

## EVIDÊNCIAS DO AUMENTO DA ARIDEZ NO ESTADO DO CEARÁ

Larissa Ingrid Marques **LINHARES**  
Universidade Federal Do Rio Grande do Norte  
Doutoranda em Ciências Climáticas  
E-mail: larissamarques275@gmail.com  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9150-2783>

José **FALCÃO SOBRINHO**  
Universidade Estadual Vale do Acaraú  
Professor do Departamento de Geografia  
E-mail: falcao.sobral@gmail.com  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7399-6502>

Pedro Rodrigues **MUTTI**  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Professor do Departamento em Ciências Climáticas  
E-mail: pedromutti@gmail.com  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7607-1727>

*Recebido*  
*Março de 2024*

*Aceito*  
*Setembro de 2024*

*Publicado*  
*Setembro de 2024*

---

**Resumo:** O aumento da aridez se constitui como uma questão em ascensão nos últimos tempos, intensificada pelas mudanças climáticas globais, a aridez se relaciona ao aumento das áreas susceptíveis ou desertificadas em todo o globo. Em nível nacional, a região Nordeste se constitui como a área mais vulnerável às mudanças climáticas. Dessa forma, o estado do Ceará, se apresenta como uma das áreas mais vulneráveis ao aumento da aridez. Assim, a presente pesquisa teve como objetivo principal avaliar a variação do índice de aridez no Estado do Ceará no período de 1961-2020 utilizando-se dados observados interpolados em grade. Os resultados mostraram uma expansão de 28,4% na área semiárida no estado em 1991-2020 comparado com 1961-1991, além de uma redução de 32,1% das áreas subúmidas secas e 44,7% das áreas úmidas. A tipologia árida (índice de aridez entre 0,03 e 0,20) tem se tornado cada vez mais frequente no estado, e a tipologia hiper árida foi identificada de forma inédita pelo menos uma vez no período de 1991-2020.

**Palavras-chave:** Ceará; aridez; índice de aridez; mudanças climáticas.

## EVIDENCE OF INCREASED ARIDICITY IN THE STATE OF CEARÁ

**Abstract:** The increase in aridity has emerged as a growing concern in recent times, exacerbated by global climate change. Aridity is linked to the expansion of susceptible or desertified areas worldwide. At the regional level, the Northeast region of Brazil stands out as the most vulnerable to climate change. Consequently, the state of Ceará presents itself as one of the most susceptible areas to increased aridity. Therefore, the primary objective of this research was to assess the variation in the aridity index in the State of Ceará from 1961 to 2020 using interpolated observed data. The results revealed a 28.4% expansion of the semiarid area in the state from 1991-2020 compared to 1961-1991. Additionally, there was a reduction of 32.1% in dry subhumid areas and 44.7% in humid areas. The arid typology (aridity index between 0.03 and 0.20) has become increasingly prevalent in the state, and the hyper-arid typology was identified at least once during the period from 1991 to 2020, marking an unprecedented occurrence.

**Keywords:** Ceará; aridity; Aridity index; climate changes.

## PREUVE D'UNE ARIDITÉ ACCRUE DANS L'ÉTAT DU CEARÁ

**Résumé:** L'augmentation de l'aridité est devenue une préoccupation croissante ces derniers années, exacerbée par le changement climatique mondial. L'aridité est liée à l'expansion de zones sensibles ou désertifiées dans le monde. Au niveau régional, la région du Nord-Est du Brésil se distingue comme la plus vulnérable au changement climatique. Par conséquent, l'État de Ceará se présente comme l'une des zones les plus susceptibles à l'augmentation de l'aridité. Ainsi, l'objectif principal de cette recherche était d'évaluer la variation de l'indice d'aridité dans l'État de Ceará de 1961 à 2020 en utilisant des données observées interpolées. Les résultats ont révélé une expansion de 28,4% de la zone semi-aride dans l'État de 1991 à 2020 par rapport à 1961-1991. De plus, il y a eu une réduction de 32,1% dans les zones subhumides sèches et de 44,7% dans les zones humides. La typologie aride (indice d'aridité entre 0,03 et 0,20) est devenue de plus en plus prévalente dans l'État, et la typologie hyper-aride a été identifiée au moins une fois au cours de la période de 1991 à 2020, marquant un événement sans précédent.

**Palabras clave:** Ceará; aridité indice d'aridité; les changements climatiques.

## INTRODUÇÃO

A aridez se constitui como um aspecto climático que tem como principal característica o déficit hídrico, que ocorre como resultado das interações de múltiplos fatores atmosféricos, superficiais, vegetais e antropogênicos (Huang *et al.*, 2015). Dessa forma, as regiões que são classificadas como áridas apresentam baixa umidade e extremos de secas frequentes, podendo ser classificadas como áreas susceptíveis a desertificação ou zonas desérticas (United Nations Convention to Combat Desertification, 1994).

Com a acentuação das mudanças climáticas globais, diversos efeitos vêm sendo observados em variáveis hidrometeorológicas, como: aumento da temperatura, flutuações anormais na precipitação, aumento da evapotranspiração, heterogeneidade do escoamento

superficial, alterações na dinâmica de circulação atmosférica, duração prolongada da insolação, e baixa umidade atmosférica (Islam *et al.*, 2021).

De acordo com Greve *et al.* (2019) essas variações, tornam, os eventos de seca e déficit hídrico cada vez mais frequentes, levando ao aumento da aridez e, portanto, aumentando o risco de desertificação. As áreas afetadas por esse fenômeno sofrem com um risco em potencial para sua disponibilidade hídrica, biodiversidade e capacidade de sustentar populações.

Em nível nacional, o Nordeste do Brasil se configura como uma das áreas mais vulneráveis as mudanças climáticas, principalmente no que tange ao aumento da aridez e de áreas susceptíveis a desertificação ou desertificadas. O Relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas afirma que as altas taxas de evaporação e a grande variabilidade anual das variáveis hidrometeorológicas causam uma oscilação significativa na disponibilidade de água superficial no NEB, criando uma tendência a maior aridez e mais intensa variabilidade interanual no clima futuro desta região (Ribeiro; Santos 2016).

Com base nisso, é importante avaliar esse fenômeno em diversas escalas espaciais e temporais, compreendendo de que maneira as alterações climáticas globais afetam a expansão da aridez no Brasil. De acordo com Silva *et al.* (2023) a intensificação nos níveis de aridez deve implicar em alterações espaciais das classes climática do Semiárido Brasileiro, intensificando as áreas susceptíveis a desertificação, Tomasella *et al.* (2018) salienta que a seca desde 2011 afetou e intensificou a capacidade de restauração ecológica da paisagem, ou seja, intensificando o processo de desertificação do Nordeste do Brasil.

Marin *et al.* (2020) ressalta que a atual extensão do Semiárido apresenta 9% com alto índice de desertificação, 85% com moderado índice de desertificação e 6% com baixo ou ausência de desertificação, assim, Silva *et al.* (2023) salienta que até o final do século o semiárido brasileiro poderá se tornar mais seco, sobretudo com intensificação dos níveis de aridez e expansão territorial de zonas mais áridas, e essa dinâmica é preocupante mesmo nos cenários otimistas de mudanças do clima.

A maneira mais usual de observação da aridez é pelo uso de índices simples que visam quantificá-la. Um índice de aridez é um indicador numérico que representa o grau do déficit hídrico observado em um determinado local, podendo ser utilizado para classificar o tipo de clima ou simplesmente o grau de aridez em relação à disponibilidade de água (Tabari *et al.*, 2014).

Dessa forma, os primeiros índices de aridez foram propostos nos estudos clássicos de balanço hídrico de Thornthwaite (1948), sofrendo algumas alterações ao longo dos anos. Atualmente, o índice de aridez (IA) mais utilizado se baseia na razão entre a oferta de água

(precipitação – P) e a demanda de água (evapotranspiração potencial – ETP) sobre uma região (Tsiros *et al.*, 2020).

No contexto das mudanças climáticas, diversas pesquisas vêm utilizando o IA para quantificar e analisar mudanças na aridez, seus impactos e projeções. Greve *et al.* (2019), por exemplo, avaliaram as mudanças na aridez sob condições projetadas de aquecimento global e níveis aumentados de CO<sub>2</sub> atmosférico, sugerindo um aumento no grau de aridez global ao longo do tempo devido à resposta termodinâmica de uma atmosfera em aquecimento.

Em nível nacional Vieira *et al.* (2021) e Silva *et al.* (2023), com base no IA, projetaram a expansão de regiões semiáridas e áridas no Nordeste Brasileiro, principalmente no norte da Bahia e Pernambuco, com a identificação de novas áreas susceptíveis a desertificação. No entanto, esses estudos focaram no comportamento médio do índice de aridez ao longo de intervalos de tempo de 20 e 30 anos. Trata-se de uma análise de um comportamento estacionário do clima, mas que não permite o monitoramento dessas mudanças em uma escala temporal mais curta.

Para tentar atenuar o efeito dessa estacionariedade, Dubreuil *et al.* (2019) avaliaram as mudanças nos tipos climáticos de Köppen no Brasil através de uma perspectiva não apenas climatológica, mas também anual, encontrando ocorrência crescente de tipos climáticos que não são capturados pela climatologia de 30 anos. Por exemplo, os autores encontraram a ocorrência mais frequente do clima BWh (árido quente) em regiões do Nordeste Brasileiro, embora a média de 30 anos apontasse apenas a ocorrência do clima semiárido (BSh).

Compreendendo a vulnerabilidade climática do Nordeste Brasileiro e o aumento das condições de aridez observadas nos trabalhos citados anteriormente, é crucial que estudos mais detalhados e específicos sejam desenvolvidos sobre o tema na região. Dessa forma, o estado do Ceará ocupa uma posição de destaque por ser o estado brasileiro mais susceptível à desertificação (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 2017). De acordo com Albuquerque *et al.* (2020), o estado do Ceará possui 98% do seu território influenciado pelo clima semiárido e 100% do seu espaço classificado como área suscetível a desertificação.

Com base nisso, o mapeamento feito pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE (2016) mostra que o estado do Ceará possui três grandes áreas que se apresentam muito comprometidas quanto à preservação dos recursos naturais: a região dos Inhamuns/Sertão de Crateús; municípios de Irauçuba e regiões circunvizinhas, e o Médio Jaguaribe.

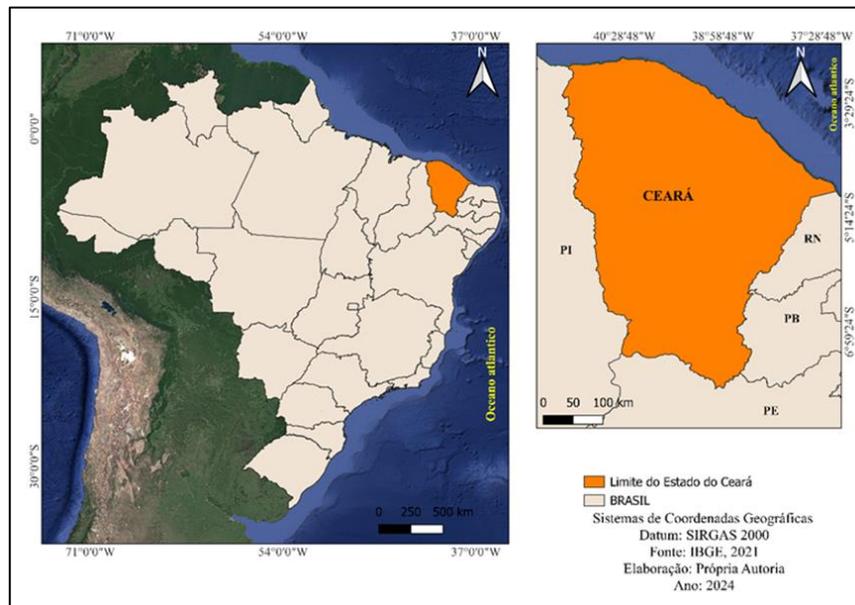
Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar as alterações das condições de aridez no Estado do Ceará no período de 1961 a 2020, por meio do IA. Além disso, as alterações no IA em função de alterações na P e ETP também serão avaliadas, assim

como o comportamento anual da frequência de ocorrência de classes de aridez (hiper árido, árido, semiárido, subúmido seco e úmido) entre os períodos 1961-1990 e 1991-2020.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo abrange o estado do Ceará, localizado na região nordeste do Brasil. (Figura 1). De acordo com Muniz *et al.* (2017) em relação a classificação climática de Koppen, o Ceará apresenta clima tropical com inverno seco, abrangendo cerca 63,7% de seu território e em relação a classificação de Thornthwaite prevalece o clima semiárido, cerca de 85% de seu território, caracterizado por elevadas temperaturas, escassez e irregularidade espaço-temporal das chuvas e altas taxas de evaporação/evapotranspiração (IPECE, 2021).

Figura 1 - Localização do estado do Ceará.



Fonte: IBGE (2021). Os autores (2024).

O IA foi calculado usando dados de P e ETP do jogo de dados Brazilian Daily Weather GriddedDataset (BR-DWGD) desenvolvido por Xavier *et al.* (2022), que fornece dados meteorológicos interpolados medidos em estações de superfície numa grade de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  para o período 1961-2020. Comparamos os valores médios de P, ETP e do IA sobre o Ceará para os períodos 1961- 1990 e 1991-2020. Essa comparação foi feita considerando-se uma correlação linear entre as variáveis em cada período e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) dessa relação, que determina o grau de explicação da variância entre os dois grupos de dados.

Além do comportamento médio do IA no em cada período (1961-1990 e 1991-2020), analisamos também as alterações na frequência anual de ocorrência de cada classe de aridez

definida pelo IA em todo o período:  $IA < 0,03$ : hiperárido;  $0,03 < AI < 0,20$ : árido;  $0,20 < AI < 0,50$ : semiárido;  $0,50 < AI < 0,65$ : subúmido seco; e  $AI > 0,65$ : úmido, de acordo com a classificação proposta pela UNESCO (1979). Essa avaliação foi feita também de forma espacial, com intuito de identificar padrões e áreas mais afetadas pela aridez no estado do Ceará.

O IA foi calculado usando dados de P e ETP do jogo de dados Brazilian Daily Weather GriddedDataset (BR-DWGD) desenvolvido por Xavier *et al.* (2022), que fornece dados meteorológicos interpolados medidos em estações de superfície numa grade de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  para o período 1961-2020. Comparamos os valores médios de P, ETP e do IA sobre o Ceará para os períodos 1961- 1990 e 1991-2020.

Essa comparação foi feita considerando-se uma correlação linear entre as variáveis em cada período e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) dessa relação, que determina o grau de explicação da variância entre os dois grupos de dados. Analisamos também as alterações na frequência anual de ocorrência de cada classe de aridez definida pelo IA em todo o período:  $IA < 0,03$ : hiperárido;  $0,03 < AI < 0,20$ : árido;  $0,20 < AI < 0,50$ : semiárido;  $0,50 < AI < 0,65$ : subúmido seco; e  $AI > 0,65$ : úmido. Essa avaliação foi feita também de forma espacial, com intuito de identificar padrões e áreas mais afetadas pela aridez no estado do Ceará.

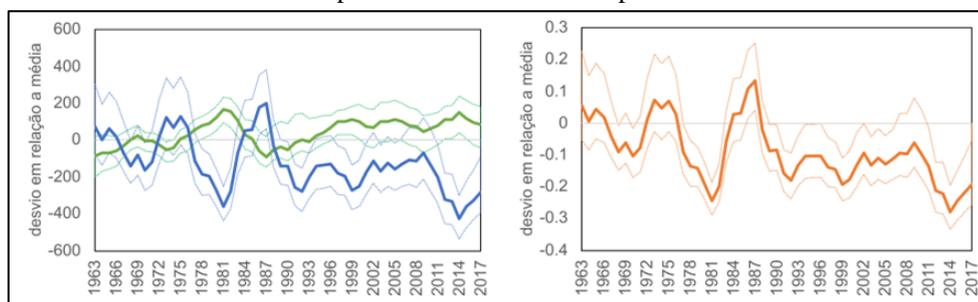
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, avaliou-se o comportamento da série temporal do IA, P e ETP medianos no estado do Ceará. A Figura 2 mostra que houve variações acentuadas na precipitação do Ceará no período inicial da série (1961 até aproximadamente 1990). No entanto, o comportamento da série a partir da década de 90 é de valores abaixo da mediana, com desvios negativos máximos ocorrendo a partir de 2012, por conta da última grande seca que atingiu o Nordeste Brasileiro, Ponte *et al.* (2020) discorreu que a seca plurianual causou impactos socioeconômicos e no meio ambiente do NEB devido a sua longa duração, principalmente no Ceará, onde sua capacidade de armazenamento diminuiu 63%, levando médios e pequenos reservatórios ao colapso.

Em relação à ETP (linha verde), a Figura 2 mostra o contrário, com valores consistentemente maiores a partir do final da década de 90, indicando um aumento na demanda atmosférica por água. Resultados similares foram encontrados em outros trabalhos que avaliaram tendências na ETP e P em áreas do nordeste do Brasil, Salviano *et al.* (2016) discorreu que a evapotranspiração apresenta um comportamento diretamente proporcional à temperatura, enquanto que a umidade relativa apresentou comportamento inversamente proporcional, concordando com Rocha *et al.* (2021) que avaliou a tendência positiva de ET, onde associado com o aumento da temperatura local, intensifica o processo de desertificação

no NEB, corroborando com Tomasella *et al.* (2018) destacou grandes áreas com aumento no processo de desertificação, com destaque para a área central do semiárido. A continuidade dessas tendências poderá resultar em impactos na agricultura e no ciclo hidrológico, e conseqüentemente para a fauna, flora e para a população. Ainda na Figura 2, o painel da direita mostra o comportamento anual do IA mediano no período (recordando que se trata da razão entre P e ETP), indicando também desvios consistentes mais negativos (maior aridez) na segunda metade do período de estudo.

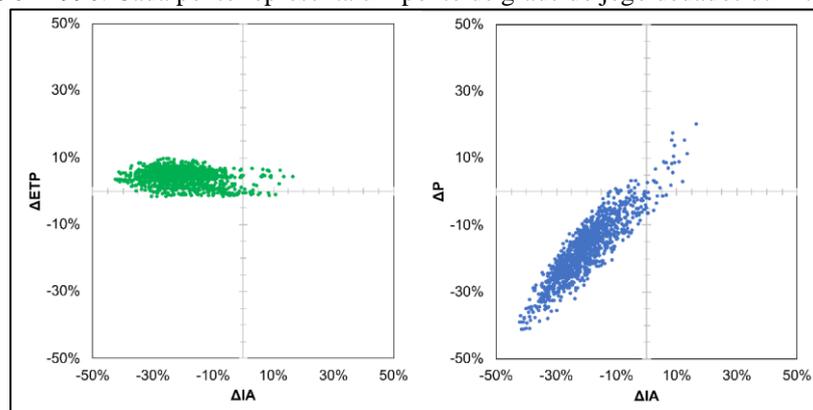
Figura 2 - Evolução anual da mediana da precipitação e evapotranspiração potencial (azul e verde, respectivamente, no primeiro quadro) e do índice de aridez (segundo quadro) em relação à mediana do período 1961-1990. Foi aplicada uma média móvel para suavizar a série.



Fonte: Os autores (2024).

A influência relativa das variações da ETP e da P nas variações do IA podem ser observadas na Figura 3. De uma forma geral, incrementos relativamente pequenos na ETP (até 10%) estão associados a reduções de até 45% no IA. Por outro lado, a relação com desvios na P é mais linear, com reduções no IA acompanhando proporcionalmente reduções observadas na P, que também chegaram até 45%.

Figura 3 - Correlação entre a variação na evapotranspiração potencial - ETP e a variação no índice de aridez - IA (painel esquerdo) e correlação entre a variação da precipitação - P e a variação no IA (painel direito) em todo o período 1961-1990. Cada ponto representa um ponto de grade do jogo de dados utilizado

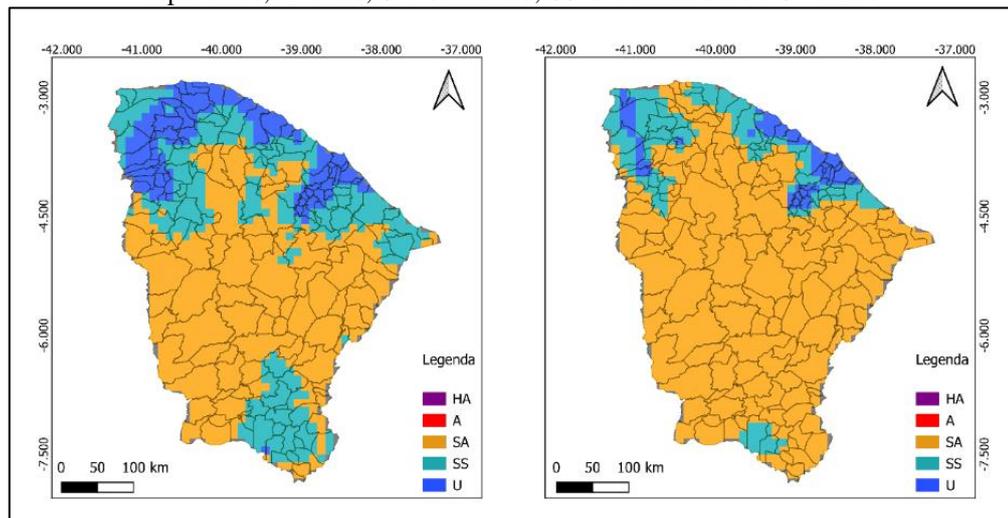


Fonte: Os autores (2024).

Do ponto de vista espacial, a Figura 4 compara as classes médias de aridez observadas no período 1961-1990 e 1991-2020. Nota-se uma mudança acentuada do comportamento entre

os dois períodos. De acordo com a Fundação Cearense de Meteorologia e Recurso Hídricos (2018) o Ceará possui 98% de seu território influenciado pelo clima semiárido segundo a classificação de Thornthwaite, e 100% do seu espaço é considerado área susceptível a desertificação, possuindo três núcleos acometidos por esse fenômeno e com 11,45% de suas terras fortemente degradadas em processo de desertificação.

Figura 4 - Classes de aridez médias nos períodos: 1961-1990 (painel esquerdo) e 1991-2020 (painel direito). HA: hiper árido, A: árido; SA: semiárido; SS: subúmido seco e U: úmido



Fonte: Os autores (2024).

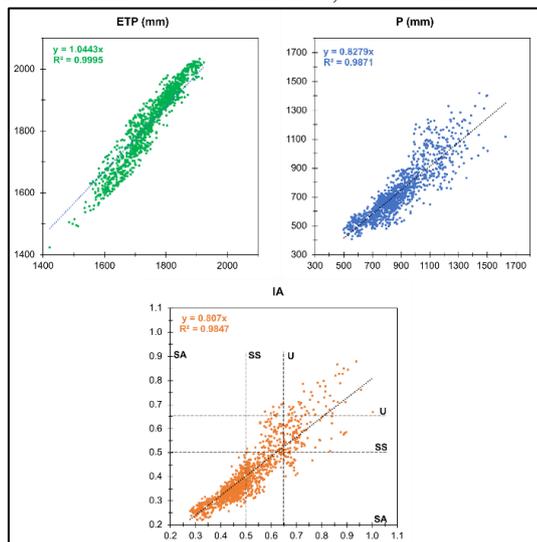
É importante notar que, de acordo com a UNCDD (1992) áreas susceptíveis à desertificação são aquelas que possuem  $IA < 0,65$ . Dessa forma, nossos resultados mostram uma caracterização sutilmente diferente. Em 1961-1990 ainda existiam algumas porções do litoral cearense que possuíam  $IA > 0,65$ , embora no período de 1991-2020 essas áreas reduziram consideravelmente. Em ambos os períodos, a maior área do estado foi classificada como semiárida por apresentarem  $0,20 < IA < 0,50$ .

As mudanças entre classes de aridez podem ser melhor avaliadas na Figura 4. De uma forma geral, a ETP no estado do Ceará aumentou 4,4% ( $R^2=0,9995$ ), com valores médios máximos aumentando de 1900 mm em 1961-1990 para mais de 2000 mm em 1991-2020. A P, por sua vez, apresentou uma redução média da ordem de 17% ( $R^2=0,9871$ ), e os valores médios mínimos caíram de aproximadamente 500 mm em 1961-1990 para 400 mm em 1991-2020. Em relação ao IA, a Figura 4 corrobora a Figura 2, indicando um IA médio mínimo maior do que 0,2, ou seja, uma classificação média mínima semiárida. No entanto, uma redução de aproximadamente 19% foi observada no IA médio entre 1961-1990 e 1991-2020. Além disso, a Fig. 4 mostra também que uma quantidade considerável de pontos de grade passou da classe subúmida seca ( $0,50 < IA < 0,65$ ) para semiárida ( $0,20 < IA < 0,50$ ), e da classe úmida ( $IA > 0,65$ )

para as classes subúmida seca e semiárida.

Esses resultados são reforçados pelas informações apresentadas na Tabela 1, que mostra uma expansão de 28,4% na área do estado sobre uma classe de aridez semiárida. Além disso, a classe subúmida seca reduziu em 47% e a classe úmida reduziu em 54,9%, como pode ser observado espacialmente também na Figura 3. Esses resultados confirmam as tendências observadas em estudos anteriores que também indicavam uma expansão das regiões semiáridas no Nordeste do Brasil (Dubreuil *et al.*, 2019; Mutti *et al.*, 2020). Medeiros *et al.* (2016) analisando o comportamento das tendências térmicas e pluviiais nas condições climatológicas em Bom Jesus -PI, salientaram que o cenário futuro é pessimista, sugerindo uma redução de até 20% na precipitação e 4 °C de aumento na temperatura. Já Costa *et al.* (2020) mostraram tendências majoritariamente positivas em extremos relacionados à temperatura em boa parte do Nordeste, com acentuado número de estações apresentando significância estatística na porção central do semiárido e oeste da Bahia, além de tendências negativas da precipitação total anual. (Figura 5).

Figura 5 - Correlação da evapotranspiração potencial – ETP, precipitação – P e índice de aridez – IA nos períodos 1961-1990 (eixo x) e 1991-2020 (eixo y). As equações mostradas se referem a correspondência linear (intercepto = 0) entre os dados e seu coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>). Cada ponto se refere a um ponto de grade do jogo de dados utilizado. SA: semiárido, SS: subúmido seco e U: úmido



Fonte: Os autores (2024).

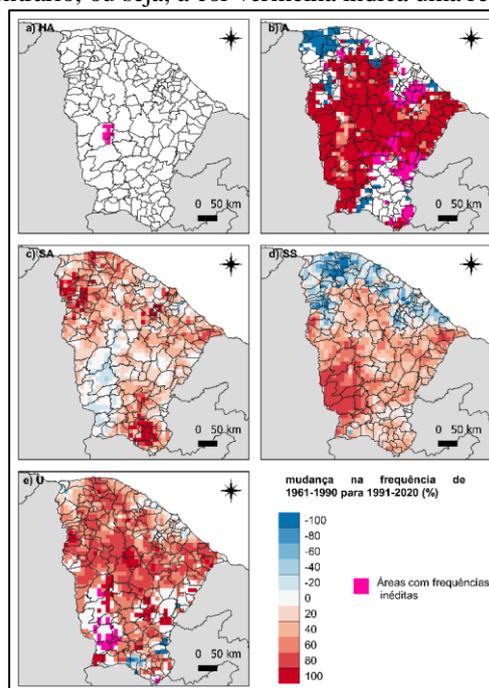
Tabela 1 – Mudanças das classes de aridez dos pontos de grade no estado do Ceará entre os valores médios no período 1961-1990 e 1991-2020. Os valores percentuais indicariam o aumento ou redução na área sob influência de cada classe

	Hiperárido	Árido	Semiárido	Subúmido Seco	Úmido	Total
<b>Hiperárido</b>						0 (-)
<b>Árido</b>						0 (-)
<b>Semiárido</b>						0 (-)
<b>Subúmido Seco</b>			278		2	-280 (60,9%)
<b>Úmido</b>			1	29		-30 (66,7%)
<b>Total</b>	0 (-)	0 (-)	+279 (28,4%)	+29 (13,9%)	+2 (11,8%)	310

Fonte: Os autores (2024).

Assim, a Figura 6 mostra a variação percentual na frequência anual de ocorrência de classes de aridez entre os dois períodos estudados. Essa avaliação permite verificar a ocorrência de classes de aridez que não são captadas na caracterização média de 30 anos.

Figura 6 – Mudança percentual na frequência de ocorrência de cada classe de aridez entre os períodos de 1961-1990 e 1991-2020. HA: hiper árido, A: árido; SA: semiárido; SS: subúmido seco e U: úmido. Para as classes SS e U, as cores têm sentido contrário, ou seja, a cor vermelha indica uma redução na ocorrência.



Fonte: Os autores (2024).

Nota-se, por exemplo, que áreas hiper árida (Figura 6a) ocorreram de forma inédita no período de 1991-2020 no estado do Ceará, mais especificamente na região do Inhamuns. Essa região é conhecida por ser uma zona suscetível a desertificação com forte pressão antrópica além das condições de aridez, conforme Silva e Oliveira (2017), as áreas dos Inhamuns/Sertões

de Crateús, Irauçuba e regiões circunvizinhas, do Médio Jaguaribe e mais de 90 municípios sob influência semiárida no território cearense, estão seriamente comprometidas com a desertificação e apresentam deterioração de seus recursos naturais.

A frequência de ocorrência de zonas áridas também praticamente dobrou em quase todo o estado, com destaque para zonas áridas inéditas no Maciço de Baturité, Sertão Central, Jaguaribe e Cariri (Figura 6b). Pesquisas recentes do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) apontaram a presença inédita de clima árido na climatologia mais recente da região do centro norte do Estado da Bahia. Esse estudo também utilizou os dados de Xavier *et al.* (2022) para gerar o IA em todo o Brasil. Os nossos resultados indicam que, na realidade, se forem observadas as frequências anuais da aridez, até mesmo a tipologia hiperárida já pode ser observada em algumas regiões do Brasil (no caso, no Sertão do Inhamuns).

O aumento da ocorrência de zonas semiáridas mais expressivo se deu no Cariri e também na Serra de Ibiapaba (Figura 6c). Uma informação interessante indicada pela Figura 6e é a ocorrência inédita de  $IA > 0,65$  (úmido, ou ausência de aridez) na porção oeste do Cariri. Esse resultado, embora curioso, pode ser explicado também pelas mudanças climáticas. Tanto episódios de seca extrema, como de chuva extrema estão se tornando mais frequentes na região. A frequência de eventos extremos de precipitação vem crescendo nos últimos anos, com maior intensidade e duração, favorecendo desastres naturais como as inundações e secas severas (Marengo *et al.*, 2011) de forma que possivelmente ocorreram chuvas extremas no período 1991-2020 que fizeram com que o IA apresentasse um valor muito elevado em algum ano.

Esses resultados são complementados pela Tabela 2, que mostra um aumento de 163,8% na ocorrência pontual da classe árido, um aumento de 20,9% na ocorrência da classe semiárida, e uma redução de 32,1% e 44,7% na ocorrência das classes subúmido seco e úmido, respectivamente.

Tabela 2 – Contagem total (somando-se ano a ano) de ocorrências de cada classe de aridez em cada período estudado. Cada ocorrência se refere a um ponto de grade que apresentou aquela classe

	Hiperárido	Árido	Semiárido	Subúmido Seco	Úmido
<b>1961-1990</b>		1.409	18.183	10.570	6.078
<b>1991-2020</b>	10	3.717	21.978	7.175	3.360
<b>Evolução</b>	-	+163,8%	+20,9%	-32,1%	-44,7%

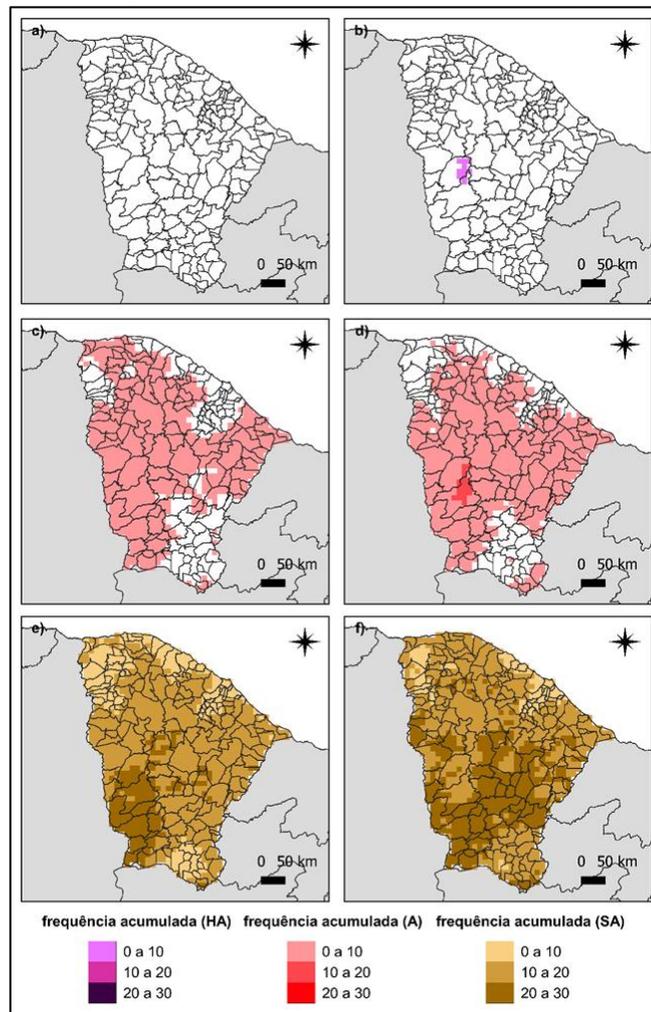
Fonte: Os autores (2024).

O que se observa é, portanto, um aumento sistemático da aridez em todo o estado do Ceará, confirmando resultados de trabalhos anteriores realizados no estado, de acordo Queiroz *et al.* (2022) a vulnerabilidade ao clima, especificamente ao evento da seca, é uma realidade

experimentada por todos os 184 municípios do Ceará e também no Nordeste do Brasil, aumento das áreas suscetíveis à desertificação climática pode intensificar as alterações ecológicas e afetar as propriedades do solo no Semiárido Brasileiro, com o aumento da aridez, pode haver uma expansão da vegetação com características xerófilas em áreas atualmente mais úmidas, como indicado por estudos recentes (Oliveira *et al.*, 2021)

Finalmente, a Figura 7 e a Figura 8 mostram, espacialmente, a frequência anual acumulada de cada classe de aridez (hiper árido, árido e semiárido na Figura 7, subúmido seco e úmido na Figura 8) avaliada nos dois períodos estudados: 1961-1990 e 1991-2020.

Figura 7 – Frequência acumulada da ocorrência das classes de aridez hiper árida (HA), árida (A) e semiárida (SA) nos períodos 1961-1990 (a c, e) e 1991-2020 (b, d, f)

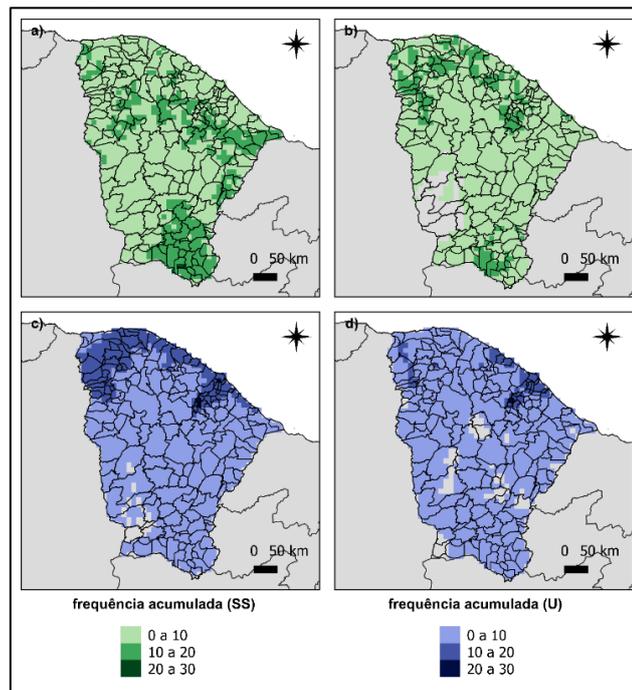


Fonte: Os autores (2024).

A Figura 7b mostra a região inédita onde observou-se hiper aridez no Sertão de Inhamuns, o que é reforçado também pela maior frequência da tipologia árida na mesma região (Figura 7d) no período 1991-2020. Para a tipologia semiárida (Figura 7ef), houve um aumento

na frequência de ocorrência principalmente na porção central do estado e no litoral. Analisando-se na mesma perspectiva a tipologia subúmida seca, observa-se uma diminuição da ocorrência na região central do estado como também nas regiões sul e leste do estado (Figura 8ab).

Figura 8 – Frequência acumulada da ocorrência das classes de aridez subúmida seca (SS) e úmida (U) nos períodos 1961-1990 (a c) e 1991-2020 (b, d)



Fonte: Os autores (2024).

Em paralelo a isso houve um aumento em potencial da ocorrência nas regiões oeste do estado como também no litoral. Já em relação a ocorrência da tipologia úmida ( $IA > 0,65$ ), a diminuição na frequência de ocorrência entre os dois períodos foi bastante representativa no litoral do estado.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho avaliou o comportamento espacial e temporal do IA no estado do Ceará no período de 1961-2020. Além das variações no comportamento médio do índice no Estado, a influência da P e da ETP no IA foram também avaliadas, assim como a frequência anual de tipologias de aridez.

Os resultados encontrados destacam o aumento significativo da aridez no estado do Ceará. Verificou-se aumento das frequências das classes climáticas áridas e semiáridas como também identificado de forma inédita a classe hiper árida na região do Sertão do Inhamuns. Tais resultados dialogam com pesquisas já desenvolvidas sobre a expansão das áreas áridas como também susceptíveis à desertificação no Brasil. Destaca-se a região de Inhamuns se

mostrando a área com mais intensificação da aridez, principalmente quando se observa que para além da classe hiper árida, as classes áridas foram encontradas diversas vezes nessa região. Verificou-se também a expansão da classe semiárida em todo o estado principalmente em áreas do litoral cearense. Dessa forma, os resultados encontrados demonstram o aumento da ETP como a diminuição da P e a diminuição do IA no estado, demonstrando que o Ceará se torna cada vez mais árido comparando os dados de 1961-1990 a 1991-2020.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, D. S. *et al.* Cenário da desertificação no território brasileiro e ações de combate à problemática no estado do Ceará, Nordeste do Brasil. *In: Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 55., 1992. **Anais** [...]. [S. l.], 1992. [S. p]. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2020.

BRITO, Y. M. A. *et al.* Panorama da seca plurianual 2012–2018 no semiárido brasileiro: impactos hidrológicos, agrícolas e medidas de convivência. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 58., 2021. **Anais** [...]. [S. l.], 2021. [S. p].

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Desertificação, degradação das terras secas no Brasil**. Brasília, DF: 2016.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D. S.; ROCHA JÚNIOR, R. L.; SALVADOR, M. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 100-254, 2020.

DUBREUIL, Vincent *et al.* Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 39, n. 3, p. 1446-1456, 2019.

FEDERAL DO BRASIL - GOVERNO. **Elaboração dos Mapas de índice de Aridez e Precipitação Total Acumulada para o Brasil**. Brasília: Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - Cemaden/MCTI. 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/estudo-do-cemaden-e-do-inpe-identifica-pela-primeira-vez-a-ocorrencia-de-uma-regiao-arida-no-pais/nota-tecnica\\_aridas.pdf](https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/estudo-do-cemaden-e-do-inpe-identifica-pela-primeira-vez-a-ocorrencia-de-uma-regiao-arida-no-pais/nota-tecnica_aridas.pdf). Acesso em: 30 jan. 2024.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Mapeamento Áreas Fortemente Degradadas em processo de Desertificação no Ceará, 2018. **Desenvolv. Meio Ambiente**, [S. l.], v. 55, n. 1, p. 673-696, dez. 2020. Disponível em: <http://www.funceme.br/wp-content/>. Acesso em: 30 jan. 2024.

GREVE, P. *et al.* O índice de aridez sob o aquecimento global. **Cartas de Pesquisa Ambiental**, [S. l.], v. 14, n. 12, p. 124006, 2019.

HUANG, H.; HAN, Y.; CAO, M.; SONG, J.; XIAO, H.; CHENG, W. Spatiotemporal characteristics of evapotranspiration paradox and impact factors in China in the period of 1960–2013. **Advances in Meteorology**, [S. l.], v. 1, n.1, p. 1-11, 2015.

IPECE. **Índice Municipal de Alerta IMA**. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/indice-municipal-de-alerta/>. Acesso em 6 jan. 2024.

ISLAM, A. R. T. *et al.* Spatio temporal distribution of drought and its possible associations with ENSO indices in Bangladesh. **Arabian Journal of Geosciences**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 1-19, 2021.

MARENGO, J. A. *et al.* A seca de 2010 no contexto das secas históricas na região amazônica. **Cartas de pesquisa geofísica**, [S. l.], v. 38, n. 12, 2011.

MARIN, A. M. P. *et al.* Níveis atuais da desertificação no Semiárido brasileiro. **Cadernos de Agroecologia**, [S. l.], v. 15, n. 2, 2020.

MEDEIROS, R. M. *et al.* Diagnosis and trend rainfall in Bom Jesus-Piauí, Brazil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 115-121, 2016.

MOURA, M. M. *et al.* Análise temporal da vulnerabilidade à desertificação no Nordeste do Brasil usando o Google Earth Engine. **Transações em SIG**, [S. l.], v. 26, n. 4, p. 2041-2055, 2022.

MUNIZ, L. F.; PEREIRA, J. M. R.; XIMENES JÚNIOR, Celso. Lira.; STUDART, T. M. C. Classificação climática para o Estado do Ceará utilizando distintos sistemas de caracterização. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS - SBRH, 22., 2017, Florianópolis. Anais [...].* Florianópolis: UFSC, 2017.

MUTTI, P. R. *et al.* Avaliação de dados CRU TS em grade para monitoramento do balanço hídrico climático de longo prazo na Bacia Hidrográfica do São Francisco, Brasil. **Atmosfera**, [S. l.], v. 11, n. 11, p. 1207, 2020.

OLIVEIRA, G. C. *et al.* Os preditores do solo são cruciais para modelar a distribuição da vegetação e as suas respostas às alterações climáticas. **Ciência do Meio Ambiente Total**, [S. l.], v. 780, p. 146-680, 2021.

PONTES FILHO, J. D. *et al.* Análise de frequência multivariada baseada em cópulas da seca de 2012–2018 no Nordeste do Brasil. **Água**, [S. l.], v. 12, n. 3, 2020.

QUEIROZ, D. B. *et al.* Tecnologias Sociais na Redução da Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas nos Municípios do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 37, p. 261-268, 2022.

RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. S. **Mudanças climáticas e cidades**: relatório especial do painel brasileiro de mudanças climáticas. Rio de Janeiro, 2016.

ROCHA, R. L. *et al.* Mudança de longo prazo e regionalização da evapotranspiração de referência no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 35, p. 891-902, 2021.

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 31, p. 64-73, 2016.

SILVA, E. G. B.; OLIVEIRA, V. P. V. Identificação das áreas susceptíveis à desertificação no estado do Ceará: antecedentes cartográficos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 1269-1280, 2017.

SILVA, L. A. P. *et al.* Mapeamento da aridez e suas conexões com classes do clima e desertificação climática em cenários futuros-Semiárido Brasileiro. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 35, n. 1, 2023.

SUDENE. Resolução N. 115, de 23 de novembro de 2017. **Delimitação do Semiárido Brasileiro**. Diário Oficial da União, Seção 1, p. 32, Brasília, 5 dez. 2017.

TABARI, H. *et al.* Uma pesquisa de índices de aridez baseados em temperatura e precipitação no Irã. **Quaternário Internacional**, [S. l.], v. 345, n. 1, p. 158-166, 2014.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

TOMASELLA, J. *et al.* Tendências da desertificação no Nordeste do Brasil no período 2000–2016. **Jornal Internacional de Observação Aplicada da Terra e Geoinformação**, [S. l.], v. 73, n. 1, p. 197-206, 2018.

TSIROS, I. X. *et al.* Variabilidade do índice de aridez e parâmetros de seca relacionados na Grécia utilizando dados climatológicos ao longo do último século (1900–1997). **Pesquisa Atmosférica**, [S. l.], v. 240, n. 1, p. 104-914, 2020.

UNCCD, 1994. **United Nations Convention to Combat Desertification. Elaboración de una Convención Internacional de Lucha Contra La Desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación en particular en África**. Texto final de la Convención Doc. A/AC.241/27. Disponível em: <http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibra>. Acesso em: 22 de jan. 2024.

UNCCD. Managing fragile ecosystems: combating desertification and drought Agenda 82 21: Earth Summit. **United Nations Sustainable Development**. [S. l.; S.n.], 1994.

UNESCO. **Aridity definition (UN documents), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization**, New York. 1979. Disponível em: <http://www.unesco.org/new/en/unesco/resources/publications/>. Acesso em: 15 dez. 2023.

UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION. **Benefits of Sustainable Land Management**, 2009.

VIEIRA, R. M. D. S. P. *et al.* Desertification risk assessment intheast Brazil: Current trends and future scenarios. **Land Degradation & Development**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 224–240, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.3681>. Acesso em: 15 dez. 2023.

XAVIER, A. C. *et al.* Novos dados meteorológicos diários brasileiros melhorados (1961–2020). **Revista Internacional de Climatologia**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 8390-8404, 2022.