Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
UFGD Editora

VARIABILIDADE CLIMÁTICA DA PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DO CEARÁ, NORDESTE DO BRASIL

Climate variability of precipitation in ceara region, Northeast of Brazil

Variabilidad climática de la precipitación en el estado de Ceará, Nordeste de Brasil

Maria Daniele Pereira Bessa da Silva
Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)
mdanielebessa@gmail.com

Juan Carlos Alvarado Alcócer
Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)
jcalcocer@unilab.edu.br

Maria Leidinice da Silva
Doutorado em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
leidinicesilva@gmail.com

Natali Pamela Mora Sandi
Centro de Pesquisas Geofísicas, Universidade da Costa Rica (UCR)
natali.morasandi@ucr.ac.cr

Eric J. Alfaro
Escola de Física, Centro de Pesquisas Geofísicas, Centro de Pesquisa em Ciências Marinhas e Limnologia, Universidade da Costa Rica (UCR)
erick.alfaro@ucr.ac.cr

Hugo G. Hidalgo
Escola de Física, Centro de Pesquisas Geofísicas, Centro de Pesquisas em Matemática Pura e Aplicada, Universidade da Costa Rica (UCR)
hugo.hidalgo@ucr.ac.cr

Paulo Roberto Silva Pessoa
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará (UECE)
paulorpessoa@gmail.com

Olienaide Ribeiro de Oliveira Pinto
Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)
agron.olienaide@gmail.com

Resumo: O estado do Ceará é uma região semiárida localizada na região Nordeste do Brasil, caracterizada por uma estação chuvosa irregular, grande variabilidade climática impulsionada principalmente pelo fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), Temperatura da superfície do Mar (TSM) do Atlântico Sul tropical e eventos climáticos extremos. As secas e seus efeitos foram estudados para determinar sua frequência e ajudar a reduzir seus impactos econômicos, sociais e ambientais. Para tanto, avaliamos a variabilidade espaço-temporal do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e caracterizamos a seca para as doze regiões hidrográficas do Estado do Ceará nas escalas de 3, 6 e 12 meses. Os dados compreendem o período 1980-2020 considerando os valores mensais de precipitação fornecidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Durante os anos de 1982 e 1993, o SPI detectou as maiores secas do estado. Verificou-se também que 1996 e 1998 foram os anos com eventos secos menos intensos, apresentados nas escalas 3, 6 e 12 meses do SPI. O índice provou ser uma ferramenta útil para a identificação da seca na área de estudo em diferentes escalas de tempo. Usando a análise wavelet encontramos um aumento da potência espectral nas periodicidades de 4-10 anos, especialmente por volta de 1982 e 2011, mas essas oscilações não parecem ser significativas acima do espectro de ruído vermelho. Descobrimos que condições mais frias e mais quentes de ENOS e a variabilidade da TSM do Atlântico Sul tropical, respectivamente, estavam relacionadas com estações chuvosas mais úmidas, enquanto condições opostas de TSM com estações mais secas.
Palavras-chaves : Seca. SPI. Precipitação. Ceará. Variabilidade Climática.

Abstract: The state of Ceará is a semi-arid region located in the Northeast region of Brazil, characterized by an irregular rainy season, great climate variability mainly driven by the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), Sea Surface Temperature (SST) of the tropical South Atlantic and extreme weather events . Droughts and their effects were studied to determine their frequency and help reduce their economic, social and environmental impacts. For that, we evaluated the space-time variability of the Standardized Precipitation Index (SPI) and characterized the drought for the twelve hydrographic regions of the State of Ceará in the scales of 3, 6 and 12 months. The data comprise the period 1980-2020 considering the monthly values of precipitation provided by the Cearense Foundation of Meteorology and Water Resources (FUNCEME)During the years 1982 and 1993, the SPI detected the greatest droughts in the state. It was also verified that 1996 and 1998 were the years with less intense dry events, presented in the 3, 6 and 12 month scales of the SPI. The index proved to be a useful tool for identifying drought in the study area at different time scales. Using wavelet analysis we found increases in spectral power at periodicities of 4-10 years, especially around 1982 and 2011, but these oscillations do not seem to be significant above the red noise spectrum. We found that cooler and warmer ENSO conditions and tropical South Atlantic SST variability were related to wetter rainy seasons, while opposite SST conditions to drier seasons.
Keywords.: Drought. SPI. Precipitation. Ceará. Climate Variability.

Resumen: El estado de Ceará es una región semiárida ubicada en la región Nordeste de Brasil, caracterizada por una estación lluviosa irregular, gran variabilidad climática impulsada principalmente por el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS), la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) del trópico Atlántico Sur y fenómenos meteorológicos extremos. Se estudiaron las sequías y sus efectos para determinar su frecuencia y ayudar a reducir sus impactos económicos, sociales y ambientales. Para eso, evaluamos la variabilidad espacio-temporal del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y caracterizamos la sequía para las doce regiones hidrográficas del Estado de Ceará en las escalas de 3, 6 y 12 meses. Los datos abarcan el período 1980-2020 considerando los valores mensuales de precipitación proporcionados por la Fundación Cearense de Meteorología y Recursos Hídricos(FUNCEME). Durante los años 1982 y 1993, el SPI detectó las mayores sequías en el estado. También se verificó que 1996 y 1998 fueron los años con eventos secos menos intensos, presentados en las escalas de 3, 6 y 12 meses del SPI. El índice demostró ser una herramienta útil para identificar la sequía en el área de estudio en diferentes escalas de tiempo. Mediante el análisis de wavelet, encontramos aumentos en la potencia espectral con periodicidades de 4 a 10 años, especialmente alrededor de 1982 y 2011, pero estas oscilaciones no parecen ser significativas por encima del espectro de ruido rojo. Descobrimos que condições mais frias e mais quentes de ENOS y a usare da TSM do Atlântico Sul tropical, respectivamente, estavam relacionados com estações chuvosas mais úmidas, enquanto condições opostas de TSM com estações mais secas.
Palabras-clave.: Sequía. SPI. Precipitación. Ceará. Variabilidad Climática.

Submetido em: 30/05/2023
Aceito para publicação em: 17/11/2023
Publicado em: 20/11/2023

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, as secas mostram-se como um dos fenômenos meteorológicos mais desafiadores devido à complexidade na determinação de sua severidade, duração e extensão geográfica. Durante os períodos de seca, milhões de pessoas podem ser afetadas em todo o mundo, causando perdas econômicas significativas e impactos sociais, ambientais, agrícolas e de recursos hídricos (DING; HAYES; WIDHALM, 2011; FAO, 2016; NOBRE et al., 2016; WENG et al., 2020; DANTAS; da SILVA; GUIMARÃES, 2020).

Conforme as considerações acerca dos parâmetros de duração, severidade e intensidade, é possível classificar as secas em categorias distintas, nomeadamente, as de natureza meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica. Sob essa perspectiva, embora haja uma interdependência intrínseca entre os diferentes tipos de seca, destaca-se uma maior ênfase na investigação dos aspectos meteorológicos, hidrológicos e agrícolas. (WILHITE; GLANTZ, 1985; SANTOS et al., 2021; ALMEIDA; MARQUES, 2021).

No entanto, não existe uma definição geralmente aceita da seca e a percepção e perspectiva humana deste fenômeno físico e os seus impactos tendem a ser regionalmente específicos (HEIM; RICHARD, 2002). Existem, também, muitas metodologias diferentes para monitorar períodos secos/úmidos; a maioria dos estudos observacionais foi realizada usando índices de seca (HEIM; RICHARD, 2002; HAYES, 2006; ZARGAR et al., 2011; TRENBERTH et al., 2014; QUESADA-HERNANDÉZ et al., 2019), que, frequentemente, usam dados meteorológicos e hidrológicos.

Particularmente, no nordeste brasileiro, o comportamento e a evolução da seca têm sido monitorados por meio do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) (MCKEE et al., 1993). Encontramos diversos estudos desta tal particularidade, como em Fechine (2015), Santos (2017), Pontes et al. (2020), Da Silva et al. (2020) e Silva et al. (2013) fornecendo uma indicação da persistência de condições de déficit de precipitação na região. O estado do Ceará, no ambiente semiárido do nordeste do Brasil, é uma região com alta vulnerabilidade hídrica e é periodicamente afetado por esse perigo natural (FIAN; NELSON, 2001; DE OLIVIERA, 2019).

A ocorrência de secas severas desempenha um papel importante nas atividades agrícolas regionais em razão do efeito direto na ampla disponibilidade de sistemas de irrigação (RAMALHO, 2013; ALVALA et al., 2017). Alguns estudos têm mostrado que as regiões

semiáridas são uma das regiões mais vulneráveis do mundo a eventos climáticos extremos (SILVA et al., 2013; ALVALA et al., 2017; SENA et al., 2018; MARENGO et al., 2020) e as projeções climáticas futuras sugerem uma intensificação de déficits hídricos, relacionados a aumentos de temperaturas e reduções de chuva (GUIMARÃES et al., 2016; MARENGO et al., 2017; TORRES; ALVES, 2017; IPCC, 2022).

Em termos de duração e intensidade, a pior estiagem desde 1980 que afetou o estado cearense foi no período 2012-2016, onde foram registradas anomalias negativas de precipitação em mais de 50% da região, principalmente no centro e sul da região. Na verdade, o governo federal declarou estado de "calamidade pública" mais de 6.295 vezes devido às secas no estado do Ceará (LIMA, 2020; QUEIROGA, 2019). Dessa maneira, a proposta central deste estudo reside na avaliação da variabilidade espaço-temporal dos padrões de precipitação, assim como uma identificação de seus determinantes subjacentes. Além disso, busca-se caracterizar períodos úmidos/secos para as doze regiões hidrográficas do Estado do Ceará ao longo do período compreendido entre 1980 e 2020. Através desta investigação, pretende-se alcançar uma compreensão aprofundada da dinâmica inerente às secas, bem como das suas características, com vistas a uma apreensão mais abrangente dos impactos destes eventos sobre as esferas humanas e ambientais. Essa abordagem, por sua vez, poderá trazer benefícios positivos no âmbito das medidas preventivas e mitigadoras, buscando atenuar os efeitos adversos ou conter os acidentes decorrentes do perigo intrínseco à ocorrência de secas (CARMO; LIMA, 2020; SILVA et al., 2021).

Embora diversos estudos tenham sido previamente divulgados sobre essa região, a natureza imprevisível do período de precipitação, a suscetibilidade da comunidade local e a oscilação climática peculiar do estado do Ceará conferem fortalecimento crucial à persistência da vigilância contínua e à prossecução das pesquisas referentes à seca. Dada a importância de entender os impactos da seca e da variabilidade climática, ainda há muito trabalho a ser feito para aumentar a resiliência e melhorar as políticas de seca e medidas de planejamento de resposta no Ceará.

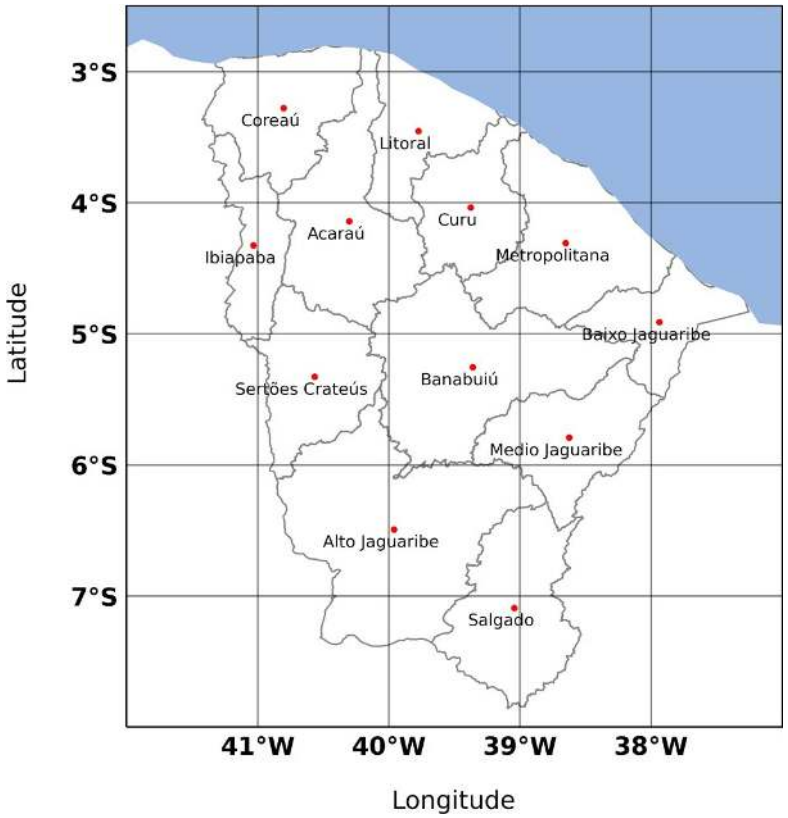
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O Estado do Ceará está localizado na região Nordeste do Brasil sendo composto por doze bacias hidrográficas (Figura 1) e ocupa uma área de cerca de 136.328 km². Tem como limites a leste os estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba, ao sul o estado de Pernambuco, a oeste o estado do Piauí e é banhado ao norte pelo Oceano Atlântico. Semiárida, situa-se na vertente nordeste do grande planalto brasileiro e na costa arenosa. Nessa região, quase 80% da mão de obra agrícola é composta pela agricultura familiar, segundo dados do último Censo Agropecuário realizado pelo IBGE em 2017 (IBGE, 2019).

O clima semiárido da região Nordeste do Brasil é caracterizado pela vegetação da Caatinga, baixos níveis de precipitação, alta radiação solar e taxas de evaporação (GONDIM et al., 2017). Como consequência, a região se destaca por ser vulnerável a eventos de seca, com um intenso período de estiagem de sete meses. A estação seca vai de junho a dezembro, e a principal estação chuvosa ocorre de janeiro a maio (FUNCEME, 2020).

Figura 1 - Localização das bacias hidrográficas do estado do Ceará.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

As condições climáticas no Nordeste brasileiro são influenciadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), distúrbios de ondas de leste, circulações de brisa, sistemas convectivos de mesoescala, linhas de instabilidade e vórtices ciclônicos de alto nível (UVO; BERNDTSSON, 1996). A variabilidade climática interanual é modulada pelas anomalias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (UVO et al., 1998), e a seca tem sido relacionada à fase quente dos episódios de El Niño–Oscilação Sul (ENOS) (SILVA et al., 2021). Desta forma, Enfield e Mestas-Nuñez (1999; 2000) e Mestas-Nuñez e Enfield (1999; 2001) mostraram que o clima local do Nordeste do Brasil pode ser modulado por variabilidades multiescala em TSMs globais através de relações com padrões climáticos troposféricos.

2.2 Dados

Foram utilizados registros de precipitação para avaliar as condições hidrológicas de doze bacias hidrográficas no estado do Ceará, a saber Acaraú, Alto Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Banabuiú, Coreaú, Curu, Ibiapaba, Litoral, Médio Jaguaribe, Metropolitana, Salgado e Sertões Crateús (conforme indicado na Figura 1), durante um período abrangente de 41 anos, de 1980 a 2020.

Estes dados foram fornecidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) e constituíram a base da análise testada para investigar os padrões de seca na região em questão. As estações meteorológicas são automáticas e com dados mensais em todos os períodos. As séries cronológicas referentes à cada região foram construídas por meio da utilização da técnica empregando o método de Thiessen (DAVIS, 1986). Dados concernentes às características das bacias hidrográficas, coordenadas do ponto central e valores altimétricos associados estão disponibilizados de forma detalhada na Tabela 1.

Tabela 1- Lista das bacias hidrográficas do estado do Ceará, suas localizações de centróides e altitude. Tendências lineares significativas dos índices de precipitação associados com 95% de confiança são destacadas em negrito

Número da Bacia	Nome da Bacia	Latitude Norte	Longitude Leste	Altitude (m)	Tendência (x 10^{-2} mm/month)
1	Acaraú	-40,3	-4,14	168	-3.68
2	Alto Jaguaribe	-39,96	-6,49	311	-3.78
3	Baixo Jaguaribe	-37,94	-4,91	21	-2.81
4	Banabuiú	-39,36	-5,26	247	-3.24
5	Coreaú	-40,8	-3,28	35	-3.63
6	Curu	-39,38	-4,04	128	-2.58
7	Ibiapaba	-41,03	-4,32	658	-6.18
8	Litoral	-39,77	-3,45	57	-3.35
9	Médio Jaguaribe	-38,62	-5,79	138	**-5.51**
10	Metropolitana	-38,65	-4,31	113	-2.90
11	Salgado	-39,04	-7,09	335	-2.15
12	Sertões Crateús	-40,57	-5,33	297	-2.02

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

As séries temporais mensais de SST dos índices Niño 3.4 do Atlântico sul tropical foram usadas para contabilizar as variações causadas pelo ENOS e pelas condições climáticas do Oceano Atlântico nas regiões tropicais do Pacífico e do Atlântico. Os dados foram obtidos no Laboratório de Ciências Físicas da NOAA (https://psl.noaa.gov/data/correlation/nina34.anom.data e https://psl.noaa.gov/data/correlation/tsa.data, respectivamente). Esses índices foram selecionados porque foram sugeridos como fontes de variabilidade climática de precipitação no Ceará (por exemplo, MESTAS-NUÑEZ; ENFIELD, 2001; SILVA et al., 2021). A variabilidade da

TSM do oceano Atlântico sul tropical (ALFARO; SOLEY, 1999) é importante através da sua comparação com a variabilidade da TSM do Atlântico Norte Tropical (TNA) (ALFARO, 2000), associada ao Dipolo da TSM do Atlântico (SILVA et al., 2021) e à condição ENOS (MESTAS; NUÑEZ; ENFIELD, 2001).

2.3. Metodologia

Os dados da série temporal de 12 precipitações mensais das bacias hidrográficas da região do Ceará foram compostos em um índice de precipitação normalizado (PINDEX), subtraindo as médias de precipitação mensal histórica e dividindo essas anomalias por seus desvios padrão mensais históricos. As tendências foram removidas da série normalizada, subtraindo um modelo de regressão linear simples (WILKS, 2019).

Uma matriz de correlação foi estimada usando esses últimos índices de tendência normalizados de precipitação mensal para explorar a covariabilidade temporal e sua coerência espacial. Devido às altas intercorrelações entre as regiões, foram estimadas as médias mensais dos 12 Pindex normalizados e sem tendência para se obter um único índice de precipitação para todo o estado do Ceará. Esse índice foi usado para calcular o SPI e a análise de wavelets.

2.3.1 Índice de SPI

O Índice de Precipitação Padronizada (SPI) constitui-se como um indicador de seca desenvolvido pelo trabalho de Mckee et al. (1993) com o propósito de avaliar tantos déficits (períodos secos) quanto excessos (períodos úmidos) de precipitação em diversas escalas temporais, fundamentando-se em dados históricos de entrada. Amplamente adotado mundialmente, o SPI se configura como a ferramenta preeminente para identificação e quantificação das condições de seca, inclusive em sua intensidade, fenômeno natural que impacta consideravelmente o abastecimento hídrico, as práticas agrícolas e os sistemas hidrológicos. A notável potência do SPI reside em sua simplicidade e praticidade de cálculo, porque a precipitação é o único parâmetro de entrada; que permite estudar secas meteorológicas (1-3 meses), agrícolas (3-7 meses) e hidrológicas (7 meses acima).

Adicionalmente, o SPI assume um papel de destaque na projeção de eventos extremos, servindo como medida de prevenção ante situações potenciais de seca (SILVA et

al., 2021). É importante notar que o referido índice é altamente recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2012), endossando sua validade e utilidade substanciais na monitorização e análise das manifestações de seca em âmbito global.

O SPI é útil, também, para prever eventos extremos, como medida preventiva de seca (SILVA et al., 2021) e é altamente recomendado pela Organização Meteorológica Mundial. Os valores de SPI são classificados em diferentes condições de seca com base na classificação SPI proposta por McKee et al. (1993) mostrado na Tabela 2. Neste estudo, o SPI foi calculado para o índice do estado do Ceará (CE) de 1980 a 2020 usando o software R e a metodologia descrita por Wheatley (2010) para 1-, 2-, 3- ,6-, Tempo de 12, 24 e 36 escalas de meses. O roteiro foi fornecido por Muñoz (2014) que escreveu o código para o Observatório Latino-Americano (OLA), um centro da The New School University em Nova York.

Tabela 2- SPI valores

SPI valores	Categoria
2+	extremamente úmido
1.5 to 1.99	Severamente úmido
1.0 to 1.49	moderamente úmido
-0.99 to 0.99	quase normal
-1 to -1.49	Moderamente seco
-1.5 to -1.99	Severamente seco
-2 and less	Extremamente seco

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

2.3.2 Análise de Wavelet

O uso do wavelet é indicado para a compreensão de eventos irregularmente distribuídos e séries temporais que contenham potências não estacionárias em diferentes frequências, posto que ela traz diversas vantagens sobre as análises espectrais clássicas, pois permite analisar a periodicidade de eventos em diferentes escalas da variabilidade temporal e não carece de uma série estacionária.

De acordo com Santos et al. (2013), a nomenclatura do termo tem origem no francês "ondelette", que significa "onda pequena". O espectro de potência wavelet foi calculado de acordo com o código em MatlabR fornecido por Torrence e Compo (1998). Um espectro de ruído vermelho foi usado como ruído de fundo para o sinal espectral. Outros parâmetros do software em relação às wavelets são: wavelet mãe = Morlet, pad =1; com zeros os dados nas

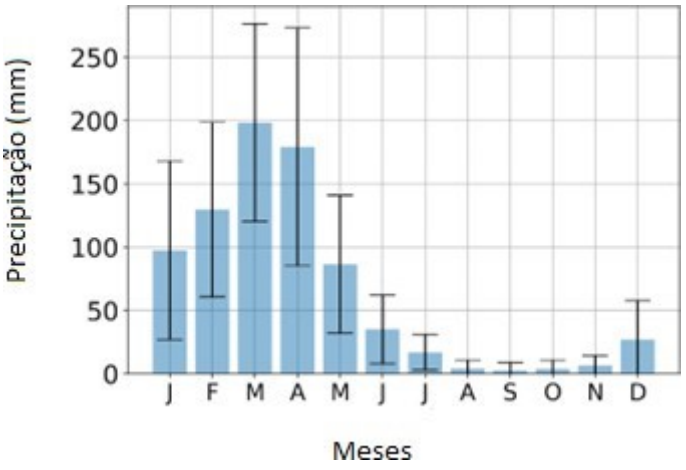
bordas, dj = 0,25 (4 sub-oitavas por oitava) e j1 = 7/dj (7 potências de dois com dj sub-oitavas cada). O espectro wavelet foi usado para determinar as frequências dominantes e, portanto, as periodicidades da precipitação normalizada no estado do Ceará.

A Transformada Wavelet (TW) é considerada um avanço contemporâneo no processamento de sinais e despertou interesse para diversas aplicações desde seu desenvolvimento teórico em 1984 por Grossman e Morlet. Sua aplicação tem se expandido de maneira acelerada, com o objetivo de superar as limitações de técnicas clássicas de análise de sinais como a Transformada Janelada de Fourier (TF) apresentando-se como uma alternativa ao preservar fenômenos locais, não periódicos e de múltiplas escalas. A TW dispõe de pequenas ondas de curta duração (denominadas de Wavelet Mãe) que são transpostas através de uma série temporal e que se dilatam e se comprimem para apodera-se de altas e baixas frequências nos sinais (BOLZAN,2006; SANTOS, FREIRE; TORRENCE, 2013; WILKS, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 mostra a média das doze médias anuais históricas dos índices listados na Tabela 1. Observa-se que as chuvas ocorreram, principalmente de janeiro a maio (88%), com máximo em março, semelhante à da Silva et al. (2021) para a sub-bacia do Choró. Um período seco está presente de junho a dezembro, com um mínimo em setembro. Os meses de máxima e mínima variabilidade são abril e outubro, respectivamente.

Figura 2 -Médias climatológicas de precipitação (barras) para o estado do Ceará de 1980 a 2020. Bigodes são de ± um desvio padrão considerando a variação da climatologia das 12 regiões.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Na matriz de correlação apresentada na Tabela 3 mostra-se os altos valores de correlação positiva e estatisticamente significativa, sugerindo uma covariabilidade importante entre os índices; portanto, os índices de precipitação original das regiões individuais podem ser calculados em uma única série temporal representando a variabilidade climática do estado do Ceará, reduzindo a dimensionalidade da análise.

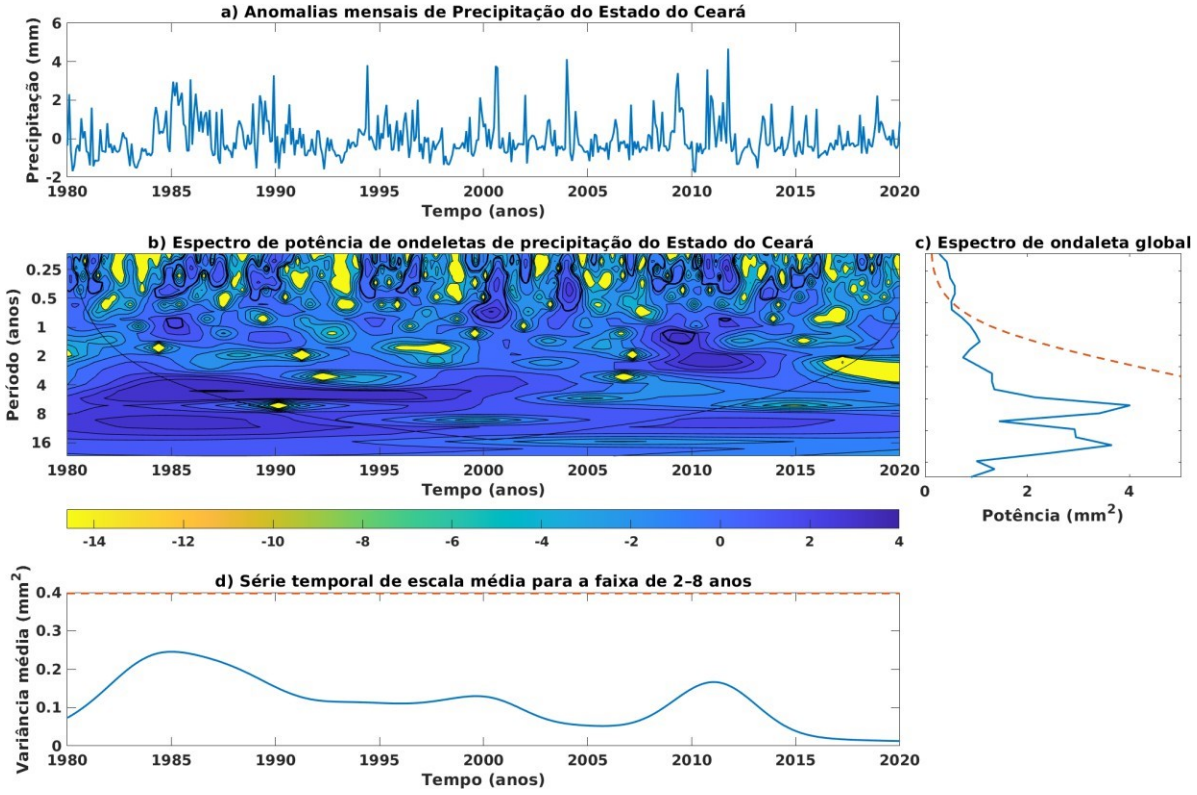
Tabela 3- Matriz de correlação para os doze índices de precipitação normalizados e sem tendência listados na Tabela 1. Todas as correlações têm um valor p < 0,01.

	2	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	0,70	0,74	0,71	0,76	0,76	0,80	0,60	0,72	0,71	0,64	0,73
2		0,69	0,73	0,62	0,67	0,71	0,49	0,76	0,69	0,80	0,74
3			0,76	0,66	0,81	0,74	0,50	0,79	0,83	0,64	0,65
4				0,62	0,72	0,70	0,50	0,82	0,75	0,63	0,68
5					0,73	0,80	0,59	0,65	0,69	0,59	0,66
6						0,78	0,66	0,73	0,87	0,64	0,67
7							0,52	0,75	0,70	0,65	0,72
8								0,48	0,63	0,43	0,52
9									0,72	0,69	0,71
10										0,62	0,65
11											0,65

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A análise wavelet tempo-frequência para o índice de precipitação do Estado do Ceará (CE) é apresentada na Figura 3a; fica claro que a maior parte da energia está localizada em períodos de 4 a 10 anos (Figura 3b), com máximo por volta de 1985. Dois picos secundários são observados por volta de 2000 e 2011 (Figura 3d). A banda de frequências ENOS (Figura 3c) apresentou aumento de potência por volta dos mesmos anos, embora não tenha atingido significância acima do ruído vermelho.

Figura 3 - Análise tempo-frequência para o índice de precipitação do Estado do Ceará, a) séries temporais do índice, b) gráfico de contorno wavelet, c) espectro de fourier e d) séries temporais médias de escala correspondentes à banda de frequência usual do ENOS.



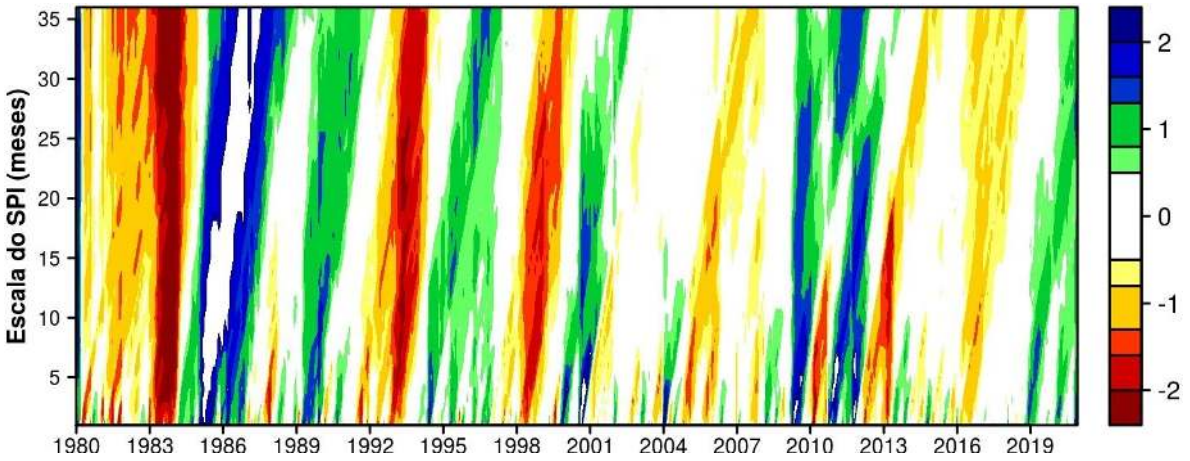
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Figura 4 ilustra a variabilidade do SPI mensal para o índice de precipitação do CE (média das doze regiões hidrográficas do estado do Ceará) em diferentes escalas de tempo (1 a 36 meses) de 1980 a 2020. A figura mostra o efeito cumulativo da seca em diferentes escalas de tempo, períodos prolongados em vermelho indicam durações longas (eixo horizontal), enquanto tons de vermelho que se estendem por várias escalas de tempo (eixo vertical) indicam a evolução da seca meteorológica (duração de alguns meses), para secas agrícolas ou

hidrológicas (vários meses).

Observe, na Figura 4, uma recorrência de períodos secos (cores vermelho/laranja) de 1981 a 1983 e alguns anos úmidos como em 1984–1986 (cores azul/verde). Outras secas importantes foram observadas no Ceará de 1991 a 1993 e de 1998 a 1999. Outros eventos menores foram observados a partir de 2005-2006, 2010, 2012-2013 e 2016, de acordo com o estudo anterior de Silva et al. (2021) para a sub-bacia do Choró. Condições mais úmidas começando em 1985-1987, 1989-1990, 1994-1995, 1999-2000, 2009, 2011 e 2019. Os resultados de Marengo et al. (2017) mostraram que de 1979 a 1983 algumas áreas do semiárido nordestino foram afetadas por secas, o que é consistente com os eventos de seca identificados. De acordo com o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, 2018), os anos de 1982 e 1983 foram registrados como fases quentes do ENOS, uma das principais causas da deficiência de chuvas e seca na região, além de algumas condições frias de TSM observadas no TSA (ALFARO; SOLEY, 1999).

Figura 4 - Escala de tempo do SPI para o estado do Ceará para o índice mensal de precipitação

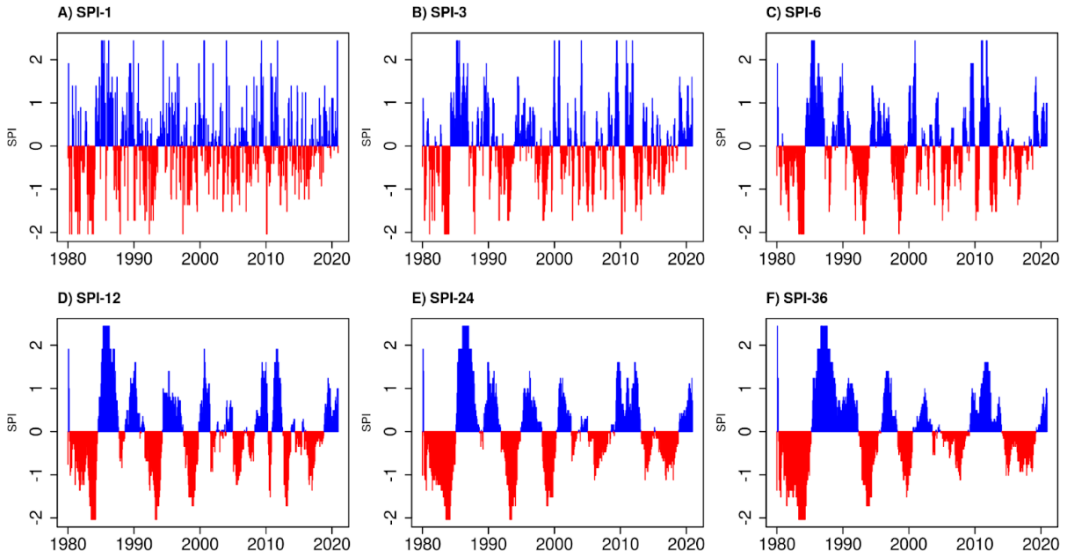


Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

O SPI (Índice de Precipitação Padronizada) foi calculado para o estado do Ceará em diferentes períodos de 1, 3, 6, 12, 24 e 36 meses (Figura 5). Nesse contexto, são perceptíveis as condições graves e persistentes de seca que se estenderam de 1980 a 1983. A ocorrência mais recente de eventos secos, iniciada em 2012, é notável na escala de SPI-12. Entre 2012 e 2018, houve registros de déficits influenciados por precipitação, impactando diversos setores da sociedade (BURITI, 2020). Especificamente, o ano de 2012 foi marcado pela presença de

águas quentes no Atlântico Norte Tropical, associadas ao fenômeno do Dipolo Atlântico. Os picos acentuados de aridez observados entre 2012 e 2018 são considerados, segundo a literatura, como um dos períodos de seca mais recentes e prolongados a afetar o estado (NUNES; MEDEROS, 2020; MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017; MARENGO et al., 2020).

Figura 5 -Série temporal do SPI para o índice mensal de precipitação do estado do Ceará (CE) em a) escala de 1 mês (SPI 1), b) escala de 3 meses(SPI 3), c) escala de 6 meses(SPI 6), d) escala de 12 meses(SPI 12), e) escala de tempo de 24 meses(SPI 5) , f) escala de tempo de 36 meses(SPI 6).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Tabela 4 mostra a contingência entre os meses JFMAM (janeiro-fevereiro-março-abril-maio) TSA-Niño 3.4 anual e os índices de precipitação. Os resultados mostram que, nos anos em que a TSM tende a ser mais fria (mais quente) na TSA quando comparadas com o Niño 3.4, as estações chuvosas tendem a ser mais secas (mais úmidas) no Ceará.

Tabela 4- Análise de contingência entre JFMAM anual de TSA-Niño 3.4 e índices de precipitação, para 1980-2020 (41 anos). Os valores dentro dos parênteses são para ocorrências empíricas e os valores fora são para ocorrências relativas expressas como porcentagens de linha. Correlação de Spearman = 0,65*** e χ2=17,28***. A significância das contagens baixa e alta foi estimada contra um teste de Montecarlo de 104 tabelas aleatórias. Nesta tabela, *** indica uma significância estatística de α < 0,01. BN indica abaixo do normal, N é normal e AN denota acima do normal.

		P-JFMAM (mm)		
		BN	**N**	**AN**
TSA-Niño 3.4	**BN**	64(9)***	29(4)	7(1)***
JFMAM	**N**	31(4)	46(6)	23(3)
	AN	7(1)***	21(3)	72(10)***

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Os anos para as condições abaixo da normal climatológica foram: 1981, 1982, 1983, 1987, 1990, 1993, 1998, 2012 e 2015, enquanto para as condições acima da normal climatológica foram: 1984, 1985, 1986, 1988, 1989, 1996, 2008, 2009, 2011 e 2020. Mestas-Nuñez e Enfield (2001) sugeriram que o mecanismo associado aos déficits de chuva relacionados ao El Niño no nordeste do Brasil é o deslocamento para o norte da ZCIT do Atlântico em resposta ao aquecimento induzido pelo El Niño no norte Atlântico (ENFIELD; MAYER, 1997), enquanto os eventos de La Niña favorecem as posições ao sul da ZCIT e as precipitações sobre o nordeste do Brasil. Eventos quentes e frios também influenciam a posição da Zona de Convergência Intertropical Atlântica, através das latitudes sul e norte, favorecendo estações chuvosas mais úmidas e secas no nordeste do Brasil (SILVA et. al., 2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto do estado do Ceará, é importante ressaltar que as precipitações se concentraram principalmente no período compreendido entre janeiro e maio, representando aproximadamente 88% do total registrado. Março se destacou como o mês de maior chuva nesse intervalo. Em contrapartida, observou-se um período caracterizado pela escassez de chuvas, que abrange os meses de junho a dezembro, atingindo seu mínimo em setembro. Além disso, ao se analisar os índices de precipitação da bacia ao longo do período de 1980 a 2020, torna-se evidente a presença de tendências negativas.

Altos valores negativos de SPI, caracterizando eventos de seca severa e extrema, foram identificados em todas as estações estudadas. Esses eventos ocorreram em muitos casos

devido à ocorrência simultânea de fenômenos e mecanismos indutores de chuva em várias escalas de tempo que são responsáveis por anomalias de precipitação.

A análise do SPI mostrou uma recorrência de períodos secos no Ceará de 1981 a 1983 e alguns anos úmidos, como em 1984-1986. Outras secas importantes foram observadas no Ceará de 1998 a 1999. Outros eventos menores foram observados em 2005, 2006, 2010, 2012, 2013 e 2016. Condições mais úmidas começando em 1985-1987, 1989-1990, 1994-1995, 1999-2000, 2009, 2011 e 2019. A análise wavelet mostrou que a maior parte da energia situa- se em períodos de 4 a 10 anos, com máximo em torno de 1985 para o índice de precipitação do estado do Ceará.

A análise de contingência mostrou que, nos anos em que as TSM tendem a ser mais frias (mais quentes) na TSA quando comparadas com o Niño 3.4, as estações chuvosas tendem a ser mais secas (úmidas) no Ceará, favorecendo as posições norte (sul) da ZCIT, já que o clima local do Nordeste do Brasil poderia ser modulado por variabilidades multiescala em TSMs globais através de relações com padrões climáticos troposféricos.

O SPI revelou-se bastante capaz de quantificar eventos secos, evidenciando-se como uma ferramenta adequada para mitigar eventos extremos de seca, posto que a identificação e o monitoramento precoces resultam em um conjunto de informações que auxiliam diversos setores, mitigando os impactos que esses eventos podem causar na sociedade. Assim, também deve ocorrer a promoção de políticas públicas tanto ao nível municipal, como Estadual e Federal que visem à consolidação de estratégias eficazes na atenuação dos problemas socioambientais no semiárido nordestino. Portanto, os elementos supracitados evidenciam a importância do entendimento acerca de fenômenos climáticos de caráter extremo.

AGRADECIMENTOS

À Escola de Física da UCR por nos ceder o tempo de pesquisa para desenvolver este estudo e ao centro de pesquisa da UCR CIGEFI pelo apoio logístico durante a compilação e análise dos dados. Os autores desejam agradecer o financiamento desta pesquisa através das seguintes bolsas da Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica: V.I. C0074, B9454 (apoiado pelo Fondo de Grupos), EC-497 (VarClim, apoiado pela FEES-CONARE), C0-610

(apoiado pelo Fondo de Estímulo), e ao projeto RC4 (apoiado por CSUCA-IDRC). Ao Mestrado Acadêmico em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis da UNILAB e especialmente à FUNCEME pela disponibilização dos dados utilizados.

REFERÊNCIAS

ALFARO, Eric J. Eventos Cálidos y Fríos en el Atlántico Tropical Norte. **Atmósfera**, v. 13, n. 2, p. 109-119, may./jun.2000. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362000000200004&lng=es&nrm=iso.

ALFARO, Eric J; SOLEY, Francisco J. Eventos Cálidos y Fríos en el Atlántico Tropical Sur. **Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos**, v. 6, n. 2, p. 65-70, nov.1999. Disponível em: https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/76667/1999_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

ALMEIDA, Hermes Alves de; MARQUES, Maysa Porto Farias. Análises Comparativas De Índices De Seca Meteorológica Para O Polo De Petrolina, PE, E Juazeiro, BA. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento,** 04. ed, v. 06, p. 81-98, abr.2021. ISSN: 2448-0959. 2021. ISSN: 2448-0959. DOI: 10.32749/nucleo conhecimento.com.br/geografia/seca-meteorológica. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/geografia/seca-meteorologica.

ALVALA, Regina et al. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências,** v. 91, 2017.

BURITI, Catarina de Oliveira et al. Um Século de Secas: Por que as Políticas Hídricas não Transformaram a Região Semiárida Brasileira?. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n. ahead, 2020.

CARMO, Maria Vitória Nava Silva do; LIMA, Carlos Henrique Ribeiro. Caracterização Espaço-Temporal das Secas no Nordeste a partir da Análise do índice SPI. **Revista Brasileira de Meteorologia,** v. 35, p. 233-242, 2020.

COSTA, Maria Tatiana Lima et al. Jornalismo e imaginário: a simbologia da seca. 2020.

DA SILVA, Djane Fonseca et al. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 449-464, abr.2020. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/243372

DANTAS, José Carlos; DA SILVA, Richarde Marques; GUIMARÃES, Celso Augusto. Drought impacts, social organization, and public policies in northeastern Brazil: a case study of the

upper Paraíba River basin. **Environ Monit Asses**, v. 192, n. 317, apr.2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-020-8219-0

DA SILVA, Richarde Marques et al. Spatial distribution and estimation of rainfall trends and erosivity in the Epitácio Pessoa reservoir catchment, Paraíba, Brazil. **Natural hazards**, v. 102, p. 829-849, 2020.

DAVIS, John C.; SAMPSON, Robert J. **Statistics and data analysis in geology.** New York: Wiley, 1986.

DE OLIVEIRA, Victor Hugo. Natural disasters and economic growth in Northeast Brazil: evidence from municipal economies of the Ceará State. **Environment and Development Economics, v**. 24, n. 3, p. 271-293, 2019.

DILLING, Lisa; LEMOS, Maria Carmen. Creating usable science: Opportunities and constraints for climate knowledge use and their implications for science policy. **Global environmental change,** v. 21, n. 2, p. 680-689, 2011.

ENFIELD, David B.; MAYER, Dennis A. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation. **Journal of Geophysical Research: Oceans,** v. 102, n. C1, p. 929-945, 1997.

ENFIELD, David B.; MESTAS-NUÑEZ, Alberto M. Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationships with tropospheric climate patterns. **Journal of Climate,** v. 12, n. 9, p. 2719-2733, 1999.

ENFIELD, David B.; MESTAS-NUÑEZ, Alberto M. Interannual to multidecadal climate variability and its relationship to global sea surface temperatures. In: **Interhemispheric Climate Linkages.** Academic Press, 2000. p. 17-29.

FAO (Food and Agriculture Organization. Dry corridor-situation report June 2016. https://www.fao.org/3/br092e/br092e.pdf

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Volume Armazenado,** 2020.

FECHINE, José Alegnoberto Leite. Identificação de secas meteorológicas na região metropolitana de Fortaleza, usando o índice de precipitação padronizada (SPI). **Boletim de Geografia,** v. 33, n. 2, p. 18-33, 2015.

FINAN, Timothy J.; NELSON, Donald R. Making rain, making roads, making do: public and private adaptations to drought in Ceará, Northeast Brazil. **Climate research**, v. 19, n. 2, p. 97-108, 2001.

GONDIM, Joaquim et al. A seca atual no Semiárido nordestino–Impactos sobre os recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, p. 277-300, 2017. Disponível em: https://www.academia.edu/81697380/A_seca_atual_no_Semi%C3%A1rido_nordestino_Impactos_sobre_os_recursos_h%C3%ADdricos.

GUIMARÃES, Sullyandro Oliveira et al. Climate change projections over the Brazilian Northeast of the CMIP5 and CORDEX models. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 337-365, 2016.

HAYES, Michael J.; ALVORD, C.; LOWREY, J. Drought indices. **Intermountain west climate summary,** v. 3, n. 6, p. 2-6, 2

HEIM JR, Richard R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, n. 8, p. 1149-1166, 2002.

IBGE. (2019) Censo Agropecuário: Resultados Definitivos 2017. Rio de Janeiro.

AGROPECUÁRIO, Censo. Resultados definitivos. Rio de Janeiro–RJ, IBGE, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC. La Niña. El Niño. 2018. Disponível em: http://enos.cptec.inpe.br/ Acesso em 06/09/2021.

IPCC. "Summary for policymakers" in Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, p. 1-367

LIMA, Maria Tatiana. Jornalismo e imaginário: a simbologia da seca. Feb.2020. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Comunicação e Culturas Midiáticas) – Universidade Federal da Paraíba, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/20376.

NOBRE, Carlos A. et al. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 2, p. 252-262, 2016.

MARENGO, Jose A.; CUNHA, Ana P.; ALVES, Lincoln M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanálise**, v. 3, n. 1, p. 49-54, 2016.

MARENGO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1189-1200, 2017.

MARENGO, Jose A. et al. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 C. **Natural Hazards**, v. 103, p. 2589-2611, 2020.

MESTAS-NUÑES, Alberto M; ENFIELD, David B. Eastern Equatorial Pacific SST Variability: ENSO and Non-ENSO Components and Their Climatic Associations. **Journal of Climate***,* v. 14, n. 3, p. 391-402, feb.2001. DOI: https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0391:EEPSVE>2.0.CO;2

MESTAS-NUÑEZ, Alberto M; ENFIELD, Davis B. Rotated global modes of non-ENSO sea surface temperature variability. **J. Climate***,* v. 12, p. 2735–2746, dec.1999. Disponível em: https://www.aoml.noaa.gov/phod/docs/gmsst2.pdf

MUÑOZ, Ángel; VAN MEERBECK, Cedric - . Visualización y aplicaciones del SPI como indicador para eventos de sequía en el Caribe. Taller sobre el uso del índice estandarizado de precipitación (SPI). 2014, San José, Costa Rica. Disponível em : https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/informe-taller-spi.pdf

MCKEE, Thomas B; DOESKEN, Nolan; KLEIST, John - . The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California. p. 179–184, jan.1993. Disponível em: https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf

NOBRE, Carlos A et al. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 2, p. 252-262, 2016. DOI: 10.4236/jwarp.2016.82022

NUNES, Luiz Fabiano Camilo Viana; MEDEIROS, Pedro Henrique Augusto. Análise histórica da severidade de secas no Ceará: efeitos da aquisição de capital hidráulico sobre a sociedade. **Revista de Gestão de Água da América Latina,** v. 17, jan./dez.2020. DOI: https://doi.org/10.21168/rega.v17e18

ORGANIZACIÓN METEOROLOGICA MUNDIAL. Guía del usuario sobre el Índice Normalizado de Precipitación (OMM-No 1090) (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood), Ginebra, 2012. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7769

PONTES, João Dehon et al. Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012–2018 drought in Northeast Brazil. **Water**, v. 12, n. 3, p. 834, mar.2020. DOI: https://doi.org/10.3390/w12030834

QUEIROGA, Francisco de Assis- Análise econômico-financeira, ambiental e social do modelo de gestão de lotes para os colonos do perimetro irrigado de São Gonçalo (PISG). 2019. Monografia (Especialização em Administração da Unidade Acadêmica de Ciências Contábeis do Centro de Ciências Jurídicas e Sociais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil. 2019. Disponível em:http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/13681

RAMALHO, Maria Francisca de. A fragilidade ambiental do Nordeste brasileiro: o clima semiárido e as imprevisões das grandes estiagens. **Sociedade e Território**, v. 25, n. 2, p. 104-115, jun.2013. Disponível em: https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/3629

SVOBODA, M.; HAYES, M.; WOOD, D. Índice Normalizado De Precipitación. Guía de Usuario. Organización Meteorológica Mundial. 2012.

SANTOS, Maria Auxiliadora Freitas; COSTA, Valéria Sandra; GALVINCIO, Josiclêda Domiciano. Secas meteorológica, agrícola, hidrológica no município de Serrinha-BA. **Revista Brasileira de Climatologia,** v. 28, 2021.

SANTOS, Sergio Rodrigo Quadros dos et al. Determinação de regiões homogêneas do índice de precipitação normalizada (SPI) na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia,** v. 32, p. 111-122, 2017.

SENA, Aderita et al. Drought in the semiarid region of Brazil: Exposure, vulnerabilities and health impacts from the perspectives of local actors. **PLoS currents,** v. 10, 2018.

SILVA, Fernanda et al. Avaliação da ocorrência de secas na Bahia utilizando o Índice de Precipitação Padronizada (SPI). **Bahia Análise & Dado***s*, v. 23, n. 2, p. 461-473, 2013. Disponível em:https://www.researchgate.net/publication/274082609_Avaliacao_da_ocorrencia_de_secas_na_Bahia_utilizando_o_Indice_de_Precipitacao_Padronizada_SPI

SILVA, Greicy Kelly da et al. Análise da Variabilidade Espaço-Temporal do SPI: Um Estudo de Caso para a Sub-Bacia Choró, Ceará, Brasil**. Revista Brasileira de Meteorologia,** v. 36, p. 539-549, 2021.

TRENBERTH, Kevin E. et al. Global warming and changes in drought. Nature Climate Change, v. 4, n. 1, p. 17-22, 2014. Disponível em:https://doi.org/10.1038/nclimate2067.

UVO, Cíntia; BERNDTSSON, Ronny. Regionalization and spatial properties of Ceará State rainfall in Northeast Brazil. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres,** v. 101, n. D2, p. 4221-4233, 1996.. https://doi.org/10.1029/95JD03235

UVO, Cintia Bertacchi et al. The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation. **Journal of climate**, v. 11, n. 4, p. 551-562, 1998.

WENG, Wei et al. Landscape matters: Insights from the impact of mega-droughts on Colombia's energy transition. **Environmental Innovation and Societal Transitions,** v. 36, p. 1-16, 2020..

WILHITE, Donald A.; GLANTZ, Michael H. Understanding the drought phenomenon: The role definitions. In: WILHITE et al. Planning for drought toward a reduction of societal vulnerability. Colorado: Westview, 1987. cap. 2, p. 11-14.

WILKS, D. S. Statistical forecasting. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. DS Wilks, Ed. 2019.

WHEATLEY, J. Visualizing Drought. biospherica. **URL: http://joewheatley. net/visualizing-drought, 2010.**

ZARGAR, Amin et al. A review of drought indices. **Environmental Reviews,** v. 19, n. NA, p. 333-349, 2011.