MODELO ANALÍTICO DE VULNERABILIDADE HIDROAMBIENTAL PARA O BAIXO RIO SÃO FRANCISCO: UMA PROPOSTA INTEGRADA DE AVALIAÇÃO

Eudes de Oliveira Bomfim [1] *& Carlos Alexandre Borges Garcia* [2]

RESUMO – O Baixo Rio São Francisco apresenta elevada complexidade hidroambiental resultante da interação entre alterações no regime hidrológico, processos limnológicos, dinâmica trófica e influência flúvio-estuarina. Apesar dos avanços observados no monitoramento ambiental, persistem limitações relacionadas à integração dessas dimensões em estruturas analíticas capazes de representar a vulnerabilidade hidroambiental de forma sistêmica. Nesse contexto, o presente estudo propõe o Modelo Analítico de Vulnerabilidade Hidroambiental para o Baixo Rio São Francisco (MAIAH-BSF), concebido como uma estrutura integrada de avaliação para sistemas fluviais regulados. A construção do modelo fundamentou-se em referenciais da hidrologia ecológica, ecologia de ecossistemas aquáticos, sistemas socioecológicos e avaliação ambiental integrada. O *framework* foi estruturado em cinco dimensões analíticas: Pressões Hidrológicas e Climáticas, Estado Limnológico, Estado Trófico e Nutrientes, Estrutura e Respostas Hidroecológicas e Dinâmica Flúvio-Estuarina. A operacionalização do modelo foi realizada por meio da seleção de vinte indicadores ecológicos e ambientais organizados em uma arquitetura analítica integrada. Como estrutura de síntese, propõe-se o Índice Integrado de Vulnerabilidade Hidroambiental (IIVH), destinado a apoiar o monitoramento ambiental e a gestão de recursos hídricos em sistemas flúvio-estuarinos submetidos à regulação hidrológica.

ABSTRACT– The Lower São Francisco River exhibits high hydroenvironmental complexity resulting from the interaction among altered hydrological regimes, limnological processes, trophic dynamics, and fluvial-estuarine influences. Despite advances in environmental monitoring, significant challenges remain regarding the integration of these dimensions into analytical frameworks capable of representing hydroenvironmental vulnerability from a systemic perspective. In this context, this study proposes the Analytical Model of Hydroenvironmental Vulnerability for the Lower São Francisco River (MAIAH-BSF), conceived as an integrated assessment framework for regulated river systems. The model was developed based on concepts derived from ecological hydrology, aquatic ecosystem ecology, social-ecological systems, and integrated environmental assessment. The framework comprises five analytical dimensions: Hydrological and Climatic Pressures, Limnological Condition, Trophic State and Nutrients, Hydroecological Structure and Responses, and Fluvial-Estuarine Dynamics. Model operationalization was achieved through the selection of twenty ecological and environmental indicators organized within an integrated analytical architecture. As a synthesis component, the Integrated Hydroenvironmental Vulnerability Index (IHVI) is proposed to support environmental monitoring and water resources management in fluvial-estuarine systems subjected to hydrological regulation.

Palavras-Chave – Vulnerabilidade hidroambiental; Sistemas flúvio-estuarinos; Recursos hídricos.

[1]) Pesquisador independente. Aracaju, Sergipe, Brasil, Aracaju/SE, Brasil. e-mail: eudes.bomfim1977@gmail.com
[2]) Universidade Federal de Sergipe. Cidade Univ. Prof. José Aloísio de Campos. Av. Marcelo Deda Chagas, s/n, Bairro Rosa Elze, CEP: 49107-230, São Cristóvão/SE, Brasil. e-mail: cgarcia@academico.ufs.br

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas fluviais constituem ecossistemas complexos cuja dinâmica resulta da interação entre processos hidrológicos, físicos, químicos e biológicos que operam em diferentes escalas espaciais e temporais. Em rios regulados por barragens e reservatórios, essas interações tornam-se ainda mais complexas em razão das alterações impostas ao regime natural de fluxo, ao transporte de sedimentos, à disponibilidade de nutrientes e à organização das comunidades aquáticas, ampliando os desafios para o monitoramento ambiental e a gestão sustentável dos recursos hídricos.

O Baixo Rio São Francisco representa um exemplo emblemático desse contexto. A regulação hidrológica da bacia modificou significativamente os padrões naturais de vazão, enquanto mudanças climáticas, usos múltiplos da água, alterações no aporte de sedimentos e a influência flúvio-estuarina passaram a atuar de forma simultânea sobre a dinâmica hidroambiental. Como consequência, observam-se alterações nas características físico-químicas da água, na disponibilidade de nutrientes, na produtividade biológica e na estrutura das comunidades aquáticas.

Embora o monitoramento ambiental tenha avançado nas últimas décadas, grande parte das abordagens permanece centrada na análise de variáveis isoladas, dificultando a compreensão das interações que determinam a vulnerabilidade hidroambiental em sistemas complexos. Permanece, portanto, a necessidade de modelos capazes de integrar, em uma estrutura analítica única, as relações entre pressões hidrológicas e climáticas, condições limnológicas, dinâmica trófica, respostas hidroecológicas e processos associados à influência flúvio-estuarina.

Diante desse cenário, este estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: como estruturar um modelo analítico capaz de representar, de forma integrada, os principais processos responsáveis pela geração da vulnerabilidade hidroambiental em sistemas fluviais regulados sob influência flúvio-estuarina?

Para responder a essa questão, propõe-se o Modelo Analítico de Vulnerabilidade Hidroambiental para o Baixo Rio São Francisco (MAIAH-BSF), concebido como um framework destinado a integrar essas dimensões em uma estrutura única de avaliação. O modelo articula processos hidrológicos, limnológicos, tróficos, hidroecológicos e flúvio-estuarinos, buscando representar as relações que condicionam a vulnerabilidade do sistema.

Assim, o objetivo deste artigo consiste em propor e fundamentar o Modelo Analítico de Vulnerabilidade Hidroambiental para o Baixo Rio São Francisco (MAIAH-BSF), apresentando sua arquitetura conceitual, suas dimensões analíticas e sua estrutura de operacionalização como

instrumento de apoio ao monitoramento ambiental e à gestão dos recursos hídricos em sistemas fluviais regulados.

2 VULNERABILIDADE HIDROAMBIENTAL EM SISTEMAS FLÚVIO-ESTUARINOS

A compreensão da vulnerabilidade hidroambiental exige o reconhecimento de que os ecossistemas aquáticos constituem sistemas complexos formados por múltiplas interações entre processos hidrológicos, ecológicos, climáticos e antrópicos. Nesse contexto, abordagens baseadas em parâmetros isolados frequentemente apresentam limitações para explicar as dinâmicas que condicionam a degradação ambiental, uma vez que tendem a desconsiderar os mecanismos de interação e retroalimentação que caracterizam os sistemas naturais.

2.1 Vulnerabilidade Hidroambiental e Sistemas Socioecológicos: Fundamentos para uma Abordagem Integrada

A abordagem dos Sistemas Socioecológicos (SES), proposta por Ostrom (2009), oferece uma base teórica consistente para compreender a complexidade inerente aos sistemas hidroambientais. Segundo essa perspectiva, a sustentabilidade dos recursos naturais depende da interação entre componentes biofísicos, sistemas de governança e usuários, configurando subsistemas interdependentes cujas dinâmicas não podem ser analisadas de forma isolada. Corroborando essa abordagem, Binder *et al.* (2013) destacam que modelos integradores apresentam maior capacidade para representar relações bidirecionais, processos adaptativos e dinâmicas não lineares, características frequentemente observadas em ecossistemas aquáticos complexos.

No campo da gestão ambiental, essa compreensão tem impulsionado a adoção de modelos capazes de integrar diferentes componentes ecológicos em estruturas analíticas unificadas. Piet *et al.* (2020) e Link *et al.* (2017) argumentam que a efetividade da gestão baseada em ecossistemas depende da incorporação simultânea de fatores físicos, químicos e biológicos, enquanto Barton *et al.* (2018) ressaltam que avaliações ambientais integradas somente produzem resultados úteis à tomada de decisão quando conseguem representar adequadamente as interdependências existentes entre os processos ambientais.

Nessa perspectiva, a vulnerabilidade hidroambiental pode ser compreendida como uma propriedade emergente resultante da interação entre pressões externas, sensibilidade ecológica e capacidade de resposta do sistema. Lei *et al.* (2014) destacam que vulnerabilidade, resiliência e adaptação constituem componentes interdependentes de um mesmo processo, cuja manifestação depende das características estruturais e funcionais do ecossistema analisado.

No âmbito dos ecossistemas aquáticos, a literatura demonstra que alterações hidrológicas representam um dos principais mecanismos indutores de vulnerabilidade. O paradigma do regime

natural de fluxo, proposto por Poff *et al.* (1997), estabelece que a integridade ecológica dos rios depende da manutenção da variabilidade natural dos fluxos. Complementando essa abordagem, Bunn e Arthington (2002) demonstram que modificações no regime hidrológico promovem alterações em habitats, processos ecológicos e padrões de biodiversidade, produzindo efeitos que se propagam por toda a estrutura do ecossistema. Avanços recentes reforçam essa compreensão ao evidenciar que métricas hidrológicas somente adquirem significado ecológico quando relacionadas aos processos funcionais que sustentam as comunidades aquáticas (Yarnell *et al.*, 2020), sendo necessária sua integração com indicadores ecológicos capazes de representar a condição ambiental do sistema (Yates *et al.*, 2019).

No caso do Baixo Rio São Francisco, essas questões assumem importância adicional em razão da presença de uma extensa zona de transição flúvio-estuarina, na qual processos hidrológicos continentais interagem continuamente com mecanismos estuarinos e marinhos. Conforme demonstrado por Cavalcante, Miranda e Medeiros (2017), a dinâmica estuarina do sistema resulta da interação permanente entre vazão fluvial e forçantes oceânicas, produzindo gradientes ambientais complexos que influenciam diretamente sua organização ecológica.

Diante desse contexto, a vulnerabilidade hidroambiental é compreendida neste estudo como uma propriedade emergente do sistema, resultante da interação entre pressões hidrológicas e climáticas, condições limnológicas, disponibilidade de nutrientes, respostas ecológicas e influência flúvio-estuarina. Essa concepção constitui o fundamento teórico para a construção do Modelo Analítico de Vulnerabilidade Hidroambiental para o Baixo Rio São Francisco (MAIAH-BSF).

3 PERCURSO METODOLÓGICO DE CONSTRUÇÃO DO MAIAH-BSF

A construção do Modelo Analítico de Vulnerabilidade Hidroambiental para o Baixo Rio São Francisco (MAIAH-BSF) foi estruturada de forma sequencial, contemplando três etapas complementares: (i) definição da arquitetura conceitual do modelo; (ii) identificação das dimensões analíticas e dos indicadores representativos dos processos hidroambientais; e (iii) desenvolvimento de uma estrutura síntese capaz de integrar as diferentes dimensões da vulnerabilidade hidroambiental por meio do Índice Integrado de Vulnerabilidade Hidroambiental (IIVH).

3.1 Arquitetura Conceitual do MAIAH-BSF

A arquitetura conceitual do MAIAH-BSF foi desenvolvida para representar a vulnerabilidade hidroambiental como uma propriedade emergente da interação entre processos hidrológicos, limnológicos, tróficos, hidroecológicos e flúvio-estuarinos. Em vez de considerar esses processos de forma isolada, o modelo organiza-os em uma estrutura analítica integrada capaz de representar os principais mecanismos associados à geração da vulnerabilidade em sistemas fluviais regulados.

A organização estrutural do modelo foi fundamentada nos pressupostos da hidrologia ecológica e da ecologia de ecossistemas aquáticos. Conforme demonstrado por Poff *et al.* (1997), Bunn e Arthington (2002) e Yarnell *et al.* (2020), alterações na magnitude, frequência, duração e sazonalidade dos fluxos exercem influência direta sobre habitats aquáticos, processos ecológicos e padrões de biodiversidade. Dessa forma, as condições hidrológicas foram consideradas o principal componente desencadeador das transformações observadas no sistema hidroambiental.

Com base nesse entendimento, o MAIAH-BSF foi estruturado em cinco dimensões analíticas complementares: Pressões Hidrológicas e Climáticas, Estado Limnológico, Estado Trófico e Nutrientes, Estrutura e Respostas Hidroecológicas e Dinâmica Flúvio-Estuarina. Essas dimensões representam diferentes níveis de organização ecológica e foram selecionadas por sua capacidade de sintetizar os principais mecanismos associados à geração da vulnerabilidade hidroambiental.

A dimensão Pressões Hidrológicas e Climáticas representa as forças motrizes responsáveis por alterar o funcionamento do sistema, incluindo mudanças no regime de vazões, variabilidade hidrológica, ocorrência de eventos extremos e anomalias climáticas. Essas pressões influenciam diretamente as condições ambientais do meio aquático, representadas pela dimensão Estado Limnológico, responsável por expressar alterações físico-químicas relacionadas à qualidade da água e ao funcionamento metabólico do sistema.

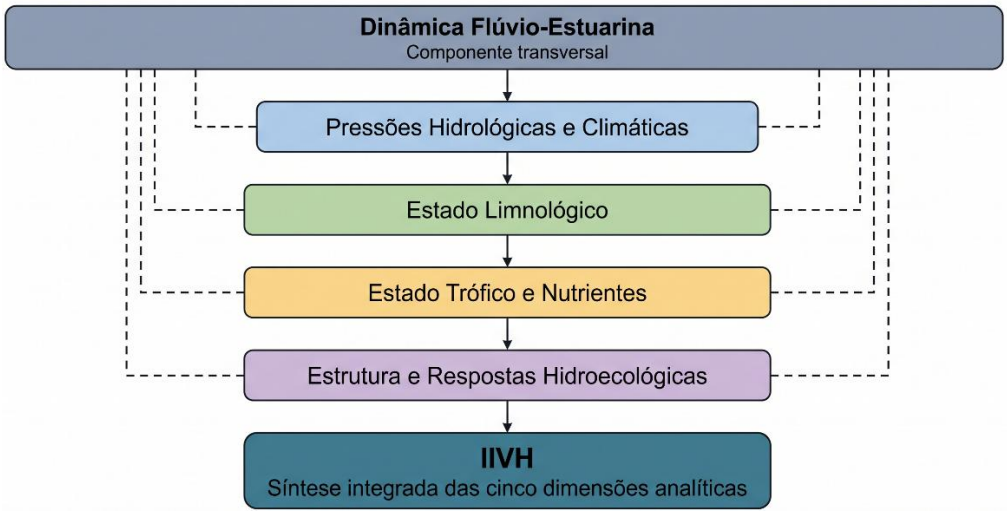
As condições limnológicas repercutem sobre a disponibilidade, o transporte e a ciclagem de nutrientes, afetando processos associados à produtividade biológica e ao enriquecimento ambiental, sintetizados na dimensão Estado Trófico e Nutrientes. Por sua vez, as alterações acumuladas ao longo dessas dimensões manifestam-se nas comunidades biológicas, cuja estrutura e funcionamento são representados pela dimensão Estrutura e Respostas Hidroecológicas.

Como elemento distintivo do modelo, a dimensão Dinâmica Flúvio-Estuarina foi incorporada para representar a influência dos processos de transição entre os ambientes fluvial e marinho. Diferentemente das demais dimensões, sua função não consiste em representar uma etapa específica da cadeia causal. No contexto do Baixo Rio São Francisco, essa dimensão atua como elemento modulador dos processos hidroambientais, influenciando simultaneamente a hidrodinâmica, a salinidade, a disponibilidade de nutrientes e a distribuição dos organismos aquáticos.

Por fim, o MAIAH-BSF foi concebido em duas camadas complementares. A primeira corresponde à camada conceitual, responsável por representar os processos ecológicos que estruturam a vulnerabilidade hidroambiental. A segunda corresponde à camada operacional, composta pelo conjunto de indicadores e procedimentos de agregação que permitem transformar informações ambientais em medidas sintéticas de monitoramento. Essa distinção assegura simultaneamente

coerência teórica e aplicabilidade prática, permitindo que o modelo seja utilizado tanto como instrumento analítico quanto como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos. A Figura 1 sintetiza a arquitetura do modelo.

Figura 1. Arquitetura Conceitual do MAIAH-BSF



Fonte: Elaboração própria.

Como toda representação analítica de sistemas complexos, o modelo reconhece que os processos ecológicos operam por meio de mecanismos de retroalimentação e respostas não lineares. Alterações na produtividade fitoplanctônica, por exemplo, podem reduzir a transparência da água e modificar condições limnológicas, ao passo que mudanças na composição biológica podem influenciar a ciclagem de nutrientes, a disponibilidade de recursos e o funcionamento do ecossistema. Dessa forma, a arquitetura proposta deve ser interpretada como uma representação simplificada dos principais mecanismos de geração da vulnerabilidade hidroambiental, e não como uma sequência estritamente linear de causa e efeito.

3.2 Operacionalização das Dimensões Analíticas

A operacionalização do MAIAH-BSF foi realizada por meio da seleção de vinte indicadores capazes de representar os principais processos associados à geração da vulnerabilidade hidroambiental em sistemas flúvio-estuarinos. A seleção foi orientada por três critérios complementares: (i) relevância ecológica, considerando sua capacidade de representar processos determinantes da vulnerabilidade hidroambiental; (ii) recorrência na literatura especializada, privilegiando indicadores amplamente empregados em estudos de hidrologia, limnologia e monitoramento ambiental; e (iii) viabilidade operacional, considerando a disponibilidade dos dados em programas convencionais de monitoramento. Esses critérios asseguram coerência entre a fundamentação conceitual do modelo e sua aplicabilidade como instrumento de monitoramento ambiental (Quadro 1).

Quadro 1. Estrutura Operacional do Modelo Analítico de Vulnerabilidade Hidroambiental para o Baixo Rio São Francisco (MAIAH-BSF)

Dimensão	Indicador	Unidade/Métrica	Significado ecológico
Pressões Hidrológicas e Climáticas	Vazão média	m³/s	Intensidade da descarga fluvial
	Variabilidade hidrológica	Coeficiente de variação (%)	Alterações do regime de fluxo
	Frequência de Eventos extremos	nº eventos/ano	Intensidade de Distúrbios hidrológicos
	Índice Padronizado de Precipitação (SPI-12)	índice padronizado (adimensional)	Pressão climática regional
Estado Limnológico	Oxigênio dissolvido	mg/L	Condição metabólica do sistema
	Ph	unidade	Equilíbrio químico da água
	Transparência	M	Disponibilidade de luz
	Condutividade	µS/cm	Concentração de íons dissolvidos
	Temperatura da água	°C	Controle dos processos biológicos
Estado Trófico e Nutrientes	Nitrogênio Total	mg/L	Disponibilidade de nutrientes
	Fósforo Total	mg/L	Potencial de enriquecimento
	Clorofila-a	µg/L	Biomassa fitoplanctônica
	Relação N:P	Razão	Limitação nutricional
Estrutura e Respostas Hidroecológicas	Riqueza de espécies	nº espécies	Complexidade biológica
	Diversidade (Shannon)	H'	Organização ecológica
	Grupos funcionais fitoplanctônicos	Abundância relativa	Respostas ambientais
Dinâmica Flúvio-Estuarina	Salinidade	PSU	Influência marinha
	Intrusão salina	Km	Alcance da cunha salina
	Estratificação vertical	ΔPSU	Mistura da coluna d'água
	Gradiente estuarino	PSU/km	Conectividade flúvio-estuarina

Fonte: Elaboração própria a partir da literatura revisada (2026).

Os indicadores apresentados no Quadro 1 foram organizados em cinco dimensões analíticas complementares, estruturadas para representar diferentes níveis de organização dos processos hidroambientais. Essa organização permite integrar pressões hidrológicas e climáticas, condições limnológicas, dinâmica trófica, respostas hidroecológicas e influência flúvio-estuarina em uma estrutura analítica única, preservando simultaneamente a interpretação dos indicadores individuais e a síntese proporcionada pelo Índice Integrado de Vulnerabilidade Hidroambiental (IIVH).

3.3 Construção do Índice Integrado de Vulnerabilidade Hidroambiental (IIVH)

A construção do Índice Integrado de Vulnerabilidade Hidroambiental (IIVH) foi estruturada em três etapas: (i) normalização dos indicadores, (ii) cálculo dos escores dimensionais e (iii) agregação das dimensões em um índice sintético único. Inicialmente, os indicadores são normalizados pelo método Min-Max, amplamente utilizado na construção de índices ambientais compostos, permitindo sua conversão para uma escala adimensional compreendida entre 0 e 1.

- **Normalização dos indicadores**

$$I_{norm} = \frac{I_i - I_{min}}{I_{máx} - I_{min}} \quad (1)$$

Onde, I_{norm} = valor normalizado do indicador, I_i = valor observado, I_{min} = valor mínimo da série e $I_{máx}$ = valor máximo da série.

- **Cálculo dos escores dimensionais**

Após a normalização, procede-se ao cálculo dos escores dimensionais. Cada dimensão é representada pela média aritmética simples dos indicadores que a compõem, produzindo um escore sintético capaz de expressar sua contribuição relativa para a vulnerabilidade hidroambiental.

$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} I_{norm}}{n} \quad (2)$$

Onde, D_j = escore da dimensão j; I_{norm} = indicador normalizado; n = número de indicadores da dimensão. A utilização de escores dimensionais evita que dimensões com maior número de indicadores exerçam influência desproporcional sobre o índice final.

- **Construção do Índice Integrado de Vulnerabilidade Hidroambiental (IIVH)**

Uma vez obtidos os escores dimensionais, calcula-se o Índice Integrado de Vulnerabilidade Hidroambiental (IIVH) por meio da agregação ponderada das cinco dimensões analíticas do MAIAH-BSF.

$$IIVH = \sum_{j=1}^{5} w_j D_j \quad (3)$$

Onde, $IIVH$ = Índice Integrado de Vulnerabilidade Hidroambiental; D_j = escore da dimensão j e w_j = peso atribuído à dimensão j. Nesta proposta, adotou-se ponderação equivalente entre as cinco dimensões (wj = 0,20), considerando que todas representam componentes essenciais da vulnerabilidade hidroambiental.

No estágio atual de proposição do modelo, adotou-se a ponderação equivalente (wj = 0,20) entre as cinco dimensões analíticas. Essa decisão privilegia a transparência do procedimento de agregação e reduz a subjetividade inerente à atribuição prévia de pesos na ausência de evidências empíricas suficientes para justificar sua hierarquização. Entretanto, a literatura apresenta diferentes estratégias para definição de pesos em índices compostos, incluindo métodos baseados em julgamento de especialistas, como a Análise Hierárquica de Processos (AHP), métodos estatísticos de redução da dimensionalidade, como a Análise de Componentes Principais (PCA), e métodos informacionais, como o Método da Entropia, que atribuem pesos em função da variabilidade observada nos dados. Essas abordagens poderão subsidiar futuras calibrações do MAIAH-BSF, permitindo avaliar a influência de diferentes esquemas de ponderação sobre o comportamento do IIVH e a contribuição relativa de cada dimensão analítica.

A análise de sensibilidade constitui uma etapa importante para o aperfeiçoamento do MAIAH-BSF, permitindo avaliar a influência de diferentes estratégias de ponderação sobre o comportamento

do IIVH. Diferentes esquemas de pesos podem alterar a contribuição relativa das dimensões analíticas e, consequentemente, modificar a classificação final da vulnerabilidade hidroambiental. Estudos futuros deverão avaliar essa influência com base em dados empíricos, possibilitando o refinamento dos pesos e a calibração das faixas interpretativas atualmente propostas em caráter exploratório.

Para facilitar a interpretação dos resultados, propõe-se a classificação preliminar do IIVH em cinco categorias de vulnerabilidade, variando de Muito Baixa a Muito Alta (Tabela 1). A definição dessas classes baseou-se na divisão uniforme da escala normalizada do índice (0-1), constituindo uma referência inicial para interpretação dos resultados. Por se tratar de uma proposta metodológica ainda não validada empiricamente, essas faixas possuem caráter exploratório e deverão ser refinadas em estudos futuros a partir da calibração do modelo com dados observacionais.

Tabela 1. Faixas de classificação do IIVH

Faixa do IIVH	Classificação
0,00 – 0,20	Muito Baixa
0,21 – 0,40	Baixa
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Alta
0,81 – 1,00	Muito Alta

Fonte: Elaboração própria (2026)

Para ilustrar a operacionalização do modelo, considere-se um conjunto hipotético de escores dimensionais obtidos após a aplicação da Equação (1): Pressões Hidrológicas e Climáticas = 0,80; Estado Limnológico = 0,50; Estado Trófico e Nutrientes = 0,50; Estrutura e Respostas Hidroecológicas = 0,50; e Dinâmica Flúvio-Estuarina = 0,50. Considerando a ponderação equivalente entre as cinco dimensões (wj = 0,20), a aplicação da Equação (3) resulta em um Índice Integrado de Vulnerabilidade Hidroambiental (IIVH) igual a 0,56, correspondente à classe de Vulnerabilidade Moderada, conforme a Tabela 1. Os valores apresentados possuem caráter exclusivamente ilustrativo e têm por finalidade demonstrar o procedimento de cálculo e interpretação do índice.

O MAIAH-BSF constitui uma proposta metodológica de caráter exploratório cuja aplicação requer validação empírica em diferentes condições hidroambientais. Essa etapa permitirá avaliar o desempenho dos indicadores selecionados, a adequação da estrutura de agregação, a sensibilidade do índice às diferentes estratégias de ponderação e a calibração das faixas interpretativas propostas. A aplicação do modelo em séries temporais e distintos contextos flúvio-estuarinos, contribuirá para verificar sua robustez analítica, ampliar sua capacidade explicativa e consolidar seu potencial como instrumento de monitoramento ambiental e apoio à gestão de recursos hídricos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo propôs o Modelo Analítico de Vulnerabilidade Hidroambiental para o Baixo Rio São Francisco (MAIAH-BSF), concebido como uma estrutura integrada para avaliação da vulnerabilidade hidroambiental em sistemas fluviais regulados sob influência estuarina. Fundamentado na hidrologia ecológica, na limnologia e na abordagem de sistemas socioecológicos, o modelo integra vinte indicadores organizados em cinco dimensões analíticas, sintetizadas pelo Índice Integrado de Vulnerabilidade Hidroambiental (IIVH), oferecendo uma estrutura capaz de apoiar o monitoramento ambiental e a gestão de recursos hídricos em sistemas aquáticos complexos.

Como perspectiva de desenvolvimento, a aplicação do MAIAH-BSF em bases de dados ambientais permitirá validar sua estrutura analítica, aperfeiçoar os procedimentos de ponderação e calibrar as faixas interpretativas do IIVH. Esses avanços contribuirão para consolidar o modelo como instrumento de monitoramento ambiental, apoio à tomada de decisão e fortalecimento da governança dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

BARTON, David N. *et al.* (Dis)integrated valuation – Assessing the information gaps in ecosystem service appraisals for governance support. *Ecosystem Services*, v. 29, p. 529-541, 2018.

BINDER, Claudia R. *et al.* Comparison of Frameworks for Analyzing Social-ecological Systems. *Ecology and Society*, v. 18, n. 4, art. 26, 2013.

BUNN, S. E.; ARTHINGTON, A. H. Basic principles and consequences of altered hydrological regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, v. 30, p. 492-507, 2002.

CAVALCANTE, Geórgenes; MIRANDA, Luiz Bruner de; MEDEIROS, Paulo Ricardo Petter. Circulation and salt balance in the São Francisco river Estuary (NE/Brazil). *RBRH*, v. 22, e31, 2017.

LEI, Yongdeng *et al.* Rethinking the relationships of vulnerability, resilience, and adaptation from a disaster risk perspective. *Natural Hazards*, v. 70, n. 1, p. 609-627, 2014.

LINK, J. S. *et al.* Advancing Aquatic Ecosystem-Based Management with Full Consideration of the Social-Ecological System. *ICES Journal of Marine Science*, v. 74, n. 7, p. 1947–1956, 2017.

OSTROM, Elinor. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, v. 325, n. 5939, p. 419-422, 2009.

PIET, Gerjan *et al.* Advancing Aquatic Ecosystem-Based Management with Full Consideration of the Social-Ecological System. In: *Ecosystem-Based Management, Ecosystem Services and Aquatic Biodiversity*. Springer, 2020. p. 17-37.

POFF, N. LeRoy *et al.* The Natural Flow Regime: a paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, v. 47, n. 11, p. 769-784, 1997.

YARNELL, Sarah M. *et al.* A functional flows approach to selecting ecologically relevant flow metrics for environmental flow applications. *River Research and Applications*, v. 36, n. 1, p. 1-7, 2020.

YATES, Adam G. *et al.* Enhancing bioassessment approaches: development of a river services assessment framework. *Freshwater Science*, v. 38, n. 1, 2019.