

Aprimoramento do Índice de Segurança Hídrica da ANA: adição do indicador vulnerabilidade a inundações e aplicação na região hidrográfica do rio Jucu, ES - Brasil

Improving the ANA's Water Security Index: adding the vulnerability to flooding indicator and applying it to the Jucu River hydrographic region, ES - Brazil

Daniel Ben-Hur Silva de Oliveira¹ , Bruno Peterle Vaneli² , Edmilson Costa Teixeira³ 

¹Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Serra, ES, Brasil. E-mail: danielbenhur.s.o@gmail.com

²Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Cariacica, ES, Brasil. E-mail: brunopvaneli@gmail.com

³Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória, ES, Brasil. E-mail: edmilson.teixeira@ufes.br

Como citar: Oliveira, D. B. H. S., Vaneli, B. P., & Teixeira, E. C. (2024). Aprimoramento do Índice de Segurança Hídrica da ANA: adição do indicador vulnerabilidade a inundações e aplicação na região hidrográfica do rio Jucu, ES - Brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 21, e15. <https://doi.org/10.21168/reg.v21e15>

RESUMO: A segurança hídrica é ampla, ainda assim tem sido modelada como sinônimo de escassez hídrica. No Brasil, a ANA criou o Índice de Segurança Hídrica (ISH) que seguiu este mesmo viés. Como ainda há poucos modelos que considerem outros fatores igualmente importantes, como as inundações, em suas análises de segurança hídrica, neste trabalho se propôs a desenvolver um modelo (denominado ISH_{ajustado}) a partir do ISH, incorporando inundações para torná-lo mais coerente com o conceito de segurança hídrica. Metodologicamente, modificou-se a dimensão resiliência do ISH, adicionando-se o “índice de vulnerabilidade às inundações” (IVI) em sua composição. O ISH_{ajustado} foi aplicado em uma projeção para 2035 da segurança hídrica na Região Hidrográfica do Rio Jucu (RHJ), no estado do Espírito Santo. O novo modelo apontou que algumas áreas com maior vulnerabilidade a inundações passaram a apresentar menor segurança hídrica do que no ISH original. Esses resultados se mostraram sensíveis ao contexto da segurança hídrica na RHJ e coerente com percepções locais. Conclui-se que o aprimoramento realizado aponta para a necessidade de modelos que abordem mais representativamente a segurança hídrica da forma como ela é conceituada.

Palavras-chave: Segurança Hídrica; Inundação; Desenvolvimento Regional; Modelagem; Vulnerabilidade.

ABSTRACT: Water security is broad, yet it has been modeled as synonymous of water scarcity. In Brazil, the ANA created the Water Security Index (ISH) which followed this same bias. As there are still few models that consider other equally important factors, such as flooding, in their water security analyses, this study set out to develop a model (called ISH_{adjusted}) based on the ISH, incorporating flooding to make it more coherent with the concept of water security. Methodologically, the resilience dimension of the ISH was modified, adding the “flood vulnerability index” (IVI) to its composition. The adjusted ISH was applied to a 2035 projection of water security in the Jucu River Hydrographic Region (RHJ), in the state of Espírito Santo. The new model showed that some areas with greater vulnerability to flooding now have lower water security than in the original ISH. These results proved to be sensitive to the context of water security in the RHJ and consistent with local perceptions. It is concluded that the improvements made point to the need for models that more representatively address water security as it is conceptualized.

Keywords: Water Security; Flooding; Regional Development; Modeling; Vulnerability.

1. INTRODUÇÃO

Segurança hídrica é um conceito que surgiu no fim do século XX e que possui muitas definições a depender do contexto em que está sendo aplicada (Marcal et al., 2021; Allan et al., 2018). Ainda assim, dentre as mais utilizadas (Marcal et al., 2021) está a definição dada pela UN-Water, que trata a segurança hídrica como:

Recebido: Fevereiro 12, 2024. Revisado: Julho 02, 2024. Aceito: Julho 25, 2024.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

[...] a capacidade de uma população de salvaguardar o acesso sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável para sustentar a subsistência, o bem-estar humano e o desenvolvimento socioeconômico, para garantir proteção contra a poluição causada à água e desastres relacionados à água e para preservar os ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política (UN-Water, 2013, p. 1).

A partir de estudos como os de Octavianti & Staddon (2021) e Gerlak et al. (2018), que analisaram modelos e definições de segurança hídrica, percebe-se que apesar da amplitude de dimensões abordadas nas definições de segurança hídrica, a maioria dos modelos concentram-se em fatores específicos. Temas relacionados ao suprimento de água, bem como qualidade de água, são os mais comuns de serem incorporados nos modelos, enquanto fatores como inundação, paz, estabilidade política, governança e mudanças climáticas são pouco incorporados (Octavianti, 2020; Octavianti & Staddon, 2021; Gerlak et al., 2018; Grafton, 2017). Muitos dos modelos de avaliação da segurança hídrica a igualam à escassez hídrica ou segurança do abastecimento hídrico, tornando pouco analisados seus outros fatores intervenientes (Octavianti, 2020; Octavianti & Staddon, 2021; Gerlak et al., 2018).

Remontando-se, porém, as origens do termo segurança hídrica, percebe-se que este teve grande influência do conceito de desenvolvimento sustentável, especialmente devido a elaboração dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODMs) e posteriormente os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODSs) (Harmancioglu, 2017). A própria definição construída pela UN-Water (2013) tinha intuito de trazer o tema para os ODSs lançados em 2015 (Harmancioglu, 2017). Em uma análise das primeiras definições de segurança hídrica, Octavianti (2020) aponta que outro motivo gerador do tema é o medo do futuro incerto causado por desastres relacionados à água (como escassez ou inundações). Grey & Sadoff (2007) já indicavam em sua definição de segurança hídrica que ela poderia ser dividida em duas partes: uma voltada à capacidade da água de produção e crescimento (ou desenvolvimento sustentável); outra voltada à sua capacidade de destruição (de onde vem a necessidade de cuidado com desastres).

Considerando as inundações, em especial, ela é o desastre natural mais frequente no mundo (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2023), com tendência de crescimento devido às mudanças climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). Alguns de seus impactos estão em prejudicar a subsistência (Mucherera & Spiegel, 2022) e o bem-estar humano (Murata et al., 2023), a qualidade das águas (Mishra et al., 2021; Octavianti, 2020) e o desenvolvimento socioeconômico (Krichene et al., 2021; Zeng et al., 2019), todos esses sendo assuntos presentes na supracitada definição da UN-Water (2013), assim como nela está presente a necessidade de proteção contra desastres relacionados à água. Entretanto, a pesquisa feita por Octavianti (2020) demonstra que as inundações são pouco incorporadas nas modelagens de segurança hídrica. Um dos motivos apontados por essa pesquisadora é que os especialistas no campo da modelagem de inundações trabalham um nicho de pesquisa bem mais consolidado e desenvolvido do que o da segurança hídrica. Deste modo, esses especialistas tendem a não considerar interessante a junção dos dois temas e adição do termo segurança hídrica nas palavras-chave de suas publicações. Esse tipo de tratamento faz os modelos de avaliação não abordarem o tema em sua totalidade.

Dessa forma, crises de escassez hídrica acabam sendo um dos principais catalisadores da construção de modelos e inserção da segurança hídrica na pauta governamental (Octavianti, 2020). Um exemplo é o caso do Brasil, onde movida por uma crise hídrica ocorrida em 2014 no país, a atualmente chamada Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) elaborou o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) e o Índice de Segurança Hídrica (ISH) (Agência Nacional de Águas, 2019c). O ISH focou na escassez hídrica, mas no PNSH analisaram-se também as inundações (mesmo que fora do ISH), usando o Índice de Vulnerabilidade a Inundações (IVI), publicado por Agência Nacional de Águas (2014). A ANA objetivava localizar áreas prioritárias para investimento em infraestrutura hídrica no PNSH, assim o modelo ISH serviria para indicar locais prioritários para infraestrutura de secas, enquanto outro índice, voltado à inundação, no caso o IVI, daria infraestrutura necessária para controle de inundações. Alguns pesquisadores revisaram criticamente o ISH, adicionando novas dimensões, como a social (Barbosa, 2022) e a de risco às secas (Brito et al., 2022). A busca desses autores estava em tornar o ISH mais representativo das realidades em que ele era aplicado, bem como preencher lacunas espaciais que existem em alguns indicadores das dimensões do ISH.

Visto que o ISH da ANA é um modelo utilizado nacionalmente e que ainda não há publicações que incorporem o risco das inundações como um fator interveniente à segurança hídrica nesse modelo, percebe-se a importância de pesquisas que abordem o assunto. Nesse contexto, o objetivo do presente estudo é aprimorar o ISH da Agência Nacional de Águas (2019c) por meio da incorporação do IVI e aplicar o índice aprimorado em uma área piloto, tendo sido escolhido para isso a Região Hidrográfica

do Rio Jucu (RHJ), no Espírito Santo (ES). Espera-se que com a incorporação das inundações no ISH, o índice torne-se mais coerente com o conceito da UN-Water (2013) e mais sensível ao contexto das regiões em que ele é aplicado.

1.1. O ÍNDICE DE SEGURANÇA HÍDRICA - ISH

No Brasil, um dos índices para avaliação da segurança hídrica que se desenvolveu foi o ISH, um modelo de análise multicritério, baseado em indicadores, criado para dar suporte ao PNSH. A definição de trabalho utilizada pela ANA nesse plano baseou-se na definição da UN-Water (2013) e trata de segurança hídrica como a:

[...] disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para o atendimento às necessidades humanas, à prática das atividades econômicas e à conservação dos ecossistemas aquáticos, acompanhada de um nível aceitável de risco relacionado a secas e cheias, devendo ser consideradas as suas quatro dimensões como balizadoras do planejamento da oferta e do uso da água em um país (Agência Nacional de Águas, 2019c, p. 13.)

Partindo daí, o ISH foi construído tendo por base as dimensões humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência — novamente tentando aproximar-se do modo como a ONU trata o tema. Porém, tanto na definição da UN-Water (2013) quanto na da Agência Nacional de Águas (2019c), a dimensão de resiliência é mais abrangente do que o abordado no ISH. Essa abrangência existe porque essas definições tratam tanto do risco de secas quanto de cheias — e nesse pensamento ainda se poderia incluir outros riscos de desastres relacionados à água, como os desastres tecnológicos envolvendo poluição hídrica. Os formuladores do PNSH, na verdade, parecem ter notado a importância dessa dimensão e buscaram incorporá-las no Plano, mas elas não estão incluídas no ISH.

O ISH foi calculado e disponibilizado seus dados no portal de metadados da Agência Nacional de Águas (2019b) na escala das otobacias com codificação BHO 2013 no nível 6 de detalhamento. O cálculo foi realizado para dois cenários: diagnóstico (ano de 2017) e prognóstico (ano de 2035). No prognóstico alterou-se a demanda hídrica e a quantidade da população. O Índice é dividido em quatro dimensões: a humana e a econômica (que quantificam os déficits de atendimento às demandas efetivas do abastecimento humano e do setor produtivo) e a ecossistêmica e de resiliência (que identificam as áreas mais críticas quanto à poluição e disponibilidade hídrica). Como a dimensão resiliência não dependeu desses dados, ela não sofreu modificação de valores entre 2017 e 2035. Cada uma das dimensões do ISH foi concebida a fim de subsidiar uma análise de segurança hídrica pautada na possibilidade de escassez hídrica (especialmente para o abastecimento de água) e necessidade de infraestrutura hídrica. O Quadro 1 apresenta as funções de cada dimensão do ISH para o PNSH. No Índice, essas dimensões são classificadas em cinco graus, indo de um (mínimo) a cinco (máximo) (Quadro 2).

Quanto à construção do PNSH, este partiu dos graus de segurança hídrica de cada otobacia do território nacional, com a análise integrada e a apresentação dos resultados realizada pelas Unidades Territoriais de Análise (UTAs). O estudo baseou-se em um inventário de Estudos, Planos, Projetos e Obras (EPPOs) da área de recursos hídricos e infraestrutura hídrica, nos dados do Atlas de Vulnerabilidade a Inundações e no ISH (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021b) (Figura 1). Decerto, todo o plano e inclusive o ISH tem foco em infraestrutura.

Quadro 1: Função no PNSH das dimensões do modelo ISH original da ANA.

| Dimensões do ISH original | Função no PNSH |
|---------------------------|---|
| Humana | Identificar as áreas onde são requeridos sistemas adutores e o aproveitamento de outras fontes hídricas (existentes ou que demandam nova infraestrutura). |
| Econômica | Identificar as áreas onde é requerida infraestrutura hídrica para usos múltiplos (barragens, canais e eixos de integração). |
| Ecossistêmica | Identifica áreas críticas que possuem limitação na oferta hídrica e no suprimento de demandas em função da baixa qualidade da água e de questões ambientais. |
| Resiliência (às secas) | Identificar as áreas com menor grau de resiliência, em que um balanço hídrico deficitário é mais crítico devido à alta variabilidade pluviométrica somada à ausência de reservatórios ou de águas subterrâneas. Essas áreas requerem infraestrutura hídrica mais complexa e em geral de caráter integrado e abrangência regional. |

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas (2019c).

Quadro 2: Classes do ISH.

| GRAU DE SEGURANÇA HÍDRICA | LIMITE INFERIOR | | LIMITE SUPERIOR |
|---------------------------|-----------------|------|-----------------|
| | MÁXIMO | 4,51 | 5 |
| ALTO | 3,51 | 4,5 | |
| MÉDIO | 2,51 | 3,5 | |
| BAIXO | 1,51 | 2,5 | |
| MÍNIMO | 1 | 1,5 | |

Fonte: adaptado de Agência Nacional de Águas (2019a).



Figura 1: Processo de construção do PNSH. Fonte: Agência Nacional de Águas (2019c).

Com o lançamento do PNSH, uma série de estudos foram desenvolvidos, alguns em busca de aplicar o ISH a regiões específicas (Almeida et al., 2022; Marins et al., 2021; Instituto Jones dos Santos Neves, 2021), outros para adaptar ou criar novas dimensões (Barbosa, 2022; Brito et al., 2022; Pozzebon et al., 2022; Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021a). A necessidade de atualização do ISH tem sido percebida inclusive pela ANA. Assim, durante a elaboração do mais recente Atlas Águas (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021a) foi criado o Índice de Segurança Hídrica do Abastecimento Urbano (ISH-U), como uma atualização da dimensão Humana do ISH. Ela não substituiu oficialmente a dimensão humana do ISH — possivelmente porque isso, entre outros motivos, demandaria o processo de transferência das informações para a escala de otobacias. Outra alteração prevista no PNSH (Agência Nacional de Águas, 2019c) e já iniciada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2024) é a da incorporação de cenários mais robustos que considerem mudanças climáticas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise da segurança hídrica da RHJ com inclusão do fator referente ao risco de inundações se deu mediante quatro grandes passos: (i) caracterização da área de estudo; (ii) desenvolvimento do novo índice, o Índice de Segurança Hídrica Ajustado ($ISH_{ajustado}$); (iii) aplicação do novo $ISH_{ajustado}$ na RHJ; (iv) avaliação comparativa entre o ISH original e o $ISH_{ajustado}$, ambos aplicados na RHJ, bem como comparação com outros estudos locais. Após essa análise, foi construído um quadro de limitações e potencialidades de modelo, com posterior discussão. Na sequência apresentam-se os passos detalhadamente.

2.1. ÁREA DE ESTUDO

Nesse projeto, definiu-se como área de estudo a Região Hidrográfica do Rio Jucu (RHJ) no Espírito Santo (ES), sudeste brasileiro (Figura 2). A RHJ tem área de drenagem de aproximadamente 2.000 km² e possui cinco Unidades de Planejamento (UPs), a saber: Alto Jucu; Médio Jucu; Baixo Jucu; Rio Jucu Braço Sul; e Formate/Marinho e Costeiro (Figura 2). Essa região abrange totalmente os municípios de Marechal Floriano, Domingos Martins — esses dois, integrantes da macrorregião estadual Serrana — e Viana, e parcialmente os municípios de Vila Velha, Cariacica e Guarapari — esses quatro, componentes da microrregião estadual Metropolitana da Grande Vitória (RMGV). A população desses

municípios compõe 27% da população total do estado, conforme censo de 2022 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023). De acordo com o Atlas Águas (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021a), as maiores demandas de água para abastecimento humano na RHJ advêm do sistema de abastecimento integrado SIN JUCU que atende cerca de um milhão de habitantes. Quanto à sua economia, a RHJ possui diversos setores como: portuário; industrial; agrícola; florestal; pecuário; hidroelétrico; turístico; pesca/mariscagem; entre outros. Seu bioma está todo inserido na Mata Atlântica. A RHJ possui uma diversificação de relevo e ocupação, indo desde áreas planas no nível do mar, de restinga e manguezais, à jusante, passando pela conurbação urbana da RMGV, até regiões rurais de relevo com declividade média de 1,5% e temperaturas mais frias, a montante (Espírito Santo, 2016).

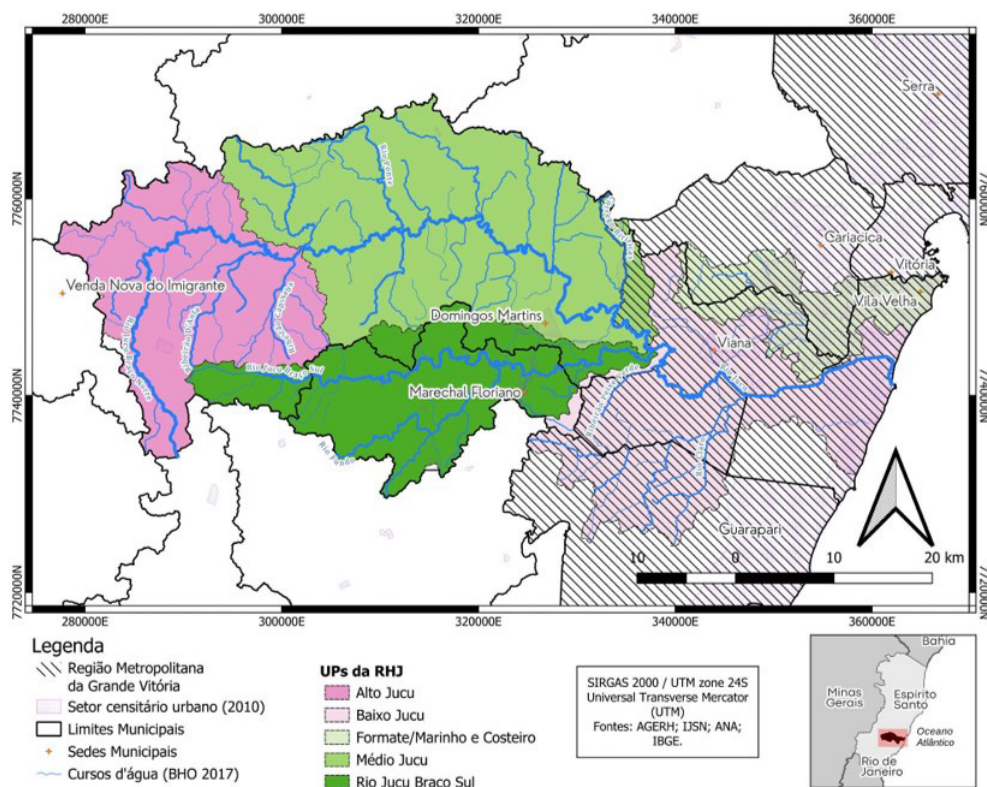


Figura 2: Região Hidrográfica do Rio Jucu e suas Unidades de Planejamento. Fonte: Os autores.

O rio Jucu, de onde vem o nome da Região, é formado pelo encontro do rio Jucu Braço Norte e rio Jucu Braço Sul. Este último, é um de seus mais importantes afluentes, que nascem no interior do Parque Estadual Pedra Azul (PEPAZ) e tem relevante valor turístico para o estado (Holz, 2012). A RHJ possui atualmente duas barragens principais, referentes à Pequena Central Hidrelétrica (PCH) de São Pedro, no rio Jucu Braço Norte e a PCH Rio Jucu, situada no Jucu Braço Sul (Espírito Santo, 2016). Conforme o Atlas Águas (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021a), há planos de construção de reservatórios de usos múltiplos na região entre os municípios de Domingos Martins e Viana. A região estudada possui um Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH) (Espírito Santo, 2016), um Plano de Recursos Hídricos para até 2036, um Enquadramento de Corpos d'Água e cobrança pelo uso da água (Espírito Santo, 2021).

Durante a crise hídrica que ocorreu a partir de 2014 no sudeste brasileiro, a RHJ foi uma das áreas afetadas. Na ocasião da crise mencionada, percebeu-se que essa região, importante para o abastecimento da RMGV, não possuíam reservatórios de regularização hídrica e usos múltiplos capazes de garantir o abastecimento para seus vários setores usuários diante da escassez. Foi necessária a construção de acordos técnico-operacionais para compatibilização entre a geração de energia hidroelétrica e abastecimento humano, através da utilização do reservatório da pequena central hidrelétrica de Rio Bonito na região hidrográfica vizinha à RHJ, a do Rio Santa Maria da Vitória (RHSMV) (Soares Neto & Pedrosa, 2018). Além disso, um racionamento progressivo foi implementado

pela concessionária de abastecimento de água, forçando especialmente as indústrias na Grande Vitória (região que contém áreas tanto dentro da RHSMV, quanto da RHJ) a buscarem fontes alternativas de abastecimento (Soares Neto & Pedrosa, 2018).

Porém, além de desafios relacionados à escassez hídrica, a RHJ também enfrenta problemas voltados às inundações (Espírito Santo, 2016). Todos os municípios dessa região apresentaram decretos de Situação de Emergência e Estado de Calamidade nos últimos anos, devido a desastres relacionados à chuva (Brasil, 2022). Os registros de eventos de inundações, alagamentos, enxurradas e cheias mais frequentes são para os municípios que também estão na RMGV (Deina & Coelho, 2015), onde obras envolvendo diques, redes de macro e micro drenagem e bombeamento de águas pluviais compõem algumas das infraestruturas para tentar conter o problema histórico de danos devido a esses eventos na região urbanizada. Essa região na UP Baixo Jucu da RHJ, de planícies fluviais e litorâneas, com vários trechos abaixo do nível do mar totalmente urbanizados, está naturalmente sujeita a inundação (Deina & Coelho, 2015). O problema, porém, se estende para as UPs da RHJ mais a montante na microrregião Serrana do estado, como a UP Rio Jucu Braço Norte, a exemplo de alagamentos registrados em Marechal Floriano (Brasil, 2022).

2.2. DESENVOLVIMENTO DO ISH_{ajustado}

Para o desenvolvimento do novo índice, que será denominado ISH_{ajustado}, tomou-se como base o modelo ISH construído pela ANA, que tem característica de ser um modelo baseado em indicadores (segundo a classificação de Marcal et al. (2021). As informações utilizadas para manipulação do ISH estão dispostas no manual metodológico do ISH (Agência Nacional de Águas, 2019a) e no PNSH (Agência Nacional de Águas, 2019c), enquanto os dados brutos estão no Portal de Metadados da Agência Nacional de Águas (2019b).

Identificou-se o fator “risco de inundações” como um fator interveniente na segurança hídrica que pode ser incorporado no ISH. Este não está presente no ISH original, mas pode relacionar-se à dimensão resiliência, possui grande interferência na segurança hídrica da região de estudo (a RHJ), e foi estudado para construção do PNSH (Figura 1), mesmo que não foi considerado entre as componentes do ISH.

Seguiu-se à escolha de um indicador que representasse esse fator e do modo para sua incorporação. Percebeu-se que no manual do ISH produzido pela Agência Nacional de Águas (2019a) não são abordados quais foram os critérios para seleção dos indicadores durante a elaboração do ISH. Deduziu-se que foram escolhidos os indicadores que tinham maior disponibilidade de dados, abrangência nacional e escala espacial detalhada. Optou-se, portanto, em incorporar o Índice de Vulnerabilidade a Inundações (IVI) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021b) — também utilizado no PNSH (Agência Nacional de Águas, 2019c) — inserindo-o no ISH para representar o fator risco de inundação. Apesar de o IVI tratar de vulnerabilidade e não de risco (o qual é o produto entre vulnerabilidade, perigo e exposição) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023), considerou-se que este indicador é suficiente para os propósitos deste estudo. Pela afinidade com a dimensão de resiliência, o IVI foi adicionado nessa dimensão. Define-se assim que no ISH_{ajustado}, utilizar-se-á do mesmo grau de classificação (Quadro 2) e das mesmas quatro dimensões originais do ISH (humana, econômica, ecossistêmica, resiliência). Semelhantemente, não há alteração de seus indicadores e formas de cálculo, com exceção para a dimensão de resiliência que terá a adição de um novo indicador (o IVI) e será dividida em duas subdimensões.

Definidos o indicador e sua respectiva dimensão onde entrará no ISH_{ajustado}, passa-se a sua adequação à forma do modelo ISH. A dimensão resiliência no ISH_{ajustado} foi dividida em duas subdimensões: resiliência às secas, com os mesmos indicadores da dimensão resiliência no ISH original; e resiliência às inundações, representada por seu indicador único, o IVI. Quanto à dimensão de resiliência, no ISH original esta é composta dos indicadores: reservação artificial, reservação natural, potencial de armazenamento subterrâneo e variabilidade pluviométrica. A dimensão resiliência no ISH_{ajustado} (neste caso, o conjunto das duas subdimensões), assim como no ISH original, é calculada por *ottobacia*. Algumas dificuldades em se manipular os dados brutos do ISH que estão disponíveis no Portal de Metadados da Agência Nacional de Águas (2019b) parecem ter influenciado decisões metodológicas de Brito et al. (2022) e de Barbosa (2022), especialmente em se criar dimensões ao invés de alterar indicadores das existentes. Por essas mesmas dificuldades, neste trabalho modificou-se o índice sem alterar pesos ou indicadores das demais dimensões que o compõem e apenas para o ano de 2035. Outra decisão foi de considerar que na projeção para 2035, não haveria alteração dos trechos vulneráveis à inundação e que as subdimensões de resiliência

possuem no ISH_{ajustado}, cada uma, o mesmo peso das dimensões humana, econômica e ecossistêmica. O conjunto de dimensões e indicadores do novo modelo está apresentado no Quadro 3. Para incorporação do IVI na subdimensão resiliência, é necessário a normalização dos seus graus. Assim, reclassificaram-se seus graus de vulnerabilidade para os graus de segurança hídrica, sendo um (grau mínimo) o menos seguro e três (grau médio) o mais seguro (Tabela 1). Assim, considerou-se que não há segurança hídrica alta ou máxima onde há vulnerabilidade às inundações (classificação semelhante à adotada para o indicador Segurança de Barragens de Rejeito, na dimensão ecossistêmica do ISH). Os trechos não vulneráveis no IVI não entraram no cálculo.

Quadro 3: Dimensões e indicadores do ISH_{ajustado}.

| Indicadores do ISH _{ajustado} | | | | |
|--|--|--|--|---|
| Dimensão | | Indicador | Fonte de informação | |
| Humana | Garantia de água para abastecimento | | Presentes no ISH original da Agência Nacional de Águas (2019b) | |
| | Cobertura da rede de abastecimento | | | |
| Econômica | Garantia de água para irrigação e pecuária | | | |
| | Garantia de água para atividade industrial | | | |
| Ecossistêmica | Quantidade adequada de água para usos naturais | | | |
| | Qualidade adequada de água para usos naturais | | | |
| | Segurança de barragens de rejeito de mineração | | | |
| Resiliência | às secas | Reservação artificial | | |
| | | Reservação Natural | | |
| | | Potencial de armazenamento subterrâneo | | |
| | | Variabilidade pluviométrica | | |
| | às inundações | Vulnerabilidade às inundações | | Adicionado no ISH _{ajustado} a partir de dados de Vulnerabilidade à Inundação de Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021b) |

Fonte: os autores.

Tabela 1: Reclassificação do IVI para graus de segurança hídrica do ISH_{ajustado}. Valores correspondem aos seguintes graus: 3 = grau médio; 2 = grau alto; 1 = grau máximo.

| Grau de segurança hídrica | | Impacto | | |
|---------------------------|-------|---------|-------|------|
| | | Baixo | Médio | Alto |
| Ocorrência | Baixa | 3 | 2 | 1 |
| | Média | 3 | 2 | 1 |
| | Alta | 2 | 1 | 1 |

Fonte: os autores.

O ISH_{ajustado} trata dessa adaptação descrita, e o grau de segurança hídrica para uma região específica nesse modelo é a média simples por otobacia dos valores não nulos do conjunto das cinco dimensões e subdimensões (humana, econômica, ecossistêmica, resiliência às secas e resiliência às inundações), ou seja:

$$\text{Equação 1: ISH}_{\text{ajustado}} = \sum_i^{n=5} \left(\frac{i}{k} \right),$$

sendo:

i = o valor da dimensão ou subdimensão;

k = o número total das dimensões (Humana, Econômica e Ecológica) e subdimensões (Resiliência às Secas e Resiliência às Inundações) que sejam não nulas. Valor máximo é igual a 5.

2.3. APLICAÇÃO DO ISH_{ajustado} NA RHJ

Para que o ISH_{ajustado} fosse avaliado em uma região piloto, aplicou-se o índice na RHJ. Utilizou-se o QGIS® para recortar pelos limites da RHJ (Espírito Santo, 2016) os dados brutos do ISH a nível de Brasil (Agência Nacional de Águas, 2019b). O mesmo foi feito com os dados do IVI (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021b). Em seguida, interpolaram-se os trechos inundáveis segundo o IVI da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021b) (com otocodificação BHO 2017), com as otobacias utilizadas no cálculo do ISH original (com otocodificação BHO 2013). O IVI, coletado no portal de metadados da ANA, contém os trechos de cursos d'água inundáveis com os atributos de otocodificação, frequência de ocorrência, grau de impacto e vulnerabilidade a inundações graduais do estado do Espírito Santo na escala 1:1.000.000 (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021b). Devido à diferença entre as BHOs, alguns trechos ocuparam duas otobacias. Nesses casos considerou-se apenas a otobacia que contivesse a maior parte do trecho. Com isso, dentre os locais que contêm trechos vulneráveis à inundação no IVI (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021b), extraíram-se os valores por otobacias, com a codificação disponível em sua tabela de atributos, sendo ela a BHO 2017. Outra fonte possível para dados seria o Atlas Estadual de Vulnerabilidade à Inundação (Instituto Estadual de Meio Ambiente, 2013), que possui escala mais detalhada (1:50.000 e 1:100.000); todavia, não foram encontrados seus dados de vetores georreferenciados disponíveis em bases de dados públicas.

Após ajustes dos dados e realização dos recortes para a área de estudo, calculou-se o ISH_{ajustado} conforme a Equação 1. Logo após, passou-se à análise da segurança hídrica pelo exame do resultado do ISH_{ajustado} na projeção de 2035 para a dimensão de resiliência (nas duas subdimensões) e de seu resultado global (todas as dimensões unidas) para o mesmo ano. Os resultados foram expostos em formato de mapas e tabelas seccionadas por UPs.

2.4. COMPARAÇÃO DOS MODELOS ISH E ISH_{ajustado} NA RHJ

Após a análise do ISH_{ajustado}, realizou-se uma comparação dos valores de segurança hídrica obtidos a partir do novo modelo em relação aos resultados do ISH original para 2017 (diagnóstico) e 2035 (prognóstico) na dimensão resiliência e no índice global. Para isso, utilizou-se do recorte do ISH realizado para a RHJ na etapa anterior. Essa comparação teve o objetivo de verificar a sensibilidade do ISH_{ajustado} e a diferença entre os graus de segurança hídrica para cada UP da RHJ obtidos por cada modelo.

Para auxiliar essa comparação, foram elaborados mapas com grau de segurança hídrica para a área de estudo e tabelas com os valores de área das UPs correspondente a cada grau de segurança hídrica nos dois índices. As análises foram realizadas para o nível de municípios e de regiões hidrográficas. No nível de regiões hidrográficas utilizaram-se as Unidades de Planejamento (UPs) e a hidrografia como referências. Em subsídio a essa interpretação dos resultados, utilizou-se de informações no encarte dos CBHs Jucu e Santa Maria da Vitória (Espírito Santo, 2016), elaborado para resumir alguns resultados do Plano de Recursos Hídricos da região. Igualmente utilizaram-se informações de registros de desastres ocorridos entre 2013 e 2023 obtidos no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID) da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (Brasil, 2022).

2.5. APONTAMENTO DE LIMITAÇÕES E POTENCIALIDADES DO MODELO ISH_{ajustado}

Com o conhecimento adquirido ao longo deste estudo foram identificadas e discutidas limitações e potencialidades do modelo. Para tal, utilizou-se de uma adaptação do método de estruturação de problemas denominado Forças (Strengths), Fraquezas (Weaknesses), Oportunidades (Opportunities) e Ameaças (Threats), conhecido como matriz FOFA, ou no inglês SWOT (Marttunen et al., 2017; Srdjevic et al., 2012). Assim, construiu-se um quadro com limitações (correspondente às “fraquezas” da matriz SWOT) e potencialidades (“forças” da matriz SWOT) e em seguida discutiu-se sua composição.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção, inicia-se com uma análise das duas subdimensões de resiliência do ISH_{ajustado} para 2035 na RHJ. Em seguida, expõem-se os resultados globais (junção de todas as dimensões) do ISH_{ajustado} e sua comparação com os graus de segurança hídrica na RHJ calculados pelo ISH original nos dois anos de referência (2017 e 2035). No fim serão expostas limitações e potencialidades do modelo desenvolvido identificadas ao longo do estudo, as quais podem auxiliar no aprimoramento dele e do ISH.

Na Figura 3 são apresentados, para o ano de 2035, todas as dimensões que compõem o ISH_{ajustado}, aplicados à região hidrográfica do rio Jucu. Ressalta-se que, o ISH original é composto apenas pelas dimensões representadas nas Figuras 3a a 3d, enquanto o ISH_{ajustado} possui também a subdimensão representada na Figura 3e.

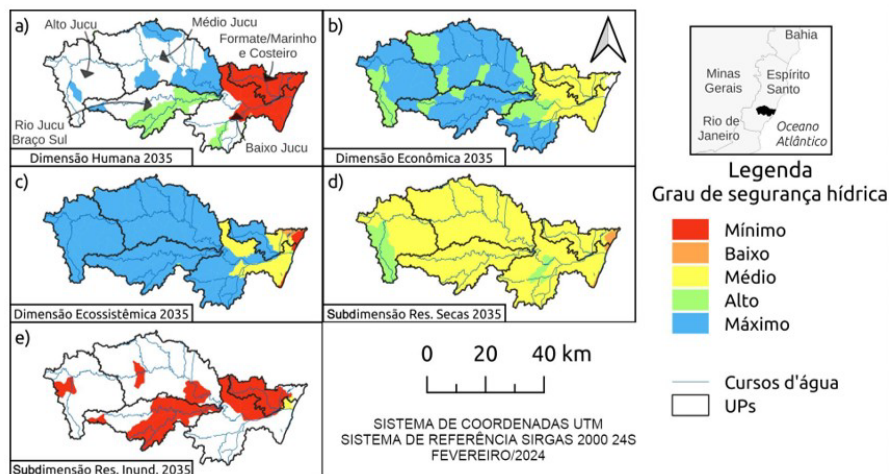


Figura 3: Dimensões do ISH_{ajustado} (ano de 2035), aplicados à Região Hidrográfica do Rio Jucu. Fonte: Os autores.

3.1. DIMENSÃO DE RESILIÊNCIA DO ISH_{ajustado} APLICADO À RHJ

A dimensão de resiliência está dividida em duas subdimensões no ISH_{ajustado}, que serão apresentadas separadamente.

A subdimensão de Resiliência às Secas (que corresponde a toda a dimensão de resiliência do ISH original) não dependeu do balanço hídrico e da quantidade da população (únicos parâmetros alterados no cenário de 2035), assim, não houve alterações do diagnóstico de 2017 para a projeção de 2035. Portanto, foi possível observar pelos dados calculados e disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (2019) para esses dois anos, que a maior parte da RHJ apresentou grau médio de segurança hídrica. Por outro lado, na área costeira situada a menos de 10km do mar verificou-se um grau baixo de segurança hídrica (Figura 3d), fato que reflete o baixo potencial de armazenamento de água nas ottobacias mais próximas ao litoral. O volume potencial de armazenamento artificial foi quase nulo (em torno de 10^{-4} hm³/km²), devido a não existir reservatórios artificiais de volume significativo na RHJ. Poucas áreas apresentaram grau alto na subdimensão de resiliência às secas, a saber, em ottobacia a montante do Rio Jucu Braço Norte (Alto Jucu), e em partes do rio Jacarandá e do Rio Jucu (Baixo Jucu). Essas regiões, respectivamente, têm níveis um pouco menores do coeficiente de variação pluviométrica e maiores de infiltração (potencial de armazenamento subterrâneo) que as demais. O potencial de reservação natural (razão entre a vazão com 95% de permanência e a vazão média de longo termo) é máximo, pela classificação adotada, em praticamente toda a RHJ. Em análise geral, este cenário expressa potencial insuficiência dos estoques de águas naturais e artificiais para suprimento de demanda dos usos múltiplos da água em situação de estiagens severas e de seca.

Quanto à subdimensão de resiliência às inundações, aplicando o IVI (seu indicador único) na RHJ para o ano de 2035 (Figura 3e), percebe-se que todas as UPs possuem alguma ottobacia com grau mínimo para a nova dimensão, ou seja, contém áreas de alta vulnerabilidade às inundações. Isso corresponde a 27,36% da área da RHJ apresentando grau mínimo de segurança hídrica na dimensão. Apenas em uma pequena área próxima à foz do rio Jucu (0,61% da RHJ), foi observado o grau médio de segurança hídrica (área classificada como de baixa vulnerabilidade a inundações). No restante da RHJ (72,03% da área total) não foi contabilizado o grau de segurança hídrica por não apresentar vulnerabilidade à inundações conforme o IVI. Esses dados podem ser vistos detalhadamente na Tabela 2.

Tabela 2: Porcentagem da área da RHJ por grau do ISH_{ajustado} (2035) na subdimensão de Resiliência às Inundações. Células com hífen “-” representam área nula.

| Unidades de Planejamento (UPs) da Região Hidrográfica do Rio Jucu (RHJ) | | | | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Grau de segurança hídrica na dimensão Resiliência às Inundações | Alto Jucu (% de área da RHJ) | Baixo Jucu (% de área da RHJ) | Formate/ Marinho e Costeiro (% de área da RHJ) | Médio Jucu (% de área da RHJ) | Rio Jucu Braço Sul (% de área da RHJ) | Total da RHJ (% de área da RHJ) |
| Não se aplica | 18,04% | 16,72% | 1,26% | 29,21% | 6,80% | 72,03% |
| 1 - Mínimo | 1,50% | 4,73% | 6,43% | 3,60% | 11,10% | 27,36% |
| 2 - Baixo | - | - | - | - | - | - |
| 3 - Médio | - | 0,45% | 0,16% | - | - | 0,61% |
| Total geral | 19,54% (424,80 km ²) | 21,90% (476,03 km ²) | 7,85% (170,63 km ²) | 32,82% (713,46 km ²) | 17,90% (389,08 km ²) | 100,00% (2174,00 km ²) |

Fonte: os autores.

Parte dos resultados coincide com a percepção local exposta no encarte dos CBHs Jucu e Santa Maria da Vitória (Espírito Santo, 2016). Nesse encarte, identificaram-se como as áreas mais propensas à inundação, aquelas que estão situadas nas sedes urbanas e nas UPs Formate Marinho/Costeira e Rio Jucu Braço Sul. Essa primeira UP também foi identificada no ISH_{ajustado}. Já a segunda UP, ela não aparece no índice global do ISH_{ajustado} como uma das UPs mais críticas, mas tem extensas áreas de grau mínimo de segurança na subdimensão de resiliência às inundações. Analisando-se os registros no S2ID de eventos relacionados a alguns desastres relacionados ao excesso de água (Brasil, 2022), resumido na Figura 4, percebe-se que Viana e Marechal Floriano estão empatados em maior número de registros (9, cada um, relacionados às chuvas intensas e enxurradas). Seguem-se após esses municípios os de Cariacica (5 relacionados à enxurradas e chuvas intensas) e Vila Velha (4, relacionados às chuvas intensas e alagamentos). Domingos Martins (2 relacionados a chuvas intensas) e Guarapari (1 relacionado a inundação) apresentam a menor quantidade de registros. Comparando essas informações com o mapa da subdimensão resiliência às inundações (Figura 3e) percebe-se que Marechal Floriano (que está todo inserido na UP rio Jucu Braço Sul) apresenta grande parte dos trechos com IVI. Por outro lado, tanto Domingos Martins (que está majoritariamente contido nas UPs Rio Jucu Braço Norte e Alto Jucu) quanto Guarapari (que possui uma parte de sua área na UP Baixo Jucu) são os municípios com menos trechos vulneráveis, se comparado aos outros municípios na RHJ. Contudo, os registros (que em alguns casos tornaram-se decretos de Situação de Emergência ou Estados de Calamidade Pública) apontam que, ainda que poucas áreas sejam consideradas de alto risco, elas podem ter grande impacto no desenvolvimento da região.

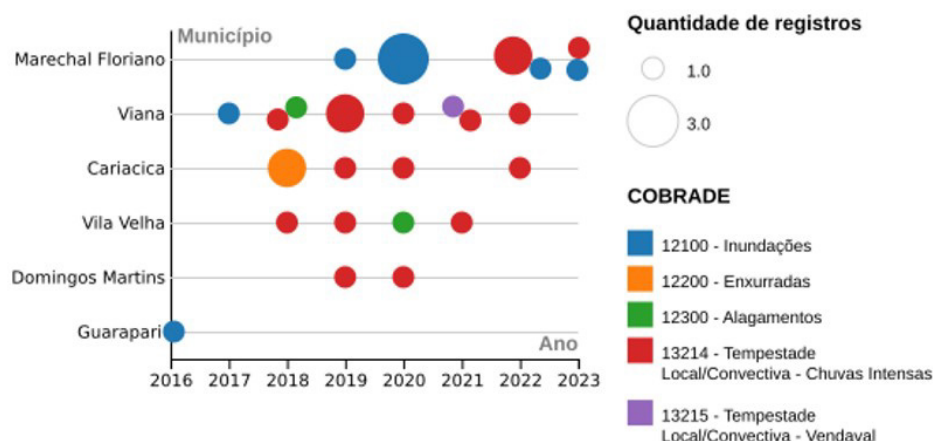


Figura 4: Quantidade de desastres hidrológicos e meteorológicos (restringindo-se aos relacionados a tempestade) entre 2013 e 2023 registrados no S2ID pelos municípios que contém a RHJ. O código dos desastres está conforme a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE). Foram contabilizados apenas registros com a situação de “registrado” e “reconhecido”. O primeiro registro relacionado aos tipos referidos de desastres entre os municípios citados foi apenas em 2016. Fonte: Adaptado de Brasil (2022).

3.2. AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE O ISH ORIGINAL E O ISH_{ajustado}

Na Figura 5a apresenta-se o resultado da aplicação do ISH_{ajustado} global, o qual agrupa as cinco dimensões da segurança hídrica. Por outro lado, nas Figuras 5b e 5c, é possível visualizar o recorte do ISH apenas com as quatro dimensões originais (agrupadas para os anos 2017 e 2035). Um resumo do percentual de área da RHJ que se enquadra em cada grau de segurança hídrica estimados pelo ISH_{ajustado} e pelo ISH original está apresentado na Tabela 3.

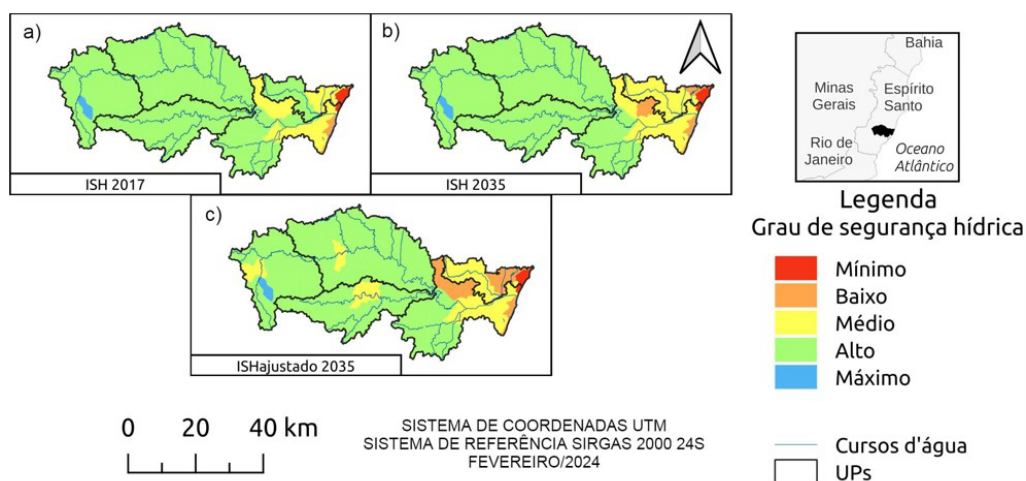


Figura 5: ISH (anos de 2017 e 2035) e ISH_{ajustado} (ano de 2035), aplicados à Região Hidrográfica do Rio Jucu.
Fonte: Os autores

Avaliando o resultado obtido por meio da aplicação do ISH global para o ano de 2017 (Figura 5b), notou-se que, considerando apenas as quatro dimensões originais, os menores graus de segurança hídrica foram encontrados para as regiões da faixa litorânea da RHJ, até 10 km da costa. Conforme a Tabela 3, há criticidade, com graus mínimo (0,79% da área da RHJ) e baixo (0,78% da área da RHJ) na UP do Formate/Marinho e Costeiro e no Baixo Jucu. Uma área correspondente a 10,45% da RHJ apresenta grau médio, com destaque para o Baixo Jucu e Formate/Marinho e Costeiro. As demais regiões apresentam grau alto (87,21% da área da RHJ), com pequena exceção na UP Alto Jucu (0,77% da área da RHJ) apresentando grau máximo.

Na projeção para 2035 do ISH (Figura 5c), ainda considerando apenas as quatro dimensões originais, houve diminuição de graus médio para baixo e de alto para médio em parte da UP Formate/Marinho e Costeiro e da UP Baixo Jucu. Nas demais áreas não houve alteração. Assim, de 2017 para 2035 (Tabela 3), passou-se para 81,03% da área da RHJ com grau alto de segurança hídrica, 14,83% com grau médio e 2,58% com grau baixo. As áreas com graus máximo (0,77% da área da RHJ) e mínimo (0,79% da área da RHJ) permaneceram as mesmas do ISH de 2017. Os graus alto e máximo de segurança hídrica de cada uma das quatro dimensões originais, foram observados, em sua maioria, nas UPs mais a montante, isto é, do Médio e Alto Jucu e do Braço Sul. Essas são regiões mais rurais (sendo que em muitas de suas subáreas não foram calculadas a dimensão humana), além de terem relevo íngreme e conter na época do diagnóstico a maioria da cobertura de vegetação natural da RHJ (Espírito Santo, 2016). Já as regiões mais a jusante, as UPs Formate/Marinho e Costeiro e a UP Baixo Jucu, são as mais críticas (todas as áreas classificadas com grau baixo e mínimo estão nessas duas UPs). Tal criticidade se observa tanto nas quatro dimensões segregadas do ISH original para 2035 (Figuras 3a a 3d) quanto nos dois anos de referência para as dimensões agrupadas (Figuras 5b e 5c). Essas UPs à jusante da RHJ são caracterizadas pela existência de aglomerados urbanos, pela distância de até 30km da costa e por serem mais planas comparadas às outras UPs. Conforme o PNSH (Agência Nacional de Águas, 2019c), áreas com grau baixo e mínimo no ISH requerem atenção quanto à infraestrutura hídrica existente de abastecimento urbano e de usos múltiplos.

Portanto, pelo ISH original da ANA, destaca-se a criticidade em lidar com as futuras demandas de água nas UPs Baixo Jucu e Formate/Marinho e Costeira. Esse cenário aponta para um comprometimento da disponibilidade quali/quantitativa de água nessas regiões, demonstradas por um excesso de demandas de água em relação à quantidade de água disponível.

Tabela 3: Percentual de área das UPs da RHJ por grau de segurança hídrica, considerando a aplicação do ISH (anos 2017 e 2035) e do ISH_{ajustado} (2035). Células com hífen “-” representam área nula.

| Unidades de Planejamento (UPs) da Região Hidrográfica do Rio Jucu (RHJ) | Alto Jucu (% de área da RHJ) | | | Baixo Jucu (% de área da RHJ) | | | Formate/Marinho e Costeiro (% de área da RHJ) | | | Médio Jucu (% de área da RHJ) | | | Rio Jucu Braço Sul (% de área da RHJ) | | | Total da RHJ (% de área da RHJ) | | | |
|---|----------------------------------|----------|----------|----------------------------------|----------|----------|---|----------|----------|----------------------------------|----------|----------|---------------------------------------|----------|----------|------------------------------------|----------|----------|------------------------------|
| | Grau de segurança hídrica | ISH 2017 | ISH 2023 | ISH _{ajustado} 2035 | ISH 2017 | ISH 2023 | ISH _{ajustado} 2035 | ISH 2017 | ISH 2023 | ISH _{ajustado} 2035 | ISH 2017 | ISH 2023 | ISH _{ajustado} 2035 | ISH 2017 | ISH 2023 | ISH _{ajustado} 2035 | ISH 2017 | ISH 2023 | ISH _{ajustado} 2035 |
| 1 - Mínimo | - | - | - | 0,15% | 0,15% | 0,15% | 0,64% | 0,64% | 0,64% | - | - | - | - | - | - | - | 0,79% | 0,79% | 0,79% |
| 2 - Baixo | - | - | - | 0,77% | 1,89% | 4,00% | 0,01% | 0,69% | 2,28% | - | - | 0,02% | - | - | - | - | 0,78% | 2,58% | 6,29% |
| 3 - Médio | 0,01% | 0,01% | 1,50% | 7,92% | 8,20% | 6,10% | 2,43% | 6,52% | 4,93% | 0,09% | 0,09% | 1,20% | - | - | 2,22% | 10,45% | 14,83% | 15,95% | |
| 4 - Alto | 18,75% | 18,75% | 17,27% | 13,05% | 11,65% | 11,65% | 4,77% | - | - | 32,73% | 32,73% | 31,60% | 17,90% | 17,90% | 15,68% | 87,21% | 81,03% | 76,19% | |
| 5 - Máximo | 0,77% | 0,77% | 0,77% | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,77% | 0,77% | 0,77% | |
| Total geral | 19,54% (424,80 km ²) | | | 21,90% (476,03 km ²) | | | 7,85% (170,63 km ²) | | | 32,82% (713,46 km ²) | | | 17,90% (389,08 km ²) | | | 100,00% (2174,00 km ²) | | | |

Fonte: os autores.

Comparando aos graus de segurança hídrica do ISH original (que não considera as inundações) (Figura 5c) com o ISH_{ajustado} (que considera a vulnerabilidade às inundações) (Figura 5a), ambos para 2035, observaram-se diminuições de grau de segurança hídrica em ottobacias de todas as UPs, sendo alguns desses locais notadamente influenciados pelo alto IVI (Figura 3e). Tais diminuições se devem ao caráter restritivo da nova dimensão, que permite apenas níveis de segurança hídrica entre mínimo e médio. Assim, a sua aplicação tendeu a diminuir a segurança hídrica global, indicando as regiões onde a vulnerabilidade às inundações seria um agravante para a segurança hídrica. Por esse motivo não houve áreas com aumento do grau de segurança hídrica no ISH_{ajustado}. A Tabela 3 detalha a alteração do grau de segurança hídrica entre os dois modelos. As UPs Formate Marinho/Costeira e Rio Jucu Braço Sul apresentaram a maior criticidade, pois em comparação com as áreas somadas de grau baixo no ISH original para essas duas UPs, expandiram-se em 144% as áreas com grau baixo de segurança hídrica no ISH_{ajustado}. Conforme ressalta o diagnóstico da RHJ realizado por Agência Estadual de Recursos Hídricos (Espírito Santo, 2016), o fato de as UPs Formate Marinho/Costeira e Baixo Jucu estarem sob área de influência de marés, pode aumentar o tempo de residência das cheias na região. Algumas ottobacias das UPs de montante (5% da área das UPs Alto e Médio Jucu) passam a destoar dos níveis mais altos de segurança hídrica, apresentando nível médio. Essas mesmas áreas que apresentaram nível médio as UPs de montante, não contém dados na dimensão humana (ou seja, apresentam nessa dimensão grau de segurança hídrica nulo), mas possuem grau de alta vulnerabilidade na subdimensão resiliência às inundações. Assim, Visto que essas áreas não entraram no cálculo da dimensão humana por não serem urbanas, mas que o IVI leva em conta a população vulnerável em seu cálculo, nota-se que essas áreas rurais também contém uma população exposta à insegurança hídrica por questões relacionadas a inundações e outros problemas relacionados ao excesso de água.

Logo, percebe-se que incorporar as inundações direto no ISH ajuda a destacar que certos locais são vulneráveis também a esse fator que está presente desde as primeiras definições de segurança hídrica (por exemplo, a de Global Water Partnership, 2000), e não somente à escassez d'água. Visto que inundação e escassez — às vezes tão opostas em relação à quantidade de água — são passíveis de agravamento tanto na variação sazonal quanto considerando mudanças climáticas, tais regiões precisam de atenção reforçada para haver promoção da segurança hídrica nelas. Portanto, a aplicação do ISH_{ajustado} na RHJ deu indícios de que esse modelo tende a ser mais aderente à realidade da segurança hídrica dessa região, quando comparado com seu modelo basilar. Igualmente, a adição das inundações no novo índice mostra-o como conceitualmente mais próximo do que o ISH original à definição de segurança hídrica adotada pela UN-Water (2013) e pela Agência Nacional de Águas (2019c) por apresentar os riscos relacionados à água de forma mais abrangente. Os resultados obtidos nessa aplicação de um novo fator apontam para a possibilidade de se tratar a segurança hídrica holisticamente e abarcando ainda outros assuntos em sua modelagem.

3.3. LIMITAÇÕES E POTENCIALIDADES DO MODELO ISH_{ajustado}

A seguir apresenta-se uma discussão sobre limitações e potencialidades do modelo ISH e do ISH_{ajustado} identificadas ao longo da pesquisa, os quais estão resumidos no Quadro 4.

Ao buscar indicadores para representar os riscos de inundações percebeu-se que no modelo ISH, e consequentemente no ISH_{ajustado}, informações com código de ottobacia (especialmente ottobacias da BHO

2013) ou mesmo distribuídas em forma de pontos (ou interpolados) são mais fáceis de se incorporar no ISH. Indicadores georreferenciados por município precisam passar por processos mais complexos, que envolvem álgebra de mapas. Também informações sem geolocalização, assim como os que possuem escala muito diferentes entre si, podem trazer problemas para a confecção dos mapas. O indicador IVI teve sua incorporação facilitada por haver disponibilidade de dados com informação por ottobacias. Ainda assim, verificou-se dificuldade pela diferença de base de dados, tendo o atlas de inundação seguindo a BHO de 2017 e o ISH seguindo a BHO de 2013. Como a BHO 2017 é a mais recente, é proveitoso haver uma atualização dos dados do ISH para os novos códigos de ottobacia. Ainda assim, o detalhamento por ottobacia é uma vantagem do ISH e outros índices que se baseiam nele, como o ISH_{ajustado}.

Sobre os indicadores utilizados em cada dimensão — tanto no ISH original quanto no ISH_{ajustado} — estes possuem caráter de aplicação nacional e detalhada, assim permitem que ambos os índices sejam aplicados em várias escalas (de nação a ottobacias) e especialmente aplicáveis em ambiente SIG. Por outro lado, essa busca de indicadores com dados suficientes para todo um país, faz com que algumas especificidades regionais sejam despercebidas. Um exemplo disso é a dimensão humana que apresentou grandes áreas sem dados sobre abastecimento, bem como a escala espacial do indicador da subdimensão resiliência às inundações (1:1.000.000) no índice ajustado, que fez com que alguns pontos de alta vulnerabilidade não aparecem no mapa ou aparecem como pouco vulneráveis. Exemplo: há uma região próxima à foz do rio Jucu, que baseado nos dados do IVI da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021b) e na reclassificação dos dados utilizada, tem grau de segurança médio na subdimensão de resiliência às inundações. Essa mesma área poderia passar para grau mínimo, caso fossem utilizados dados de vulnerabilidade à inundação em escala mais detalhada (1:50.000 e 1:100.000), como o do Instituto Estadual de Meio Ambiente (2013). Assim, é reforçada a necessidade de adaptação do ISH para as realidades e escalas locais, a fim de se obter análises mais realistas.

Quadro 4: Potencialidades e Limitações identificadas na aplicação do ISH_{ajustado}.

| Potencialidades | Limitações |
|---|---|
| ● Aplicável a diferentes escalas. | ● Base ottocodificada desatualizada. |
| ● Detalhamento espacial em ottobacias. | ● Contém indicadores que carecem de dados para algumas regiões. |
| ● Aplicável em SIG. | ● Dificuldade de modificar indicadores e pesos. |
| ● Podem ser acrescentadas outras dimensões e indicadores. | ● Difícil reprodução para outros anos, seguindo o manual metodológico do ISH e dados disponíveis no portal de metadados da ANA. |
| ● Visualização e aplicação práticas. | ● Estatisticamente frágil. |
| ● É baseado no indicador utilizado pela ANA, a qual é um dos órgãos superiores da gestão de recursos hídricos nacionalmente, portanto seu modelo tem influência no SINGERH. | ● Ainda não apresenta todas as dimensões da segurança hídrica. |
| ● Maior aderência à definição da Agência Nacional de Águas (2019c) e da UN-Water (2013). | |
| ● Melhor representação da segurança hídrica em regiões que sofrem com inundações. | |

Fonte: os autores.

Outra limitação do ISH original e das dimensões reaproveitadas no ISH_{ajustado}, diz respeito à modificação dos pesos dos indicadores para situações específicas. Essa modificação do índice pela ponderação de cada variável permitiria ajuste às realidades locais e a adição/supressão de indicadores em cada dimensão. No entanto, apesar de os dados brutos estarem disponíveis no portal de mercados da ANA, há dificuldade em sua manipulação: as dimensões humana e econômica apresentam indicadores por municípios, enquanto as demais apresentam por ottobacia. Esse foi um dos motivos que induziu a escolha metodológica de adicionar o IVI em uma subdimensão com o mesmo peso de uma nova dimensão no ISH_{ajustado}. Foi também devido a essas limitações percebidas na manipulação do modelo (falta de dados quantitativos nos metadados da ANA) que o grau de segurança hídrica para a subdimensão resiliência às inundações só foi calculado para o ano de 2035.

A partir da aplicação do ISH_{ajustado}, percebeu-se que é possível qualificar a análise de segurança hídrica para além dos fatores intervenientes e das dimensões apresentadas no ISH original. Deste modo, a aplicação do IVI apresentou uma sugestão de como aplicar outros fatores intervenientes na segurança hídrica no modelo original do ISH. Uma vantagem de que o ISH tenha sido escolhido como base para esse estudo é que seu tipo baseado em indicadores e aplicável em SIG permite a

apresentação de seus resultados em forma visual. Assim, mesmo que esses tipos de modelos possuam uma fragilidade estatística (geralmente não apresentam margem de erro e possuem classificações que tendem à subjetividade), a visualização em mapas facilita aplicações práticas, como indicar áreas prioritárias para intervenção. Esse modelo também é amplamente divulgado entre membros do Sistema Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (SINGREH), o que nacionalmente pode tornar suas adaptações mais fáceis de serem incorporadas para ações desse público. Adicionalmente, como discutido na seção anterior, o ISH_{ajustado} tem vantagem sobre o ISH original em ser mais coerente conceitualmente e representar a segurança hídrica de regiões de maneira mais abrangente, não se restringindo a tratar segurança hídrica como sinônimo de escassez e incorporando as inundações.

4. CONCLUSÃO

O aprimoramento do Índice de Segurança Hídrica da ANA (ISH) (Agência Nacional de Águas, 2019b), adicionando nele a subdimensão resiliência às inundações, que possui o “Índice de Vulnerabilidade às Inundações” (IVI) (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2021b) como seu indicador único, culminou num modelo mais abrangente e coerente com o conceito de segurança hídrica da UN-Water (2013) e da Agência Nacional de Águas (2019c). A essa nova versão do ISH denominou-se ISH_{ajustado}.

Além disso, o ISH_{ajustado} mostrou-se sensível ao contexto da segurança hídrica regional, ao ser aplicado na Região Hidrográfica do Rio Jucu/ES. Isso porque ao incluir-se o IVI no ISH_{ajustado}, o grau de segurança hídrica diminuiu, quando comparado ao ISH original em algumas ottobacias, sobretudo naquelas mais próximas ao litoral e às sedes urbanas. Esses locais são reconhecidamente alguns dos mais críticos na área de estudo, no que diz respeito às inundações e às demandas para uso de água, confirmando os resultados do ISH_{ajustado}. Abranger as inundações no escopo do novo modelo permitiu acrescentar nele um fator limitante para o desenvolvimento sustentável de diversas regiões e que é fundamental para prevenção e mitigação de desastres (sendo desastres relacionados às inundações um dos mais comuns ao redor do mundo).

Conclui-se que a adição das inundações na análise de segurança hídrica faz com que sua modelagem não se restrinja à escassez hídrica e aponta para a necessidade de se desenvolver modelos mais abrangentes, que abordem os diversos fatores intervenientes que surgem da definição de segurança hídrica que estiver sendo adotada.

Reconhecem-se as limitações do ISH_{ajustado}, o qual se baseou em dados com escalas espaço-temporais distintas. Logo, recomenda-se que futuras pesquisas adaptem o ISH_{ajustado} às realidades locais, incorporando novos indicadores ao índice e ajustando o peso e as projeções dos indicadores existentes, para obter análises mais realistas da segurança hídrica e superar as referidas limitações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) por bolsas concedidas. Também se agradece ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGEA/UFES), ao Núcleo Estratégico em Água e Desenvolvimento (NEADES) e ao Laboratório de Gestão de Recursos Hídricos (LabGest/UFES) pelo apoio técnico e operacional concedido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allan, J. V., Kenway, S. J., & Head, B. W. (2018). Urban water: security-what does it mean? *Urban Water Journal*, 15(9), 899-910. <http://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1574843>
- Almeida, F. S., Costa, C. T. F., Paula Filho, F. J., & Coutinho, J. V. (2022). Segurança hídrica: um estudo de caso na sub-bacia hidrográfica do rio Salgado – Ceará. In *Anais do XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste; XV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa*. Porto Alegre: ABRHidro. Recuperado em 10 de fevereiro de 2024, de <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/187/XVISRHNE0226-1-20220720-234756.pdf>
- Agência Nacional de Águas. (2014). *Atlas de Vulnerabilidade a Inundações*. Brasília: ANA.
- Agência Nacional de Águas. (2019a). *Índice de Segurança Hídrica, ISH: manual metodológico*. Brasília: ANA. Recuperado em 7 de fevereiro de 2024, de https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c349dc5a-0c01-4f14-9519-e3340fef2c66/attachments/Metodologia_ISH.pdf

- Agência Nacional de Águas. (2019b). *Índice de Segurança Hídrica*. Brasília: ANA. Recuperado em 7 de fevereiro de 2024, de <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c349dc5a-0c01-4f14-9519-e3340fef2c66>
- Agência Nacional de Águas – ANA. (2019c). *Plano Nacional de Segurança Hídrica* (112 p.). Brasília: ANA. Recuperado em 23 de janeiro de 2023, de <http://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2021a). *Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano*. Brasília: ANA. Recuperado em 7 de fevereiro de 2024, de https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/asp/download.asp?codigo=151307&tipo_midia=2&iIndexSrv=1&iUsuario=0&obra=90683&tipo=1&iBanner=0&iIdioma=0
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2021b). *Atlas de vulnerabilidade a inundações*. Brasília: ANA. Recuperado em 23 de dezembro de 2023, de <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/2cfa808b-b370-43ef-8107-5c3bfd7acf9c>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2024). *Impacto da mudança climática nos recursos hídricos no Brasil: sumário executivo*. Brasília: ANA. Recuperado em 2 de fevereiro de 2024, de https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-lanca-estudo-sobre-impactos-da-mudanca-climatica-nos-recursos-hidricos-das-diferentes-regioes-do-brasil/resumo-executivo_26012024.pdf
- Barbosa, P. M. (2022). *Segurança hídrica e dimensão social: um olhar sobre a região metropolitana de Goiânia* (Tese de doutorado). Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. Recuperado em 19 de janeiro de 2023, de <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/12192>
- Brasil. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil – SEDEC. (2022). *Relatórios*. Brasília: Sistema Integrado de Informações sobre Desastres. Recuperado em 10 de fevereiro de 2022, de <https://s2id.mi.gov.br/paginas/relatorios>
- Brito, H. C., Brito, Y. M. A., & Rufino, I. A. A. (2022). The Brazilian Water Security Index and the Brazilian semi-arid: challenges and future risks. *Revista Brasileira de Cartografia*, 74(1), 1-15. <http://doi.org/10.14393/rbcv74n1-60928>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED. (2023). *2022 disasters in numbers*. Brussels: CRED. Recuperado em 7 de fevereiro de 2024, de https://cred.be/sites/default/files/2022_EMDAT_report.pdf
- Deina, M. A., & Coelho, A. L. N. (2015). A Influência da Zona Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) nos Eventos de Inundação no Baixo Jucu em Vila Velha (ES). *Geografia*, 24(2), 5-23. <http://dx.doi.org/10.5433/2447-1747.2015v24n2p05>
- Espírito Santo. Agência Estadual de Recursos Hídricos – AGERH. (2016). *CBHs Jucu e Santa Maria da Vitória: enquadramento de corpos de água e plano de recursos hídricos*. Vitória. Recuperado em 23 de dezembro de 2023, de <https://agerh.es.gov.br/Media/agerh/Documenta%C3%A7%C3%A3o%20CBHs/CBHs%20Jucu%20e%20Santa%20Maria%20da%20Vit%C3%B3ria%20-%20Enquadramento%20de%20Corpos%20de%20%C3%81gua%20e%20Plano%20de%20Recursos%20H%C3%ADricos.pdf>
- Espírito Santo. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. (2021, 8 de setembro). Resolução nº 3, de 8 de setembro de 2021. *Diário Oficial [do] Estado do Espírito Santo*, Vitória.
- Gerlak, A. K., House-Peters, L., Varady, R. G., Albrecht, T., Zúñiga-Terán, A., Granade, R. R., Cook, C., & Scott, C. A. (2018). Water security: a review of place-based research. *Environmental Science & Policy*, 82, 79-89. <http://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.009>
- Grafton, R. (2017). Responding to the ‘wicked problem’ of water insecurity. *Water Resources Management*, 31(10), 3023-3041. <http://doi.org/10.1007/s11269-017-1606-9>
- Grey, D., & Sadoff, W. (2007). Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 9(6), 545-571. <http://doi.org/10.2166/wp.2007.021>
- Global Water Partnership – GWP. (2000). *Towards water security: a framework for action*. Stockholm: GWP. Recuperado em 20 de janeiro de 2023, de <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/references/towards-water-security.-a-framework-for-action.-executive-summary-gwp-2000.pdf>
- Harmancioglu, N. B. (2017). Overview of water policy developments: pre- and post-2015 Development Agenda. *Water Resources Management*, 31(10), 3001-3021. <http://doi.org/10.1007/s11269-017-1725-3>
- Holz, I. H. (2012). *Urbanização e impactos sobre áreas de preservação permanente: o caso do Rio Jucu-ES* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Artes. Recuperado em 10 de fevereiro de 2024, de <http://repositorio.ufes.br/handle/10/4408>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2023). *IBGE Cidades*. Rio de Janeiro. Recuperado em 7 de fevereiro de 2024, de <https://cidades.ibge.gov.br>

- Instituto Estadual de Meio Ambiente. (2013). *Alerta! Atlas de vulnerabilidade a inundação*. Recuperado em 23 de abril de 2023, de <https://alerta.es.gov.br/atlas-de-vulnerabilidade-a-inundacao>
- Instituto Jones dos Santos Neves – IJSN. (2021). *Diagnóstico de componentes ambientais relacionados à temática água e desenvolvimento sustentável no Espírito Santo*. Vitória. Recuperado em 27 de fevereiro de 2023, de <http://www.ijsn.es.gov.br/component/attachments/download/7401>
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. (2023). Summary for policymakers. In Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (Ed.), *Climate Change 2023: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1-34). Geneva: IPCC. <http://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Krichene, H., Geiger, T., Frieler, K., Willner, S. N., Sauer, I., & Otto, C. (2021). Long-term impacts of tropical cyclones and fluvial floods on economic growth—Empirical evidence on transmission channels at different levels of development. *World Development*, 144, 105475. <http://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105475>
- Marcal, J., Antizar-Ladislao, B., & Hofman, J. (2021). Addressing water security: an overview. *Sustainability*, 13(24), 13702. <http://doi.org/10.3390/su132413702>
- Marins, M. F., Caravieri, A., Sobral, B. S., & Belém, A. L. (2021). Segurança hídrica: um estudo de caso na sub-bacia hidrográfica do rio Salgado – Ceará. In *Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Porto Alegre: ABRHidro. Recuperado em 10 de fevereiro de 2024, de <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/142/XXIV-SBRH0863-1-20210630-171838.pdf>
- Marttunen, M., Lienert, J., & Belton, V. (2017). Structuring problems for multi-criteria decision analysis in practice: a literature review of method combinations. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 1-17. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041>
- Mishra, A., Alnahit, A., & Campbell, B. (2021). Impact of land uses, drought, flood, wildfire, and cascading events on water quality and microbial communities: a review and analysis. *Journal of Hydrology*, 596, 125707. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125707>
- Mucherera, B., & Spiegel, S. (2022). Forced displacement: critical lessons in the protracted aftermath of a flood disaster. *GeoJournal*, 87(5), 3855-3875. <http://doi.org/10.1007/s10708-021-10471-w>
- Murata, R., Tokuda, D., Kiguchi, M., Noda, K., & Oki, T. (2023). Impact of flood experiences and anxiety on subjective well-being. *Hydrological Research Letters*, 17(3), 56-61. <http://doi.org/10.3178/hrl.17.56>
- Octavianti, T. (2020). Rethinking water security: how does flooding fit into the concept? *Environmental Science & Policy*, 106, 145-156. <http://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.01.010>
- Octavianti, T., & Staddon, C. (2021). A review of 80 assessment tools measuring water security. *WIREs. Water*, 8(3), e1516. <http://doi.org/10.1002/wat2.1516>
- UN-Water. (2013). *Water security and the global water agenda: a UN-water analytical brief*. Ontario: United Nations University, Institute for Water, Environment and Health. Recuperado em 12 de janeiro de 2023, de <https://www.unwater.org/publications/water-security-and-global-water-agenda>
- Pozzebon, G. R., Belladonna, R., Bortolin, T. A., & Vargas, T. (2022). Proposta de um novo método para a definição de indicadores de segurança hídrica no abastecimento público. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 27(5), 947-956. <http://doi.org/10.1590/s1413-415220210325>
- Soares Neto, P., & Pedrosa, V. (2018). *Construindo a segurança hídrica*. Vitória: GSA Gráfica e Editora
- Srdjevic, Z., Bajcetic, R., & Srdjevic, B. (2012). Identifying the criteria set for multicriteria decision making based on SWOT/PESTLE analysis: a case study of reconstructing a water intake structure. *Water Resources Management*, 26(12), 3379-3393. <http://doi.org/10.1007/s11269-012-0077-2>
- Zeng, Z., Guan, D., Steenge, A. E., Xia, Y., & Mendoza-Tinoco, D. (2019). Flood footprint assessment: a new approach for flood-induced indirect economic impact measurement and post-flood recovery. *Journal of Hydrology*, 579, 124204. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124204>

Contribuições dos autores:

Daniel Ben-Hur Silva de Oliveira: conceituação, metodologia, validação, análise formal, investigação, escrita - rascunho original, visualização.

Bruno Peterle Vaneli: validação, escrita - revisão e edição, supervisão.

Edmilson Costa Teixeira: escrita - revisão e edição, supervisão, aquisição de financiamento.