

Evaluation of environmental degradation on biomes in brazilian Northeastern

Bárbara A. Batista*, Washington L. F. Correia Filho**, José F. de Oliveira Júnior*, Carla T. B. dos Santos*, Dimas de B. Santiago***

*Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL, Brasil. E-mails: barbara.alba18@gmail.com, jose.junior@icat.ufal.br, carlataciane01@gmail.com

**Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, Brasil. E-mail: washington.correia@furg.br

***Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, Brasil. E-mail: dimas.barros91@gmail.com

Received 9 September 2021; accepted 30 December 2021

Abstract

In recent years, due to irregular rainfall, several regions across the globe suffer from some type of environmental degradation. Depending on the degree of intensity, they can lead to a series of socioeconomic problems, both regional and national. One of the most emblematic types of degradation today is the desertification development process, resulting in a combination of factors: anthropic, climatic, and/or environmental. In an attempt to understand the behavior of these impacts, this work evaluated the degradation process based on the Aridity Index (AI) on biomes located in the Brazilian Northeast (Caatinga, Atlantic Forest, Amazon, and Cerrado). The AI consists of the relationship between the use of evapotranspiration (in this case, the Thornthwaite estimation method) and precipitation. The data used correspond to the product *Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas* (CHELSA), which have a spatial resolution of 1km x 1km and temporal resolution on a monthly scale, from 1979 to 2013. In addition, it was found that the AI behavior during years of the occurrence of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) warm phase, the El Niños. The identification of El Niño episodes was based on the Oceanic Niño Index (ONI) climate proxy, characterized by the Equatorial Pacific region known as the Niño 3.4 region, from which the years 1983, 1993, 1998, and 2012 were selected. AI results point out different behaviors between the biomes, mainly over the south of the northeastern Cerrado and the Caatinga, motivated by the strong variability of rainfall in the respective regions. The Caatinga stands out, which exhibited a large part of its area was classified as arid (AI between 0.05 – 0.20) and hyper-arid (AI < 0.05), mainly in 2012. The Amazon and biomes, on the other hand. Atlantic Forest has areas classified as semi-arid (AI < 0.5). El Niño had a reduction in the AI values, motivated by the long periods of drought and irregular rainfall that negatively impacted the semi-arid of the Northeast region.

Keywords: El Niño-Southern Oscillation, Aridity Index, *Caatinga*, Northeastern Brazil.

Avaliação da degradação ambiental sobre os biomas do Nordeste brasileiro

Resumo

Nos últimos anos, em virtude da irregularidade das chuvas, diversas regiões ao longo do globo sofrem com algum tipo de degradação ambiental. Dependendo do grau de intensidade podem acarretar numa série de problemas socioeconômicos, tanto regionais como nacionais. Um dos mais emblemáticos tipos de degradação na atualidade é o processo de desenvolvimento de desertificação, resultante da combinação de fatores: antrópicos, climáticos e ou ambientais. Na busca de compreender o comportamento desses impactos, este trabalho avaliou o processo de degradação a partir do Índice de Aridez (IA) sobre os biomas situados no Nordeste brasileiro (Caatinga, Mata Atlântica, Amazônia e Cerrado). O IA consiste na relação entre o uso da evapotranspiração (neste caso, o método de estimação de Thornthwaite) e a precipitação. Os dados utilizados correspondem ao produto *Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas* (CHELSA), ao qual possuem resolução espacial de 1km x 1km e temporal em escala mensal, do período de 1979 a 2013. Além disso, verificou-se que o comportamento do IA durante anos de ocorrência da fase quente dos El Niño-Oscilação Sul (ENOS), os El Niños. Para a identificação dos episódios de El Niño baseou-se no proxy climático *Oceanic Niño Index* (ONI), caracterizada pela região Equatorial do Pacífico conhecida como região do Niño 3.4, ao qual foram selecionados os anos de 1983, 1993, 1998 e 2012. Os resultados do IA apontam comportamentos distintos entre os biomas, principalmente sobre o sul do Cerrado nordestino e a Caatinga, motivados pela forte variabilidade das chuvas nas respectivas regiões. Destaca-se a Caatinga, ao qual exibiu uma grande de sua área foi classificada como árida (IA entre 0,05 – 0,20) e hiper-árida (IA < 0,05), principalmente em 2012. Já os biomas Amazônia e Mata Atlântica apresentam áreas classificada como semi-árida (IA < 0,5). Durante os El Niños houve redução no valor do IA, motivada pelos longos períodos de estiagem e irregularidade das chuvas que impactam negativamente o semi-árido nordestino. Palavras-chave: El Niño-Oscilação Sul, Índice de Aridez, *Caatinga*, Nordeste do Brasil.

1. Introdução

A seca é uma das respostas mais comuns ao processo de degradação do solo em áreas áridas, semi-áridas, e hiper-áridas (Almeida et al., 2014). Nos últimos anos, a expansão do processo de seca está associada a diversos fatores: (i) intensificação das mudanças climáticas, responsável pelo surgimento da ocorrência desses extremos climáticos; (ii) atividades antrópicas, ao qual possui origem nas complexas interações de fatores físicos, biológicos, políticos, sociais, culturais e econômicos, ao qual contribui com a intensificação das mudanças no clima (ONU, 1992; Wang et al., 2009; Marengo e Bernasconi, 2015; Santos et al., 2016).

Estima-se que ao longo do globo 18 áreas com secas severas e recorrentes serão propícias à desertificação, e terão seu processo de improdutividade acelerado (Wang et al., 2009). De acordo com Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, sigla em inglês), o Nordeste do Brasil será uma das regiões mais afetadas pelas mudanças climáticas, devido aos processos recorrentes de seca e desenvolvimento dos processos de desertificação, principalmente com cenários de aumento de áreas de alto risco para Agricultura em função do aumento do processo de aridez (IPCC, 2012).

Uma das formas para a detecção da degradação ambiental é realizada a partir do monitoramento via produtos orbitais (Marques da Silva et al., 2018; Barros Santiago et al., 2019). Neste artigo, essa avaliação será realizada a partir do índice de aridez (IA), utilizado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) - (Nastos et al., 2013; Marengo e Bernasconi, 2015).

Marengo e Bernasconi (2015) analisaram IA/índice de seca por meio de modelos climáticos e previram a abrangência geográfica que se expandiria à medida que esses índices intensificam. Santos et al. (2016) descrevem que o IA exibe boa precisão na determinação de áreas susceptíveis à desertificação, pois é um dos únicos índices que utilizam variáveis quantitativas para este tipo de análise.

Na Região Nordeste, o Semiárido ao qual está situado no bioma Caatinga, é a região que exibe uma maior irregularidade de chuvas em relação aos demais biomas, mas em comparação a precipitação de outras regiões semiáridas pelo mundo, o semiárido Brasileiro é bem mais chuvoso que os demais. Vale ressaltar que a chuva é concentrada em poucos meses do ano e distribuída de forma irregular em todo semiárido.

Embora as áreas semi-áridas e os solos rochosos rasos sejam relativamente férteis, os biomas possuem recursos genéticos abundantes devido à sua alta biodiversidade. O aspecto agressivo da vegetação

contrasta com o colorido diversificado das flores emergentes no período das chuvas, cujo índice pluviométrico varia entre 300 e 800 mm.ano⁻¹ (Correia Filho et al., 2018; Correia Filho et al., 2019; WWF, 2019).

A influência climática tem papel fundamental neste processo, um dos fenômenos mais atuantes é o modo de variabilidade climática El Niño / Oscilação Sul (ENOS), que afeta o clima e o tempo do globo, inclusive da América do Sul (AS) - (Kayano e Moura, 1986; Reboita et al., 2010), e do Nordeste do Brasil (Marengo et al., 2017a; Marengo et al., 2017b). Kayano e Moura (1986) analisaram a precipitação na AS durante todo o evento do El Niño (junho de 1982 a agosto de 1983), indicando que a região do NEB sofreu um forte período de seca, com total de chuva de aproximadamente 50% menor que o valor climatológico.

Baseado no exposto, o objetivo desse estudo é avaliar o IA sobre os biomas do Nordeste Brasileiro (NEB) - (Caatinga, Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado) e sua relação com chuva e os sistemas meteorológicos durante os anos de 1979-2013.

2. Material e métodos

Área de estudo

O Nordeste do Brasil é composto por biomas: Caatinga, Mata Atlântica, Amazônia e Cerrado, ilustrado na Figura 1.

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro com uma área estimada de 734,5 mil km², que corresponde a cerca de 70% da Região Nordeste e 11% do território nacional (Correia Filho et al., 2019). Na Caatinga existem diversas atividades econômicas voltadas para fins agropecuários e industriais, acompanhadas por uma riqueza de ambientes e espécies, com 932 espécies de plantas, 178 mamíferos e 590 aves (MMA, 2021).

O Cerrado é um bioma que ocupa 2,03 milhões de km², correspondendo a 22% do território brasileiro (Correia Filho et al., 2021), e no Nordeste ocupa uma área de 465,5 mil km² (cerca de 30% da área total), situados nos estados do Maranhão, Piauí e Bahia (Correia Filho et al., 2019). O Cerrado é reconhecido como a savana de maior biodiversidade do mundo, que abriga 11.627 espécies de plantas nativas e 4.400 são espécies endêmicas (existentes apenas neste bioma). Além disso, interage com outros biomas e possui uma fitofisionomia (aspecto vegetal de uma região) diversifica e única (MMA, 2021). A Amazônia ocupa mais de 18% do país, localizado na região Norte do Brasil e ocupa uma área de 1,56 milhões km² (MMA, 2021). Em relação a Amazônia nordestina está situada no norte do estado do

Maranhão, com 112,5 km², cobrindo apenas 7% do NEB (Martins e Oliveira, 2011; Correia Filho et al., 2019).

A Mata Atlântica é um bioma formado por um conjunto de florestas e ecossistemas que ocupa 1.110.182 km² (15% do território brasileiro), no NEB ocupa uma área de 164,7 mil km² (cerca de 10% do

total) - (Correia Filho et al., 2019). Este bioma é composto por Florestas Ombrófilas Densa, Mista e Aberta, Floresta Semidecídua Sazonal, Floresta Estacional Decidual, Florestas Estepe, Savana e Estepe-Savana, Formações Pioneiras, Áreas de Tensão Ecológica e refúgios de vegetação (MMA, 2021).

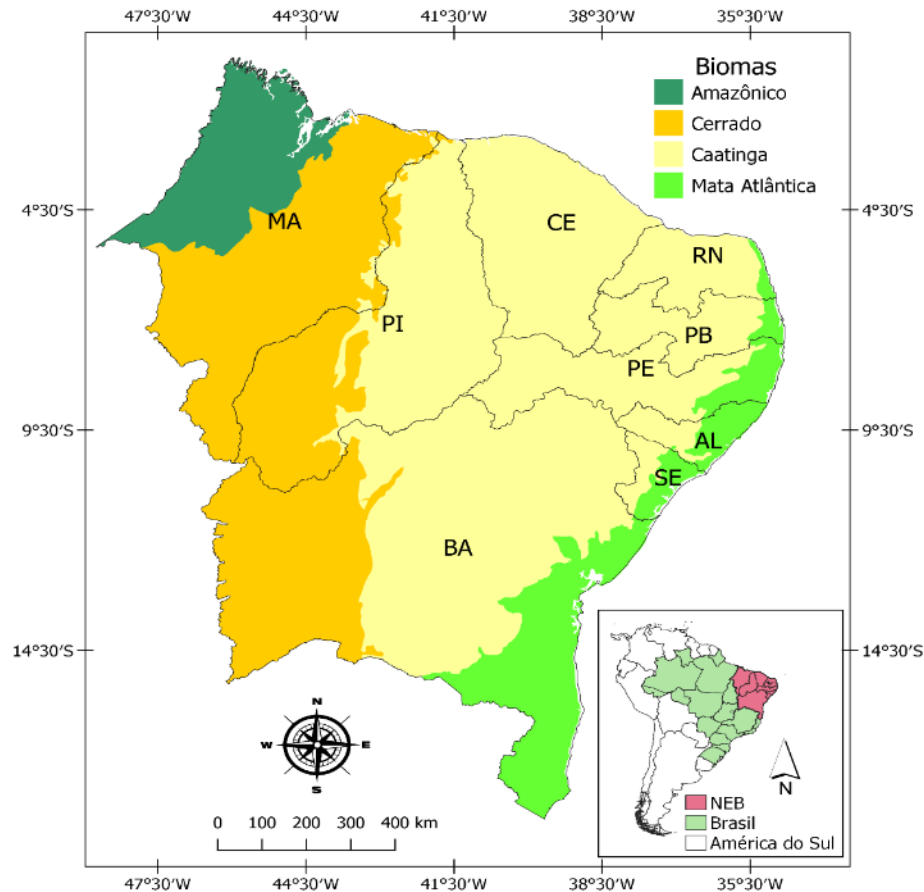


Figura 1 - Biomas do Nordeste brasileiro.

A caracterização climática sobre os biomas do NEB está conectada com a atuação de diversos sistemas meteorológicos causadores de chuvas na região, tais como: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Linhas de Instabilidades (LI) - (Reboita et al., 2010; Correia Filho et al., 2019). Na região semiárida do NEB, o período chuvoso ocorre entre março e maio, enquanto parte leste o máximo de chuva ocorre entre junho e julho (Reboita et al., 2010; Correia Filho et al., 2019).

Dados

Para avaliar o IA sobre o bioma localizados no NEB, utilizou-se dados mensais de precipitação do *Climatologies at high resolution for the earth's land surface áreas products* (CHELSA) (Karger et

al., 2017). Os dados da CHELSA possuem resolução espacial de 1 km x 1 km, com escala de tempo mensal. O período de estudo foi de 1979 a 2013. A base do produto CHELSA consiste em dados de estações meteorológicas oriundas do *Global Precipitation Climate Centre* (GPCC), com resolução temporal de 50 km x 50 km. Este conjunto de dados foi processado a partir da técnica estatística de *downscaling* para refinamento de grade de 50 km para 25 km, utilizando o método de interpolação *B-Spline* com a ajuda de dados de precipitação da Era-Interim. No caso das chuvas, há a inclusão dos efeitos da topografia, padrão de vento e altura de Camada Limite Atmosférica (ABL), ao qual são refinados de 25 km para 1 km (Karger et al., 2017; Correia Filho et al., 2019; Oliveira-Júnior et al., 2021).

Os dados estão disponíveis no seguinte sítio <<http://chelsa-climate.org/timeseries>>, ao qual foram armazenados em arquivos de extensão <.Geotiff>. Após a obtenção desses arquivos, os dados pluviais

foram processados para as regiões de limite dos quatro biomas NEB existentes. Após a seleção de cada bioma, os arquivos foram submetidos aos seguintes passos: 1) organização; 2) manipulação; 3) extração de valores mensais de precipitação e temperatura; 4) obtenção das estatísticas descritiva e exploratória para os biomas.

Para a obtenção dos dados de Índice de Aridez (IA), calculou-se o IA baseado no método de Thornthwaite (1948). O índice pode ser calculado por:

$$IA = \frac{PR}{ETP} \quad (1)$$

Onde IA corresponde ao índice de aridez, e PR e ETP correspondem aos acumulados anuais de precipitação pluviométrica e evapotranspiração potencial, respectivamente.

Para a obtenção do ETP, utilizou-se o método de Thornthwaite (Nastos et al., 2013), ao qual pode ser verificado abaixo:

$$ETP = 1,6 \times (10 \times \frac{T_i}{I})^a \quad (2)$$

Onde:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right) \quad (3)$$

$$a = 6,750 \times 10^{-7} I^3 - 7,711 \times 10^{-5} I^2 + 1,792 \times 10^{-2} I + 0,492 \quad (4)$$

ETP dada em mm/mês, T é à temperatura média mensal do ar (°C). O I corresponde ao acumulado anual do índice de calor, relativo ao somatório mensal i. As classes correspondentes ao comportamento anual do IA estar descrita na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação climática de acordo com o índice de aridez.

Classes Climáticas	Índice de Aridez
Hiperárido	< 0,05
Árido	0,05 < 0,20
Semiárido	0,21 < 0,50
Subúmido Seco	0,51 < 0,65
Subúmido Úmido	> 0,65

Fonte: Nastos et al. (2013).

A seleção dos anos mais secos está baseada no Índice Niño Oceânico (ONI) - (Huang et al.,

2015). O índice ONI baseia-se em anomalias mensais de Temperatura de Superfície do Mar (aTSM) na Região Equatorial do Pacífico, conhecida como região Niño 3.4 (CPC/NOAA, 2021). Quando o aTSM é superior que 0,5°C é classificada como El Niño, quando o mesmo exibe o sinal oposto, aTSM inferior a -0,5°C é classificada como La Niña (Huang et al., 2015; Correia Filho et al., 2019).

Tabela 2 – ENOS de intensidade moderada e intensa (aTSM +/- 0,5°C) do período de 1979-2017 (Correia Filho et al., 2019).

Eventos	Anos
El Niño (aTSM +)	1979-1980, 1982-1983, 1986, 1988, 1991-1992, 1994-1995, 1997-1998, 2002-2003, 2006, 2007, 2009-2010, 2015-2016
La Niña aTSM (-)	1983-1985, 1988-1989, 1995-1996, 1999-2001, 2005-2006, 2007-2009, 2010-2012

Fonte: Adaptado de Correia Filho et al. (2019).

3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos do IA (Figura 2) apresentaram diferenças significativas entre os anos e biomas, motivados pela variabilidade das chuvas nos anos de ocorrência de El Niño. Verifica-se o predomínio das classes semiárida (IA entre 0,21-0,50) e árida (IA entre 0,05-0,20), situadas principalmente no bioma Caatinga. Esse padrão árido corrobora com os resultados de Correia Filho et al. (2019), em que os autores constataram que a Caatinga apresenta uma maior irregularidade no padrão anual, motivada pelos longos período de estiagem.

Em relação ao comportamento anual do IA sobre a Caatinga, percebe-se que os anos de 1993 e 2012 são os mais severos, no primeiro ano, há a presença de dois núcleos da classe hiper-árido (< 0,05). Já este padrão verificado no segundo ano foi provocado por um La Niña excepcional, ao qual desenvolveu-se um forte período de estiagem entre os anos de 2012 e 2017 (Marengo et al., 2017b), que culminou num longo período de estiagem / escassez de chuvas na região. Este período anômalo trouxe efeitos devastador sobre a região do semiárido, ao qual se encontra o Bioma Caatinga, com prejuízos na ordem de R\$ 6 bilhões (Marengo et al., 2017a).

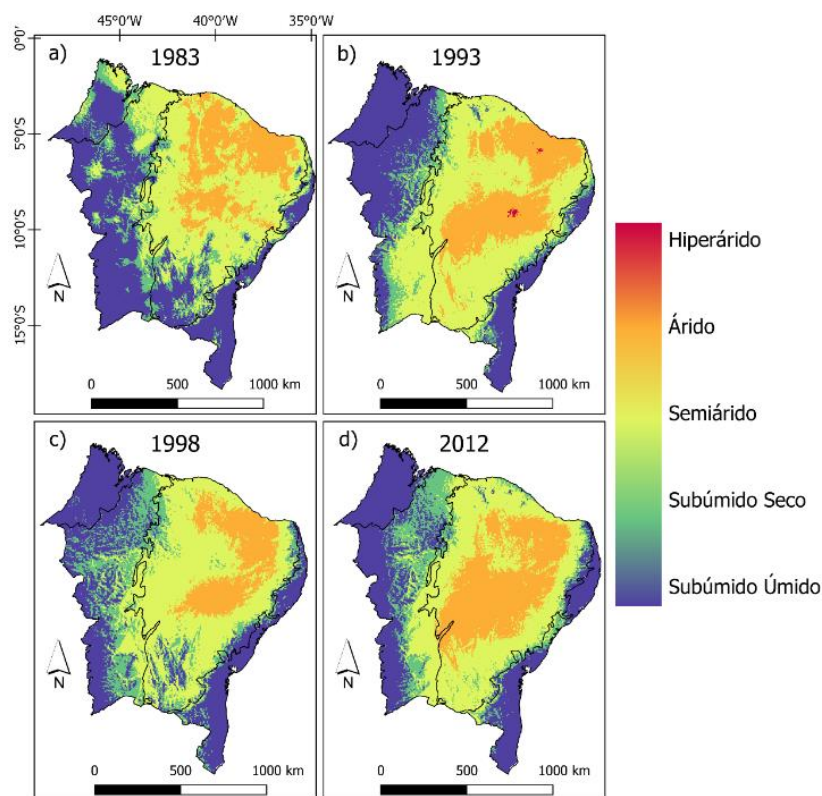


Figura 2 – Comportamento anual do IA durante a ocorrência de ENOS: (a) 1983, (b) 1993, (c) 1998, e (d) 2012.

Quanto ao bioma Amazônia, com exceção do ano de 1983, os demais anos são classificados como sub-úmido úmido ($IA > 0,65$), associados pela cobertura vegetal densa da Floresta Amazônica, ao qual libera uma alta quantidade de evapotranspiração e auxilia no desenvolvimento de nuvens e chuva. Jensen e Epiphanyo (2009) mencionam que a presença de nuvens baixas e espessas refletem a radiação solar de volta ao espaço, causando o resfriamento. Com isso o aumento da umidade favorece as partículas em suspensão na atmosfera, o que por sua vez, tende a resfriar a superfície abaixo deles (Novo, 2008).

Em relação ao ano de 1983 foi influenciado pela atuação do El Niño de 1982-1983, um dos mais intensos e afetou o tempo e clima da AS de várias maneiras que a Amazônia passou por um período de seca (Almeida et al., 2017).

Já no Cerrado, o padrão do IA é similar ao bioma Caatinga, com maior severidade nos anos de 1993 e 2012, resultante da irregularidade das chuvas motivada pela atuação dos ENOS (Correia Filho et al., 2021). Correia Filho et al. (2021) avaliaram o comportamento da chuva no Cerrado Brasileiro, e identificaram que durante a ocorrência dos El Niños, há redução nos totais pluviométricos na porção norte do Cerrado. Este efeito influencia diretamente a evapotranspiração e o comportamento da vegetação (Santos et al., 2020), ao qual pode afetar o desenvolvimento agropecuário na região, inclusive

no consórcio agrícola MATOPIBA (Araújo et al., 2019).

Já o bioma Mata Atlântica está situado na região costeira do Nordeste, e é influenciado pela atuação de diversos sistemas meteorológicos produtores de chuva (Kouadio et al., 2012; Lyra et al., 2014). Desta maneira, se constata que a atuação dos ENOS exerce poucos efeitos na variabilidade anual do IA, ao qual são concentradas em regiões distintas a cada evento analisado. Além disso, com o predomínio da classe sub-úmido úmido ($IA > 0,65$), seguida da classe sub-úmido-seco (IA entre 0,50-0,65). Este resultado é em virtude dos altos índices pluviométricos anuais condicionadas à região litorânea, e com porções de vegetação densa. No ano de 1983 e 2012, há áreas com IA superiores a 1,0 e máximos de 1,4.

4. Conclusão

De acordo com os resultados explorados, o comportamento do IA apontou maior severidade nos processos de aridez nos anos de 1993 e 2012, ao qual exibiu uma grande área classificada como semi-árida (IA entre 0,20 – 0,50) e árida (IA entre 0,05-0,20) nos biomas Caatinga e Cerrado. Em especial, destaca-se o ano de 1993, ao qual exibiu áreas classificadas como hiper-árida ($IA < 0,05$) na Caatinga.

Este padrão do IA ocorreu em virtude do processo de variabilidade das chuvas, principalmente

nos biomas Caatinga e Cerrado. Enquanto isso nos biomas Amazônia e Mata Atlântica, os resultados do IA exibiram baixa susceptibilidade ao processo de aridez. Isto possivelmente esteja relacionado a localização geográfica destes biomas, situados na costa e que sofrem influência dos sistemas meteorológicos precipitantes.

Já os biomas Amazônia e Mata Atlântica apresentaram áreas classificadas como semi-árida (IA < 0,5). Durante os El Niños houve redução no valor do IA, motivada por longos períodos de estiagem e irregularidade das chuvas que impactam negativamente o semi-árido nordestino. A recorrência desses processos de estiagem contribui para a expansão de áreas mais áridas, e dependendo do grau de severidade, pode torná-la susceptíveis ao desenvolvimento de desertificação.

Referências

- Almeida, H.A., Aguiar, D.B., Silva, J.N., Damasceno, J., 2014. Indicadores hídricos do núcleo de desertificação da Microrregião do Seridó Ocidental da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física* 7, 1-10.
- Almeida, C.T., Oliveira-Júnior, J.F., Delgado, R.C., Cubo, P., Ramos, M.C., 2017. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973-2013. *International Journal of Climatology* 37, 2013-2026.
- Araújo, M.L.S.de, Sano, E.E., Bolfe, É.L., Santos, J.R.N., Santos, J.S.dos, Silva, F.B., 2019. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990-2015). *Land use policy* 80, 57-67.
- Barros Santiago, D., Correia Filho, W.L.F., Oliveira-Júnior, J.F.de, Silva Junior, C.A.da, 2019. Mathematical modeling and use of orbital products in the environmental degradation of the Araripe Forest in the Brazilian Northeast. *Modeling Earth Systems and Environment* 5, 1429-1441.
- Correia Filho, W.L.F., Santos, T.V.dos, Diogo, A.M., Amorim, R.F.C., 2018. Diagnóstico da Precipitação e EVI em Dois Eventos de Seca no Nordeste do Brasil. *Revista do Departamento de Geografia* 35, 102-112.
- Correia Filho, W.L.F., Oliveira-Júnior, J.F., Santiago, D.B., Terassi, P.M.B., Teodoro, P.E., Gois, G., Blanco, C.J.C., Souza, P.H.A., Costa, M., Santos, P.J., 2019. Rainfall variability in the Brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and ENSO via CHLSA product. *Big Earth Data* 3, 315-337.
- Correia Filho, W.L.F., Oliveira-Júnior, J.F., Silva Junior, C.A.da, Santiago, D.B., 2021. Influence of the El Niño-Southern Oscillation and the synoptic systems on the rainfall variability over the Brazilian Cerrado via Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data. *International Journal of Climatology*.
- CPC/NOAA. Climate Prediction Center/National Oceanographic and Atmospheric Administration, 2021. Cold & Warm Episodes by Season. Disponível: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso: 5 out. 2021.
- Huang, B., Banzon, V.F., Freeman, E., Lawrimore, J., Liu, W., Peterson, T.C., Smith, T.M., Thorne, P.W., Woodruff, S.D., Zhang, H.M., 2015. Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST v4). Part I: Upgrades and intercomparisons. *Journal of climate* 28, 911-930.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field CB et al. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Jensen, J.R., Epiphany, J.C.N., 2009. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Parêntese Editora, São José dos Campos.
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, H.P., Kessler, M., 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data* 4, 170122.
- Kayano, M.T., Moura, A.D., 1986. O El-Niño de 1982-83 e a precipitação sobre a América do Sul. *Revista Brasileira de Geofísica* 4, 201 - 214.
- Kouadio, Y.K., Servain, J., Machado, L.A., Lentini, C.A., 2012. Heavy rainfall episodes in the eastern northeast Brazil linked to large-scale ocean-atmosphere conditions in the tropical Atlantic. *Advances in Meteorology* 1-16.
- Kousky, V.E., 1979. Frontal influences on northeast Brazil. *Monthly Weather Review* 107, 1140-1153.
- Lyra, G.B., Oliveira-Júnior, J.F., Zeri, M., 2014. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil. *International Journal of Climatology* 34, 3546-3558.
- Marengo, J.A., Bernasconi, M., 2015. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Climatic Change* 129, 103-115.
- Marengo, J.A., Torres, R.R., Alves, L.M., 2017a. Drought in Northeast Brazil-past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology* 129, 1189-1200.

- Marengo, J.A., Alves, L.M., Alvares, R., Cunha, A.P., Brito, S., Moraes, O.L., 2017b. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 90, 1973-1985.
- Marques da Silva, R., Santos, C.A., Araújo Maranhão, K.U.de, Medeiros Silva, A., Porto de Lima, V.R., 2018. Geospatial assessment of eco-environmental changes in desertification area of the Brazilian semi-arid region. *Earth Sciences Research Journal* 22, 175-186.
- Martins, M.B., Oliveira, T.G., 2011. *Amazônia Maranhense: diversidade e conservação*. Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente, 2021. *Portfolio Biomas Brasileiros*. Disponível: <https://antigo.mma.gov.br/biomas.html>. Acesso: 5 out. 2021.
- Nastos, P.T., Politi, N., Kapsomenakis, J., 2013. Spatial and temporal variability of the Aridity Index in Greece. *Atmospheric Research* 119, 140-152.
- Novo, E.M.L.M., 2008. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. Editora Blucher, São Paulo.
- ONU. Organização das Nações Unidas, 1992. *Agenda 21 - Capítulo 12: Manejo de Ecossistemas Frágeis: A Luta contra a Desertificação e a Seca*, in: *CNUMAD: Conferência das Nações Unidas sobre o Meio-Ambiente e Desenvolvimento*. Rio de Janeiro.
- Oliveira-Júnior, J.F., Correia Filho, W.L.F., Barros Santiago, D.de, Gois, G.de, Silva Costa, M.da, Silva Junior, C.A.da, Teodoro, P.E., Freire, F.M., 2021. Rainfall in Brazilian Northeast via in situ data and CHELSA product: mapping, trends, and socio-environmental implications. *Environmental Monitoring and Assessment* 193, 1-19.
- Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P.D., Ambrizzi, T., 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25, 185-204.
- Santos, S.M.dos, Leal, B.G., Taura, T.A., 2016. Determinação da suscetibilidade climática à desertificação para os municípios baianos de Juazeiro, Casa Nova, Sobradinho e Curaçá. *Okara: Geografia em Debate* 10, 171-184.
- Santos, C.T.B., Correia Filho, W.L. F., Batista, B.A., Oliveira Junior, J.F., Santiago, D.B., 2020. Estimativa da Evapotranspiração Potencial para o Cerrado Nordeste Brasileiro. *EDUFPG, Campina Grande*, pp. 349-356.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review* 38, 55-94.
- Wang, X., Yang, Y., Dong, Z., Zhang, C., 2009. Responses of dune activity and desertification in China to global warming in the twenty-first century. *Global and Planetary change* 67, 167-185.
- WWF. World Wide Fund for Nature, 2019. *Amazônia*. Disponível: www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/biomas/bioma_amazonia/. Acesso: 17 set. 2019.