Google (Horowitz, 2015), que permite análises multitemporais e espaciais de uma forma rápida e eficiente por meio de linguagens de programação JavaScript e Python (Ferreira et al., 2017), além de ser gratuita. Suas principais aplicações estão no mapeamento da cobertura florestal e detecção do desmatamento, monitoramento dos recursos hídricos e das mudanças da cobertura do solo (GEE, 2024).

Através do GEE é possível calcular e gerar índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que tem como finalidade medir a atividade da clorofila da vegetação por meio de imagens de satélite. Este índice é um modelo resultante da combinação dos níveis de refletância em imagens de satélites, que provêm da equação composta pelas respostas das bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo (Ramos et al., 2010). E tem sido aplicado em muitos estudos, no Brasil (Cavalcanti et al., 2020; Azevedo et al., 2021; Silva et al., 2022), e em outras regiões do planeta (Xulu et al., 2021; Amiri & Pourghasemi, 2022; Yang, et al., 2022).

O uso da plataforma do GEE em análises de monitoramento ambientais em grandes áreas e em escala temporal, vem se destacando positivamente em função da confiabilidade devido ao grande banco de dados orbitais, potencialidade e agilidade no processamento de imagens, corroborando com os estudos sobre NDVI e

Temperatura da Superfície proposto por Cavalcante et al. (2020).

Evidencia-se a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que tem pautado proteger o meio ambiente, o clima e a necessidade de adaptação aos riscos relacionados aos eventos extremos e aos desastres naturais, por meio dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Este trabalho está atrelado a um dos ODS proposto pela ONU, mais especificamente no que se refere às ações contra a mudança no clima, ODS 13, no que diz respeito à urgência de serem tomadas medidas de combate às mudanças climáticas e seus impactos. Este objetivo vem pautando novas políticas em diferentes países, e o objetivo é promover a resiliência das regiões às mudanças no clima e a redução de danos relacionados aos desastres naturais até 2030.

Tendo em vista a necessidade de estudos relacionados às mudanças no clima com enfoque local, contribuindo com informações mais específicas das cidades, este trabalho foi desenvolvido no município de Tupanatinga, localizado no Agreste Meridional de Pernambuco, cuja economia da região é oriunda da agricultura, pecuária e comércio (IBGE, 2000), sendo suscetível às variações climáticas.

Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar os impactos dos extremos climáticos de precipitação pluviométrica no uso e cobertura da terra em Tupanatinga, Agreste de Pernambuco, visando contribuir com a gestão dos recursos hídricos, planejamento das atividades agrícolas e prevenção de desastres relacionados às chuvas, tornando a região mais resiliente.

Material e métodos

Área de estudo

O município de Tupanatinga está localizado no Agreste Meridional de Pernambuco, com latitude 08°45'12" Sul e longitude 37°20'23" Oeste, altitude de 710 metros. Ocupa uma área de 934,801 km², com população estimada em 26.937 habitantes (IBGE, 2022). Situa-se nos domínios das Bacias Hidrográficas do Rio Ipanema e do Rio Moxotó. A economia da região é oriunda da agricultura, pecuária e comércio, cujos principais produtos são feijão em grão, milho em grão, mandioca e castanha de caju (IBGE, 2000).

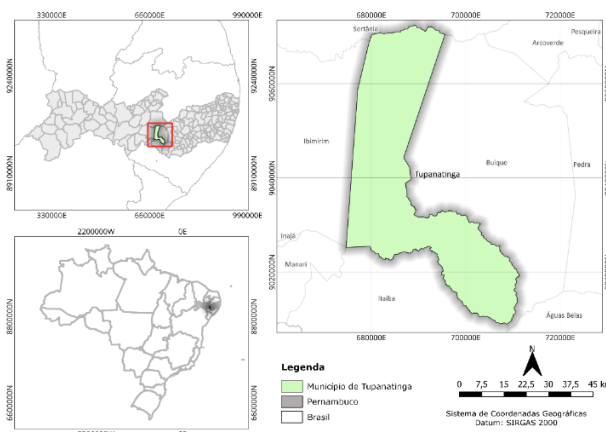


Figura 1. Localização da área de estudo.

Dados pluviométricos

Foram utilizados dados diários de precipitação pluviométrica compreendendo o período de 1 de janeiro de 1963 a 31 de dezembro de 2022 (cinquenta e nove anos de dados), atendendo a recomendação da Organização Meteorológica Mundial que preconiza uma série de dados maior ou igual a trinta anos para a caracterização climática de uma região. A análise dos dados foi realizada com a estação meteorológica de Tupanatinga (código 141), visto que o município conta com apenas um posto. Os dados foram obtidos no site da Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC.

Foi observada uma falha de dados entre 2008 a 2012. Neste trabalho optou-se por não realizar nenhum método de preenchimento, uma vez que os dados são diários e o município conta com apenas uma estação pluviométrica, apresentando alta variabilidade temporal e espacial (clima, relevo, altitude, valores médios de precipitação) em relação às cidades vizinhas, o que tornaria o preenchimento sugerido por Tucci (2014) uma falha ainda maior.

Dados espaciais (vetoriais e matriciais)

Os arquivos vetoriais do tipo shapefiles (.shp) para representar a região em estudo conforme descrito na Figura 1, foram obtidos no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A plataforma do GEE possui um catálogo vasto de informações dos satélites Landsat e Sentinel e do sensor MODIS, além de outras informações (GEE, 2024). Neste trabalho, foram utilizados imagens do Landsat 8 para os anos de 2013, 2014, 2016, 2020 e 2022, e imagens do landsat 5 para o ano de 1998, respeitando a disponibilidade para área em relação ao percentual

de cobertura de nuvens (abaixo de 40%, visto que o período escolhido corresponde ao período chuvoso da região). As análises foram feitas a partir da observação dos índices e do uso e cobertura do solo nos períodos determinados, através de um script elaborado no Code Editor na plataforma do GEE. O Landsat, entre suas características, possui uma resolução temporal de 16 dias e resolução espacial de 30 metros, ou seja, um pixel da imagem corresponde à 900 m² de área real.

Índices de extremos climáticos

Para calcular as tendências dos índices de extremos climáticos em Tupanatinga foi utilizado o software RCLIMDEX (versão 2.3.1.), que é um programa recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) utilizado para o cálculo de índices de extremos climáticos para monitorar e detectar mudanças climáticas locais. Foi desenvolvido por Byron Gleason, pesquisador do National Climate Data Centre (NCDC) da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e tem sido usado em workshops e oficinas de índices climáticos da CCI/CLIVAR (International Research Programme on Climate Variability and Predictability) desde 2001. Este software foi desenvolvido para um código em linguagem R, o qual é de distribuição gratuita e está disponível no website dos índices da ETCCDMI (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI>).

A partir do RclimDex é possível determinar vinte e sete índices de extremos derivados dos dados diários de temperatura e precipitação recomendados pela Equipe de Especialistas CCI/CLIVAR para Monitoramento e Índices de Detecção de Mudanças Climáticas - ETCCDMI, bem como alguns outros índices de temperatura e precipitação com limites definidos pelo usuário (Zhang e Yang, 2004). Na presente pesquisa foram analisados dois dos vinte e sete índices definidos pelo ETCCDMI, sendo os dois relativos a dados de precipitação pluviométrica. No Quadro 1 constam os índices selecionados, suas definições e unidades.

Quadro 1. Índices climáticos dependentes da precipitação, com suas definições e unidades, utilizados neste estudo.

Índice	Nome do indicador	Definição	Unidade
--------	-------------------	-----------	---------

PRCPTOT	Precipitação total anual nos dias úmidos	Precipitação total anual nos dias úmidos (RR* ≥ 1mm)	mm
CDD	Dias consecutivos secos	Número máximo de dias consecutivos com RR* < 1mm	dias

As equações dos índices de detecção de mudanças climáticas utilizados foram as seguintes:

PRCPTOT (Precipitação total anual dos dias úmidos*)

Seja RR_{ij} a quantidade diária de precipitação num dia i de um período j . Se I representa o número de dias em j , então:

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad (1)$$

*Considera-se dias úmidos, os dias com precipitação igual ou acima de 1 mm (RCLIMDEX 1.0 – MANUAL DEL USUARIO, 2004).

CDD (Dias consecutivos secos)

Seja RR_{ija} quantidade diária de precipitação em um dia i de um período j . O índice de extremo climático CDD indica o número máximo de dias consecutivos em que a chuva diária foi menor que 1 mm ($RR_{ij} < 1\text{mm}$) no período j . A unidade do índice CDD é dia. Então:

$$RR_{mmij} \geq 1\text{mm} \quad (2)$$

A saída do Rclimdex para todos os índices, fornecem dados estatísticos, tais como: tendência linear calculada pelo método de mínimos quadrados; nível de significância estatística da tendência (valor p); coeficiente de determinação (r^2) e erro padrão de estimativa; assim como, os gráficos das séries anuais (Zhang e Yang, 2004). Dessa forma, a tendência dos índices de detecção de mudanças climáticas foi analisada a partir dos resultados estatísticos gerados pelo software Rclimdex.

O valor p calculado pelo teste de t-student representa o nível de significância estatística, caso

o valor de p de um índice qualquer seja igual ou inferior a 0,1 a tendência do índice é estatisticamente significativa em 90%, se for igual ou inferior a 0,05 em 95% e para p menor que 0,01 tem-se uma tendência com significância estatística de 99%. Foram consideradas como possíveis tendências climáticas os índices que apresentaram tendência linear (positiva ou negativa) superior ao erro padrão de estimativa e estatisticamente significativa (valor de $p < 0.1$).

Determinação biofísica do NDVI

Foi utilizado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para analisar os impactos da variabilidade da precipitação pluviométrica no uso e cobertura do solo da região. Seus dados parâmetros processados e obtidos através da plataforma Google Earth Engine e do software livre QGIS versão 3.28.10.

O NDVI foi proposto por Rouse *et al.* (1974) e tem sido muito utilizado nos mapeamentos de uso e cobertura do solo, por possibilitar análises de baixo custo operacional (Barros *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2020). Este índice identifica a existência de vegetação fotossinteticamente ativa, monitora a cobertura vegetal e sua distribuição no espaço (Folhes, 2007).

Os resultados do NDVI variam de -1 a +1, onde os valores positivos correspondem às superfícies cobertas por vegetação, e os valores negativos geralmente estão associados a nuvens e corpos hídricos, inclusive ausência de vegetação em solo exposto. O valor máximo positivo (+1) representa maior densidade de cobertura vegetal, e à medida que esse valor diminui, a vegetação se torna mais esparsa (Martinho *et al.*, 2012). É descrito pela fórmula a seguir, proposta por Rouse *et al.* (1974):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (3)$$

Em que: NIR equivale ao valor da reflectância na banda do infravermelho próximo e; RED corresponde ao valor da reflectância na banda do vermelho.

Essas bandas espectrais foram utilizadas pois a vegetação, devido a ação da clorofila, apresenta grande absorção de energia na região do vermelho. Enquanto, na região do infravermelho próximo, essa energia é refletida pela estrutura celular das folhas. Dessa forma, possibilita a extração das informações acerca da qualidade

vegetal, contribuindo para o monitoramento ambiental (Miranda, 2023).

Os produtos gerados foram apresentados diretamente como índices, poupando algumas etapas de processamento. As imagens dos índices gerados pelo GEE foram exportadas em níveis de cinza até o software livre QGIS para elaboração dos mapas temáticos. Em seguida, através da aba “simbologia”, seguido de “renderização de banda”, alterando de banda simples para falsa cor, foi aplicado uma composição colorida (falsa cor) por meio de um gradiente de cores para representar a variabilidade entre -1 e +1. Segue a seguir o link para acesso ao script utilizado neste trabalho para obtenção do NDVI:

<https://code.earthengine.google.com/3d04d47dcd36e02f2c19de6feaf95b54>

Para determinar o impacto dos eventos extremos da precipitação no uso e ocupação do solo por meio do NDVI, foi utilizado o Índice de Anomalia de chuva (IAC), que tem como objetivo analisar a frequência de ocorrência dos registros dos anos secos e dos anos chuvosos, assim como a intensidade do evento. Esse índice foi desenvolvido por Rooy (1965) e adaptado por Freitas (2004) e Araújo (2007) para a região Nordeste, para classificar o ano como seco, normal ou chuvoso, e segundo Marcuzzo *et al.* (2011) e Sanches *et al.* (2014) permite a realização de comparações do regime pluviométrico de uma determinada localidade a partir de uma série histórica de dados pluviométricos. Dessa forma, o grau de severidade e duração dos períodos secos e úmidos são realizados através do cálculo do índice IAC (Freitas 2004), obtido a partir das equações 4 e 5, para anomalias positivas e negativas, respectivamente:

$$IAC = 3 \left[\frac{(N - \bar{N})}{(M - \bar{N})} \right] \quad (4)$$

$$IAC = -3 \left[\frac{(N - \bar{N})}{(\bar{X} - \bar{N})} \right] \quad (5)$$

Em que: N = precipitação anual (mm);

$\bar{N}$ = precipitação média anual da série histórica (mm);

$\bar{M}$ = média das 10 maiores precipitações anuais da série histórica (mm);

$\bar{X}$ = média das 10 menores precipitações anuais da série histórica (mm).

As anomalias positivas são valores acima da média histórica e anomalias negativas são valores abaixo da média histórica da precipitação pluviométrica. A partir da metodologia proposta por Freitas (2004, 2005) e Araújo (2007), utilizou-se a classificação de anos secos e úmidos como indicador climático para a intensidade destas anomalias, conforme mostra a Quadro 2.

Quadro 2 - Classes de Intensidade do índice de Anomalia de Chuva.

Índice de Anomalia de Chuva (IAC)	Faixa do IAC	Classe de Intensidade
	Acima de 4	Extremamente úmido
	2 a 4	Muito úmido
	0 a 2	Úmido
	0 a -2	Seco

Resultados e discussão

Índices de extremos de precipitação pluvial

Os índices de extremos climáticos para o município de Tupanatinga-PE estão representados na A Figura 2 e suas tendências estatísticas no Quadro 3.

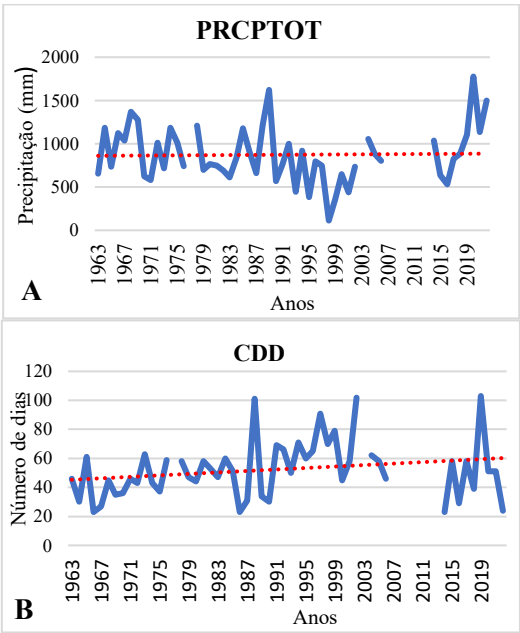


Figura 2 - Precipitação total anual nos dias úmidos (A), Número de dias consecutivos secos (B) em Tupanatinga-PE, para o período de 1963 a 2022.

-2 a -4	Muito seco
Abaixo de - 4	Extremamente Seco

Para avaliar os desastres decorrentes das variabilidades climáticas foram utilizadas informações, no período de 1991 a 2022, das perdas econômicas associadas aos desastres (estiagens, secas, inundações e enxurradas) e dos prejuízos na agricultura, pecuária, indústria e serviços em Tupanatinga-PE, fornecidos pelo site <https://atlasdigital.mdr.gov.br>, por meio do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (Brasil, 2023).

No Quadro 3, o valor destacado em negrito apresentou significância estatística a 95%, enquanto o valor referente à PRCPTOT apresentou (p valor <0,05), não indicando significância estatística.

Quadro 3 - Tendências dos índices de extremos climáticos dependentes da precipitação pluvial para Tupanatinga utilizados neste estudo. (p<0,01: significância estatística de 99%; p<0,05: significância estatística 95%; p<0,1: significância estatística 90%).

Índices	P-valor
PRCPTOT	0.718
DCS	0.038

A precipitação total anual (Figura 2A) não apresentou uma tendência com significância estatística. Ao longo do recorte temporal foi possível observar extremos relevantes, como em 1969 (1278,1 mm), 1989 (1622,2 mm), 2020 (1776,8 mm) e 2022 (1496,1 mm) com chuvas acima da média histórica. A década de 1990 apresentou uma sequência de anos secos, com chuvas abaixo da média.

Estes resultados convergem com os de Silva (2020) que ao estudar a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú no Nordeste (abrangendo parte dos estados de Pernambuco e Alagoas), concluindo que a década de 1990 concentrou as menores médias de precipitação.

Já em relação aos dias consecutivos secos (Figura 2-B), observou-se uma tendência de

aumento, com significância estatística a 95%, como apresentado do Quadro 3.

Resultados positivos também foram encontrados por Assis (2012) ao estudar índices de extremos no Agreste de Pernambuco. Através da análise, é possível notar um aumento da intensidade e da frequência de dias consecutivos sem chuva, com destaque a partir de 1990. Os extremos dos anos com o número de dias consecutivos secos, acima de cem dias, registrados ao longo desse recorte temporal ocorreram em 1988, 1997 e 2019.

Os resultados encontrados para estes dois índices também convergem com os de Assis et al. (2021), ao estudar onze localidades inseridas na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú, observaram uma diminuição significativa na precipitação total anual e aumento de dias consecutivos sem chuva na região ao longo de cinquenta e dois anos.

Índice de Anomalia de Chuva

O IAC foi utilizado para avaliar os anos secos e úmidos, assim como o grau de severidade dos eventos no município de Tupanatinga-PE. Os valores de IAC positivos referem-se a anos chuvosos, muito chuvosos e extremamente chuvosos, dependendo do seu valor. No mesmo sentido, os valores negativos, referem-se aos anos secos, muito secos e extremamente secos, dependendo do seu valor, conforme Quadro 2.

Através do IAC apresentado a partir do gráfico da Figura 3, verificou-se uma alta variabilidade das precipitações ao longo do recorte temporal estudado. Novamente, a década de 1990 destaca-se sendo a mais seca, com anomalias negativas em praticamente todo o período, inclusive o maior registro, em 1998, classificado como um ano extremamente seco.

Pereira et al. (2017), estudou extremos climáticos a partir do IAC para a região do Agreste Pernambucano e considerou que a forte redução da precipitação no ano 1998 foi causada pela atuação do El Niño de forte intensidade.

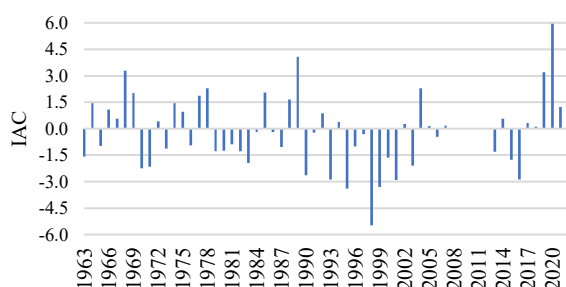


Figura 3 - IAC para Tupanatinga/PE para o período de 1963 a 2022.

Conforme descritos na Figura 3 anteriormente, partir da análise dos extremos de precipitação através do IAC, destacaram-se os anos 1998, 1995 e 1999, respectivamente, com os maiores índices negativos da série histórica em Tupanatinga-PE. Os anos que apresentaram maiores valores positivos foram 2020, 1989, 1968 e 2022, respectivamente.

Com base nos resultados apontados pelos valores obtidos no IAC, os anos escolhidos para avaliação nesse estudo, foram descritos no Quadro 4 abaixo:

Quadro 4 - Classificação dos anos escolhidos para o estudo com base no IAC.

Classificação	Anos
Extremamente seco	1998
Seco	2013
Úmido	2014
Muito seco	2016
Extremamente úmido	2020
Muito úmido	2022

Ressalta-se que para cada ano utilizado, foi definida uma condição temporal para as imagens orbitais (Quadro 4), considerando que o Landsat apresenta resolução temporal de 16 dias, sendo assim, respeitando a disponibilidade para área em relação ao percentual de cobertura de nuvens (abaixo de 40%). O critério de escolha para este período objetivou analisar os efeitos da alta variabilidade das chuvas sob a cobertura vegetal, ou seja, as condições da vegetação após o período de chuvas, de acordo com as características de cada ano.

Identificar o comportamento dos anos em função dos valores computados através do IAC é de suma importância para o planejamento agropecuário assim como para ações de políticas públicas, pois com essa ferramenta, ficam assertivas as tomadas de decisões por parte dos órgãos públicos através do conhecimento pluviométrico da região em períodos de significativas variações climáticas, conforme abordado por Diniz et al. (2020).

Uso e cobertura do solo através do NDVI:

O uso do sensoriamento remoto através do índice biofísico NDVI para análise temática confrontada com aspectos visuais, tornaram

ferramentas inerentes para validação de resultados que diagnosticam ou mitigação determinada ação em ambientes sensíveis às condições hídricas conforme o município em estudo corroborando com Ganem et al. (2020).

A análise do índice de vegetação para Tupanatinga-PE para os anos 1998, 2013, 2014, 2016, 2020 e 2022 foi representado através dos mapas na Figura 4 e por meio da Tabela 1, onde foram apresentados os valores estatísticos (mínimos, médios e máximos) do NDVI.

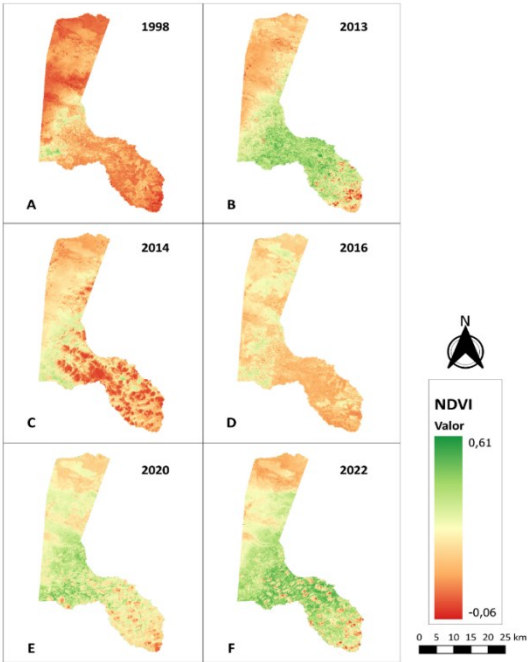


Figura 4 - Valores de NDVI para os anos 1998 (A), 2013 (B), 2014 (C), 2016 (D), 2020 (E) e 2022 (F).

Foi observado, através dos mapas, a alta variação na vegetação em função da variabilidade da precipitação. O gradiente de cores localizada do lado direito da figura varia de acordo com: valores próximos a -1 foram representados pela cor vermelha, valores próximos a zero, relacionados à cor laranja, valores intermediários relacionados à cor amarela, e valores próximos a 1 associam-se a cor verde.

Castro e Silva (2020) e Amancio et al. (2021), valores negativos estão associados a corpos d'água; de 0.1 a 0.2 indica a presença de solo exposto e áreas não vegetadas; de 0.2 a 0.5 representa uma vegetação mais esparsa; e os valores acima de 0.5 indicam uma vegetação mais densa.

O ano 1998 (Figura 4-A), classificado através do IAC como um ano extremamente seco, apresentou os menores valores de NDVI, com valor

máximo 0.33, conforme mostra a Tabela 1, assim como cores vermelha e laranja em maior parte do mapa, indicando que a vegetação foi fortemente afetada pela ausência das chuvas este ano. Resultados um pouco semelhantes foram observados no ano 2016, classificado como um ano muito seco, obteve os segundos menores valores de NDVI, sendo 0.43 o valor máximo.

Tabela 1: Valores de NDVI para 1998, 2013, 2014, 2016, 2020 e 2022.

Anos	Valor mínimo	Valor médio	Valor máximo
1998	0.05	0.12	0.33
2013	0.06	0.24	0.52
2014	0.03	0.21	0.52
2016	0.01	0.19	0.43
2020	0.06	0.18	0.46
2022	0.08	0.28	0.61

Os anos 2013 e 2014 (Figura 4-B e C) classificados como seco e úmido, respectivamente, apresentaram os mesmos valores máximos de NDVI (0.52). Isso pode ser explicado pela alta presença de nuvens nas imagens do ano 2014, interferindo nos valores do índice. Outro fato relevante é que, os anos que antecederam 2013 podem ter apresentado maior frequência e distribuição das chuvas, sendo suficientes para que houvesse o avanço da vegetação.

De acordo com Leite et al. (2020), onde analisaram o comportamento dos valores do IAC em relação ao NDVI em Ouricuri-PE, constataram a importância desse estudo na identificação de possíveis núcleos de semiáridez em função da variabilidade vegetal sobre aquele solo em período severos de estiagem, o qual desequilibra o comportamento biótico da localidade.

Já em relação aos anos mais chuvosos, 2020 e 2022, classificados como anos extremamente úmido e muito úmido, respectivamente, é possível verificar que, 2020 mesmo se destacando com os maiores volumes de chuvas, apresentou valores de NDVI inferiores, quando comparado aos demais anos. Isso pode também estar relacionado a presença de nuvens nas imagens, interferindo nos valores do índice, mas principalmente pelos anos que antecederam 2020, que sendo anos secos, o resultado foi refletido em 2020. Os maiores valores de NDVI foram obtidos para o ano de 2022, com valor máximo de 0.61.

Estas observações concordam com Pereira et al. (2017) ao estudar a variabilidade climática no Agreste de Pernambuco. Os autores consideram

que os impactos sociais ocasionados pela estiagem e seca, em um determinado ano, nem sempre está relacionado à falta de chuvas de um determinado ano, mas pela distribuição e frequência da precipitação pluviométrica antes do ano de seca em análise, pois anos de chuvas irregulares antes de

Sales et al. (2023) estudou a correlação dos índices biofísicos com os índices climáticos no Nordeste Brasileiro. Os autores observaram que os valores de NDVI para o clima da região, que é o Semiárido, se apresentam extremamente baixos, com intervalos de -0,400 e 0,194, o que está totalmente relacionado às características da vegetação desse bioma, que é a Caatinga. Em períodos secos, devido sua fisiologia, perdem as folhas com o objetivo de evitar a transferência de água para a atmosfera através do processo de transpiração, o que garante a sobrevivência até o período úmido.

Silva e Nascimento (2023) ao investigar a influência da variabilidade sazonal das chuvas na dinâmica da vegetação em GO, constatou uma correlação positiva entre o regime de precipitação e o vigor da vegetação. Os autores verificaram que no período de estiagem a vegetação tende a perder consideravelmente o seu vigor, alcançando registros mínimos de NDVI (0,281 nm), e no período chuvoso esses valores tendem a aumentar, apresentando, por exemplo, valor de 0,737 nm.

A partir dos resultados encontrados até aqui, torna-se evidente a forte influência que a variabilidade das precipitações, com destaque para eventos extremos, desempenha sob a vegetação e todo o meio, o que não impacta apenas a qualidade ambiental, mas a disponibilidade dos recursos hídricos, o avanço das atividades agrícolas, além da qualidade de vida da população.

Desastres associados aos eventos extremos

As perdas econômicas associadas aos desastres mais recorrentes (Figura 5) e a distribuição dos prejuízos privados, por categoria (Figura 6), registrados no período de 1991 a 2022 em Tupanatinga-PE, evidenciam que as estiagens e as secas são os desastres mais recorrentes na região, com perdas da ordem de 225 milhões, sendo os maiores impactos na agricultura com prejuízo estimado de 170 milhões e nos serviços da ordem de 90 milhões, afetando a população e a economia da região.

um ano classificado seco, não tão severo, pode ocasionar um profundo caos social bem mais abrangente do que um ano de seca mais severa ocorrido após alguns anos com chuvas mais regulares.

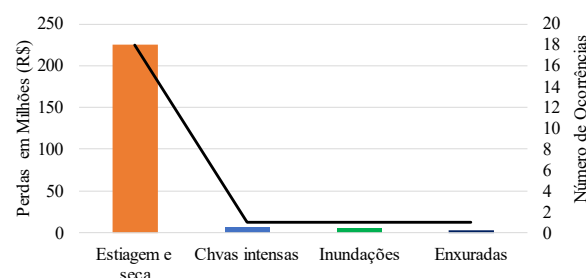


Figura 5 – Perdas (em milhões de R\$) dos desastres mais recorrentes e número de ocorrências de 1993 a 2022 registrados em Tupanatinga-PE.

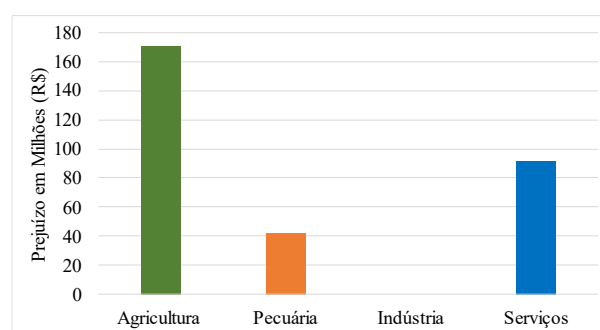


Figura 6 – Distribuição dos prejuízos (em milhões de R\$) privados, por categoria, no período de 1991 a 2022 em Tupanatinga-PE.

No Brasil, a maior parte das ameaças naturais com risco de desastre está relacionada a fatores climáticos (IPCC, 2014 e 2022). Em Pernambuco e em Tupanatinga, os danos humanos e impactos na economia também estão associados aos desastres decorrentes das secas e estiagens frequentes no semiárido e das chuvas intensas na Zona da Mata e Litoral, afetando consideravelmente a agricultura, os recursos hídricos, os serviços, a pecuária e a sociedade.

Conclusões

Através dos índices de extremos climáticos pôde-se constatar que não houve tendência significativa de aumento ou de redução da precipitação total anual, porém, identificou-se aumento da frequência de anos secos (chuva abaixo da climatologia), com destaque para a década de 1990 com anomalias negativas em praticamente todo o período.

Com relação ao número de dias consecutivos secos, observou-se uma tendência positiva de aumento com significância estatística de 95%, indicando que o número de dias secos está aumentando na região.

Para a análise do uso e cobertura do solo através do NDVI, os resultados evidenciaram uma alta correlação da vegetação da região com as precipitações, mais especificamente quanto a sua frequência e distribuição.

Os menores valores de NDVI foram observados nos anos 1998 e 2013, anos com baixos volumes de chuvas. Essa alta variabilidade das chuvas afeta fortemente a região, e quando intensificada pelas mudanças climáticas através de eventos extremos resulta em desastres relacionados à seca, comprometendo o desenvolvimento da região.

As estiagens e as secas são os desastres mais recorrentes na região, com perdas da ordem de 225 milhões, sendo os maiores prejuízos observados na agricultura e serviços, afetando a população e a economia do município.

O uso do sensoriamento remoto através da plataforma do Google Earth Engine demonstrou-se como uma ferramenta tecnológica de baixo custo e acessível, apresentando potencial significativo no processamento rápido grande volume de imagens de satélites.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pela concessão da bolsa de Mestrado, ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPCIAM/UFRPE) e à Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE). Este artigo é parte da dissertação de Mestrado do primeiro autor.

Referências

Abbasnia, M., Toros, H., 2018. Analysis of longterm changes in extreme climatic indices: a

case study of the Mediterranean climate, Marmara Region, Turkey. *Pure and Applied Geophysics* 175, 3861-3873.

Ahmed, I., Ishtiaque, S., Zahan, T., Rashed, M. S. U., Sen, R., Hossain, M. F., ... & Haque, M. I., 2022. Climate change vulnerability in Bangladesh based on trend analysis of some extreme temperature indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1), 831-842. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04079-4>

Amiri, M., & Pourghasemi, H. R., 2022. Mapping the NDVI and monitoring of its changes using Google Earth Engine and Sentinel-2 images. In *Computers in Earth and Environmental Sciences*. Elsevier, 127-136.

Andrango, D. T., & Zapata Rios, X. E., 2022. Determinação de tendências de eventos climáticos extremos no Centro Norte da Região Interandina do Equador. *Revista Brasileira De Climatologia*, 30, 668-690. <https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.14731>

Araújo Filho, M. C., Meneses, P. R. & Sano, E. E., 2007. Sistema de Classificação de Uso e Cobertura da Terra com base na análise de imagens de satélite. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 59.

Araújo, L. D., Silva, D. D., Moraes Neto, J. D., & Sousa, F. D., 2007. Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação na Bacia do Rio Paraíba usando IAC. *Revista de geografia*, 24, 47-59.

Assis, J., Lacerda, F. F., & do Carmo Sobral, M., 2012. Análise de detecção de tendências no padrão pluviométrico na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 5, 320-331.

Assis, J. O. M., Menezes, A. F., Souza, W. M., & Sobral, M. D. C. M., 2021. Methods to analyze spatio-temporal rainfall variability: application to the Pajeú river basin, Pernambuco, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)*, 56, 577-588. <https://doi.org/10.5327/Z21769478866>

Azevedo, L. S., Nascimento, E. F., Barbosa, L. C., Ferreira, W. S., Silva, J. R. S., & Borges, K., 2021. Análise de mudanças na cobertura vegetal do Pará utilizando o Google Earth Engine. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 7, 12037-01.

Barros, A. S., Farias, L. M., & Marinho, J. L. A., 2020. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na Caracterização da Cobertura Vegetativa de Juazeiro Do Norte - CE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 2885-2895.

Berhane, A., Hadgu, G., Worku, W., & Abrha, B., 2020. Trends in extreme temperature and rainfall indices in the semi-arid areas of Western Tigray, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 9, 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00165-6>

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. Atlas Digital de Desastres no Brasil. Brasília: MIDR, 2023.

Cardoso, A. S., Alves, E. A., Marques, C.O.M.E., Castro, C.M.V.A., Casé, M., & Sobral, M.C.M., 2019. Avaliação da toxicidade da piscicultura do semiárido de Pernambuco (Brasil). *Revista Brasileira de Desenvolvimento*, 5, 24934-24961. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-171>.

Cavalcante, J. C., Almeida, C. A., & Bandeira Castelo, T., 2020. Análise de NDVI e temperatura da superfície terrestre utilizando a plataforma do Google Earth Engine em área de Savana Amazônica e floresta secundária, no município de Vigia – PA. *Revista De Geociências do Nordeste*, 6, 64–70. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n1ID18978>

Cavalcante, J. C.; Almeida, C. A.; Castelo, T. B. Análise de NDVI e temperatura da superfície terrestre utilizando a plataforma do Google Earth Engine em área de savana amazônica e floresta secundária, no município de Vigia – PA. *Revista de Geociências do Nordeste*, vol. 6, n. 1, p. 64-70, 2020.

Chen, J., Chen, S., Fu, R., Li, D., Jiang, H., Wang, C., ... & Hicks, B. J., 2022. Remote sensing big data for water environment monitoring: current status, challenges, and future prospects. *Earth's Future*, 10. <https://doi.org/10.1029/2021EF002289>

Costa, R. L., de Mello Baptista, G. M., Gomes, H. B., dos Santos Silva, F. D., da Rocha Júnior, R. L., de Araújo Salvador, M., & Herdies, D. L., 2020. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather and Climate*

Extremes, 28.

<https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>

Deshmukh, S. S., Khobragade, A. M., & Misal, V. S. (2020). Trend Analysis of Precipitation over Marathwada Region, Maharashtra Using RCLIMDEX. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 11, 3342-3347. <http://www.ijcmas.com>

Donat, M.G., Alexander, L.V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Caesar, J., 2013. Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 997-1006.

Diniz, R. R. S.; Alencar, M. L. S.; Medeiros, S. A.; Guerra, O. C.; Sales, J. C. R. Índice de anomalia de chuvas da Microrregião do Cariri Ocidental Paraibano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol. 13, n. 06, p. 2628-2640, 2020.

Dunn, R.J.H., Alexander, L.V., Donat, M.G., Zhang, X., Bador, M., Bin Hj Yussof, M. N.A., et al., 2020. Development of an Updated Global Land In Situ-Based Data Set of Temperature and Precipitation Extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 125, 1-28.

Ferreira, B.; Zimmermann, D. M.; Crispim, L. C.; Flash, M. F., & Vieira, C. A. O., 2017. Análise sazonal das temperaturas superficiais do estado de Santa Catarina entre os anos de 2000 e 2010. In: *Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Exposicarta*, SBC, 933-937.

Freitas, M. A. S., 2004. A Previsão de Secas e a Gestão Hidroenergética: O Caso da Bacia do Rio Parnaíba no Nordeste do Brasil. *Seminário Internacional sobre Represas y Operación de Embalses*, Puerto Iguazú. CACIER, 1, 1-1.

Freitas, M.A.S., 2005. Um Sistema de Suporte à Decisão para o Monitoramento de Secas Meteorológicas em Regiões Semi-Áridas. *Revista Tecnologia*, 84-95.

Folhes, M. T., 2007. Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos. [tese de doutorado]. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos, Brazil*.

Galvão, M.L.M, Santos, M.A, Silva, F.N, Silva, V.P. (2020). Conexões entre Energia Eólica, Pobreza e Sustentabilidade Social no Semiárido

Brasileiro. Sustentabilidade, 12, 864.
<http://dx.doi.org/10.3390/su12030864>.

Ganem, K.A.; Dutra, A. C.; Oliveira, M. T.; Freitas, R. M.; Grecchi, R. C.; Vieira, R. M. S.; Arai, E.; Silva, F. B.; Sampaio, C. B. V.; Duarte, V.; Shimabukuro, Y. E. Mapeamento da Vegetação da Caatinga a partir de Dados Ópticos de Observação da Terra – Oportunidades e Desafios. *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 72, n. especial, p. 829-854, 2020.

GEE – Google Earth Engine, 2024. Uma plataforma em escala planetária para dados e análises das ciências da Terra.

Horowitz, F. G., 2015. MODIS daily land surface temperature estimates in Google Earth Engine as an aid in geothermal energy siting. In: *Proceedings World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia.

Huang, Y., Xiao W., Hou B., Zhou Y., Hou G., YI L., & Cui H., 2021. Hydrological projections in the upper reaches of the Yangtze River Basin from 2020 to 2050. *Nature. Scientific Reports* 11, 9720.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-88135-5>

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. *Four Assessment Report: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge Univ.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, 2014. *Mudanças Climáticas 2014: Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas*. IPCC, Genebra, Suíça.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change, 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Geneva.

Lazcarro, M. C., Tristán, A. C., Belitskaya, V. D., Ovalle, A. C., & Putri, R. F., 2020. Comparison of two climate methodologies on Lerma Chapala basin: moving mean and climate variability indices with RClimDex. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 451.
<https://doi.org/10.1007/s00477-023-02573-3>

Leite, C. R. M.; Lopes, P. M. O.; Nascimento, C. R.; Moura, G. B. A.; Silva, D. A. O.; Silva, J. L. B.

Semi-aridity nuclei associated the land cover and soil moisture in Pernambuco, Brazil. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v.10, n.1 (2020) 20-33

Lins, F.A.C.; Montenegro, A.A.A.; Farias, C.W.L.A.; Silva, M.V.; Souza, W.M.; Moura, G.B.A.; Silva, T.G.F.; Montenegro, S.M.G.L. Soil moisture and hydrological processes dynamics under climate and land use changes in a semiarid experimental basin, Brazil, *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2024,
<https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2024.02.001>

Malboosi, S., Abbasi, F., Pakdaman, M., & Javanshiri, Z, 2023. Investigation of changes in the extreme of temperature and precipitation in Iran in the last 60 years. *Journal of Climate Research*, 1402, 163-178.

Marcuzzo, F. F. N., & Romero, V., 2013. Influência do El Niño e La Niña na precipitação máxima diária do estado de Goiás. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28, 429-440.

Marengo, J.A., 2008. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. *Parcerias Estratégicas*, 13, 149-176.

Marengo, J.A. et al., 2011. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande –PB, 1, 383-422.

Marengo, J.A., Alves, L.M., Alvala, R.C.S., Cunha, A.P., Brito, S., & Moraes, O.L.L., 2018. Características Climáticas da Seca 2010-2016 no Semiárido Nordeste Brasileiro. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90, 1678-2690.
<https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>.

Martinho, P. R. R., Holler, W. A., Santos, B. B. O., Spadotto, C. A., Trajano, S. R. S., Daltio, J., & Foies, N. S., 2012. Metodologia de Monitoramento de Cobertura Vegetal - estudo de caso: Município de Goiânia, GO. Campinas, SP: Embrapa. 38.

Miranda, V. D., 2023. Análise do uso e cobertura da terra através de NDVI e de classificação supervisionada–Estudo de caso da implantação de sistema portuário privado em Ilha da Madeira, Itaguaí-RJ. [Tese de doutorado]. Biblioteca digital UERJ. <http://www.bdt.d.uerj.br/handle/1/20705>

Nobre, P., Pereira, E.B., Lacerda, F.F., Bursztyn, M., Haddad, E.A., & Ley, D., 2019. Rede solar inteligente como caminho para inclusão

econômica e adaptações às mudanças climáticas no semiárido nordestino brasileiro. *Jornal Internacional de Estratégias e Gestão de Mudanças Climáticas*, 11, 499-517.
<https://doi.org/10.1108/ijccsm-09-2018-0067>

Ogunjo, S.T., Akinsusi, J.O., Fuwape, I. A., 2021. Trends in extreme temperature indices over Lagos, Nigeria. *IOP Conf. Ser.: Meio Ambiente da Terra. Ciência*. 655.
doi:10.1088/1755-1315/655/1/012003

Panditharathne, R., Gunathilake, M.B., Chathuranika, I.M., Rathnayake, U., Babel, M.S., Jha, M.K., 2023. Trends and Variabilities in Rainfall and Streamflow: A Case Study of the Nilwala River Basin in Sri Lanka. *Hydrology*, 10, 8.
<https://doi.org/10.3390/hydrology10010008>

Pereira, M. L. T., Soares, M. P. A., Silva, E. A., de Assunção Montenegro, A. A., & de Souza, W. M., 2017. Variabilidade climática no Agreste de Pernambuco e os desastres decorrentes dos extremos climáticos. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 2, 394-402.

Rana, A., Moradkhani, H., Qin, Y., 2016. Understanding the joint behavior of temperature and precipitation for climate change impact studies. *Theoretical and Applied Climatology*, 129, 321-339.

RCLIMDEX 1.0 – Manual Del usuario (versão em espanhol), 2004. Disponível em <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>.

Reis, L. C., Silva, C. M. S. E., Bezerra, B. G., Mutti, P. R., Spyrides, M. H. C., & Da Silva, P. E., 2020. Analysis of climate extreme indices in the MATOPIBA region, Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 4457-4478.
<https://doi.org/10.1007/s00024-020-02474-4>

Regueira, A.O., Wanderley, H.S., 2022. Changes in rainfall rates and increased number of extreme rainfall events in Rio de Janeiro city. *Natural Hazards*, 114, 3833-3847.
<https://doi.org/10.1007/s11069-022-05545-y>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351, 309.

Roza, M. P.O, Cecílio, R. A., Zanetti, S. S., Abreu, M. C., Lyra, G. B., & Reis, G. B., 2023. Natural disasters related to rainfall trends in Espírito Santo, southeastern Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 1451-1466.
<https://doi.org/10.1007/s00704-023-04703-x>

Sales, E. S. G., Araújo, F. D. S., Matsunaga, W. K., & Brito, J. I., 2023. Relação do NDVI e EVI com os Índices Climáticos do Nordeste do Brasil. *Geoambiente On-line*, 47.

Sanches, F. O., Verdum, R., & Fisch, G., 2014. O índice de anomalia de chuva (IAC) na avaliação das precipitações anuais em Alegrete/RS (1928-2009). *Caminhos de Geografia*, 15, 73-84.: <https://doi.org/10.14393/RCG155126423>

Santos, L. A., Lucio, P. S., Rebello, E. R., Balbino, H. T., Fortes, L. T., de Sales, N. D., ... & de Paula, T. P., 2006. CARACTERIZAÇÃO DE EXTREMOS CLIMÁTICOS UTILIZANDO O SOFTWARE Rclimdex. ESTUDO DE CASO: SUDESTE DE GOIÁS.

Santos, C.A.S., Rocha, F.A., Ramos, T.B., Alves, L.M., Matheus, M., Oliveira, R.P., & Neves, R., 2019. Uso de modelo hidrológico para avaliar o desempenho de modelos climáticos regionais em uma bacia hidrográfica semiárida no Brasil. *Água*, 11, 170. <https://doi.org/10.3390/w11010170>.

Santos, L. O. F., Machado, N. G., Biudes, M. S., Geli, H. M., Querino, C. A. S., Ruhoff, A. L., ... & Lotufo Neto, N., 2023. Trends in Precipitation and Air Temperature Extremes and Their Relationship with Sea Surface Temperature in the Brazilian Midwest. *Atmosphere*, 14, 426.
<https://doi.org/10.3390/atmos14030426>

Silva, D. F., Sousa, F. A. S., & Kayano, M. T., 2007. Avaliação dos impactos da poluição nos recursos hídricos da bacia do rio Mundaú (AL e PE). *Revista de Geografia*, 24, 209-222.

Silva, G. K., da Silva Silveira, C., da Silva, M. V. M., Júnior, A. D. M., Souza Filho, F. A., & Guimarães, S. O., 2020. Análise de projeções das mudanças climáticas sobre precipitação e temperatura nas regiões hidrográficas brasileiras para o século XXI. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)*, 55, 420-436.

Silva, K. A. D., El-Deir, S. G., Monteiro Júnior, J. J., Santos, J. P. D. O., & Silva, E. A., 2020.

Analysis of vegetation dynamics using the normalized difference vegetation index (NDVI) at the archipelago of Fernando de Noronha, Pernambuco, Brazil. *Interações (Campo Grande)*, 21, 895-901.

Silva, S. D. A., 2020. Análise das interações entre variabilidade climática e cobertura da terra no regime hidrológico da Bacia Hidrográfica Interestadual do Rio Mundaú (Pernambuco/Alagoas). [Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco]. Repositório UFPE. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/38160>

Silva, M. V., Pandorfi, H., Oliveira-Junior, J. F., Silva, J. L. B., Almeida, G. L. P., Assunção Montenegro, A. A., ... & Giongo, P. R., 2022. Remote sensing techniques via Google Earth Engine for land degradation assessment in the Brazilian semiarid region, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 120.

Silva, I. S. ., & Nascimento, D. T. F., 2023. Variability of vegetation spectral indexes according to rainfall regime around the Itumbiara Hydrelétic Power Plant reservoir – Brazil (2010-2020). *Agua Y Territorio / Water and Landscape*, 23. <https://doi.org/10.17561/at.23.7209>

Siqueira, M. S., Silva, M. T., Brito, J. I. B., Braga, C. C., Souza, A. C., & Sousa, W. G., 2024. Índices climáticos extremos de precipitação pluvial e temperatura do ar na região do MATOPIBA-Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17, 446-464.

Sobral, M. D. C. M., de Assis, J. M. O., de Oliveira, C. R., da Silva, G. M. N., Moraes, M., & Carvalho, R. M. C., 2018. Impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos no submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco–Brasil. *REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA*, 12, 95-106.

Souza, W. M., Barbosa, V. V., Almeida, F. F. A., Soares, M. P. A., Galvêncio, J. D., & Sales Filho, R. L. M., 2023. Índices Climáticos e Cenários de Mudanças Climáticas para a Região Agreste do Estado de Pernambuco-Brasil. *Pesquisa e Tecnologias Hídricas para o Desenvolvimento do Semiárido de Pernambuco*, 129-143.

Sun, J., Lei, X., Tian, Y., Liao, W., & Wang, Y., 2013. Hydrological impacts of climate change in

the upper reaches of the Yangtze River Basin. *Quaternary international*, 304, 62-74.

Terassi, P. M. B, Galvani, E., Gobo, J. P. A., da Silva Oscar-Júnior, A. C., Luiz-Silva, W., Sobral, B. S., ... & Biffi, V. H. R., 2023. Exploring climate extremes in Brazil's Legal Amazon. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02634-7>

Tucci, E. C. M., 2014. Hidrologia: ciência e aplicação. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 201, 943.

United Nations, 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Wu, Y., Zhang, L., Zhang, Z., Ling, J., Yang, S., Si, J. J., Zhan, H., Chen, W. L., 2024. Influência da atividade solar e dos fenômenos climáticos de grande escala nos eventos extremos de precipitação no Cinturão Econômico do Rio Yangtze. *Avaliação de risco de Stoch Environ Res*, 38 , 211–231. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02573-3>

Xulu, S., Phungula, P. T., Mbatha, N., & Moyo, I., 2021. Multi-year mapping of disturbance and reclamation patterns over Tronox's hillendale mine, South Africa with DBEST and Google Earth engine. *Land*, 10, 760.

Yang, K., Luo, Y., Li, M., Zhong, S., Liu, Q., & Li, X., 2022. Reconstruction of sentinel-2 image time series using google earth engine. *Remote Sensing*, 14, 4395.

Zhang, X., Yang, F., 2004. RClimDex (1.0) UserManual. Ontario: Climate Research Branch, Environment Canada.

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., Trewin, B., Zwiers, F.W., 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 851-870.