



O Índice de Segurança Hídrica do Brasil e o Semiárido Brasileiro: Desafios e Riscos Futuros

The Brazilian Water Security Index and the Brazilian Semi-arid: Challenges and Future Risks

Higor Costa de Brito ¹, Yáscara Maia Araújo de Brito ² e Iana Alexandra Alves Rufino ³

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Campina Grande, Brasil. h_igor@hotmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4721-7197>

² Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais, Campina Grande, Brasil. yascaramaiaa@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8933-6058>

³ Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Civil, Campina Grande, Brasil.

iana.alexandra@ufcg.edu.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0450-4647>

Recebido: 05.2021 | Aceito: 08.2021

Resumo: No Semiárido Brasileiro a escassez de água é recorrente, agravada por secas históricas e pelo aumento da demanda de água. Na busca por mitigar tais efeitos, o estudo objetiva elaborar uma dimensão para o Índice de Segurança Hídrica do Brasil (ISH), capaz de representar o risco associado às interferências antrópicas e ao fenômeno da seca na região. A metodologia visa adicionar uma quinta dimensão ao ISH, que considera as dimensões humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência. O intuito é aprimorar o mapa de segurança hídrica previsto para o ano de 2035, aplicado à Bacia do Alto Curso do Rio Paraíba. A nova dimensão, denominada Dimensão de Risco, utiliza um produto de uso e cobertura da terra simulado para 2035 e o Mapa Cumulativo de Secas. Os resultados constatarem a carência de informações em algumas dimensões do ISH, visto que diversas otobacias têm o seu ISH representado por apenas uma dimensão. Nesse âmbito, a Dimensão de Risco agregou informações baseada na demanda e oferta de água, ao considerar todas as áreas de uso antrópico e as condições de seca que assolam a região, alterando o ISH de diversas localidades. Logo, o trabalho contribui para refinar o conceito de risco adotado na elaboração do ISH, principalmente para regiões de maior vulnerabilidade climática e social como o Semiárido Brasileiro, onde o risco transcende quantificações de oferta e demanda de água e afeta diretamente o desenvolvimento humano, político e econômico da população, impactando as ações humanas que ocorrem na região e, conseqüentemente, sua segurança hídrica.

Palavras-chave: Segurança hídrica. Seca. Antropização. Risco. Sensoriamento remoto.

Abstract: In the Brazilian semi-arid region, water scarcity is recurrent, aggravated by historical droughts and increased water demand. In the search to mitigate such effects, the study aims to elaborate a dimension for the Brazilian Water Security Index (ISH), representing the risk associated with anthropic interference and the drought phenomenon in the region. The methodology aims to add a fifth dimension to ISH, which considers the human, economic, ecosystem, and resilience dimensions. The aim is to improve the water security map planned for the year 2035, applied to the Upper Course Basin of the Paraíba River. The new dimension, called the Risk Dimension, uses a simulated land use and land cover product for 2035 and the Cumulative Drought Map. The results show the lack of information in some dimensions of the ISH, where several otobacias have their ISH represented by only one dimension. In this context, the Risk Dimension added information based on the demand and supply of water, considering all areas of anthropic use and the drought conditions that plague the region, changing the ISH of several locations. Therefore, the work contributes to refine the concept of risk adopted in the elaboration of the ISH, mainly for regions of greater climatic and social vulnerability, such as the Brazilian Semi-arid, where the risk transcends quantifications of water supply and demand and directly affects human, political development and economical of the population, impacting the human actions that take place in the region and, consequently, its water security.

Keywords: Water security. Drought. Anthropization. Risk. Remote sensing.

1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são diretamente ameaçados pelas atividades humanas, por meio de mudanças generalizadas na cobertura do solo, urbanização, industrialização, obras de engenharia, irrigação e transposição de água entre bacias hidrográficas que maximizam o acesso hídrico. Os benefícios do fornecimento de água aos centros urbanos e à produção agrícola são frequentemente acompanhados por danos aos ecossistemas e à biodiversidade, potencialmente graves, mas dificilmente quantificados (ABELL et al., 2008; VERONES et al., 2017). A elaboração de intervenções, que incluam convenções e avaliações científicas para proteger a biodiversidade aquática e garantir a sustentabilidade dos sistemas de distribuição de água, requer estruturas para diagnosticar as principais ameaças à segurança hídrica em uma variedade de escalas espaciais (VÖRÖSMARTY et al., 2010).

Para desenvolver indicadores nessa perspectiva, Lautze e Manthritlake (2012) identificaram cinco fatores críticos para a segurança hídrica: (i) necessidades básicas, (ii) produção agrícola, (iii) meio ambiente, (iv) gestão de riscos e (v) independência. Nesse caso, o fator “gestão de risco” está intrinsicamente associado à prevenção de desastres relacionados à água.

Os riscos associados aos recursos hídricos são comumente associados ao excesso de água ou a sua escassez. No Semiárido Brasileiro, a escassez de água é um problema recorrente, constantemente agravado por secas históricas, relatadas desde o século XVI (CAMPOS, 2015; MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016). Segundo Londe et al. (2014), os impactos da seca na região semiárida brasileira tendem a ser subestimados, embora seja um problema frequente em diversos municípios brasileiros, onde representam, secularmente, um quadro de risco para a população (SILVA et al., 2013). Os períodos de seca podem ser influenciados pelas mudanças climáticas e, embora possuam origem meteorológica, os efeitos são drasticamente ampliados pela degradação e ocupação desordenada da terra, o que aumenta a pressão antrópica sobre os recursos hídricos (FALKENMARK, 2013).

A segurança hídrica também está, portanto, associada às pressões crônicas e aos eventos extremos. Nesse contexto, o conceito de risco torna-se cada vez mais atraente para enquadrar, medir e informar as respostas aos desafios da segurança hídrica futura. Desse modo, este trabalho objetiva adicionar uma nova dimensão para o Índice de Segurança Hídrica do Brasil (ISH), capaz de representar espacialmente o risco associado as interferências antrópicas (representadas pelas mudanças no uso do solo) e ao fenômeno da seca na região semiárida do país.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O índice de segurança hídrica do Brasil

O ISH foi elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA), no âmbito do Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), para retratar as condições atuais e perspectivas futuras da segurança hídrica no território brasileiro, através de diferentes dimensões que incorporam o conceito de risco aos usos da água (ANA, 2019a).

Os conceitos envolvidos na composição do ISH são estruturados de acordo com dimensões, indicadores e variáveis. Dessa forma, foram estabelecidas quatro dimensões para a elaboração do índice: Humana, Econômica, Ecossistêmica e de Resiliência. Cada dimensão é composta por um ou mais indicadores, formando uma combinação de variáveis ou atributos mensuráveis que, segundo a ANA, são capazes de quantificar aspectos pertinentes à segurança da água.

As dimensões humana e econômica permitem quantificar os déficits de atendimento às demandas efetivas (abastecimento humano e setor produtivo), enquanto as demais dimensões (ecossistêmica e resiliência) buscam identificar áreas mais críticas e vulneráveis.

Os indicadores possuem valores normalizados, com a atribuição de números naturais entre 1 e 5, em ordem decrescente do nível de segurança hídrica, com exceção do indicador de segurança das barragens de rejeito de mineração, que varia de 1 a 3. Por fim, o grau de segurança hídrica é resultante de uma média simples

ou ponderada dos graus de segurança de cada dimensão. Os cálculos foram realizados na escala de ottobacia¹ e os indicadores que apresentam valor nulo não participam da média.

O ISH foi calculado para dois cenários referentes aos anos de 2017 e 2035 (ANA, 2019a). As mudanças entre o cenário observado e o previsto ocorrem em duas variáveis: nas estimativas de demanda por água e na estimativa da população urbana, alterando apenas o grau da Dimensão Humana. Dessa forma, os impactos ocasionados pela expansão do agronegócio e demais atividades antrópicas – e o consequente aumento da demanda de água para essas atividades – não são considerados diretamente no cálculo do ISH.

No contexto do PNSH, o risco hídrico é tratado com base na demanda e oferta de água, sendo caracterizado por duas grandes tipologias: risco pós-déficit, que corresponde ao valor em risco quando uma parcela da demanda não está sendo suprida e risco iminente, correspondente ao valor em risco que pode ocorrer no limiar do déficit, porém, ainda antes de sua ocorrência. Esses riscos foram calculados em termos de população exposta a déficits hídricos (dimensão humana do ISH) e de valores monetários de produção econômica perdida devido a demandas não atendidas (dimensão econômica).

2.2 A antropização e a seca como indicadores de risco

O risco é o resultado da interação entre perigo, exposição e vulnerabilidade (MARTÍNEZ-GRAÑA et al., 2016). O perigo é caracterizado como um evento perigoso que pode afetar diferentes locais em momentos distintos (com uma certa intensidade e frequência de ocorrência), enquanto a exposição é composta pelos valores humanos presentes no local envolvido. Já a vulnerabilidade abrange as características e circunstâncias de uma comunidade ou sistema, que é suscetível aos efeitos prejudiciais de um perigo (FRIGERIO; DE AMICIS, 2016; KRON, 2002; WISNER et al., 2004).

Considerando as definições expostas, o risco pode ser caracterizado como o potencial de materialização de resultados indesejáveis (HALL; BORGOMEIO, 2013). No Brasil, assim como em outros países em desenvolvimento, os riscos associados à segurança hídrica ocorrem em decorrência dos impactos do crescimento populacional, urbanização, degradação ambiental e desenvolvimento econômico, justapondo à demanda acelerada de água urbana e à escassez provocada por períodos de seca (HOPE; ROUSE, 2013).

Entre os desafios para alcançar a segurança hídrica destacam-se o perigo climático, relacionado aos eventos climáticos extremos (chuvas intensas ou escassez) e a exposição, que representa a natureza e o grau em que um receptor é exposto aos riscos climáticos ou meteorológicos (KAŹMIERCZAK; CAVAN, 2011; PARRY et al., 2007).

A preparação para um futuro incerto pode ser abordada através da melhoria da adaptação à variabilidade climática (BURTON, 1997). Nesse sentido, a análise de riscos fornece evidências essenciais para escolhas entre diferentes alternativas de ação e permite uma maior compreensão sobre a materialização dos impactos da seca, através de avaliações que contribuam para o planejamento espacial da redução do risco e opções de adaptação (HAGENLOCHER et al., 2019).

2.2.1 ABORDAGEM CUMULATIVA E INTEGRADA DE SECAS PLURIANUAIS

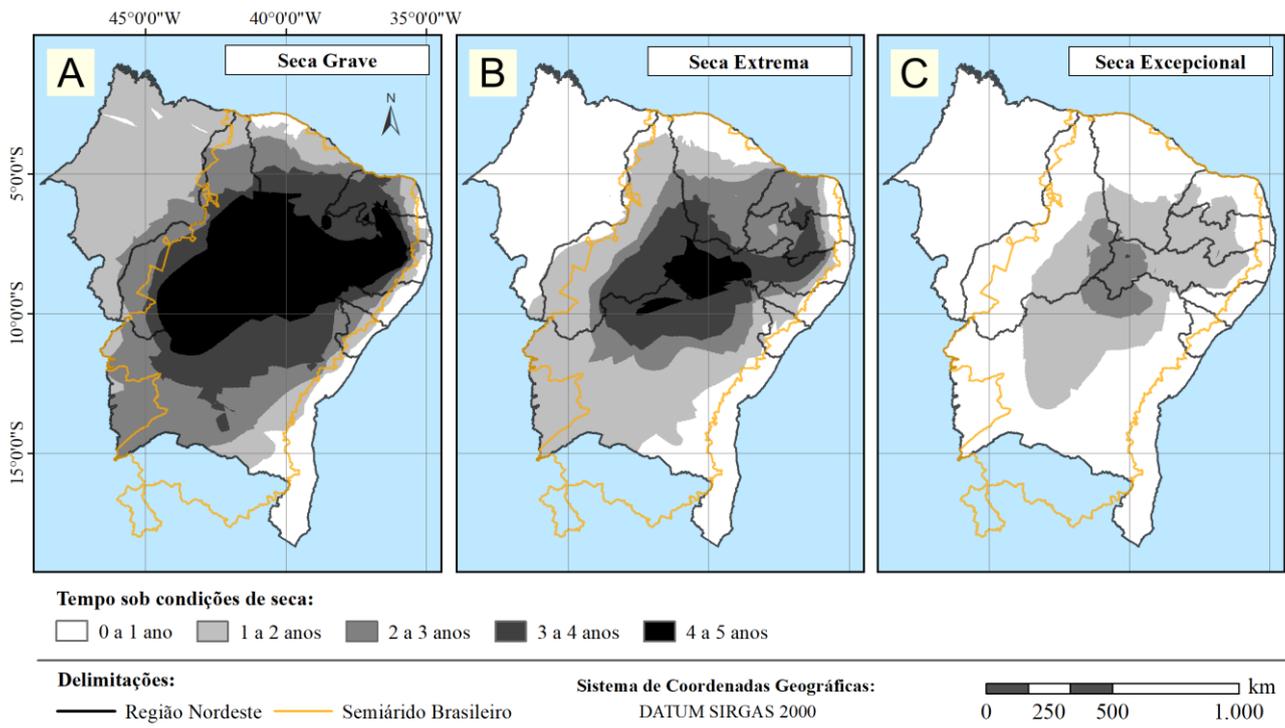
O Monitor de Secas do Brasil (MSB) é um produto para acompanhamento contínuo mensal do grau de severidade das secas no país, com base em indicadores climáticos e impactos causados pelo fenômeno a curto e longo prazo (MARTINS et al., 2015). No MSB, cada classe de seca (fraca, moderada, grave, extrema e excepcional) está associada a possíveis impactos referentes ao abastecimento de água e a agropecuária. Nesse contexto, a Abordagem Cumulativa de Secas, metodologia proposta por Brito et al. (2021), consiste em integrar todos os resultados mensais do MSB em um único produto, através do qual é possível observar as secas sob uma perspectiva plurianual. A pesquisa teve como principal motivação a avaliação das intensidades de secas severas, extremas e excepcionais que afetaram o Nordeste Brasileiro entre 2014 a 2019, em uma perspectiva plurianual integrada.

¹ Ottobacias são subdivisões das bacias hidrográficas em áreas menores, de maior detalhe, realizadas de acordo com metodologia desenvolvida pela ANA, que tem por base teórica o método de codificação de cursos de água desenvolvido por Otto Pfafstetter.

A abordagem destes autores utilizou as três tipologias de seca de maior gravidade presentes no MSB: secas severas, extremas e excepcionais. Essa seleção se deve aos níveis de maior impacto esperados para essas categorias, como as restrições hídricas impostas na seca grave e a criação de estados de emergência na seca excepcional. Foram utilizados dados mensais, de julho de 2014 a junho de 2019, totalizando 5 anos de análise de secas, submetidos a operações de análise espacial, tabulação cruzada e consequente estruturação de mapas de secas acumuladas.

No mapa resultante (Figura 1), os valores contidos nos *pixels* variam entre 0 e 60 (referente a quantidade de meses analisados), onde “0” significa que o pixel está em uma área que não esteve em seca por nenhum dos meses, dentro da análise de intervalo de tempo de 5 anos. Por outro lado, o valor “60” expressa que a área foi severamente atingida por seca durante todo o período de análise de 60 meses, ininterruptamente.

Figura 1 – Mapas resultantes da abordagem de seca cumulativa para o Nordeste Brasileiro. Da intensidade mais baixa à mais alta estão: (A) seca severa, (B) seca extrema e (C) seca excepcional.



Fonte: Adaptada de Brito et al. (2021).

A abordagem cumulativa visa analisar a trajetória espacial e temporal de cada pixel e consequentemente, determinar quais estão em condições de seca severa, extrema ou excepcional em diferentes períodos, além do tempo de permanência e continuidade dessas condições. O estudo foi baseado na abordagem acumulada aplicada a 13 anos de mapas de seca dos Estados Unidos, desenvolvidos por Rufino et al. (2014). Os resultados obtidos forneceram novos subsídios para avaliar todos os dados disponibilizados pelo MSB. Além disso, os produtos resultantes da pesquisa evidenciam áreas que requerem maior preocupação com o enfrentamento da seca, o que nem sempre é possível em uma análise mensal ou mesmo em uma análise comparativa (mês a mês em diferentes anos).

2.2.2 ABORDAGEM PREDITIVA DO AVANÇO ANTRÓPICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

O território brasileiro é vasto e atualmente conta com mapas anuais de uso e cobertura da terra (LULC), elaborados pelo Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra no Brasil – Mapbiomas (SOUZA et al., 2020). A disponibilidade de bancos de dados espaciais de LULC, em uma base anual, torna-se uma oportunidade valiosa para gerar cenários futuros capazes de representar tendências de ocupação antrópica. Tais cenários são amplamente usados para o planejamento em escalas urbanas e regionais, com base em diferentes métodos e técnicas (KHAN et al., 2018; SANCHEZ et al., 2014; SWEETAPPLE et al., 2019; VANNIER et al., 2019).

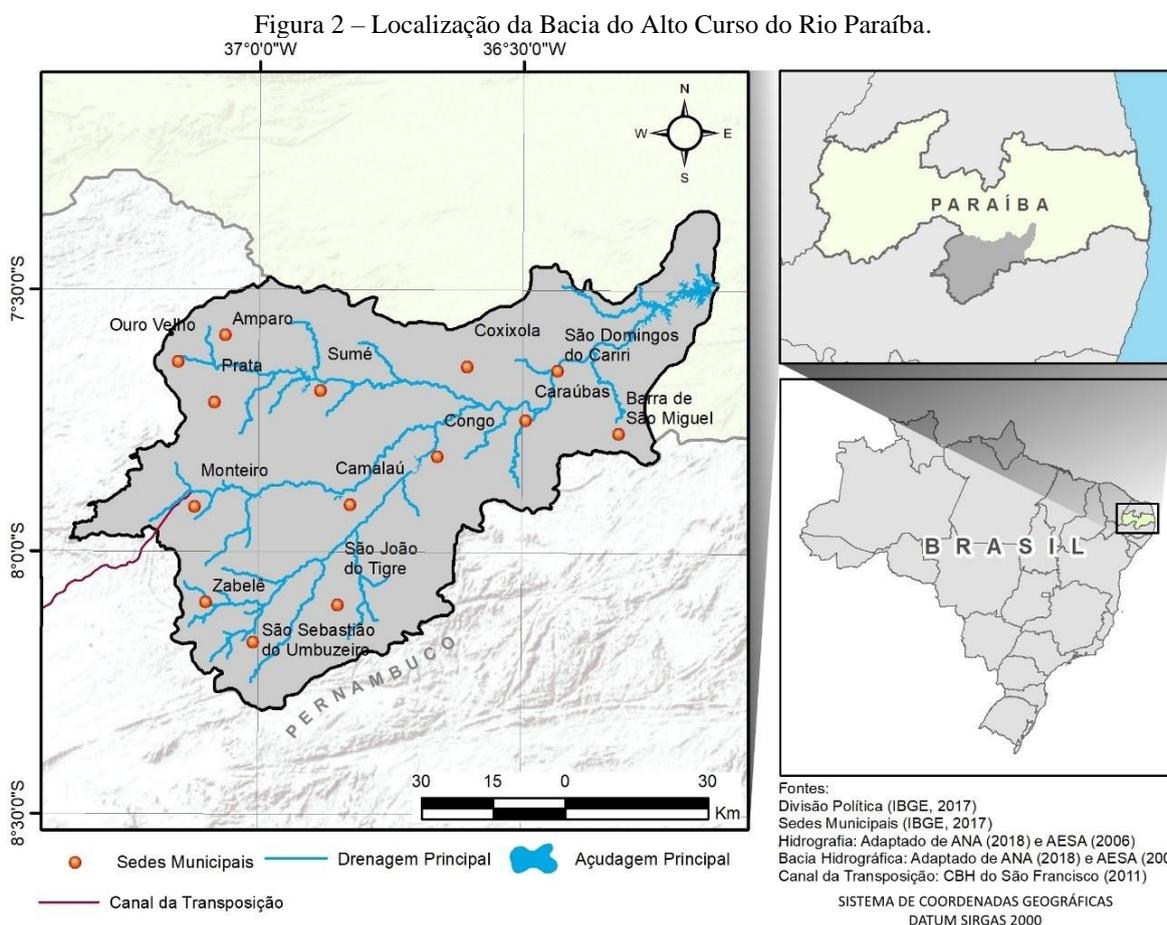
Por conseguinte, Brito, Rufino e Djordjević (2021) implementaram uma abordagem preditiva a partir de um modelo baseado em autômatos celulares, na bacia hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba, utilizando a série de dados do Mapbiomas como dado de entrada para o modelo. O estudo apresenta a possibilidade de uma modelagem preditiva do uso da terra em larga escala, viabilizada pela disponibilidade de produtos LULC da coleção Mapbiomas para os biomas brasileiros. Além disso, a metodologia possibilita a replicação da modelagem em outras bacias hidrográficas brasileiras. Nessa perspectiva, os cenários futuros baseados em tendências e alta precisão espacial despontam como uma ferramenta inteligente para melhorar a qualidade da gestão dos recursos hídricos.

Os cenários anuais de LULC futuros elaborados na pesquisa supracitada, calculados entre 2019 e 2025, estimaram o potencial de degradação das áreas de formação natural em decorrência dos avanços antrópicos na região. Sendo assim, essa ação humana, que ocorre principalmente em decorrência das atividades agrícolas, pecuárias e do crescimento urbano, aumentam a demanda pela água e afetam diretamente a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica, comprometendo a segurança hídrica de toda a região.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

O Alto Curso do Rio Paraíba (Figura 2) localiza-se na porção sul do estado da Paraíba, na divisa com o estado de Pernambuco, na região Nordeste do Brasil. A bacia abrange uma área de aproximadamente 6.696,17 km² e engloba 18 municípios, alguns deles de forma parcial. Esses municípios encontram-se distribuídos entre as microrregiões do Cariri Ocidental e Oriental do Estado, uma das regiões com índices pluviométricos mais baixos do país (FURTADO; SOUZA, 2016). O Rio Paraíba recebe contribuições pouco expressivas de seus afluentes salobros, recebendo mais água das chuvas do regime torrencial, como caracterizado na maior parte da região semiárida.



Fonte: Os autores (2022).

Esse regime condicionou uma vegetação do tipo caatinga, havendo em suas vertentes espécies arbóreas de grande porte, típicas de mata úmida, que, com o avanço da atividade agrícola, foram dando lugar a predominância da caatinga propriamente dita. Segundo a Organização Não Governamental Paraíba:

Nas margens do rio, onde havia árvores de grande porte, a agropecuária as eliminou, contribuindo assim para o assoreamento do leito do rio e para os problemas ambientais, quais sejam o desmatamento e a compactação do solo pelo pisoteio do gado, cuja consequência vem sendo a gradativa diminuição da vazão de água no leito do rio. Tais práticas agropecuárias têm sido responsáveis pelo processo de degradação ambiental, que dentre outras coisas, vem diminuindo as nascentes perenes que alimentam a bacia do Rio Paraíba. Não obstante, são práticas culturais incorporadas ao imaginário sertanejo, que dificultam muito a solução dos problemas ambientais (Maia Júnior et al., 2011, não paginado).

Nessa região, os conflitos pelo uso de recursos naturais não se limitam apenas aos custos e medidas de compartilhamento de recursos. As divergências surgem associadas a aspectos socioculturais, políticos e medidas de gerenciamento, historicamente agravados por fenômenos de secas. Dentre os casos de secas recentes, tem-se a seca plurianual de 2012 a 2018. O período de estiagem ocasionou impactos substanciais à população, onde inúmeros açudes entraram em colapso, com volumes zerados; diversos municípios passaram a ser abastecidos por carros-pipa; a irrigação foi proibida em muitas regiões e a agropecuária apresentou perdas críticas (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016).

3.2 Processamento dos dados

A metodologia elaborada neste trabalho visa adicionar uma quinta dimensão ao ISH, por meio de novos indicadores que até então, não haviam sido levados em consideração para a segurança hídrica. O intuito foi aprimorar o produto previsto para o ano de 2035 na região semiárida do Brasil. Para a elaboração da dimensão, denominada de Dimensão de Risco, foi utilizado o produto de LULC da bacia do Alto Curso do Rio Paraíba para o ano de 2035, resultante da pesquisa de Brito, Rufino e Djordjević (2021), onde o cenário futuro foi elaborado a partir dos 35 produtos anuais de LULC do Mapbiomas e modelagens com autômatos celulares. Além disso, foi utilizado o Mapa Cumulativo de Secas, proposto por Brito et al. (2021), com base em 60 produtos mensais fornecidos pelo MSB (MARTINS et al., 2015).

A Dimensão de Risco objetiva adicionar ao ISH de 2035 indicadores capazes de quantificar o risco associado à segurança hídrica de cada ottobacia, através da relação entre o perigo e exposição, representados pela seca (com base no Mapa Cumulativo de Secas) e antropização (como base no cenário futuro de LULC), respectivamente. A Figura 3 ilustra os indicadores das cinco dimensões utilizadas para elaboração do Índice de Segurança Hídrica do Brasil Ajustado (ISH_{ajust}) – composta pelas quatro dimensões originalmente presentes no ISH (humana, econômica, ecossistêmica e resiliência) e a dimensão de risco – e os respectivos indicadores utilizados.

Figura 3 – Dimensões e indicadores do ISH_{ajust} .

DIMENSÃO	INDICADORES
HUMANA	<ul style="list-style-type: none"> • Garantia de água para abastecimento • Cobertura da rede de abastecimento
ECONÔMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Garantia de água para Irrigação e Pecuária • Garantia de água para atividade Industrial
ECOSSISTÊMICA	<ul style="list-style-type: none"> • Quantidade adequada de água para usos naturais • Qualidade adequada de água para usos naturais • Segurança de barragens de rejeito de mineração
RESILIÊNCIA	<ul style="list-style-type: none"> • Reservação artificial • Reservação natural • Potencial de armazenamento subterrâneo • Variabilidade pluviométrica
RISCO	<ul style="list-style-type: none"> • Perigo associado a seca • Exposição de áreas antropizadas

Fonte: Adaptada de ANA (2019).

O perigo associado à seca foi quantificado de acordo com o número de meses em que cada ottobacia registrou algum tipo de seca mais intensa (grave, extrema ou excepcional) durante 60 meses de análise, entre julho de 2014 e junho de 2019. Os anos de 2012 e 2013 não foram considerados, tendo em vista que a iniciativa do MSB passou a fornecer dados apenas a partir de julho de 2014. Esse intervalo inclui uma das secas plurianuais mais longas já registradas pelo Semiárido Brasileiro, que se estendeu de 2012 a 2018 (DANTAS; SILVA; SANTOS, 2020; PONTES FILHO et al., 2020). Foram analisadas três tipologias de seca: grave, extrema e excepcional; em que o menor grau registrado entre os três tipos determinou o grau de seca da ottobacia. A Tabela 1 relaciona a quantidade de meses com registro de seca e seu respectivo grau, sendo este aferido com base no seu nível de severidade (registro de seca mais intensa) e período de tempo em que cada ottobacia registrou esse fenômeno.

Tabela 1 – Quantidade de meses em cada tipologia de seca e seu respectivo grau associado.

Grau de Seca	Seca Excepcional	Seca Extrema	Seca Grave
1	≥ 10 meses	≥ 20 meses	≥ 30 meses
2	7 a 9 meses	14 a 19 meses	21 a 29 meses
3	4 a 6 meses	8 a 13 meses	12 a 20 meses
4	1 a 3 meses	2 a 7 meses	3 a 11 meses
5	Nenhum registro	≤ 1 mês	≤ 2 meses

Fonte: Os autores (2022).

Por sua vez, a exposição de áreas antropizadas foi obtida a partir da porcentagem de área antropizada em cada ottobacia. Para isso, utilizou-se o mapa de LULC de 2035 e, a partir da quantificação das áreas antropizadas observadas no cenário simulado, por meio de estatísticas zonais em ambiente SIG, obteve-se a porcentagem por ottobacia. Por fim, o percentual de área antropizada simulada foi associado a um grau de antropização, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Porcentagem de área antropizada e seu respectivo grau associado.

Grau de Antropização	Percentual de área antropizada (2035)
5	0 a 20%
4	20,01 a 40%
3	40,01 a 60%
2	60,01 a 80%
1	80,01 a 100%

Fonte: Os autores (2022).

Para o cálculo do valor da Dimensão de Risco, utilizou-se os graus de seca e antropização, seguindo uma matriz de classificação (Tabela 3), conforme utilizado no PNSH para quantificar graus de risco (ANA, 2019b). A classificação dos valores segue uma ordem inversa das utilizadas nas demais dimensões, indo de um risco máximo (valor 1) até um risco considerado mínimo (valor 5). Dessa forma, o valor 1 representa uma ottobacia que em 2035 irá apresentar uma porcentagem de antropização superior a 60% e conviveu, no mínimo, sete meses com algum tipo de seca (grave, extrema ou excepcional). Por outro lado, o valor 5 indica uma ottobacia com menos de 40% de sua área ocupada por atividades antrópicas e com registro de secas de, no máximo, 11 meses.

Tabela 3 – Valor da dimensão de risco em função dos graus de seca e antropização.

Grau de Seca	Grau de Antropização				
	1	2	3	4	5
1	1	1	2	2	3
2	1	2	2	3	3
3	2	2	3	3	4
4	2	3	3	4	5
5	3	3	4	5	5

Fonte: Os autores (2022).

Por fim, o ISH_{ajust} foi calculado em ambiente SIG, a partir da álgebra de mapas entre as cinco

dimensões. O grau de segurança hídrica foi o resultado da média simples entre os valores de cada uma das dimensões. Os cálculos foram realizados para cada ottobacia e as dimensões que apresentam valor nulo, ou seja, que não possuíam informações suficientes para seu cálculo, não participaram da média.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A construção do ISH_{ajust} foi resultante da relação entre as cinco dimensões analisadas (humana, econômica, ecossistêmica, de resiliência e risco). A Figura 4 ilustra o ISH_{ajust} e todas as dimensões utilizadas para sua elaboração na área piloto. Ainda na figura em questão foi possível constatar a carência de informações em algumas dimensões da região, principalmente na humana e na ecossistêmica, nas quais mais de 50% da bacia não possui dados que possibilitem a quantificação das dimensões supracitadas. As dimensões de resiliência e risco, por outro lado, possuem dados para toda a região, uma vez que estas são compostas por produtos derivados de levantamentos feitos por sensoriamento remoto, que conseguem abranger o território semiárido em sua totalidade.

Diante da ausência de dimensões para algumas áreas, diversas ottobacias têm o seu ISH representado apenas pelas informações da Dimensão Resiliência (única que originalmente possui dados para todo o semiárido). Segundo informações contidas no PNSH, as dimensões humana e econômica permitem quantificar os déficits de atendimento às demandas efetivas (abastecimento humano e setor produtivo) e riscos associados, entretanto, pela falta de informações, essa análise acaba não contemplando todo o território brasileiro.

Segundo Ogata et al. (2016), a região do Alto Paraíba necessita de atenção no acesso ao abastecimento de água e esgotamento sanitário, além de melhorias na garantia dos usos múltiplos. Dessa forma, a carência de dados para a elaboração da Dimensão Humana em diversas ottobacias do Semiárido omite um dos principais problemas enfrentados pela população: a dificuldade de acesso à água potável.

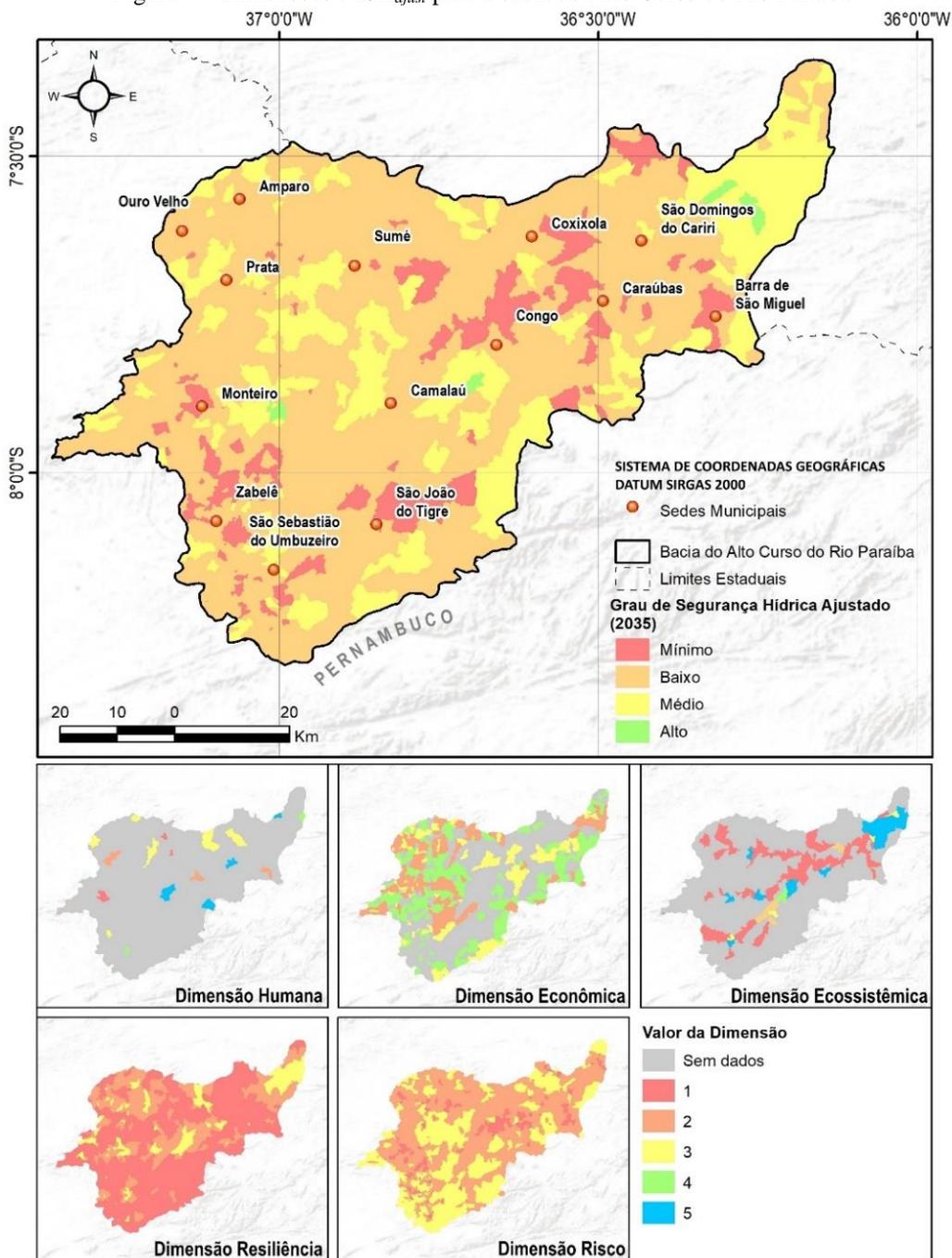
No contexto do ISH, a Dimensão Econômica busca valorar os riscos dos setores econômicos que fazem uso de recursos hídricos no território nacional. No Semiárido Brasileiro, o Censo Agropecuário de 2017 identifica 1,83 milhões de estabelecimentos agropecuários dos quais, aproximadamente 79% são caracterizados como de agricultura familiar – um dos segmentos da população brasileira mais vulneráveis às mudanças e às variabilidades climáticas (IBGE, 2019). Nesse caso, a vulnerabilidade da produção agrícola nesse segmento é estrutural e se intensifica durante os períodos de estiagem. Contudo, os indicadores utilizados para a elaboração da Dimensão Econômica não consideram a sazonalidade dos fenômenos de estiagem no semiárido.

Por sua vez, a Dimensão Ecossistêmica mensura condições minimamente saudáveis para o meio ambiente, associadas a determinados trechos de rio. Diante disso, as ottobacias mensuradas estão localizadas próximo ao Rio Paraíba e fornecem graus de segurança hídrica que variam entre mínimos e máximos ao longo do rio. Essa dimensão também avalia a segurança das barragens de rejeitos de mineração, entretanto, o estado da Paraíba não possui nenhuma barragem com essa finalidade.

A quarta dimensão originalmente presente no ISH, denominada de Resiliência, busca retratar os níveis de segurança hídrica relacionados à ocorrência de eventos críticos de secas e fornece dados para todas as ottobacias do Semiárido. No entanto, essa dimensão trata a seca como um fenômeno que se manifesta de maneira homogênea, onde os impactos sobre diferentes atores sociais ocorrem de forma uniforme, com base na capacidade de reserva da ottobacia e sua variabilidade pluviométrica.

Nesse âmbito, a Dimensão de Risco visa agregar informações à abordagem de risco presente no ISH, baseada na demanda e oferta de água, ao considerar o perigo associado à seca e a exposição que a população está submetida na região. A dimensão em questão considera todas as áreas de uso antrópico, visto que agrega as seis classes resultantes da atuação humana presentes no Mapbiomas (agricultura, aquicultura, mosaico de agricultura e pastagem, mineração, pastagem e infraestrutura urbana), expostas a diferentes graus de seca. O valor da dimensão variou entre 1 e 3 no Alto Paraíba, e identificou um maior risco na porção central da região, nas proximidades da sede municipal do Congo.

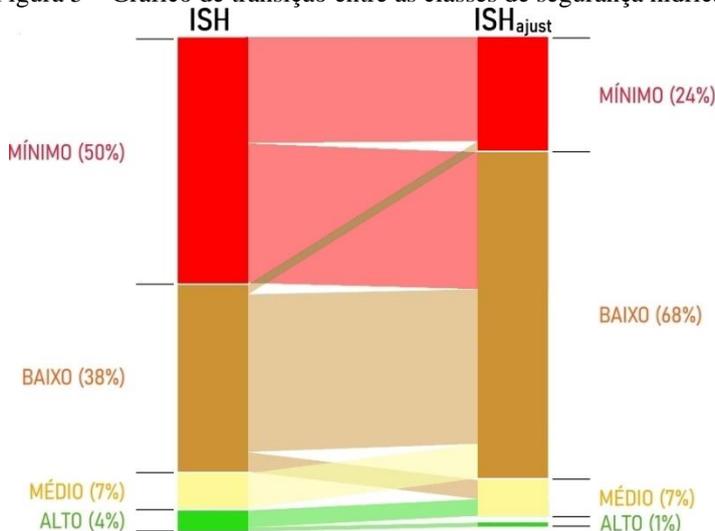
Figura 4 – Dimensões e ISH_{ajust} para a bacia do Alto Curso do Rio Paraíba.



Fonte: Os autores (2022).

A partir do incremento da Dimensão de Risco, diversas ottobacias tiveram seu grau de segurança hídrica alterado. A Figura 5 ilustra a porcentagem de ottobacias, por grau de segurança hídrica, do ISH e ISH_{ajust} na bacia do Alto Curso do Rio Paraíba. O gráfico de transição revela a diminuição do grau mínimo e consequente aumento do grau baixo, além da diminuição da porcentagem de ottobacias classificadas com grau alto. Dessa forma, nota-se a redução dos graus extremos (mínimo e alto) que, na maioria das vezes, era resultante do cálculo do ISH com valores de apenas uma dimensão.

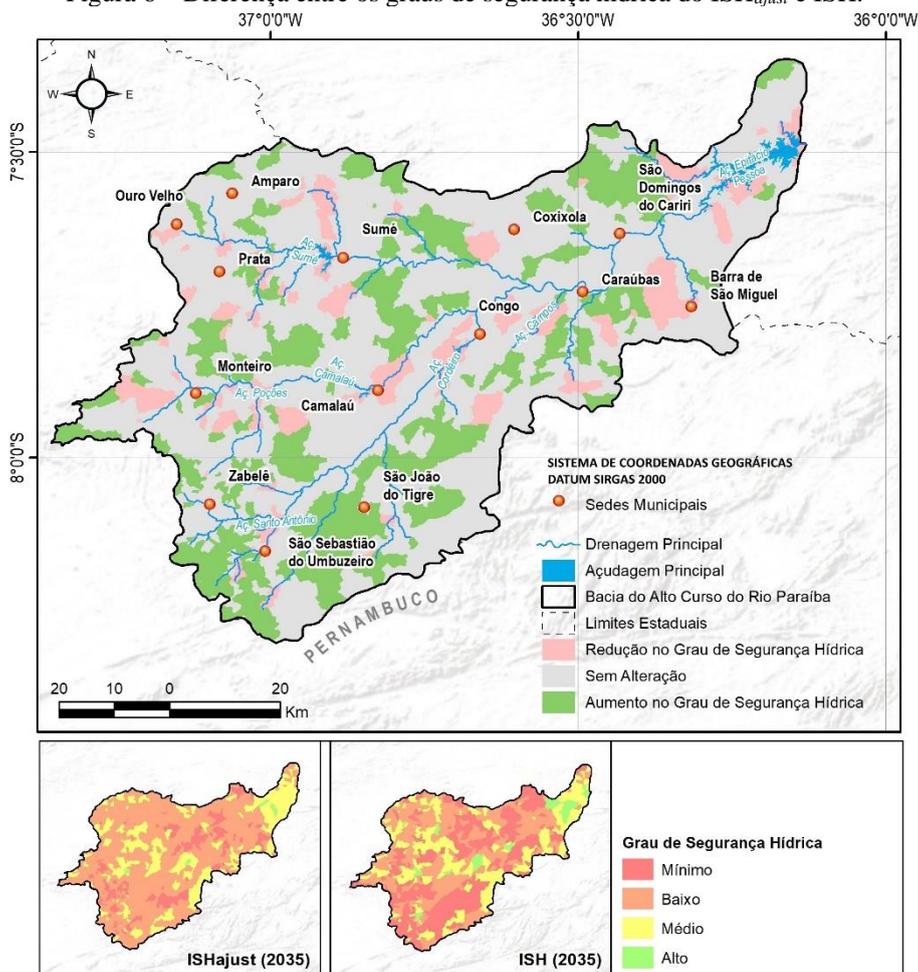
Figura 5 – Gráfico de transição entre as classes de segurança hídrica.



Fonte: Os autores (2022).

Conforme exposto, as ottobacias do ISH sofreram alterações de até um grau de segurança hídrica. A espacialização das mudanças ocorridas na bacia encontra-se na Figura 6. As ottobacias próximas aos quatro maiores reservatórios superficiais da região (Epitácio Pessoa, Cordeiro, Poções e Sumé) apresentaram uma redução no grau de segurança hídrica, o que evidencia a antropização decorrente das atividades agropecuárias nas proximidades dos açudes.

Figura 6 – Diferença entre os graus de segurança hídrica do ISH_{ajust} e ISH.



Fonte: Os autores (2022).

Os açudes situados nessa bacia, responsáveis pelo abastecimento da maior parte da população que habita a região, sofreram com o período de estiagem e gradativamente, apresentaram o problema enfrentado

pela maioria das barragens do Semiárido Brasileiro entre 2012 e 2016: diminuições contínuas dos volumes de água armazenada. O consumo de água na região nesse período permaneceu estável, visto que não houve um aumento significativo na população ou nas atividades industriais e econômicas que pudessem ter contribuído para essas reduções (DANTAS; SILVA; SANTOS, 2020). Consequentemente, as reduções no volume de água armazenada podem ser justificadas pela seca registrada na região, que ocasionou inúmeros prejuízos na agricultura e pecuária.

Nesse contexto, o ISH_{ajust} reforça a discussão de que a presença de reservatórios não garante, necessariamente, a segurança hídrica de uma região (MULLER, 2015; POFF et al., 2016; RÊGO et al., 2017; REUSS, 2005). O planejamento de infraestruturas hídricas resilientes para atingir os objetivos sociais, econômicos e ambientais em um futuro altamente incerto apresenta inúmeros desafios. Fato este que evidencia a necessidade de efetivar uma gestão mais sustentável da água nas cidades (por meio de incentivos ao reúso de águas, por exemplo) e em reservatórios localizados no semiárido, para combinar os princípios de projeto de engenharia com os requisitos do ecossistema, no contexto de eventos não estacionários (mudanças climáticas, uso da água, crescimento populacional e mudança no uso da terra).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos durante essa pesquisa apontam para a possibilidade de um maior refinamento no conceito de risco adotado na elaboração do ISH, principalmente para regiões de maior vulnerabilidade climática e social, como é o caso do Semiárido Brasileiro. Nesses locais, o risco transcende quantificações de oferta e demanda de água e afeta diretamente o desenvolvimento humano, político e econômico da população, impactando todas as ações humanas que ocorrem na região e, consequentemente, sua segurança hídrica.

Além disso, ressalta-se a necessidade de novos levantamentos socioeconômicos no território brasileiro, a fim de se obter dados mais precisos para os indicadores presentes nas dimensões humana, econômica e ecossistêmica. A ausência de dados dificulta a mensuração da segurança hídrica em diversas áreas e, conforme apresentado, resulta em graus de segurança hídrica que não representam a realidade do local. Nesse contexto, a utilização de indicadores elaborados a partir de ferramentas que empregam o sensoriamento remoto facilitam o levantamento de dados, principalmente em áreas de difícil acesso.

Por conseguinte, as discussões e resultados obtidos ao longo do trabalho não descredibilizam o ISH produzido pela ANA. Pelo contrário, a elaboração de um índice dessa categoria exige ferramentas e análises complexas, além de inúmeras limitações computacionais, em virtude da dimensão do território brasileiro, às quais foram extremamente bem executadas pela agência. Dessa forma, o ISH, assim como todo o levantamento presente no PNSH, apresenta contribuições inestimáveis para medidas de planejamento, execução, operação e manutenção voltadas a segurança hídrica brasileira.

Nesse sentido, é imprescindível que a segurança hídrica estimada para 2035 leve em consideração, além das projeções da Dimensão Humana, outros produtos preditivos. A cenarização futura do ISH carece desses produtos e é imprescindível que, em um país em desenvolvimento, marcado por conflitos pelo uso da água e da terra, e por fenômenos climáticos extremos, os impactos ocasionados pela expansão do agronegócio e demais atividades antrópicas a longo prazo não sejam consideradas no cálculo da segurança hídrica.

O ISH_{ajust} adiciona ao ISH indicadores para a localização espacial de mudanças no LULC e perigos associados a seca no Semiárido Brasileiro, o que o torna um índice mais robusto e capaz de representar a segurança hídrica de forma mais coerente em otobacias que carecem de dados. Com base nas discussões levantadas ao longo do texto, novas pesquisas podem se concentrar em inserir novos indicadores às dimensões de segurança hídrica já existentes, com base em dados modelados e observados.

Acredita-se que os resultados gerados neste trabalho possam contribuir para um dos principais desafios para a gestão racional dos recursos hídricos, que é a de fornecer uma abordagem preditiva capaz de auxiliar os planejadores e tomadores de decisão na solução de problemas complexos, capazes de considerar os diversos grupos de interesse que são confrontados por condições incertas em constante mudança. O gerenciamento do futuro ocorrerá necessariamente em um contexto adaptativo; dessa forma, planos de monitoramento e avaliações preditivas dos fenômenos que impactam os recursos hídricos serão necessários para garantir que as decisões se baseiem nas melhores informações disponíveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) que, através dos processos de nº 140038/2022-1 e nº 88882.455626/2019-01, respectivamente, concederam bolsas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande.

Contribuição dos Autores

O autor Higor Costa de Brito contribuiu com as etapas de conceptualização, curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, validação, visualização, redação. Já a autora Yáscara Maia Araújo de Brito contribuiu com as etapas de conceptualização, curadoria dos dados, metodologia, visualização e redação. A autora Iana Alexandra Alves Rufino, por sua vez, contribuiu com as etapas de conceptualização, aquisição de financiamento, administração do projeto, recursos, supervisão, visualização e redação.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

- ABELL, R.; THIEME, M. L.; REVENGA, C.; et al. Freshwater Ecoregions of the World: A New Map of Biogeographic Units for Freshwater Biodiversity Conservation. **BioScience**, v. 58, n. 5, p. 403–414, 2008. DOI. 10.1641/B580507.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. 1º ed. Brasília: ANA, 2019a. Acesso em: 20 fev. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Índice de Segurança Hídrica: Manual Metodológico**. 1º ed. Brasília: ANA, 2019b. Acesso em: 20 fev. 2021.
- BRITO, H. C. DE; RUFINO, I. A. A.; DJORDJEVIĆ, S. Cellular automata predictive model for man-made environment growth in a Brazilian semi-arid watershed. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 6, p. 323, 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s10661-021-09108-9>>. DOI. 10.1007/s10661-021-09108-9.
- BRITO, Y. M. A.; RUFINO, I. A. A.; BRAGA, C. F. C.; MULLIGAN, K. The Brazilian drought monitoring in a multi-annual perspective. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 1, p. 31, 2021. DOI. 10.1007/s10661-020-08839-5.
- BURTON, I. Vulnerability and adaptive response in the context of climate and climate change. **Climatic change**, v. 36, n. 1–2, p. 185–196, 1997. DOI. 10.1023/A:1005334926618.
- CAMPOS, J. N. B. Paradigms and Public Policies on Drought in Northeast Brazil: A Historical Perspective. **Environmental Management**, v. 55, n. 5, p. 1052–1063, 2015. DOI. 10.1007/s00267-015-0444-x.
- DANTAS, J. C.; SILVA, R. M. DA; SANTOS, C. A. G. Drought impacts, social organization, and public policies in northeastern Brazil: a case study of the upper Paraíba River basin. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 5, p. 317, 2020. DOI. 10.1007/s10661-020-8219-0.
- FALKENMARK, M. Adapting to climate change: towards societal water security in dry-climate countries. **International Journal of Water Resources Development**, v. 29, n. 2, p. 123–136, 2013. DOI. 10.1080/07900627.2012.721714.
- FRIGERIO, I.; DE AMICIS, M. Mapping social vulnerability to natural hazards in Italy: A suitable tool for risk mitigation strategies. **Environmental Science & Policy**, v. 63, p. 187–196, 2016. DOI. 10.1016/j.envsci.2016.06.001.

- FURTADO, A. V. B. D.; SOUZA, DE P. O. J. Mapeamento geomorfológico para a bacia do Alto Curso do Rio Paraíba de acordo com as normas do Manual Geomorfológico do IBGE. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 2, p. 83–91, 2016. DOI. 10.21680/2447-3359.2016v2n0ID10427.
- HAGENLOCHER, M.; MEZA, I.; ANDERSON, C. C.; et al. Drought vulnerability and risk assessments: state of the art, persistent gaps, and research agenda. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 8, p. 083002, 2019. DOI. 10.1088/1748-9326/ab225d.
- HALL, J.; BORGOMEIO, E. Risk-based principles for defining and managing water security. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 371, n. 2002, p. 20120407, 2013. DOI. 10.1098/rsta.2012.0407.
- HOPE, R.; ROUSE, M. Risks and responses to universal drinking water security. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 371, n. 2002, p. 20120417, 2013. DOI. 10.1098/rsta.2012.0417.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário, Florestal e Aquícola 2017. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/index.html>. Acesso em: 13 dez. 2020.
- KAŹMIERCZAK, A.; CAVAN, G. Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure. **Landscape and Urban Planning**, v. 103, n. 2, p. 185–197, 2011. DOI. 10.1016/j.landurbplan.2011.07.008.
- KHAN, D. M.; VEERBEEK, W.; CHEN, A. S.; et al. Back to the future: assessing the damage of 2004 Dhaka flood in the 2050 urban environment. **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, p. S43–S54, 2018. DOI. 10.1111/jfr3.12220.
- KRON, W. Keynote lecture: Flood risk= hazard× exposure× vulnerability. **Flood defence**. p.82–97, 2002. New York: Science Press. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.594.999&rep=rep1&type=pdf>.
- LAUTZE, J.; MANTHRITHILAKE, H. Water security: Old concepts, new package, what value? **Natural Resources Forum**, v. 36, n. 2, p. 76–87, 2012. DOI. 10.1111/j.1477-8947.2012.01448.x.
- LONDE, L. DE R.; COUTINHO, M. P.; DI GREGÓRIO, L. T.; SANTOS, L. B. L.; SORIANO, É. Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 4, p. 133–152, 2014. DOI. 10.1590/1809-4422ASOC1082V1742014.
- MAIA JÚNIOR, G. N.; MATA, B. D. DA; FILHO, D. L. DE A.; et al. Margens Nuas: As Nascentes e o Alto Curso do Rio Paraíba , 2011. Acesso em: 13 dez. 2020.
- MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanalise**, v. 3, p. 49–54, 2016. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/marengoetal.pdf>.
- MARTÍNEZ-GRAÑA, A. M.; BOSKI, T.; GOY, J. L.; ZAZO, C.; DABRIO, C. J. Coastal-flood risk management in central Algarve: Vulnerability and flood risk indices (South Portugal). **Ecological Indicators**, v. 71, p. 302–316, 2016. DOI. 10.1016/j.ecolind.2016.07.021.
- MARTINS, E. S. P.; DE NYS, E.; MOLEJÓN, C.; et al. **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. The World Bank, 2015. Acesso em: 13 dez. 2020.
- MULLER, M. The 'Nexus' As a Step Back towards a More Coherent Water Resource Management Paradigm. **Water Alternatives**, v. 8, n. 1, p. 675–694, 2015. Disponível em: <<https://www.water-alternatives.org/index.php/all-abs/271-a8-1-4/file>>.
- OGATA, I. S.; SANTOS, D. DE L.; MENESES, I. DE A.; OLIVEIRA, R. DE; RODRIGUES, A. C. L. Aplicação do índice de pobreza hídrica na região hidrográfica do Alto Curso do Rio Paraíba, Estado da Paraíba, Brasil. Anais do VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. **Anais...** p.1–9, 2016. Campina Grande: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais.
- PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E.

- Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.** Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. Acesso em: 13 dez. 2020.
- POFF, N. L.; BROWN, C. M.; GRANTHAM, T. E.; et al. Sustainable water management under future uncertainty with eco-engineering decision scaling. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 1, p. 25–34, 2016. DOI. 10.1038/nclimate2765.
- PONTES FILHO, J. D.; SOUZA FILHO, F. DE A.; MARTINS, E. S. P. R.; STUDART, T. M. DE C. Copula-Based Multivariate Frequency Analysis of the 2012–2018 Drought in Northeast Brazil. **Water**, v. 12, n. 3, p. 834, 2020. DOI. 10.3390/w12030834.
- RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. DE O.; ALBUQUERQUE, J. DO P. T.; RIBEIRO, M. M. R.; NUNES, T. H. C. A gestão de recursos hídricos e a transposição de águas do Rio São Francisco para o açude Epitácio Pessoa – Boqueirão. Anais do XXII SBRH. **Anais...** . p.1–8, 2017. Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- REUSS, M. Ecology, Planning, and River Management in the United States: Some Historical Reflections. **Ecology and Society**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2005. Disponível em: <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art34/>.
- RUFINO, I.; MULLIGAN, K.; BARBATO, L.; SESHADRI, S. US Drought risk map: a cumulative approach from 2000 to 2012. **ESRI Map Book volume 29**. p.98–99, 2014. California: ESRI.
- SANCHEZ, A.; MEDINA, N.; VOJINOVIC, Z.; PRICE, R. An integrated cellular automata evolutionary-based approach for evaluating future scenarios and the expansion of urban drainage networks. **Journal of Hydroinformatics**, v. 16, n. 2, p. 319–340, 2014. DOI. 10.2166/hydro.2013.302.
- SILVA, V. M. D. A.; PATRÍCIO, M. D. C. M.; RIBEIRO, V. H. D. A.; MEDEIROS, R. M. DE. O desastre seca no nordeste brasileiro. **Polemica**, v. 12, n. 2, p. 284–293, 2013. Rio de Janeiro. DOI. 10.12957/polemica.2013.6431.
- SOUZA, C. M.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M. R.; et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. DOI. 10.3390/rs12172735.
- SWEETAPPLE, C.; FU, G.; FARMANI, R.; BUTLER, D. Exploring wastewater system performance under future threats: Does enhancing resilience increase sustainability? **Water Research**, v. 149, p. 448–459, 2019. DOI. 10.1016/j.watres.2018.11.025.
- VANNIER, C.; BIERRY, A.; LONGARETTI, P.-Y.; et al. Co-constructing future land-use scenarios for the Grenoble region, France. **Landscape and Urban Planning**, v. 190, p. 103614, 2019. DOI. 10.1016/j.landurbplan.2019.103614.
- VERONES, F.; PFISTER, S.; VAN ZELM, R.; HELLWEG, S. Biodiversity impacts from water consumption on a global scale for use in life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 8, p. 1247–1256, 2017. DOI. /10.1007/s11367-016-1236-0.
- VÖRÖSMARTY, C. J.; MCINTYRE, P. B.; GESSNER, M. O.; et al. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, v. 467, n. 7315, p. 555–561, 2010. DOI. 10.1038/nature09440.
- WISNER, B.; BLAIKIE, P. M.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. **At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters**. Londres: Psychology Press, 2004. Acesso em: 13 dez. 2020.

Biografia do autor principal



Higor Costa de Brito é natural de Caicó, Rio Grande do Norte, Brasil. É bacharel em Engenharia Civil (2018) e mestre em Engenharia Civil e Ambiental (2021) pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Atualmente é doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) na mesma instituição, na linha de pesquisa de recursos hídricos. Desenvolve estudos direcionadas às temáticas de segurança hídrica, geoprocessamento e autômatos celulares aplicados as mudanças no uso e ocupação da terra.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.