

Análise Bibliométrica de Índices de Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos diante das Mudanças Climáticas

Antonio Lucas Freitas Rodrigues^{1*}, Carla Beatriz Costa de Araújo²

¹Mestrando em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Brasil. (*Autor correspondente: ant.lucas@alu.ufc.br)

²Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Brasil

Histórico do Artigo: Submetido em: 14/10/2025 – Revisado em: 22/11/2025 – Aceito em: 25/12/2025

RESUMO

As mudanças climáticas intensificam eventos extremos e agravam os desafios relacionados à gestão da água, ampliando riscos de escassez, degradação da qualidade hídrica e vulnerabilidade social. Nesse cenário, índices de vulnerabilidade hídrica se destacam como ferramentas estratégicas para antecipar riscos, planejar medidas adaptativas e apoiar políticas públicas. O presente estudo tem como objetivo analisar metodologias recorrentes na construção desses índices, identificando tendências, autores, países, instituições e indicadores-chave. A pesquisa foi conduzida nas bases Scopus e Web of Science, resultando em 65 artigos publicados entre 1999 e 2025. Os dados foram processados no RStudio e analisados em duas etapas: (i) análise de desempenho (autores, periódicos, países e citações), realizada com o Bibliometrix; e (ii) mapeamento científico (coautoria, cocitação, coocorrência de palavras-chave e acoplamento bibliográfico) conduzido no VOSviewer. Os resultados indicam crescimento contínuo das publicações a partir de 2010, com destaque para os últimos quadriênios. Ecological Indicators e Journal of Hydrology são os periódicos mais produtivos, enquanto autores como Pandey V e Babel M concentram maior impacto. Países como China, EUA e Irã lideram a produção, sendo a China o que apresenta maior colaboração internacional. A análise de conteúdo evidencia diversidade metodológica, incluindo índices baseados em agregação de indicadores normalizados (VI) e frameworks hidrológicos quantitativos (RRV, DFAAI), cada qual com vantagens, limitações e diferentes escalas de aplicação. Conclui-se que não há modelo universal de índice, mas sim abordagens complementares que devem ser adaptadas ao contexto regional e institucional. Tais índices constituem instrumentos estratégicos para fortalecer a resiliência hídrica frente às mudanças climáticas.

Palavras-chaves: Governança Hídrica, Adaptação Climática, Gestão Hídrica, Planejamento Adaptativo.

Water Vulnerability Indices under Climate Change: A Bibliometric Perspective

ABSTRACT

Climate change intensifies extreme events and exacerbates challenges related to water management, increasing risks of scarcity, water quality degradation, and social vulnerability. In this context, water vulnerability indices emerge as strategic tools to anticipate risks, guide adaptive measures, and support public policies. This study aims to analyze recurring methodologies in the construction of such indices, identifying trends, key authors, countries, institutions, and indicators. The research was conducted in the Scopus and Web of Science databases, resulting in 65 articles published between 1999 and 2025. Data were processed in RStudio and analyzed in two stages: (i) performance analysis (authors, journals, countries, and citations) using Bibliometrix; and (ii) scientific mapping (co-authorship, co-citation, keyword co-occurrence, and bibliographic coupling) using VOSviewer. Results indicate a continuous growth of publications since 2010, with a marked increase in recent years. Ecological Indicators and Journal of Hydrology were the most productive journals, while authors such as Pandey V and Babel M showed higher impact. China, the United States, and Iran lead in scientific output, with China standing out for international collaboration. Content analysis highlights methodological diversity, including indicator aggregation models (VI) and quantitative hydrological frameworks (RRV, DFAAI), each with specific advantages, limitations, and scales of application. It is concluded that no universal model exists; instead, complementary approaches must be adapted to regional and institutional contexts. These indices represent strategic instruments to strengthen water resilience in the face of climate change.

Keywords: Water Governance, Climate Adaptation, Water Management, Adaptive Planning.

Análisis Bibliométrico sobre Índices de Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos frente al Cambio Climático

RESUMEN

El cambio climático intensifica eventos extremos y agrava los desafíos en la gestión del agua, aumentando riesgos de escasez, degradación de la calidad hídrica y vulnerabilidad social. En este contexto, los índices de vulnerabilidad hídrica son herramientas clave para anticipar riesgos, planificar medidas adaptativas y apoyar políticas públicas. Este estudio analiza metodologías recurrentes en la construcción de dichos índices, identificando tendencias, autores, países, instituciones e indicadores principales. La investigación se realizó en las bases Scopus y Web of Science, con 65 artículos publicados entre 1999 y 2025. Los datos fueron procesados en RStudio y evaluados en dos etapas: (i) análisis de desempeño (autores, revistas, países y citas) con Bibliometrix; y (ii) mapeo científico (coautoria, cocitación, coocurrencia de palabras clave y acoplamiento bibliográfico) con VOSviewer. Los resultados muestran un

crecimiento continuo de publicaciones desde 2010, con aumento significativo en los últimos años. *Ecological Indicators* y *Journal of Hydrology* destacan como las revistas más productivas, mientras Pandey V y Babel M se consolidan entre los autores más influyentes. China, Estados Unidos e Irán lideran la producción científica, siendo China el país con mayor colaboración internacional. El análisis de contenido revela diversidad metodológica: modelos basados en agregación de indicadores (VI) y marcos hidrológicos cuantitativos (RRV, DFAAI), cada uno con ventajas, limitaciones y escalas de aplicación. Se concluye que no existe un modelo único de índice, sino enfoques complementarios que deben adaptarse a contextos regionales e institucionales. Tales índices representan instrumentos estratégicos para fortalecer la resiliencia hídrica frente al cambio climático.

Palabras clave: Gobernanza Hídrica, Adaptación Climática, Gestión Hídrica, Planificación Adaptativa.

1. Introdução

Alterações futuras no ciclo da água associadas às mudanças climáticas afetarão a disponibilidade e a demanda de água (Haddeland et al., 2014) de maneira que o risco para a segurança hídrica deve aumentar como resultado da mudança na disponibilidade de água interagindo com o aumento da vulnerabilidade (Field & Van Aalst, 2014). Diante desse cenário, as avaliações de vulnerabilidade são atraentes para os tomadores de decisão, pois podem ajudá-los a melhorar significativamente seu processo de tomada de decisão (Thomas et al., 2022).

A vulnerabilidade é um conceito chave no gerenciamento e no processo de tomada de decisão em qualquer setor que envolva a dinâmica entre população e o uso do meio ambiente e seus recursos naturais. O nível de vulnerabilidade pode mudar, com tempo, de acordo com as mudanças climáticas. Adicionalmente, medidas antrópicas podem aumentar ou diminuir a capacidade adaptativa da região, influenciando na sua vulnerabilidade (Souza Filho et al., 2019).

De acordo com IPCC (2023), o aquecimento global causado por atividades humanas já atingiu cerca de 1,1°C acima dos níveis pré-industriais, intensificando eventos extremos como ondas de calor, secas, enchentes e ciclones. Esses fenômenos têm gerado perdas substanciais em ecossistemas, impactos econômicos em setores como agricultura, pesca, energia e turismo, além de afetarem desproporcionalmente grupos vulneráveis, como povos indígenas, comunidades de baixa renda e países em desenvolvimento.

O impacto da variabilidade climática combinado com o rápido aumento da população e da economia, bem como a componente antropogênica, como urbanização e má gestão da água, leva ao declínio dos recursos hídricos e à degradação de sua qualidade (El Garouani et al., 2023; Hssaisoume et al., 2020; Kanga et al., 2019).

Uma abordagem para avaliar a vulnerabilidade é a avaliação baseada em indicadores, que fornece uma estimativa numérica da vulnerabilidade derivada de indicadores indiretos que supõe capturar o “espírito da vulnerabilidade” (Sullivan, 2011). Essa suposição, aliada com o uso a longo prazo de indicadores na política e na tomada de decisões (Pummer et al., 2012; Sullivan & Meigh, 2005), levou ao desenvolvimento de uma miríade de índices para avaliar a vulnerabilidade da água em diversos contextos e escalas (Alessa et al., 2008; Hamouda et al., 2009; Okpara et al., 2017; Sullivan, 2011).

Dessa forma, propõe-se a realização de uma pesquisa na literatura sobre o desenvolvimento de índices de vulnerabilidade voltados para os recursos hídricos. Portanto, foi realizada uma análise bibliométrica para lidar com grandes volumes de dados científicos e produzir alto impacto na pesquisa (N. Donthu et al., 2021), para dessa maneira direcionar o presente estudo para descobrir tendências emergentes no desempenho de artigos e periódicos, padrões de colaboração e constituintes de pesquisa, e para explorar a estrutura intelectual de um domínio específico na literatura existente (Donthu, Kumar, Pandey, & Lim, 2021a; Verma & Gustafsson, 2020; Donthu et al., 2020c).

As revisões de literatura ajudam a identificar lacunas no conhecimento e a propor novas previsões para pesquisas futuras (Lim et al., 2022). Para suprir essas lacunas buscou-se realizar uma análise perante a produção científica sobre os índices de vulnerabilidade relacionados com recursos hídricos considerando as mudanças climáticas. Com o objetivo central de analisar as metodologias mais recorrentes na produção científica, a partir de uma abordagem bibliométrica através de duas subetapas (Suzer et al., 2021): Análise de desempenho e Mapeamento científico.

2. Material e Métodos

2.1. Estratégias de busca

Para conduzir a análise bibliométrica, o estudo foi norteado pela pergunta: como são construídos os índices de vulnerabilidade de recursos hídricos considerando às mudanças climáticas?

Com base nessa questão orientadora, a pesquisa foi realizada nos bancos de dados *Scopus* e *Web Of Science* no dia 09/04/2025, visando especificamente os artigos mais relevantes. Na busca foi utilizado o termo “Index AND Indicator AND “water resources” AND vulnerability “climate change”. A procura na *Scopus* foi

através *TITLE-ABSTRACT-KEY-WORDS*, já no *Web Of Science* a busca foi por meio do *TOPIC* que é o equivalente ao *TITLE-ABSTRACT-KEY-WORDS* na *Scopus*. O termo de pesquisa foi o mesmo em ambos os bancos de dados, porém para uma pesquisa mais assertiva nos bancos de dados utilizados, optou-se por aplicar filtros diferentes. Na *Scopus* limitou-se os artigos relacionados à área da Ciências Ambientais e resultou em 46 artigos, entretanto no *Web Of Science* não houve essa limitação e o resultado foi de 96 artigos. Essa estratégia de filtração na pesquisa foi feita devido ao algoritmo de pesquisa serem diferentes nos dois bancos de dados.

Posteriormente, houve a junção dos dados obtidos dos dois bancos dados, esta etapa foi realizada utilizando o *software R Studio*, através da aplicação do *software* foi possível identificar e eliminar os artigos duplicados, resultando em um banco de dados com 117 artigos.

2.2. Processo de revisão e extração dos dados

De acordo com as orientações de Prisma (Page et al., 2021), o processo de revisão ocorreu em um primeiro momento na seleção dos artigos a partir da leitura dos títulos e resumos, a partir disso os artigos que apresentasse algum índice de vulnerabilidade aplicado a recursos hídricos considerando as mudanças climáticas foram selecionados.

Logo em seguida, os artigos selecionados foram lidos na íntegra para verificar se atendiam aos critérios de inclusão, ou seja, apresentava uma metodologia de desenvolvimento de índices de vulnerabilidade no setor de recursos hídricos levando em conta a variabilidade climática.

As informações obtidas foram extraídas e organizadas em uma tabela de *Excel*, com informações sobre ano de publicação, autores, tipo de estudo, país onde se procedeu e o contexto do estudo. Para a realização da análise bibliométrica, o estudo foi dividido em duas subetapas (Suzer et al., 2021): a Análise de desempenho; e o Mapeamento científico.

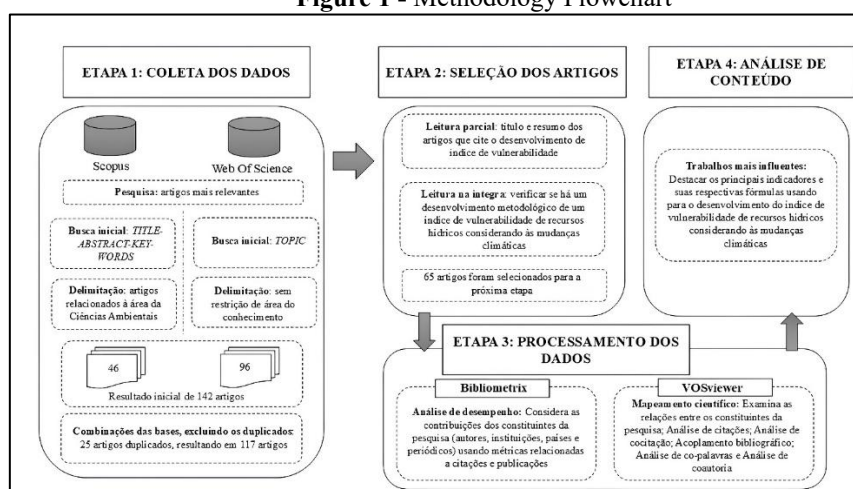
A análise de desempenho considera as contribuições dos constituintes da pesquisa (N. Donthu et al., 2021) como: tendências de publicação anual, periódicos mais produtivos, autores mais prolíficos e países e instituições líderes. Com a exceção da análise de tendência de publicação anual que foi feita no *Excel*, todas as outras etapas da análise bibliométrica foi realizada no *Bibliometrix* (Aria & Cuccurullo, 2017).

Na segunda subetapa o mapeamento científico é feito analisando as redes de conexões de coautoria, coocorrências de palavras-chaves do autor e acoplamento bibliográfico entre países (N. Donthu et al., 2021). Para a realização da análise bibliométrica foi utilizado o *software* de código aberto *VOSviewer*, trata-se de um *software* que oferece recursos suficientes para visualizar redes bibliográficas e para mapear cientificamente a literatura, sendo amplamente usado para mapear conhecimento (Wuni et al., 2019). Por fim, foram destacados os principais indicadores e suas respectivas fórmulas, utilizadas no desenvolvimento do índice de vulnerabilidade, com base em uma análise de conteúdo fundamentada nos resultados das duas subetapas anteriores.

A Figura 1 ilustra em detalhe todo o fluxograma adotado na análise bibliométrica desde da coleta dos dados até análise de conteúdo.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia

Figure 1 - Methodology Flowchart



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

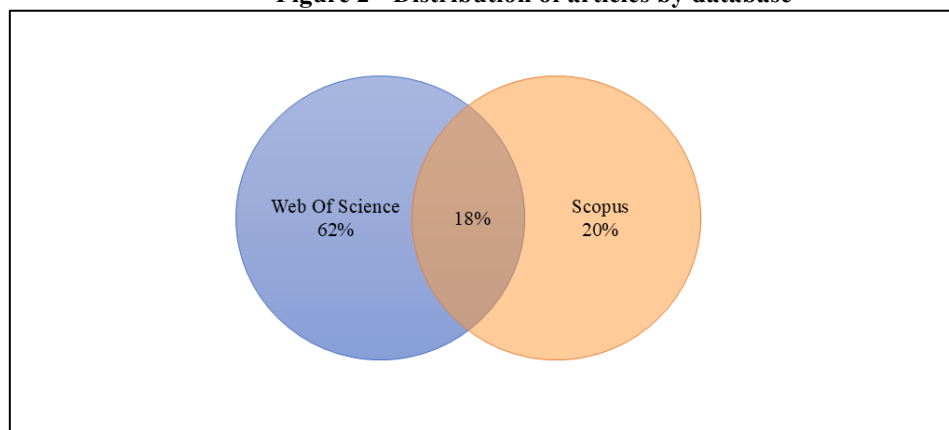
Esse fluxograma metodológico compreende quatro etapas: coleta e seleção dos artigos, processamento dos dados com *Bibliometrix* e *VOSviewer*, e análise de conteúdo voltada à identificação dos principais indicadores e fórmulas utilizadas nos índices de vulnerabilidade hídrica.

3. Resultados e Discussões

3.1. Composição e Tendências de Publicação Anual

A Figura 2 ilustra a composição dos artigos por banco de dados por meio de um diagrama de Venn, destacando visualmente o predomínio de artigos exclusivos da *Web Of Science* e a menor, porém expressiva, contribuição da *Scopus*.

Figura 2 – Composição dos artigos por banco de dados
Figure 2 - Distribution of articles by database



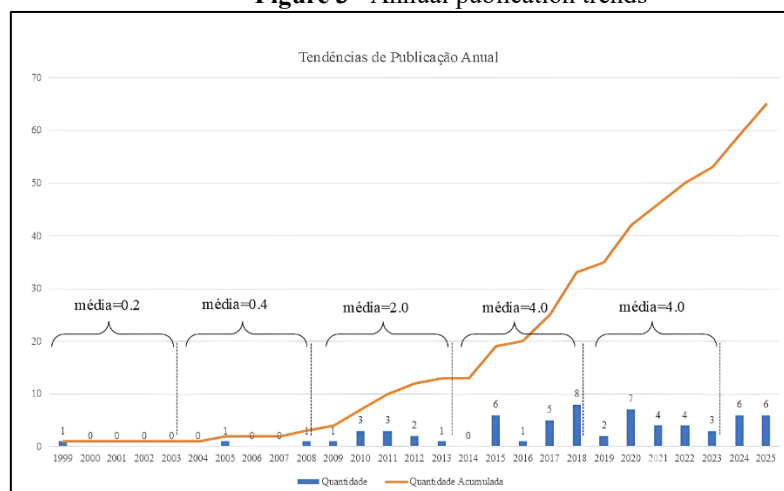
A amostra final foi composta por 65 artigos entre de 1999 a 2025, dos quais 40 artigos pertencem ao banco de dados *Web Of Science*, representando dessa maneira 62% dos artigos. A interseção entre os dois bancos de dados representa apenas 18%, enquanto a *Scopus* configura 20% com 13 artigos.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

A Figura 3 apresenta as tendências anuais de publicação. A linha representa a soma cumulativa de publicações ao longo dos anos e as barras indicam a quantidade de publicações por ano. Observa-se também uma média por quadriênio para retratar a taxa de crescimento ao longo dos anos.

Figura 3 - Tendências anuais de publicação
Figure 3 - Annual publication trends



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

Verifique-se que as tendências de publicação apresentam uma inconsistência no número de publicação entre 1999 e 2008. Entretanto, a partir do ano de 2010, há frequência e volume nas publicações, exceto no ano de 2014, que não houve nenhuma publicação referente ao assunto. Houve um aumento de duas vezes no número de publicações, saindo de uma média de 2.0 no período de quatro anos de 2009 a 2013 para uma média de 4.0 para o período de 2019 a 2023.

O primeiro artigo registrado da amostragem é de autoria de Lane M et al. (1999) publicado na revista *Asce-Amer Soc Civil Engineers* em que o artigo tem como título *Indicators Of Impacts Of Global Climate Change On Us Water Resources* (em português Indicadores de Impactos das Mudanças Climáticas Globais nos Recursos Hídricos dos EUA). Os artigos publicados no último quadriênio destacam as consequências prolongadas das mudanças climáticas como o principal fator de preocupações políticas e científicas, presente no artigo *Evaluating dual exposure by using climate-conflict vulnerability index on the coastal districts of Sindh, Pakistan* (em português Avaliar a Dupla Exposição utilizando Conflitos Climáticos Índice de Vulnerabilidade nos Distritos Costeiros de Sindh, Paquistão), assim como também seu impacto aos meios de subsistência presente em *Climate Change and Livelihood Vulnerability of the Local Population on Sagar Island, India* (Mudanças climáticas e vulnerabilidade aos meios de subsistência da população local na ilha de Sagar, Índia) utilizando o radar do IPCC para direcionar os seus estudos.

Com base na nuvem de palavras (Figura 4), é possível visualizar quais são as principais palavras e termos presentes na amostragem dos 65 artigos selecionados. As principais palavras em destaque, como: *vulnerability* (vulnerabilidade), *climate-change* (mudança climática), *water management* (gestão da água) e *adaptation* (adaptação) refletem os conceitos centrais discutidos dentro da amostragem dos artigos, que indica uma forte relação em avaliar a vulnerabilidade dos recursos hídricos frente às mudanças climáticas ou até mesmo enfatizar a importância da gestão da água como uma resposta a esse contexto de vulnerabilidade.

Figura 4 – Nuvem de palavras

Figure 4 - Word cloud



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

Palavras como *index* (índice), *adaptive capacity* (capacidade adaptativa), *risk assement* (avaliação de risco), *variability* (variabilidade), *precipitation* (precipitação), *drought* (seca) e *streamflow* (escoamento) apontam para aspectos técnicos e climáticos envolvidos na formulação dos índices de vulnerabilidade.

3.2. Periódicos e Autores mais produtivos

Na Tabela 1 está presente os periódicos mais produtivos segundo a Lei *Bradford* (Goffman, W et al., 1969), que relaciona à dispersão da literatura periódica científica, que quando ordenados em ordem decrescente de produtividade de artigos, poderão ser divididos em um núcleo de periódicos mais particularmente dedicados ao assunto e em vários grupos ou zonas, onde cada zona contém aproximadamente o mesmo número de artigos, mas o número de periódicos em cada zona aumente geometricamente.

Tabela 1 – Periódicos mais produtivos
Table 1 - Top productive journals

Rank	Periódico	Frequência	Frequência Acumulada	Zona
1	<i>Ecological Indicators</i>	6	6	Zona 1
2	<i>Journal Of Hydrology</i>	3	9	Zona 1
3	<i>Natural Hazards</i>	3	12	Zona 1
4	<i>Science Of The Total Environment</i>	3	15	Zona 1
5	<i>Climate</i>	2	17	Zona 1
6	<i>Environmental Management</i>	2	19	Zona 1
7	<i>Environmental Monitoring And Assessment</i>	2	21	Zona 1
8	<i>International Journal Of Disaster Risk Reduction</i>	2	23	Zona 1
9	<i>Journal Of Environmental Management</i>	2	25	Zona 2
10	<i>Mitigation And Adaptation Strategies For Global Change</i>	2	27	Zona 2

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

A Zona 1 (núcleo de periódicos essenciais) é composto por 8 periódicos e juntos somam 23 artigos, o que representa uma alta concentração de publicações. O periódico *Ecological Indicators* se destaca como o mais produtivo, com 6 artigos, indicando ser a principal fonte científica sobre o tema. Outros periódicos importantes da Zona 1, como *Journal Of Hydrology*, *Natural Hazards* e *Science Of The Total Environment*, também são periódicos de alto impacto nas áreas de recursos hídricos, riscos climáticos e meio ambiente.

A Zona 2, representa os periódicos complementares, mostrando periódicos ainda relevantes, como como o *Journal of Environmental Management* e *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, que são mais voltados à gestão e políticas de adaptação climática. Portanto, a partir dessa divisão de zonas define-se que quais periódicos podem ser considerados prioritários e concentrar esforços de leitura e revisão bibliográfica.

A Tabela 2 está organizada em autores mais relevantes de acordo com a medida de impacto e produtividade do autor na amostra (Índice H local), baseado em pesos dos artigos mais citados (Variante do Índice H).

Tabela 2 – Autores mais relevantes
Table 2 - Most relevant authors

Rank	Autores	Índice H local	Variante do Índice H	Média anual do índice H	Total de Citações	Número de publicações	Ano de início da publicação
1	Pandey V	4	4	0.235	126	4	2009
2	Babel M	3	3	0.176	118	3	2009
3	Chung E	2	2	0.133	141	2	2011
4	Giupponi C	2	2	0.154	105	2	2013
5	Kazama F	2	2	0.118	79	2	2009
6	Liu Y	2	2	0.333	81	2	2020
7	Sadeghi S	2	2	0.25	56	2	2018
8	Yang X	2	2	0.2	61	2	2016
9	Zhang J	2	2	0.2	15	2	2016
10	Abdulai P	1	1	0.111	46	1	2017

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

Os autores mais relevantes, ou seja, de maior impacto acumulam 385 citações. Pandey V ativo desde 2009 com o artigo *Analysis Of A Nepalese Water Resources System: Stress, Adaptive Capacity And*

Vulnerability (Análise de um Sistema de Recursos Hídricos Nepalês: Estresse, Capacidade Adaptativa e Vulnerabilidade), com produtividade consistente e alta anual (0.235), entretanto Chung E apesar de possui 2 artigos apresenta alta influência, ainda que o Índice H local seja 2.

Pandey V e Babel M são os principais autores centrais na produção da amostra e devem ser considerados referências-chave no tema. Chung E e Liu Y destacam-se pelo número de citações em poucos artigos, sinalizando alta qualidade ou relevância dos trabalhos publicados.

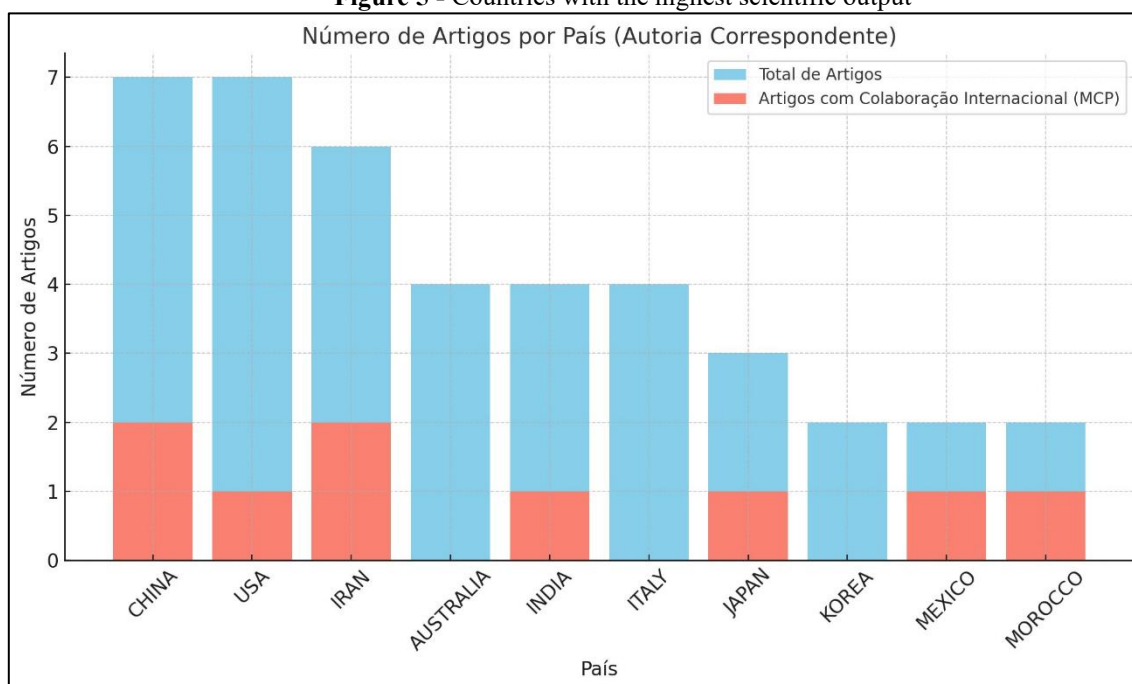
Giupponi C e Kazama F têm bom impacto relativo ($h = 2$), mas com menor número de citações, o que pode indicar participação em trabalhos menos citados ou de menor visibilidade. É importante destacar que Abdulai P, com apenas 1 artigo, *Multi-Criteria Assessment Of Spatial Robust Water Resource Vulnerability Using The TOPSIS Method Coupled With Objective And Subjective Weights In The Han River Basin* (Avaliação Multicritério da Vulnerabilidade Espacial Robusta dos Recursos Hídricos Usando o Método TOPSIS juntamente com pesos objetivos e subjetivos na Bacia do Rio Han), desde 2017, tem impacto ainda inicial.

3.3. Países e Instituições líderes

A Figura 5 trata-se de uma análise dos países com maior produção científica, como autores correspondentes, e o grau de internacionalização dessa produção, por meio da proporção de publicações feitas com coautoria de outros países (*Multiple Country Publications – MCP*).

A China com 2 artigos são MCP, o que representa uma taxa de 28,6% de colaboração internacional, enquanto os EUA possuem 1 MCP, com 14,3% de colaboração internacional. Ambos os países lideram em número de publicações, com 7 artigos cada, porém a China tem um pouco mais de articulação internacional proporcionalmente do que os EUA.

Figura 5 – Países com maior produção científica
Figure 5 - Countries with the highest scientific output



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)
Source: Prepared by the authors (2025)

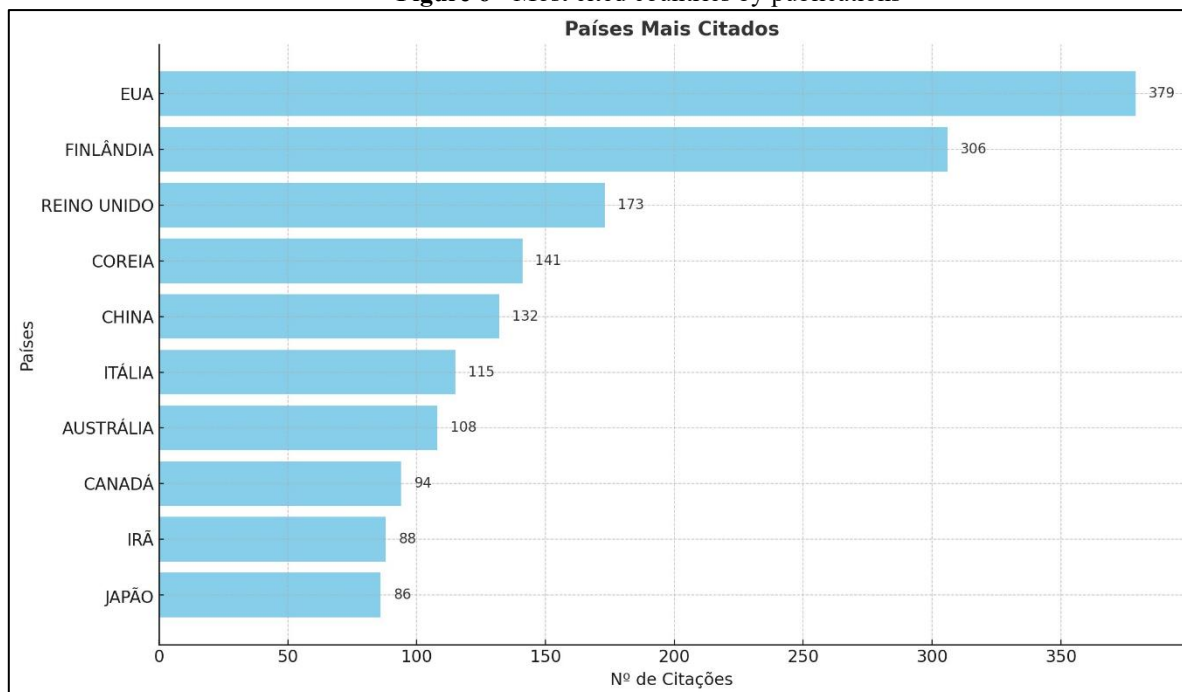
O Irã tem 6 artigos, dos quais 2 são MCP, o que dá 33,3% de colaboração internacional – uma taxa significativa. Demonstrando que é um país ativo e com articulação científica relevante em redes internacionais. Por outro lado, Austrália, Itália e Coreia do Sul não apresentam MCPs, o que indica que todas suas produções são nacionais (*Single Country Publications – SCP*), simbolizando produções mais fechadas ou focadas em agendas locais.

O México e Marrocos apresenta uma pouca produção e alta colaboração, ambos têm apenas 2 artigos, mas com 50% MCP, significando dizer que há uma forte dependência ou preferência por colaborações internacionais, que por muitas vezes por escassez de infraestrutura científica procura-se uma inserção global através de redes colaborativas.

Por fim, Japão e Índia apresenta uma produção modesta (3 e 4, respectivamente), com participação internacional razoável, Japão com 33,3% e Índia com 25% de MCP, juntos possuem uma atuação híbrida, equilibrando produção local e colaborações internacionais.

A Figura 6 exibe o número de citações recebidas por publicações científicas agrupadas por país. Esse gráfico revela a influência e impacto científico internacional dos autores afiliados a instituições desses países.

Figura 6 – Países mais citados por publicações
Figure 6 - Most cited countries by publications



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

Os EUA lideram o *ranking*, com 379 citações, refletindo seu papel de destaque e liderança global na produção científica. Isso pode estar associado à forte infraestrutura de pesquisa, financiamento robusto, e redes de colaboração internacionais consolidadas. Logo em seguida, aparece a Finlândia com altos números de citações indicativo da presença de pesquisadores de grande influência, grupos de pesquisa especializados ou até mesmo uma área temática muito citada no contexto analisado.

Reino Unido, Coreia e China com valores expressivos, entre 132 e 173 citações, reafirmam sua posição de centrais ativas na pesquisa científica de qualidade. Para fechar o *top 10*, com citações entre 86 e 115. Itália, Austrália, Canadá, Irã e Japão demonstram um papel relevante no cenário científico internacional.

A Tabela 3 trata-se das instituições mais relevantes no conjunto de dados analisado, de acordo com o número de artigos publicados associados a cada afiliação. Dentre as 10 instituições mais produtivas, destaca-se a Tohoku University (Japão) com 6 artigos, indicando uma presença significativa nas publicações da área estudada.

Tabela 3 – Instituições mais relevantes
Table 3 - Most relevant institutions

Instituição	Nº de artigos
Tohoku Univ	6
Changan Univ	5
Tarbiat Modares Univ	5
Univ Notre Dame	5
Canakkale Onsekiz Mart Univ	4
Natl Inst Hydrol	4
Univ Tehran	4
Univ Yamanashi	4

Beijing Normal Univ	3
Birzeit Univ	3

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

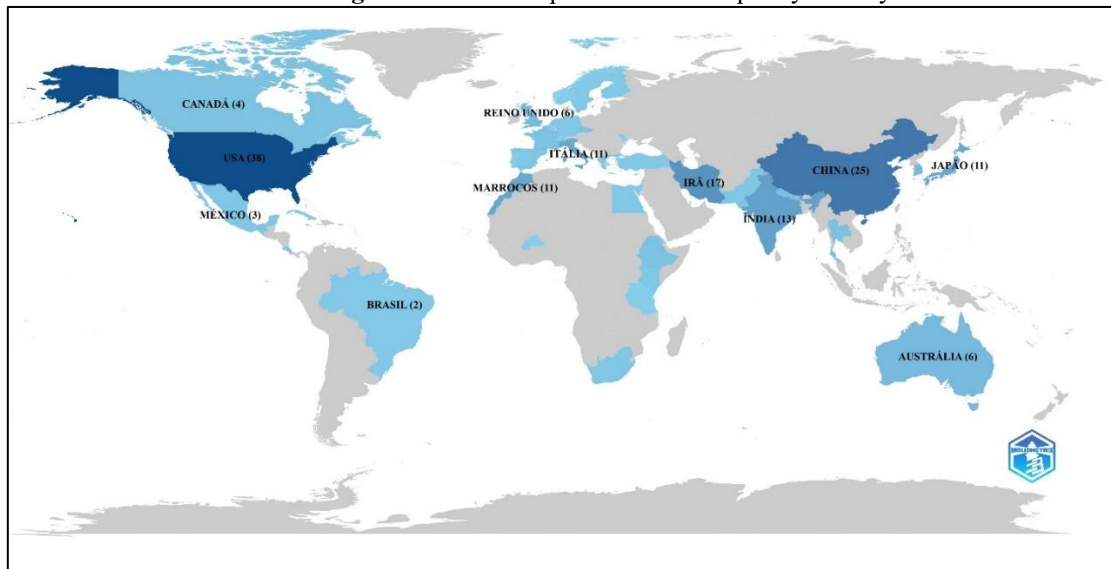
Source: Prepared by the authors (2025)

Outras instituições com alto desempenho foram: Chang'an University (China), Tarbiat Modares University (Irã) e University Of Notre Dame (EUA). As três estão empatadas com 5 artigos cada, evidenciando uma distribuição geográfica diversificada e uma participação ativa em redes internacionais de pesquisa.

A Figura 7 representa um mapa mundi temático da produção científica por país, no qual países estão coloridos em tons de azul, indicando níveis distintos de produção científico. Os Estados Unidos (USA) lidera com 38 artigos, em segundo lugar com alta produtividade científica a China (25) e com 11 artigos produzidos cada: Irã, Índia, Itália e Japão.

Figura 7 – Mapa mundi da produção científica por país

Figure 7 - World map of scientific output by country



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

Canadá (4) e México (3) possuem produções moderadas, entretanto apesar de uma produção tímida o Brasil (2) – um destes artigo tem como título *Development Of A Drought Vulnerability Index Using Mcdm And Gis: Study Case In Sao Paulo And Ceara, Brazil* (Desenvolvimento de um Índice de Vulnerabilidade à Seca usando MCDM e SIG: Estudo de Caso em São Paulo e Ceará, Brasil) - representa um polo relevante na América do Sul. Na Europa e Oriente Médio países como Reino Unido (6), Itália (11) e Marrocos (11) destaca-se na produção de artigos, principalmente o Irã (17) entre os países do Oriente Médio.

Na Ásia e Oceania: Japão (11) e Índia (13) refletem a força da ciência no continente asiático. Além disso, a Austrália aparece com relevância no cenário científico global.

Tabela 4 mostra os artigos com maior impacto global medido por número de citações, bem como desempenho anual e comparações com outras publicações do mesmo ano e área (citações normalizadas).

Tabela 4 – Artigos com maior impacto global por citação

Table 4 - Articles with the highest global citation impact

Autor, ano e periódico	DOI	Total de Citações	Citações média/ano	Citações normalizadas
Kummu M, 2010, Environ Res Lett	10.1088/1748-9326/5/3/034006	306	19.13	2.40
Sullivan C, 2005, Water Sci Technol	10.2166/wst.2005.0111	152	7.24	1.00
Alessa L, 2008, Environ Manage	10.1007/s00267-008-9152-0	123	6.83	1.00

Mehran A, 2015, J Geophys Res-Atmos	10.1002/2015JD023147	119	10.82	2.62
Jun K, 2011, Sci Total Environ	10.1016/j.scitotenv.2011.08.027	95	6.33	1.46
Malik S, 2012, Global Health	10.1186/1744-8603-8-31	94	6.71	1.65
Gain A, 2015, Ecol Indic	10.1016/j.ecolind.2014.07.034	77	7.00	1.69
Pandey V, 2011, Ecol Indic	10.1016/j.ecolind.2010.07.003	61	4.07	0.94
Xia J, 2017, Clim Change	10.1007/s10584-016-1709-y	60	6.67	2.21
Lane M, 1999, J Water Resour Plan Manage-Asce	10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(194)	59	2.19	1.00

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

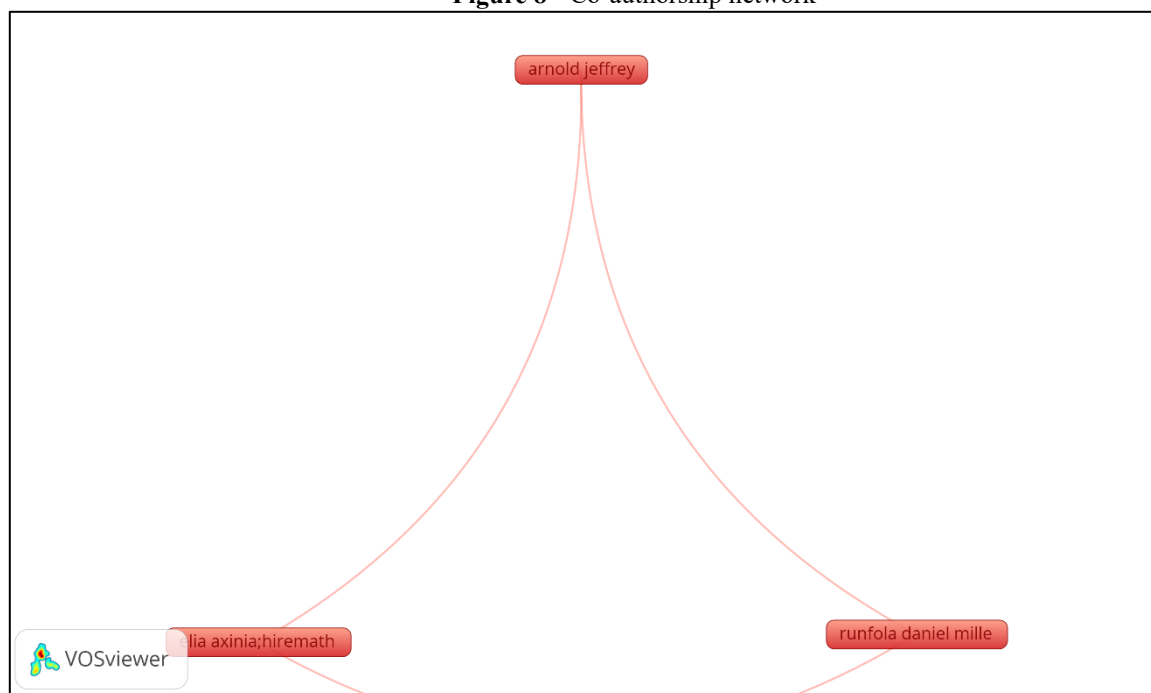
Kummu M (2010, Environ Res Lett) possui o artigo com maior número de citações totais (306) e um dos mais altos impactos normalizados (2.40). Entretanto, Mehran A (2015, J Geophys Res-Atmos) apresenta o maior impacto relativo (normalizado), apesar de ter menos citações totais. Entre as publicações da amostragem, Xia J (2017, Clim Change) contém a publicação mais recente da lista com alto impacto relativo em curto tempo.

Em relação ao impacto *versus* tempo, o documento de Lane M (1999) tem menos citações anuais (2.19) devido à idade da publicação, mesmo com total razoável (59), este documento trata-se do primeiro artigo da amostragem. As citações médias por ano, por exemplo, do artigo de Xia J, 2017 são promissores e indicam tendências emergentes.

3.4. Rede de Coautoria e Coocorrência de palavras-chaves do autor

A análise de coautoria examina as interações entre acadêmicos em um campo de pesquisa. Uma vez que a coautoria é uma forma formal de colaboração intelectual entre estudiosos (Acedo, Barroso, Casanueva, & Galan, 2006; Cisneros, Ibanescu, Keen, Lobato-Calleros & Niebla-Zatarain, 2018). A Figura 8 representa autores com base em publicações científicas em comum.

Figura 8 – Rede de coautoria
Figure 8 - Co-authorship network



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

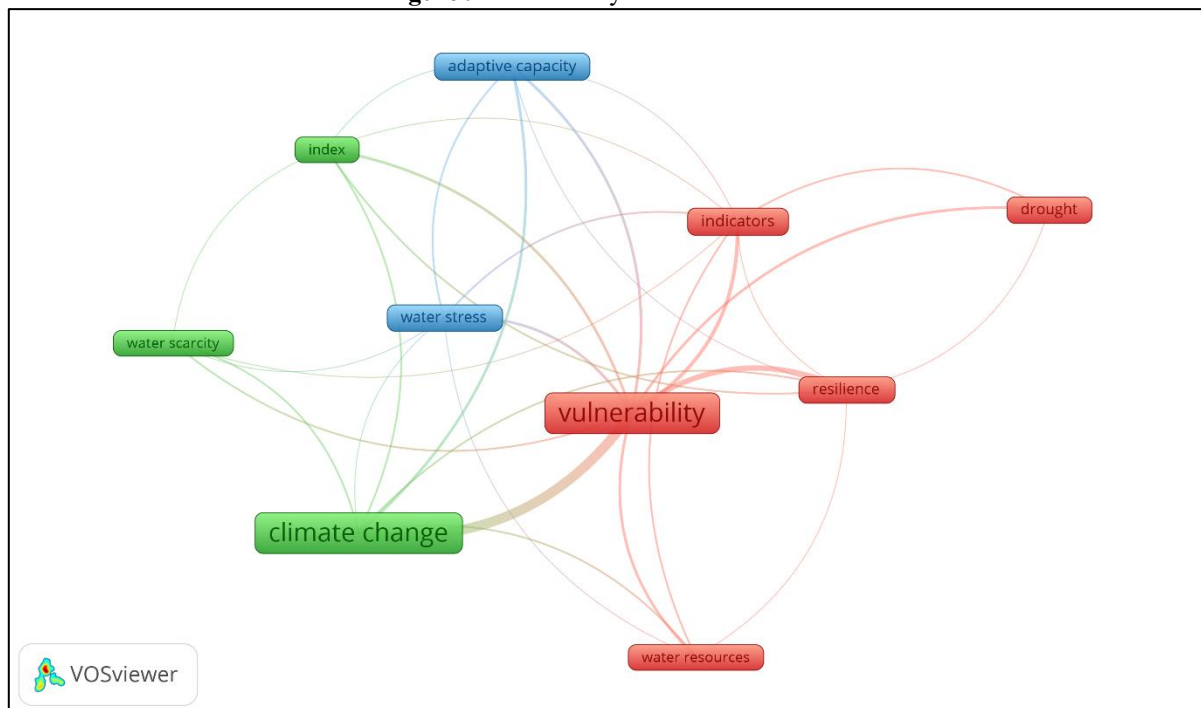
As conexões entre os nós estão representadas por linhas finas e suaves (vermelho claro), indicando força de coautoria baixa, ou seja, com poucas publicações conjuntas entre os autores. A rede de coautoria é bastante

simples e esparsa, composta por três nós principais (autores e/ou grupos de autores) conectados por arestas (linhas) que indicam coautoria. O autor “Arnold Jefferey” está no centro da rede, atuando como um elo de ligação entre dois grupos distintos de coautores, este elo é visto pela forma de “V” que atua como ponte entre os dois grupos colaborativos distintos.

Sintetizando o *cluster* vermelho gerado o grupo de coautoria produziram o artigo com título *A Multi-Criteria Geographic Information Systems Approach For The Measurement Of Vulnerability To Climate Change* (Uma abordagem de Sistemas de Informação Geográfica Multicritério para a medição da vulnerabilidade às mudanças climáticas) publicado no ano de 2017.

A análise de co-palavras (Figura 9) pressupõe que as palavras frequentemente aparecem juntas têm uma relação temática entre si (Donthu et al., 2021). Esse tipo de análise permite identificar os principais temas abordados pelos autores e como eles se relacionam entre si dentro da amostragem dos artigos.

Figura 9 – Rede de coocorrência de palavras-chaves do autor
Figure 9 - Author keyword co-occurrence network



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)
Source: Prepared by the authors (2025)

Cada nó (caixa colorida) representa uma palavra-chave atribuída por autores em suas publicações. As linhas (arestas) entre os nós são indicativas que as palavras aparecem conjuntamente em um mesmo artigo, destacando uma conexão temática. Em relação, as cores dos *clusters* (vermelho, verde, azul) representam agrupamento temáticos identificados pelo algoritmo do software com base na força de coocorrência.

A palavra *vulnerability* aparece como nó central da rede, conectando todos os grupos, isso evidencia que a vulnerabilidade é um conceito-chave que conecta todos os tópicos discutidos, por exemplo, clima, água e resiliência. As uniões entre as palavras: *climate change*, *adaptive capacity* e *index* demonstram abordagens integradas entre mudanças climáticas, indicadores e capacidade de resposta.

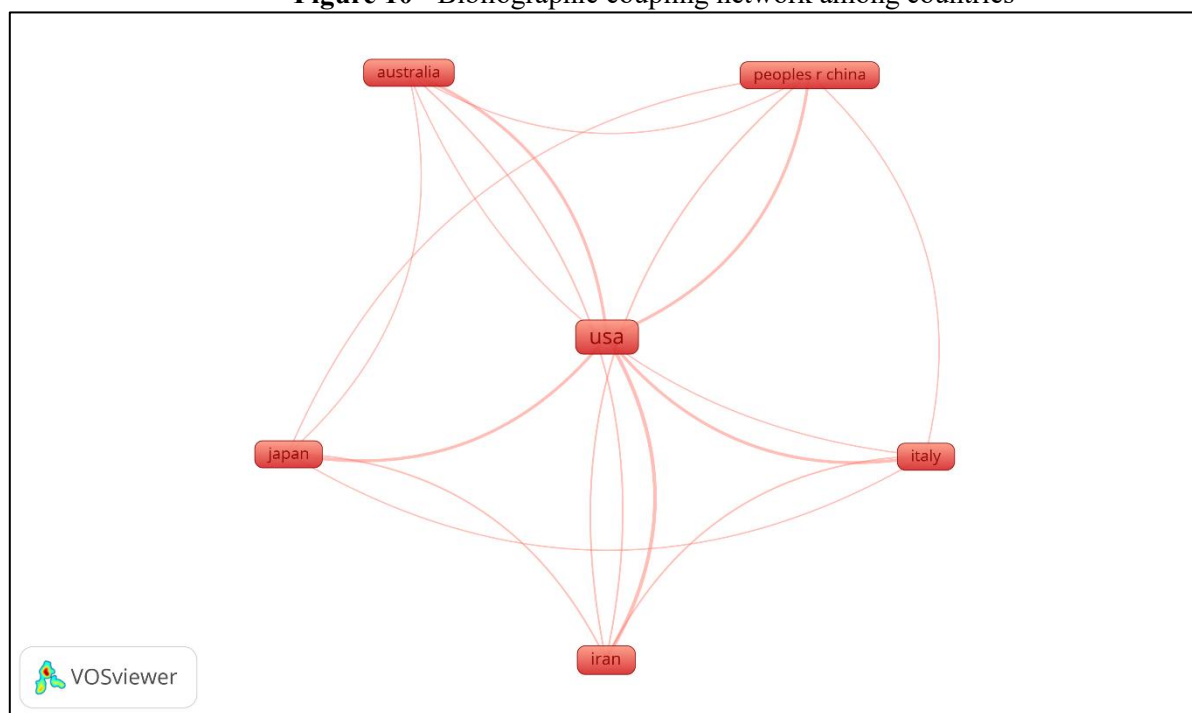
O *cluster* vermelho tem como tema central vulnerabilidade e recursos hídricos e está focado em análises de vulnerabilidade frente a eventos climáticos extremos, especialmente secas e questões ligadas à resiliência hídrica, que mostram preocupação com métricas e indicadores, sugerindo abordagens quantitativas ou modelos de avaliação de vulnerabilidade. Em relação ao *cluster* verde, com tema centralizado em mudanças climáticas e escassez hídrica, expressando o papel dos índices para mensurar os impactos da escassez hídrica ocasionada relacionadas com as mudanças climáticas.

Por fim, o *cluster* azul de temática central, a capacidade adaptativa e estresse hídrico. Concentrado na reposta adaptativa aos impactos climáticos e de escassez de água. Entretanto, as palavras deste grupo possuem uma forte ligação com os outros dois grupos anteriores, indicando um papel transversal da capacidade da adaptação como componente de resiliência e gestão da vulnerabilidade.

3.5. *Acoplamento bibliográfico entre países*

O acoplamento bibliográfico é uma técnica de mapeamento científico que opera com base no pressuposto de que duas publicações que compartilham referências comuns também são semelhantes em seu conteúdo representado pela Figura 10 (Kessler, 1963; Weinberg, 1974). Tal análise realizada trata-se da ocorrência de dois países citam as mesmas publicações em seus artigos. Quanto mais referências em comum, maior é a força de acoplamento, o que indica afinidade temática e metodológica entre as pesquisas produzidas nesses locais.

Figura 10 – Rede de acoplamento bibliográfico entre países
Figure 10 - Bibliographic coupling network among countries



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)
Source: Prepared by the authors (2025)

A rede mostra um núcleo coeso de países com produção científica interligada por meio de bases bibliográficas comuns. Os EUA se destacam como principal polo, aparece como o nó mais central e conectado da rede, logo demonstra alta similaridades nas bases bibliográficas com os outros países do grupo. Significando concluir que é um *hub* importante de produção científica, com relevância global no tema e que atua em colaborações internacionais ou é amplamente referenciado.

Os demais países compartilham conjuntos de literatura similares, que consequentemente é uma colaboração indireta, possuem uso de fontes e autores-chave semelhantes e por fim, envolvimento em pesquisas transnacionais, voltadas para áreas com temáticas climáticas, recursos hídricos, sustentabilidade e adaptação climática.

3.6. *Análise de conteúdo*

A partir da análise de desempenho e o mapeamento científico foi possível direcionar a análise de conteúdo, para dessa forma examinar os principais indicadores e suas receptivas fórmulas utilizadas para o desenvolvimento do índice de vulnerabilidade considerando às mudanças climática no setor de recursos hídricos.

3.6.1. *Análise Regional e Comparativa dos Índices de Vulnerabilidade*

Como resultado da análise de conteúdo evidencia que a escolha dos indicadores de vulnerabilidade hídrica varia de acordo com o contexto regional, revelando especificidades ambientais, socioeconômicas e

institucionais. Essa diversidade metodológica reforça que a vulnerabilidade hídrica não ser compreendida de forma homogênea, mas como um fenômeno dinâmico e altamente dependente do território avaliado.

Na Ásia Meridional, particularmente, nas regiões do Himalaia, Índia e Nepal, os estudos de Giupponi et al. (2013) e Babel et al. (2011) mostram uma ênfase nos impactos de eventos extremos como inundações sazonais, derretimento de geleiras e riscos associados a lagos glaciares (GLOFs). Nesses contextos, os indicadores físicos, como precipitação e vazão dos rios, são integrados a dimensões sociais como infraestrutura hídrica precária e baixa capacidade institucional. A aplicação de metodologias participativas, com envolvimento de atores locais e especialistas, demonstra a tentativa de contextualizar os índices a partir do reflexo de realidades sociopolíticas descentralizadas, promovendo maior legitimidade na análise de vulnerabilidade.

Nas regiões áridas do Irã e da China Ocidental, os trabalhos de Moghadam et al. (2025) e Xia et al. (2016) incorporam indicadores como o SPI (*Standardized Precipitation Index*), índice de umidade superficial e medidas de evapotranspiração para avaliar a vulnerabilidade frente à seca. Nessas áreas, os fatores climáticos e ecológicos são preponderantes, sendo que as análises demonstram maior sensibilidade à variação de precipitação e temperatura. Além disso, os modelos utilizados incorporam cenários futuros de mudança climática (RCPs), ampliando a abordagem para uma perspectiva prospectiva da vulnerabilidade.

No Brasil, a utilização do índice desenvolvidos por Reis et al. (2020) nas regiões de São Paulo e Ceará revela contrastes importantes entre duas áreas com perfis climáticos e socioeconômicos distintos. No estado do Ceará, os fatores climáticos, como: baixa precipitação e elevada variabilidade interanual, são os principais condicionantes da vulnerabilidade. Entretanto, em São Paulo, a elevada demanda hídrica por parte dos grandes centros urbanos e setores industriais, combinadas aos desafios na gestão e uso de água, constitui o fator determinantes. Essa diferença mostra que a vulnerabilidade não é apenas uma função da escassez hídrica natural, mas também da capacidade institucional e técnica de gestão dos recursos disponíveis.

Nos Estados Unidos, a abordagem de Veetil et al. (2018) destaca a importância dos indicadores hidrológicos derivados de modelagens com algoritmos de aprendizado de máquina. Índices como o coeficiente de escoamento, o índice de aridez e a razão de evapotranspiração são usados para explicar a distribuição espacial da vulnerabilidade à seca. Os resultados mostram que áreas com baixa capacidade de retenção de umidade do solo ou elevada evapotranspiração tendem a apresentar maior exposição e menor resiliência, reforçando o papel dos fatores físico-climáticos na definição da vulnerabilidade.

Portanto, constata-se que a construção de índices de vulnerabilidade hídrica deve necessariamente considerar as especificidades de cada região, incluindo variáveis físicas, climáticas, sociais e institucionais. A padronização excessiva pode comprometer a qualidade e representatividade local, razão pela qual abordagens flexíveis, adaptativas e territorialmente contextualizadas tendem a oferecer diagnósticos mais robustos e aplicáveis à gestão dos recursos hídricos em cenários de mudança climática.

Foram observados diferentes índices de vulnerabilidade aplicados a contextos hídricos que evidencia importantes distinções metodológicas, conceituais e operacionais. Portanto, é significativo expor e discutir os principais aspectos relacionados às vantagens e limitações, capacidade de replicação, sensibilidade a distintos tipos de risco e à escala de aplicação dos principais modelos identificados na análise de conteúdo, como: *Drought-Flood Abrupt Alternation Index* (DFAAI), o *Vulnerability Index* (VI) e o *Reliability-Resilience-Vulnerability* (RRV) *framework*. A Tabela 5 compara todos esses aspectos visto na análise nos principais modelos identificados.

3.6.1.1. Avaliação crítica dos índices: limitações, replicabilidade e escalabilidade

O DFAAI, aplicado no trabalho de Liu et al. (2023), evidencia a sua capacidade de quantificar eventos extremos compostos, como alternâncias abruptas entre seca e enchente. Sua principal vantagem é viabilizar uma identificação direta e quantitativa desses eventos através de séries temporais de precipitação e vazão. No entanto, sua limitação reside na dependência de dados hidrológicos de alta resolução, o que restringe sua aplicabilidade em regiões com baixa densidade de monitoramento ou regiões que possui poucos dados.

O *Vulnerability Index* (VI) de Babel et al. (2011) e Reis et al. (2020), contém a vantagem de ser flexível na escolha de indicadores, permitindo incorporar dimensões sociais, econômicas, ambientais e institucionais. Porém, sua limitação está relacionada a subjetividade dos pesos atribuídos aos indicadores, o que pode introduzir viés analítico caso não haja validação participativa ou técnica do modelo.

Por fim, RRV *framework*, conforme adotado por Moghadam et al. (2025), é vantajoso por fornecer uma abordagem integrada e quantitativa, que mensura de forma objetiva a performance de sistemas hídricos frente a eventos disruptivos. No entanto, apresenta limitações na incorporação de aspectos sociais e institucionais da vulnerabilidade, sendo mais adequado para sistemas físicos-hidrológicos do que para sistemas socioecológicos complexos.

O DFAAI possui boa capacidade de replicação em bacias monitoradas, visto que utiliza métricas padronizadas de precipitação e vazão, como SPI e dados de fluxo. Contudo, sua replicação em regiões semiáridas ou remotas vai depender da existência de longas séries históricas confiáveis, o que pode ser um entrave. O VI, especificamente da maneira que foi aplicado por Reis et al. (2020), mostra elevada replicabilidade devido ao uso de dados secundários amplamente disponíveis, como: censos, dados pluviométricos e indicadores socioeconômicos. Essa característica o torna ideal para ser implementado em regiões com restrições orçamentárias ou institucionais, inclusive por gestores locais.

O RRV é mais aplicado para eventos de escassez hídrica e análise de resiliência estrutural e operacional de sistemas de abastecimento. Ele é menos sensível a questões como qualidade da água ou aspectos sociais, sendo mais restrito à avaliação do desempenho físico-hidrológico do sistema. O DFAAI é geralmente aplicado em escala de bacia hidrográfica ou regional, onde há disponibilidade de estações de monitoramento e dados hidrológicos consistentes. Sua aplicação nacional é limitada devido à heterogeneidade de dados entre regiões.

O VI, por conta da sua versatilidade, pode ser aplicado em múltiplas escalas: local, municipal, estadual ou nacional. Seu potencial para mapeamento de vulnerabilidade o torna um instrumento útil para políticas públicas e alocação de recursos. O RRV, embora robusto, é preferencialmente aplicado em escala local ou de sub-bacia, pois requer parametrização detalhada de sistemas específicos. Sua expansão para escalas maiores pode perder precisão e exigir simplificações significativa (Tabela 5).

Tabela 5 - Comparação dos Índices de Vulnerabilidade Hídrica
Table 5 - Comparison of Water Vulnerability Indices

Critério	DFAAI	VI (Vulnerability Index)	RRV (Reliability-Resilience-Vulnerability) Framework
Vantagens	Identificação quantitativa de eventos compostos (seca → enchente)	Alta flexibilidade e adaptação local; uso de dados secundários	Abordagem integrada e quantitativa da performance hidrológica
Limitações	Requer longas séries de dados hidrológicos confiáveis	Pode conter subjetividade na ponderação de indicadores	Pouca incorporação de aspectos sociais e institucionais
Capacidade de replicação	Moderada (restrita a bacias com boa rede de monitoramento)	Alta (usa dados amplamente disponíveis e acessíveis)	Moderada a baixa (requer modelagem e conhecimento técnico)
Sensibilidade ao tipo de risco	Alta para eventos compostos (seca/inundação alternadas)	Alta para múltiplos riscos (seca, poluição, escassez social)	Alta para escassez hídrica e resiliência física de sistemas
Escala de aplicação	Regional (bacias monitoradas)	Multiescalar (local a nacional)	Local/sub-bacia; exige detalhamento para ampliação de escala

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

Finalmente, estas comparações entre os índices analisados demonstram que não há um modelo universalmente superior, mas sim abordagens complementares que devem ser escolhidas conforme o objetivo da análise, tipo de risco predominante e a escala de interesse. Enquanto o DFAAI oferece precisão na avaliação de eventos extremos compostos, o VI destaca-se pela flexibilidade e facilidade de replicação, e o RRV fornece uma visão integrada da performance hidrológica frente a eventos de escassez. A seleção adequada do índice, portanto, deve considerar não apenas os critérios técnicos, mas também a capacidade institucional de aplicação, disponibilidade de dados e o foco estratégico da política de gestão hídrica em cada região.

3.6.1.2. Abordagens de Cálculo dos Índices

Por meio da Tabela 6, é evidenciado as abordagens dos principais índices de vulnerabilidade hídrica, que varia significativamente de acordo com os objetivos da análise, o tipo de risco atrelado (seca, enchente ou escassez crônica) e a escala de aplicação. Entretanto, é possível concentrar os métodos em dois grandes grupos: modelos baseados em agregação de indicadores normalizados e modelos hidrológicos quantitativos.

Tabela 6 - Principais indicadores com suas respectivas fórmulas dos artigos analisados
Table 6 - Key indicators and respective formulas from analyzed articles

Nome do indicador	Principais fórmulas utilizadas	Unidade	Autores	País (ano)
Índice de Vulnerabilidade à Seca	$\text{Índice } (S, E \text{ ou } CA) = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$	Varia de 0 a 1	Reis; Souza Filho; Nelson; Rocha; Silva.	Brasil (2020)
Índice de Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos	$V(t) = \frac{S(t)}{C(t)}$ $S = \begin{cases} 1 - \exp(-\beta), & \text{se } \beta \geq 0 \\ 1 - \exp(\beta), & \text{se } \beta < 0 \end{cases}$ $C = ER \times \left(\frac{WP}{1000}\right) \times \frac{1}{r}$	Varia de 0 a 1	Xia, Jun; Ning, Like; Wang, Quan; Chen, Junxu; Wan, Long; Hong, Si.	China (2017)
Índice de Alternância de Seca-Enchente (DFAAI)	$DFAAI = (R_i - R_j) \times (R_i + R_j) \times \alpha - R_i + R_j $	Varia de -1 a 1	W. Liu; F. Dong; Bill X. Hu; R. You; J. Li; G. Shao.	China (2023)
Vulnerabilidade à Seca (Vu)	$Vu = \frac{\sum SPEI_i (< -1)}{M}$	Varia de -2 a 0	A.V. Veetil; G. Konapala; A.K. Mishra; Hong-Yi Li.	Estados Unidos (2018)
Índice de Vulnerabilidade	$V = \frac{\sum_i^n w_i G_i}{\sum_i^n w_i}$	Varia de 0 a 1	Gordon, Beatrice L.; Koebele, Elizabeth A.; Rego, Jesse J.; Harpold, Adrian A.; Ajami, Newsha K.	Estados Unidos (2024)
Índice de Vulnerabilidade (RRV Framework)	$V = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^T \left(\frac{L_{obs}(i) - L_{std}(i)}{L_{std}(i)} \times H[L_{obs}(i) - L_{std}(i)] \right)$ $Confiabilidade = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T}$ $Resiliência = \left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right)^{-1}$	Varia de 0 a 1	Moghadam, Negar Tayebzadeh; Malekmohammadi, Bahram.	Irã (2025)
Índice de Vulnerabilidade	$V = f(\text{Impactos potenciais}, \text{Capacidade adaptativa})$	Varia de 0 a 1	Giupponi, Carlo; Giove, Silvio; Giannini, Valentina.	Itália (2013)
Índice de Vulnerabilidade (VI)	$VI = \frac{WSI}{ACI}$	Varia de menor que 1 a maior que 3	Babel, M. S.; Pandey, V. P.; Rivas, A. A.; Wahid, S. M.	Nepal (2011)

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Source: Prepared by the authors (2025)

Nos trabalhos de Reis et al. (2020) e Babel et al. (2011) são baseados em agregação de indicadores, os índices são calculados por meio de equações do tipo aditivo ou ponderado, conforme a Equação 1.

$$\text{Índice Final} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \quad (1)$$

Onde x_i representa o valor normalizado do indicador i e w_i seu peso relativo. Essa abordagem permite combinar variáveis heterogêneas, desde dados socioeconômicos até métricas ambientais. Por exemplo, Reis et al. (2020) aplica esse modelo para combinar indicadores divididos nas dimensões de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, com objetivo de compor um índice de vulnerabilidade à seca espacializado por municípios.

Por outro lado, os modelos hidrológicos quantitativos, como o RRV *framework* (Moghadam et al., 2025), retrata um comportamento métrico do desempenho do sistema hídrico, calculada em três componentes fundamentais: Confiabilidade (Equação 2), Resiliência (Equação 3) e Vulnerabilidade (Equação 4).

$$\text{Conf} = \frac{N_s}{N_t} \quad (2)$$

Em que N_s é o número de períodos em que o sistema operou sem falhas, e N_t é o total de períodos analisados.

$$\text{Res} = \frac{N_r}{N_f} \quad (3)$$

Onde N_r é o número de recuperação e N_f o número de falhas registradas.

$$\text{Vuln} = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} D_i \quad (4)$$

Sendo o D_i o déficit hídrico associado à falha i .

Essas métricas são posteriormente combinadas para formar um índice integrado (como o SPI-RRV), permitindo avaliar a saúde da bacia frente a eventos extremos e mudanças climáticas.

Por fim, o índice DFAAI (Liu et al., 2023), o cálculo é baseado na frequência de eventos de alternância abrupta entre seca e enchente. Este índice é determinado pela contagem dos eventos em que ocorrem transições bruscas, entre seca e cheia, dentro de janelas mensais, utilizando séries temporais de precipitação e vazão (Equação 5).

$$\text{DFAAI} = \frac{n\text{DFAA}}{n\text{total}} \quad (5)$$

Onde $n\text{DFAA}$ é o número de eventos abruptos e $n\text{total}$ o número total de registros mensais considerados.

3.6.1.3. Técnicas de Normalização e Ponderação

A heterogeneidade dos indicadores analisados torna a normalização uma etapa essencial para possibilitar sua agregação métrica. A técnica mais recorrente é a normalização min-max, que transforma os dados originais em uma escala padronizada (geralmente de 0 a 1), conforme a Equação 6:

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

Essa abordagem foi amplamente utilizada nos estudos de Reis et al. (2020) e Babel et al. (2011), permitindo que indicadores com unidades distintas (como mm, habitantes/km², % de cobertura vegetal) sejam comparáveis dentro de um índice composto.

Além da normalização, a definição dos pesos atribuídos aos indicadores é outro fator determinante na composição dos índices. Três abordagens principais são observadas nos estudos analisados. A primeira é a ponderação por AHP (*Analytic Hierarchy Process*) de Reis et al. (2020) e Liu et al. (2023), esse método envolve a construção de uma matriz de comparação entre indicadores, baseada em julgamentos de especialistas. Os pesos são derivados de forma a refletir a importância relativa de cada variável na determinação da vulnerabilidade ou risco total.

A segunda abordagem é a ponderação igualitária adotada por Babel et al. (2011) e parcialmente no modelo iSECA (Reis et al., 2020), essa abordagem assume que todos os indicadores têm a mesma importância

relativa, salvo ajustes contextuais pontuais. É especialmente útil quando não há consenso técnico ou quando se deseja manter a simplicidade metodológica.

Por fim, destaca-se a aplicação de *Machine Learning* no estudo de Veetil et al. (2018) não realiza ponderação explícita, mas utiliza modelos de aprendizado de máquina (Random Forest), nos quais a importância relativa de cada variável, por exemplo, índice de aridez e evapotranspiração) é determinada com base em sua contribuição para a predição da variável-alvo (vulnerabilidade, exposição, resiliência). Essa abordagem automatizada é considerada objetiva e robusta em contextos com grandes volumes de dados.

4. Conclusões

A análise bibliométrica feita através de uma análise de desempenho destacou a importância dos índices de vulnerabilidade como uma das ferramentas críticas para enfrentar os desafios das mudanças climáticas na gestão dos recursos hídricos. Além disso, foi possível perceber como cada país se dedica ao desenvolvimento dos índices diante, por meio das publicações, e como cada país adapta o desenvolvimento dos índices de acordo com sua localização geográfica, contexto socioeconômico e investimento nesta área de pesquisa.

A análise revelou um campo de pesquisa em crescimento, com colaborações internacionais e contribuições significativas de autores e instituições líderes. Portanto, houve um aumento no número de publicações significativamente a partir de 2010, com destaque para o período de 2019 a 2023, porém é importante enfatizar que o número de publicações de 2025 até o presente trabalho está empatado com o ano anterior, 2024, ou seja, há tendência é que o próximo quadriênio (2024-2028) seja de um número maior de publicações e uma elevação da média por quadriênio.

Os periódicos como *Ecological Indicators* e *Journal of Hydrology* são os mais produtivos, concentrando grande parte das publicações relevantes. Os artigos de maior impacto é o artigo de Kummu M (2010), de título *Is Physical Water Scarcity A New Phenomenon? Global Assessment Of Water Shortage Over The Last Two Millennia* (A Escassez Física de Água é um Fenômeno novo? Avaliação Global da Escassez de Água nos últimos dois milênios) é o mais citado, abordando a vulnerabilidade dos recursos hídricos às mudanças climáticas.

Ademais, publicações recentes, como a de Xia J (2017), mostram um impacto crescente, refletindo tendências emergentes no campo. Países como China, EUA e Irã são os mais produtivos, com a China destacando-se pela alta colaboração internacional. Por outro lado, países com menor infraestrutura científica, como México e Marrocos, buscam colaborações internacionais para fortalecer sua pesquisa.

Em relação ao mapeamento científico realizado no *software VOSviewer*, conclui-se que análise da estrutura de coautoria é limitada, pois a análise revelou uma rede de coautoria esparsa, ou seja, com poucos vínculos fortes os autores. Porém, a rede de coautoria apresenta figuras-chave como intermediadores.

Os *clusters* temáticos distintos, mas ligados, evidenciando uma abordagem multidimensional e integrada aos temas de alterações climáticas, recursos hídricos e adaptação. Em suma, a análise exibe um cenário científico liderado pelos EUA como principal centro de produção e referência do assunto, embora outros países apareçam no acoplamento bibliométrico, seus interesses e bases teóricas são comuns e acabam conectado com os EUA.

Do ponto de vista metodológico, a análise identificou duas abordagens principais: os modelos baseados em agregação de indicadores normalizados (como o VI) e os modelos hidrológicos quantitativos (como o RRV e o DFAAI). A diversidade dessas abordagens revela que não há um modelo universalmente superior, mas sim metodologias que devem ser escolhidas conforme a realidade local, a disponibilidade de dados e os objetivos específicos da análise. Essa constatação é reforçada pela análise de conteúdo, que evidenciou forte variação regional na escolha dos indicadores, refletindo especificidades ambientais, climáticas, sociais e institucionais.

Em suma, os índices de vulnerabilidade hídrica representam instrumentos estratégicos para antecipar riscos, orientar políticas públicas e fortalecer a resiliência dos sistemas hídricos frente aos impactos climáticos. A construção e aplicação desses índices devem considerar, de forma integrada, variáveis ambientais, sociais e institucionais, respeitando as especificidades territoriais e promovendo o uso de ciência colaborativa e tecnicamente embasada na gestão dos recursos hídricos.

5. Agradecimentos

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro que viabilizou a realização deste estudo e ao Laboratório de Gerenciamento do Risco Climático para a Sustentabilidade Hídrica (GRC/UFC) pelo acompanhamento, suporte técnico e contribuições essenciais durante o desenvolvimento do artigo.

6. Referências

- Abbasov, R. K., & Smakhtin, V. (2012). Indexing the environmental vulnerability of mountain streams in Azerbaijan. **Mountain Research and Development**.
- Adraoui, I., & Jaafar, B. (2024). Sustainable management of water resources and assessment of the vulnerability of Moroccan oases to climate change. **Environmental Science and Pollution Research**.
- Afkhami, M., Ghorbani, M., Zahraie, B., & Azadi, H. (2021). Role of social network measurements in improving adaptive capacity: The case of agricultural water users in rural areas of western Iran. **Society & Natural Resources**.
- Ahmadi Lavin, J., Sadeghfam, S., Sharafati, A., & Neshat, A. (2025). A formulation for assessing the risk of anthropogenic drought based on drought characteristics and socioeconomic and physical factors. **Vadose Zone Journal**.
- Al Masud, M. M., Moni, N. N., Azadi, H., & Van Passel, S. (2018). Sustainability impacts of tidal river management: Towards a conceptual framework. **Ecological Indicators**.
- Alawna, S., & Garcia, X. (2025). Spatial and temporal climate change vulnerability assessment in the West Bank, **Palestine. Environments**.
- Al-Faraj, F. A. M., & Al-Dabbagh, B. N. S. (2015). Assessment of collective impact of upstream watershed development and basin-wide successive droughts on downstream flow regime: The Lesser Zab transboundary basin. **Journal of Hydrology**.
- Algarra, J. A., Cariñanos, P., Herrero, J., Delgado-Capel, M., Ramos-Lorente, M. M., & Díaz de la Guardia, C. (2019). Tracking Montane Mediterranean grasslands: Analysis of the effects of snow with other related hydro-meteorological variables and land-use change on pollen emissions. **Science of the Total Environment**.
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**.
- Ashofteh, P. S., Bozorg Haddad, O., Akbari-Alashti, H., & Mariño, M. A. (2015). Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**.
- Babel, M. S., Pandey, V. P., Rivas, A. A., & Wahid, S. M. (2011). Indicator-based approach for assessing the vulnerability of freshwater resources in the Bagmati River Basin, Nepal. **Environmental Management**.
- Benini, L., Antonellini, M., Laghi, M., & Mollema, P. N. (2016). Assessment of water resources availability and groundwater salinization in future climate and land use change scenarios: A case study from a coastal drainage basin in Italy. **Water Resources Management**.
- Cândido, L. F., Lazaro, J. C., Freitas e Silva, A. O., & Barros Neto, J. P. (2023). Sustainability transitions in the construction sector: A bibliometric review. **Sustainability**.
- Chávez-Jiménez, A., de-Lama, B., Garrote, L., Martín-Carrasco, F., & Sordo-Ward, A. (2013). Characterisation of the sensitivity of water resources systems to climate change. **Water Resources Management**.
- Chen, C., Hellmann, J., Berrang-Ford, L., Noble, I., & Regan, P. (2018). A global assessment of adaptation investment from the perspectives of equity and efficiency. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**.
- Chen, H., Wang, Q., Bento, V. A., Meng, X., & Li, X. (2023). Vegetation drought risk assessment based on the multi-weight methods in Northwest China. **Environmental Monitoring and Assessment**.
- Chen, Y., Feng, Y., Zhang, F., Yang, F., & Wang, L. (2020). Assessing and predicting the water resources vulnerability under various climate-change scenarios: A case study of Huang-Huai-Hai River Basin, China. **Entropy**.

- Chhetri, R., Kumar, P., Pandey, V. P., Singh, R., & Pandey, S. (2020). Vulnerability assessment of water resources in Hilly Region of Nepal. **Sustainable Water Resources Management**.
- Chung, E.-S., Abdulai, P. J., Park, H., Kim, Y., Ahn, S. R., & Kim, S. J. (2017). Multi-criteria assessment of spatial robust water resource vulnerability using the TOPSIS method coupled with objective and subjective weights in the Han River Basin. **Sustainability**.
- Collet, L., Ruelland, D., Estupina, V. B., Dezetter, A., & Servat, E. (2015). Water supply sustainability and adaptation strategies under anthropogenic and climatic changes of a meso-scale Mediterranean catchment. **Science of the Total Environment**.
- Dabanli, I. (2018). Drought hazard, vulnerability, and risk assessment in Turkey. **Arabian Journal of Geosciences**.
- Dayal, K. S., Deo, R. C., & Apan, A. A. (2018). Spatio-temporal drought risk mapping approach and its application in the drought-prone region of south-east Queensland, Australia. **Natural Hazards**.
- Döll, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: A global-scale assessment. **Environmental Research Letters**.
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**.
- Dorafshan, M. M., Golmohammadi, M. H., De Michele, C., & Eslamian, S. (2025). Risk analysis of inflow to the Zayandehrud Dam under historical and future scenarios using reliability, resiliency, and vulnerability indicators. **Water Reuse**.
- Dost, R., & Kasiviswanathan, K. S. (2023). Quantification of water resource sustainability in response to drought risk assessment for Afghanistan River Basins. **Natural Resources Research**.
- Eddoughri, F., Lkammarte, F. Z., El Jarroudi, M., Lahlali, R., Karmaoui, A., Yacoubi Khebiza, M., & Messouli, M. (2022). Analysis of the vulnerability of agriculture to climate and anthropogenic impacts in the Beni Mellal-Khénifra Region, Morocco. **Sustainability**.
- El Garouani, M., Radoine, H., Lahrach, A., Oulidi, H. J., & Chaabane, M. S. (2024). An integrated and multidimensional approach for analyzing vulnerability of water resources under territorial climate conditions. **Environmental and Sustainability Indicators**.
- El-Mahdy, M. E.-S. (2022). A unified index of water resources systems vulnerability assessment: Translating the theoretical approach into a simple tool to assess climate change impact. Case study in Limpopo River Basin, Africa. **Ain Shams Engineering Journal**.
- Engle, N. L., & Lemos, M. C. (2010). Unpacking governance: Building adaptive capacity to climate change of river basins in Brazil. **Global Environmental Change**.
- Fatima, N., Alamgir, A., Khan, M. A., & Owais, M. (2022). Evaluating dual exposure by using climate-conflict vulnerability index on the coastal districts of Sindh, Pakistan. **Environmental Monitoring and Assessment**.
- Fernández-Duque, B., Kumar, R., El Kenawy, A., & Vicente-Serrano, S. M. (2025). Changes in daily precipitation extremes over the Fiji Islands (1905–2021). **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**.
- Gain, A. K., & Giupponi, C. (2015). A dynamic assessment of water scarcity risk in the Lower Brahmaputra River Basin: An integrated approach. **Ecological Indicators**.
- García-Hidalgo, Y. (2017). Índice de vulnerabilidad del recurso hídrico con fines de riego en la cuenca hidrográfica del río Naranjo, Cuba. **Revista Geográfica de América Central**.
- Giupponi, C., & Gain, A. K. (2017). Using a new approach to design innovative tools for sustainable water resources management: The Watervulnerability Index. **Sustainability**.
- Giupponi, C., Giove, S., & Giannini, V. (2013). A dynamic assessment tool for exploring and communicating vulnerability to floods and climate change. **Environmental Modelling & Software**.

- Goffman, W., & Warren, K. (1969). Dispersion of Papers among Journals based on a Mathematical Analysis of Two Diverse Medical Literatures. **Nature**.
- Gordon, B. L., Koebele, E. A., Rego, J. J., Harpold, A. A., & Ajami, N. K. (2024). Adaptable and comprehensive vulnerability assessments for water resources systems in a rapidly changing world. **Journal of Environmental Management**.
- Hasan, E., Tarhule, A., Hong, Y., & Moore, B. III. (2019). Assessment of physical water scarcity in Africa using GRACE and TRMM satellite data. **Remote Sensing**.
- Henchiri, M., Zhang, J., Li, S., Essifi, B., & Wilson, K. (2024). Comprehensive assessment of drought vulnerability and resilience over North and West Africa during 1980–2100. **Agricultural Water Management**.
- Herrera-Pantoja, M., & Hiscock, K. M. (2015). Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. **Environmental Science & Policy**.
- Heydari Alamdarloo, E., Khosravi, H., Nasabpour, S., & Gholami, A. (2020). Assessment of drought hazard, vulnerability and risk in Iran using GIS techniques. **Journal of Arid Land**.
- Hori, Y., Iizumi, T., & Yokozawa, M. (2009). The Arctic Water Resource Vulnerability Index: An integrated assessment tool for water resources management under climate change. **Environmental Research Letters**.
- Hunter, C., Gironás, J., Bolster, D., & Karavitis, C. A. (2015). A dynamic, multivariate sustainability measure for robust analysis of water management under climate and demand uncertainty in an arid environment. **Water**.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). **Climate change 2023: Synthesis report**. Geneva: IPCC. Acesso em 12 de junho de 2025.
- Jun, K. S., Chung, E. S., Sung, J. Y., & Lee, K. S. (2011). Development of spatial water resources vulnerability index considering climate change impacts. **Science of the Total Environment**.
- Karamouz, M., Mohammadpour, P., & Mahmoodzadeh, D. (2017). Assessment of sustainability in water supply–demand considering uncertainties. **Water Resources Management**.
- Kaushik, P. R., Ndehedehe, C. E., Kalu, I., Burrows, R. M., Noll, M. R., & Kennard, M. J. (2023). Identifying potential hotspots of groundwater–climate interaction in the Great Artesian Basin, Australia. **Ecological Informatics**.
- Kim, Y., & Chung, E.-S. (2013). Assessing climate change vulnerability with group multi-criteria decision making approaches. **Climatic Change**.
- Kim, Y., Kong, I., Park, H., Kim, H. J., Kim, I. J., Um, M.-J., Green, P. A., & Vörösmarty, C. J. (2018). Assessment of regional threats to human water security adopting the global framework: A case study in South Korea. **Science of the Total Environment**.
- Koirala, S., Fang, Y., Dahal, N. M., Zhang, C., Pandey, B., & Shrestha, S. (2020). Application of Water Poverty Index (WPI) in spatial analysis of water stress in Koshi River Basin, Nepal. **Sustainability**.
- Kummu, M., Ward, P. J., de Moel, H., & Varis, O. (2010). Is physical water scarcity a new phenomenon? Global assessment of water shortage over the last two millennia. **Environmental Research Letters**.
- Lalthanpuia, H., Laldinpuii, H., Lalmalsawma, S., & Hrahsel, J. L. (2022). Assessment of district level climate vulnerability of Mizoram, India: Water resources approach. **Journal of Climate Change**.
- Lane, M. E., Kirshen, P. H., & Vogel, R. M. (1999). Indicators of impacts of global climate change on U.S. water resources. **Journal of Water Resources Planning and Management**.
- Lee, Y.-J. (2014). Social vulnerability indicators as a sustainable planning tool. **Environmental Impact Assessment Review**.
- Leigh, C., Burford, M. A., Roberts, D. T., & Udy, J. W. (2010). Predicting the vulnerability of reservoirs to poor water quality and cyanobacterial blooms. **Water Research**.

- Lessy, M. R., Lassa, J., & Zander, K. K. (2025). Development of small island vulnerability index to achieve sustainable development goals: Insight from Ternate Volcanic Island, Indonesia. **Environmental Challenges**.
- Li, X., Li, P., & Liu, J. (2025). Water security assessment and prediction for coastal urban agglomeration: A case study in the Pearl River Delta, east China. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**.
- Li, X., Philp, J., Cremades, R., Roberts, A., He, L., Li, L., & Yu, Q. (2016). Agricultural vulnerability over the Chinese Loess Plateau in response to climate change: Exposure, sensitivity, and adaptive capacity. **Ambio**.
- Liang, Y.-J., & Liu, L.-J. (2021). Vulnerability assessment of crop production to climate change across Northwest China during 1995–2014. **Journal of Mountain Science**.
- Liu, W., Dong, F., Hu, B. X., You, R., Li, J., & Shao, G. (2023). Exploring two-decadal risk variability of drought-flood abrupt alternation in a high-plateau basin. **Ecological Indicators**.
- Lopes, T. M. X. de M. (2021). **Previsão da demanda hídrica de Fortaleza por meio de autômatos celulares** [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará]. Repositório Institucional UFC.
- Lottering, S. J., Mafongoya, P., & Lottering, R. T. (2021). Assessing the social vulnerability of small-scale farmers to drought in uMzinga, KwaZulu-Natal. **International Journal of Disaster Risk Reduction**.
- Lourenço, M., Woodborne, S., & Fitchett, J. M. (2023). Drought history and vegetation response in the Angolan Highlands. **Theoretical and Applied Climatology**.
- Macharia, D., Kaijage, E., Kindberg, L., Koech, G., Ndungu, L., Wahome, A., & Mugo, R. (2020). Mapping climate vulnerability of river basin communities in Tanzania to inform resilience interventions. **Sustainability**.
- Malik, S. M., Awan, H., & Khan, N. (2012). Mapping vulnerability to climate change and its repercussions on human health in Pakistan. **Globalization and Health**.
- Mansir, I., Bouchaou, L., Chebli, B., Ait-Brahim, Y., & Choukr-Allah, R. (2021). A specific indicator approach for the assessment of water resource vulnerability in arid areas: The case of the Souss-Massa Region (Morocco). **Hydrological Sciences Journal**.
- Mehran, A., Mazdiyasni, O., & AghaKouchak, A. (2015). A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: Linking climate variability, local resilience, and demand. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**.
- Mengistu, D., Bewket, W., Dosio, A., & Panitz, H.-J. (2021). Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. **Journal of Hydrology**.
- Mesfin, D., Simane, B., Belay, A., Recha, J. W., & Schmiedel, U. (2020). Assessing the adaptive capacity of households to climate change in the Central Rift Valley of Ethiopia. **Climate**.
- Mohammed, R., & Scholz, M. (2016). Impact of climate variability and streamflow alteration on groundwater contribution to the base flow of the Lower Zab River (Iran and Iraq). **Environmental Earth Sciences**.
- Nam, W.-H., Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Tadesse, T., & Wilhite, D. A. (2015). Drought hazard assessment in the context of climate change for South Korea. **Agricultural Water Management**.
- Nasiri Khiavi, A., Mostafazadeh, R., & Ghanbari Talouki, F. (2024). Using game theory algorithm to identify critical watersheds based on environmental flow components and hydrological indicators. **Environment, Development and Sustainability**.
- Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., Nguyen, H. Q., Luu, C., Dang, K. B., Liu, Y., & Zhang, X. (2020). New approach of water quantity vulnerability assessment using satellite images and GIS-based model: An application to a case study in Vietnam. **Science of the Total Environment**.
- Ojeda Olivares, E. A., Belmonte Jiménez, S. I., Sandoval Torres, S., Campos Enríquez, J. O., Tiefenbacher, J. P., & Takaro, T. K. (2020). A simple method to evaluate groundwater vulnerability in urbanizing agricultural regions. **Journal of Environmental Management**.

- Oliveira, J. L. M. de., Rabbani, R. M. R., Rabbani, E. R. K., & Nunes, S. A. N. (2024). Indicadores sintéticos de vulnerabilidade: Uma revisão integrativa da literatura. Campos Neutrais: **Revista Latino-Americana de Relações Internacionais**.
- Panaiteescu, C., Constandache, C., Bilea, I. C., Vica, P., Bilanici, A., & Onutu, I. (2014). Influence of climate change on surface water quality in the Maneciu–Cheia area. **Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering**.
- Pandey, V. P., Babel, M. S., & Kazama, F. (2009). Analysis of a Nepalese water resources system: Stress, adaptive capacity and vulnerability. **Water Science & Technology: Water Supply**.
- Pandey, V. P., Babel, M. S., & Shrestha, S. (2011). Vulnerability assessment of water resources and adaptive capacity in the Bagmati River Basin, Nepal. **Environmental Management**.
- Pandey, V. P., Babel, M. S., Shrestha, S., & Kazama, F. (2011). A framework to assess adaptive capacity of the water resources system in Nepalese river basins. **Ecological Indicators**.
- Pino-Gómez, M., Soto-Córdoba, S. M., & Gaviria-Montoya, L. (2021). Construcción del Índice de Riesgo para determinar la Sostenibilidad del Servicio de Agua y Saneamiento (IRSSAS) en distritos rurales de Costa Rica atendidos por ASADAs. **Tecnología en Marcha**.
- Politi, E., Brito, A. C., Gomes, M. R., Lebreton, C., & Falcini, F. (2024). Listening to stakeholders: Development of water quality indicators for transitional environments using satellite data. **Ocean and Coastal Management**.
- Potopová, V., Cazac, V., Boincean, B., Soukup, J., & Trnka, M. (2019). Application of hydroclimatic drought indicators in the transboundary Prut River basin. **Theoretical and Applied Climatology**.
- Preziosi, E., Del Bon, A., Romano, E., Petrangeli, A. B., & Casadei, S. (2013). Vulnerability to drought of a complex water supply system: The Upper Tiber Basin case study (Central Italy). **Water Resources Management**.
- Reis, G. A., Souza Filho, F. A., Nelson, D. R., Rocha, R. V., & Silva, S. M. O. (2020). Development of a drought vulnerability index using MCDM and GIS: Study case in São Paulo and Ceará, Brazil. **Natural Hazards**.
- Romano, E., Guyennon, N., Duro, A., Giordano, R., Petrangeli, A. B., Portoghese, I., & Salerno, F. (2018). A stakeholder oriented modelling framework for the early detection of shortage in water supply systems. **Water**.
- Runfola, D. M., Ratick, S., Blue, J., Machado, E. A., Hiremath, N., Giner, N., White, K., & Arnold, J. (2017). A multi-criteria geographic information systems approach for the measurement of vulnerability to climate change. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**.
- Sadeghi, S. H., Chamani, R., Kalehhouei, M., & Haji, K. (2024). Health variability based on SPI and estimating median and mean health indices in watersheds and townships of Kermanshah Province, Iran. **Environment, Development and Sustainability**.
- Sediqi, M. N., & Komori, D. (2024). Assessing water resource sustainability in the Kabul River Basin: A standardized runoff index and reliability, resilience, and vulnerability framework approach. **Sustainability**.
- Serkendiz, H., Tatli, H., Özcan, H., Çetin, M., & Sungur, A. (2023). Multidimensional assessment of agricultural drought vulnerability based on socioeconomic and biophysical indicators. **International Journal of Disaster Risk Reduction**.
- Shen, Y., Oki, T., Kanae, S., Hanasaki, N., Utsumi, N., & Kiguchi, M. (2014). Projection of future world water resources under SRES scenarios: An integrated assessment. **Hydrological Sciences Journal**.
- Shi, X., Zhang, Y., Ding, H., Yang, Y., Chen, J., Shi, M., & Chen, F. (2023). Drought risk assessment considering ecosystem resilience: A case study in the Huang-Huai-Hai Plain, China. **Ecological Indicators**.
- Souza Filho, F. de A., et al. (2019). Análise da vulnerabilidade à seca no Estado do Ceará: Vulnerabilidade à seca. In **Gestão adaptativa do risco climático de seca**. [S. l.: s. n.].

- Suárez-Almiñana, S., Andreu, J., Solera, A., & Madrigal, J. (2022). Integrating seasonal forecasts into real-time drought management: Júcar River Basin case study. **International Journal of Disaster Risk Reduction**.
- Sun, D., Gu, J., Chen, J., Xia, X., & Chen, Z. (2022). Spatiotemporal differentiation and influencing factors of urban water supply system resilience in the Yangtze River Delta urban agglomeration. **Natural Hazards**.
- Sun, Z., Chang, N.-B., & Opp, C. (2010). Using SPOT-VGT NDVI as a successive ecological indicator for understanding the environmental implications in the Tarim River Basin, China. **Journal of Applied Remote Sensing**.
- Sung, J., Kang, B., Kim, B., & Noh, S. (2022). Development and application of integrated indicators for assessing the water resources performance of multi-purpose and water supply dams. **Journal of Korea Water Resources Association**.
- Tayebzadeh Moghadam, N., & Malekmohammadi, B. (2025). Assessment of drought change trends and watershed health using a reliability-resilience-vulnerability framework in mountainous watersheds. **Current Research in Environmental Sustainability**.
- Thomas, T., Nayak, P. C., & Ventakesh, B. (2022). Integrated assessment of drought vulnerability for water resources management of Bina basin in Central India. **Environmental Monitoring and Assessment**.
- Veetil, A. V., Konapala, G., Mishra, A. K., & Li, H.-Y. (2018). Sensitivity of drought resilience-vulnerability-exposure to hydrologic ratios in contiguous United States. **Journal of Hydrology**.
- Wang, H., He, M., Yan, W., Ai, J., & Chu, J. (2021). Ecosystem vulnerability in the Tianshan Mountains and Tarim Oasis based on remote-sensed gross primary productivity. **Acta Ecologica Sinica**.
- Wang, M., Jiang, S., Ren, L., Xu, C.-Y., Menzel, L., Yuan, F., Xu, Q., Liu, Y., & Yang, X. (2021). Separating the effects of climate change and human activities on drought propagation via a natural and human-impacted catchment comparison method. **Journal of Hydrology**.
- Wang, X., Yang, T., Yong, B., Krysanova, V., Shi, P., Li, Z., & Zhou, X. (2018). Impacts of climate change on flow regime and sequential threats to riverine ecosystem in the source region of the Yellow River. **Environmental Earth Sciences**.
- Xia, J., Ning, L., Wang, Q., Chen, J., Wan, L., & Hong, S. (2017). Vulnerability of and risk to water resources in arid and semi-arid regions of West China under a scenario of climate change. **Climatic Change**.
- Yang, X.-H., Sun, B.-Y., Zhang, J., Li, M.-S., He, J., Wei, Y.-M., & Li, Y.-Q. (2016). Hierarchy evaluation of water resources vulnerability under climate change in Beijing, China. **Natural Hazards**.
- Yilmaz, B. (2018). Proposed index for drought assessment: Modified reconnaissance drought index (mRDI). **Journal of Environmental Protection and Ecology**.
- Zhu, Y., Yang, P., Xia, J., Huang, H., Chen, Y., Li, L., Sun, K., Song, J., Shi, X., & Lu, X. (2025). Spatial heterogeneity of flash drought events in Central Asia and their link with large-scale circulation. **Climate Dynamics**.
- Župič, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**.