

# ECOLOGIA E PESQUISA TRANSDISCIPLINAR NO SETOR ELÉTRICO

Resultados e Aprendizados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG



EDITORES

Marcos Callisto  
e Carlos Bernardo M. Alves

• 2026 •

## **AXIA Energia**

Ivan de Souza Monteiro  
CEO

Antônio Varejão Godoy  
Vice-presidente de Operações e Segurança

Jader Fernandes de Jesus  
Diretor de Licenciamento Ambiental e Condicionantes

Francisco José Arteiro de Oliveira  
Diretor de Operação AXIA Sudeste

Karinne Pereira de Siqueira  
Gerente-executiva de Licenciamento Ambiental e Condicionantes

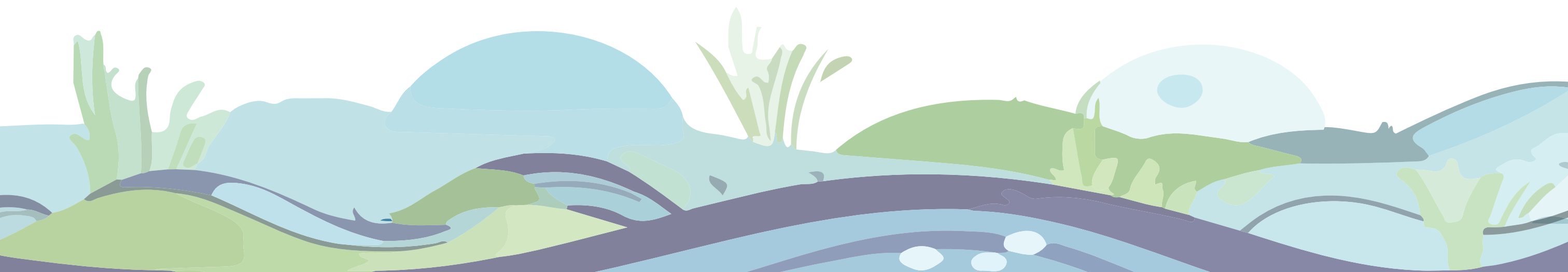
Ana Amelia Pastor Mendonca Da Silva  
Gerente de Meio Ambiente AXIA Sudeste

Felipe Viana Manzano  
Analista Ambiental - Gestor do projeto

Tiago Chagas de Oliveira Tourinho  
Analista ambiental - Gestor do projeto

# **ECOLOGIA E PESQUISA TRANSDISCIPLINAR NO SETOR ELÉTRICO**

**Resultados e Aprendizados  
do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG**





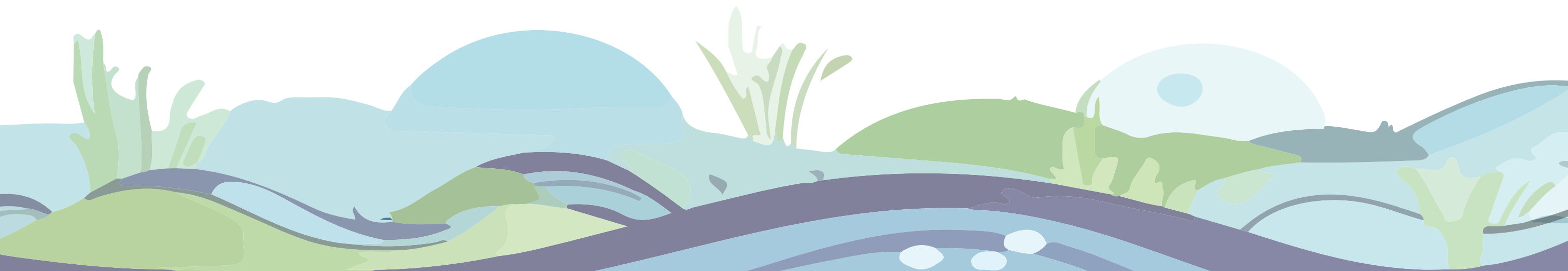
# ECOLOGIA E PESQUISA TRANSDISCIPLINAR NO SETOR ELÉTRICO

Resultados e Aprendizados  
do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG

EDITORES

Marcos Callisto  
e Carlos Bernardo M. Alves

· 2026 ·



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E19 ECOLOGIA e pesquisa transdisciplinar no setor elétrico: resultados e aprendizados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG/ Editores Marcos Callisto, Carlos Bernardo M. Alves. Belo Horizonte: Projeto IBI UHE Furnas; UFMG, 2026.

218 p. : il.

Disponível em: <https://lebufmg.wixsite.com/bentos>

Projeto IBI UHE FURNAS & UFMG

ISBN: 978-65-981989-9-2 (físico)  
ISBN: 978-65-981989-8-5 (Digital)

1. Ecologia. 2. Desenvolvimento Sustentável. 3. Energia Hidrelétrica.  
4. Biodiversidade. I. Callisto, Marcos. II. Alves, Carlos Bernardo M.

CDD: 577  
CDU: 574

Ficha Catalográfica elaborada pela bibliotecária Fabiane C. M. Reis – CRB: 6/2680



Esse livro é dedicado ao Bob Hughes (*in memoriam*), parceiro desde os primeiros passos da aplicação integral do Índice de Integridade Biótica no Brasil.

Além de ser um profissional mundialmente reconhecido, Bob incentivou cada um de nós a crescer científica e pessoalmente, com seu jeito único e louvável habilidade de perceber as melhores aptidões de cada um. Seu legado é imensurável ...

É com grande satisfação que apresentamos esta obra, fruto do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, uma iniciativa que representa um avanço significativo na forma como o setor elétrico brasileiro compreende, analisa e gerencia sua relação com o território, o meio ambiente e a sociedade.

Vivemos um momento em que a sustentabilidade deixou de ser apenas um compromisso institucional para se consolidar como um eixo estratégico do negócio. A crescente complexidade dos processos de licenciamento, a intensificação das mudanças climáticas e a ampliação das expectativas da sociedade exigem das empresas soluções cada vez mais qualificadas, integradas e baseadas em evidências. É nesse contexto que o Projeto IBI se destaca como uma resposta concreta, inovadora e aplicada a esses desafios.

Ao longo deste livro, são apresentados os resultados de uma abordagem transdisciplinar que integra ecologia, geografia e indicadores socioeconômicos, traduzindo dados complexos em informações estruturadas e úteis para a gestão de empreendimentos hidrelétricos. O desenvolvimento e a aplicação de indicadores ambientais e territoriais permitem não apenas compreender o estado atual dos ecossistemas, mas também apoiar a tomada de decisão de forma mais estratégica, preventiva e orientada para o longo prazo.

Do ponto de vista corporativo, o Projeto IBI consolida-se como uma importante ferramenta de gestão. A sistematização e padronização dos dados ambientais e socioeconômicos ampliam a capacidade da empresa de identificar riscos, priorizar ações, monitorar resultados e avaliar cenários futuros. Mais do que atender a exigências regulatórias, essa abordagem fortalece a governança ambiental, reduz incertezas e contribui para decisões mais eficientes, transparentes.

No âmbito do licenciamento ambiental, os produtos e metodologias apresentados nesta obra demonstram como o conhecimento técnico-científico pode atuar como um aliado estratégico. A utilização de indicadores integrados e territorializados oferece uma visão ágil e consistente das dinâmicas ambientais e socioeconômicas associadas aos empreendimentos, podendo contribuir para processos de licenciamento mais qualificados, dialogados e baseados em evidências robustas.

Outro aspecto relevante do Projeto IBI é sua capacidade de gerar conhecimento aplicável e replicável. A experiência desenvolvida na UHE Furnas estabelece um referencial metodológico que pode ser adaptado a outros empreendimentos do setor elétrico, ampliando seu potencial de contribuição para a gestão ambiental em escala nacional.

Este livro materializa, portanto, mais do que os resultados de um projeto de pesquisa. Ele representa uma nova forma de pensar a gestão ambiental no setor elétrico: mais integrada, estratégica e conectada com o território e as pessoas. Que esta publicação se consolide como referência e ferramenta para gestores, técnicos, pesquisadores e demais atores envolvidos na construção de empreendimentos cada vez mais sustentáveis.

Seguimos convictos de que gerar energia com responsabilidade ambiental e social é não apenas possível, mas essencial para o futuro do setor e da sociedade.

Rio de Janeiro, 20 de março de 2026.

Jader Fernandes De Jesus  
Diretor de Licenciamento Ambiental e Condicionantes



## A EMPRESA

**A AXIA Energia é a maior companhia de energia renovável do hemisfério sul. Como a maior responsável pela capacidade energética nacional, a empresa conecta o Brasil com milhares de quilômetros de linhas de transmissão.**

**A AXIA é também uma grande potência em sustentabilidade. 100% da energia da companhia é gerada por fontes renováveis, além de gerir mais de 150 projetos na área socioambiental, sendo a empresa que mais se relaciona com biomas e povos originários no mundo.**

**Toda essa potência impulsiona o propósito de catalisar negócios através da energia, crescendo de forma confiável e sustentável.**

**[axia.com.br](http://axia.com.br)**

## Prefácio

A obra “Ecologia e Pesquisa Transdisciplinar no Setor Elétrico: Resultados e Aprendizados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG” é apresentada num cenário de marcantes urgências climáticas e acelerada perda de biodiversidade, especialmente nos ecossistemas aquáticos continentais. É também um momento de profunda reflexão sobre alternativas mais eficazes para a reversão dessas tendências, incluindo estratégias multidisciplinares que congreguem os esforços da academia e das concessionárias hidrelétricas. Nesse sentido, este livro representa um grande avanço não apenas por documentar uma pesquisa acadêmica, mas também por consolidar um novo paradigma de cooperação entre a ciência de ponta e o setor produtivo.

De fato, o conteúdo dessa obra é uma resposta pertinente ao desafio de conciliar a geração de hidreletricidade, responsável por mais da metade da matriz elétrica nacional, com a mitigação das alterações que ela promove nos ecossistemas fluviais e na plenitude de seus serviços. Destaca-se o caráter multidisciplinar do projeto, bem como sua sólida base científica inspirada no conceito do “Quadrante de Pasteur”, no qual a busca do entendimento dos fundamentos ecológicos caminha lado a lado com a aplicação prática do conhecimento.

O rigor metodológico é uma outra característica marcante da obra. A implementação de um desenho amostral com réplicas verdadeiras e controle adequado de variáveis de confusão (*confounders*), confere alta confiabilidade às inferências apresentadas. Além disso, a adoção do padrão internacional “Darwin Core” na gestão de dados assegura a reprodutibilidade e viabiliza comparações de longo prazo, elevando o projeto aos padrões globais de ciência aberta.

Um dos avanços mais notáveis é a integração da ecologia, geografia e socioeconomia por meio do Índice Transdisciplinar de Integridade (ITI). Nele, autores deixam claro que a saúde de um reservatório é indissociável do bem-estar das pessoas que habitam o seu entorno. Ao amalgamar índices econômicos e de fragilidade ambiental, a obra oferece aos gestores uma ferramenta de planejamento estratégico. Complementarmente a abordagem de “ciência cidadã” – que envolveu centenas de estudantes e professores no monitoramento de habitats e bioindicadores - fortaleceu a governança local e transformou a percepção social sobre o papel dos serviços ecossistêmicos no suporte à vida e à economia regional.

No cerne dessa publicação reside o compromisso dos autores com a conservação, documentando ameaças e identificando espécies nativas, ameaçadas e invasoras - com destaque para a ictiofauna e macroinvertebrados – e mapeando as áreas críticas para restauração. Além de subsidiar a gestão da bacia do reservatório da UHE Furnas, esse livro é um convite ao diálogo sobre as relações, por vezes conflituosas, entre geração de energia hidrelétrica e a integridade ambiental.

A experiência do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG serve como uma linha de base robusta e um modelo replicável para outros setores da infraestrutura brasileira. Numa perspectiva acadêmica, essa obra se destaca no rigor do delineamento experimental, na abrangência da transdisciplinaridade, na inovação metodológica e na padronização e gestão de dados. Para os gestores do setor elétrico, ela fornece alternativas para redução de riscos; para a sociedade, traz a esperança de uma convivência harmoniosa entre a geração hidrelétrica e a natureza.

Prof. Angelo Antonio Agostinho, Maringá, janeiro de 2026

## Apresentação pelos editores

Este livro foi idealizado como uma ferramenta para sintetizar as informações geradas a partir de uma abordagem inovadora, transdisciplinar e integrada de avaliação de integridade ecológica da bacia da Usina Hidrelétrica de Furnas, no alto Rio Grande, Minas Gerais.

Ao longo de três anos, uma equipe de mais de 40 pesquisadores se dedicou a avaliar, sob múltiplas perspectivas técnico-científicas, como os vários distúrbios de atividades humanas influenciam a qualidade da água e a diversidade de espécies na bacia do reservatório da UHE Furnas. Os dados foram coletados em campo e, com o uso de dois grupos biológicos (macroinvertebrados bentônicos e peixes), amostrados de forma padronizada, pudemos chegar a uma avaliação mais precisa e garantir a comparabilidade dos resultados com outras bacias de reservatórios hidrelétricos no Brasil e no exterior, amostradas com a mesma metodologia.

Durante o projeto IBI UHE Furnas & UFMG, um grande time de profissionais contribuiu nas diversas etapas do estudo, sorteio de pontos de amostragem, planejamento das amostragens em campo, obtenção de variáveis da água e do ambiente, coleta de bioindicadores, processamento de amostras em campo e nos laboratórios de pesquisa, transcrição dos dados para planilhas, curadoria de todas as informações obtidas, cálculos de métricas e índices em ambiente R, discussões em cursos, capacitações e workshops do projeto, e para elaboração de dezenas de manuscritos científicos e apresentações em congressos internacionais, nacionais e regionais.

As nossas atividades de pesquisa não teriam sido realizadas sem o grande esforço dos profissionais da equipe da AXIA Energia que trabalham na Usina Hidrelétrica de Furnas e na Estação de Piscicultura de Furnas. Além da equipe de pesquisadores de diferentes departamentos e institutos da Universidade Federal de Minas Gerais e a gestão administrativa realizada pela FUNDEP, outras instituições de pesquisa foram gradativamente agregadas ao time de pesquisadores, incluindo a Universidade Federal de Lavras, a Universidade Estadual de Minas Gerais (Passos) e a Universidade Federal do Pará, garantindo a multi-institucionalidade e a transdisciplinaridade da nossa abordagem. O envolvimento de estudantes de graduação e pós-graduação garantiu também a formação de novos pesquisadores, agregando capital humano ao Projeto e disponibilizando futuros profissionais aptos a buscar soluções para problemas ambientais em um planeta sob mudanças.

Este livro traz, portanto, uma síntese de conceitos ecológicos transdisciplinares, abordagens técnico-científicas, resultados obtidos e vivências da parceria UFMG – AXIA Energia na bacia da UHE Furnas. Os resultados, especialmente distribuídos na bacia do reservatório da UHE Furnas, estão sendo utilizados para subsidiar a definição de áreas prioritárias para restauração ambiental e como subsídio à implementação de medidas de gestão de espécies aquáticas no reservatório e a montante da UHE Furnas. Além disso, a disponibilização gratuita deste livro permitirá que estudantes e professores das Escolas públicas e as comunidades de moradores nos 35 municípios limítrofes à UHE Furnas conheçam sobre a integridade ecológica da bacia e suas espécies. Temos a expectativa de que as novas ecotecnologias geradas neste projeto IBI UHE Furnas & UFMG poderão ser facilmente aplicadas em outros empreendimentos no Brasil.

Desejamos que este livro abra novas portas de investigação científica em futuros projetos de pesquisa e inovação entre a AXIA Energia e Universidades brasileiras, fomentando o desenvolvimento da sociedade, conhecimento científico e participação social. A missão de gerar energia com sustentabilidade deve ser realizada a partir do somatório empresa-universidade, buscando conciliar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), em cenários de emergência global. Investimentos em pesquisa devem priorizar aspectos Ambientais em Sustentabilidade e Governança Socioambiental (ASG), buscando garantir que as futuras gerações usufruam de água e energia, e um planeta em harmonia.

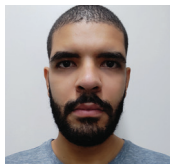
Belo Horizonte, 8 de janeiro de 2026.

Os editores

## Autores



**Alessandra A. P. Bueno:** Bacharel (1997) e Licenciada (1999) em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Mestre (1999) e doutora (2003) em Biologia Animal pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atua nas áreas de Taxonomia e Ecologia de Crustáceos Límnicos, com ênfase em micropásticos. Atualmente é professora titular do Departamento de Ecologia e Conservação, Instituto de Ciências Naturais, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais. Link CV Lattes-CNPq: <https://lattes.cnpq.br/1539507833032528>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7809-7189>.



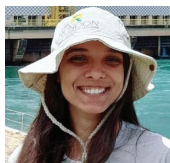
**Anderson S. Rocha:** Biólogo (2016), Mestre em Microbiologia (2024) pela Universidade Federal de Minas Gerais, técnico de laboratório do Departamento de Genética, Ecologia e Evolução do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/6010391939276475>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0450-1211>



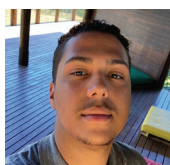
**André Braz Golgher:** Bacharel em Física (1988) pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Especialista em Física (1991) pela Unicamp. Mestre em Química Orgânica (1994) pela UFMG. Doutor em Demografia (2001) pela UFMG e Bacharel em Ciências Biológicas (2022) pela UFMG. Professor Titular do Departamento de Ciências Econômicas e do Cedeplar na Faculdade de Ciências Econômicas da UFMG. Tem experiência nas áreas de Métodos Quantitativos aplicados a Estudos Sociais, Economia Social, Demografia e Economia Ecológica. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/2194200827061280>. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5884-225X>



**Beatriz Ferreira da Graça Pego:** Bióloga, Bacharela e Licenciada (2022), pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente, é Mestranda em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre na Universidade Federal de Minas Gerais, desenvolvendo sua dissertação junto ao projeto IBI UHE Furnas & UFMG. Link cv Lattes-CNPq: <https://lattes.cnpq.br/8073790061246241>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9898-707X>.



**Bruna de Souza Vieira:** Bióloga, Licenciada e Bacharela em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), com ênfase em Biologia Vegetal. Mestre em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), desenvolve pesquisas na área de ciência cidadã. Atualmente é Analista Ambiental no setor de Licenciamento da empresa Clam Meio Ambiente. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7059589180066242> | ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4476-113>



**Bruno Bernardo Dohler Guimarães:** Técnico em Meio Ambiente (2020) pelo CEFET-MG e bacharel em Ciências Biológicas (2025), com ênfase em Ciências Ambientais, pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Atualmente é licenciando em biologia e mestrando em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre pela UFMG, com interesse em ciência cidadã, educação e comunicação científica. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3559240099381273> | ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9868-4392>



**Carlos Bernardo Mascarenhas Alves:** Biólogo (1989) e Mestre em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (1995) pela Universidade Federal de Minas Gerais. Tem experiência na área de Ecologia, com ênfase em Ecologia de Comunidades de Peixes, atuando principalmente em Projetos de Integridade Biótica no setor elétrico brasileiro, biotelemetria, inventários e biomonitoramento de peixes. Atua no Projeto Manuelzão (UFMG) desde 1999. Atualmente é responsável técnico da Bio-Ambiental Consultoria em Meio Ambiente Ltda. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/5212787526014596>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1731-6541>



**Diego Rodrigues Macedo:** Bacharel em Geografia pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG (2005), Especialista em Geoprocessamento e Estatística (UFMG, 2006 e 2020), Mestre em Geografia - Análise Ambiental (UFMG, 2009) e Doutor em Ecologia - Conservação e Manejo da Vida Silvestre (UFMG, 2013). Professor Adjunto do Departamento de Geografia e dos Programas de Pós-Graduação em Geografia e Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais do Instituto de Geociências da UFMG. Tem experiência nas áreas de Geografia Física, Recursos Hídricos, Ecologia da Paisagem, Geoecologia, Biomonitoramento, Sistemas Informativos Geográficos, Estatística Espacial e Planejamento Territorial. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/0805217613268162>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1178-4969>, website: <https://www.diegomacedo.pro.br/>.



**Felipe Viana Manzano:** Biólogo (2001), Mestre em Ciências do Mar pela Universidade Santa Úrsula (2004), atua na Gerência Executiva de Licenciamento e Gestão de Condicionantes da Geração da AXIA Energia, gestor e integrante da equipe técnica do projeto IBI UHE Furnas & UFMG pela AXIA Energia. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/3575217726964299>, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9214-4138>



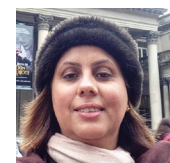
**Getulio Fonseca Domingues:** Engenheiro Florestal (2013), mestre (2015) e doutor (2018) em Ciência Florestal pela Universidade Federal de Viçosa. Atua nas áreas de Engenharia e Recursos Florestais, com ênfase em Manejo Florestal, Otimização, Inteligência Artificial, Modelagem Ambiental, Análise Espacial, Recursos Hídricos, Manejo de Bacias Hidrográficas, Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto. Atualmente é professor no Departamento de Cartografia da UFMG. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/7207060342658949>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8752-2001>



**Gilberto Nepomuceno Salvador:** Biólogo (2003) e mestre em Zoologia de Vertebrados (2011) pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, e doutor em Ecologia (2019) pela Universidade Federal de Minas Gerais. Possui experiência em ecologia e conservação de peixes neotropicais, com ênfase em impactos antrópicos, especialmente aqueles decorrentes da mineração e de barramentos. Atualmente atua como bolsista do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), no projeto de recuperação do surubim (*Pseudoplatystoma corruscans*). Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/9937738127677833>, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3598-6469>



**Gisele M. Santos:** Bióloga (2016), mestre em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (2019) pela Universidade Federal de Minas Gerais e doutora em Ecologia e Evolução (2023) pela Universidade Federal de Goiás. Possui experiência em análise de dados ecológicos, biomonitoramento, ecossistemas aquáticos, elaboração e execução de programas de educação ambiental. Atualmente é Analista Ambiental do setor de licenciamento da empresa Clam Meio Ambiente. Link cv Lattes CNPq: <http://lattes.cnpq.br/8792715915360223> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4671-8440>



**Juliana Silva França:** Licenciada em Ciências Biológicas (2002) e Doutora em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (2019) pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Possui experiência em ciência cidadã, com ênfase em monitoramentos participativos de ecossistemas aquáticos urbanos desenvolvidos junto à educação básica. Atuou como pesquisadora no projeto IBI UHE Furnas & UFMG (2023–2024). Atualmente é bióloga da Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), onde integra o Programa de Educação Ambiental Corporativo – Ecociente. Link cv Lattes CNPq: <http://lattes.cnpq.br/3258408508327661> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4862-6881>



**Karoline Hellen Madureira:** Bióloga com Licenciatura (2021) pela Universidade Federal de Viçosa e Graduação Sanduíche na Universidade de Coimbra (Portugal) pelo Programa de Licenciaturas Internacionais (PLI/Capes). Mestre (2023) e atualmente doutoranda em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre pela Universidade Federal de Minas Gerais, desenvolvendo sua tese no Laboratório Ecologia de Bentos. Pesquisadora no projeto IBI UHE Furnas & UFMG. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/7194579586912443>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8651-1116>



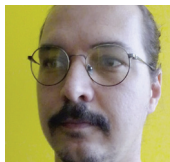
**Luana Caiafa:** Bióloga com Licenciatura (2018) e Bacharelado (2021) pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Mestre em Biodiversidade de Conservação da Natureza (2021) pela mesma instituição. Atualmente, é Doutoranda em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre na Universidade Federal de Minas Gerais e pesquisadora no projeto IBI UHE Furnas & UFMG. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/2541753273266111>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4020-9517>



**Lucília Souza Miranda:** Bióloga (2006), Mestre (2010) e Doutora (2014) em Zoologia pela Universidade de São Paulo. Atua nas áreas de Taxonomia, Morfologia e Evolução de cnidários. Atualmente é professora do Departamento de Zoologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/7007451877143253>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4121-8340>



**Marcos Callisto:** Biólogo (1991), Mestre em Ecologia (1994), Doutor em Ciências (1996) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, atualmente é professor titular da Universidade Federal de Minas Gerais, pesquisador e coordenador científico do projeto IBI UHE Furnas & UFMG. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/4097793138747810>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2341-4700>



**Marden Seabra Linares:** Graduado em Ciências Biológicas Bacharelado pela Universidade Federal de Alagoas (2010), Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Sergipe (2012) e Doutor em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre pela Universidade Federal de Minas Gerais (2017). Tem experiência na área de Ecologia, com ênfase em Limnologia. CV Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/5097449217504740> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7218-9768>



**Moara Silva Morasche:** Bióloga formada pela Universidade Federal Fluminense e com mestrado em Biologia Marinha pela mesma universidade. MBE em Gestão Ambiental pela COPPE da UFRJ. Trabalha na AXIA Energia desde 2008 nos temas de biodiversidade, mudanças climáticas, sustentabilidade e licenciamento ambiental. Atualmente é gerente da área de Estratégia Climática e Biodiversidade da AXIA Energia.



**Paulo S. Formagio:** graduado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Minas Gerais (1985), atuou nas empresas ENGEVIX/ELETRONORTE (1996-1989) e AXIA Energia/Furnas, como biólogo (1993-2023), atualmente é membro do projeto IBI UHE Furnas & UFMG. CV: <http://lattes.cnpq.br/6416707664252323> <https://orcid.org/0009-0006-0574-8490>



**Paulo S. Pompeu:** graduado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Minas Gerais (1994), mestre em Ecologia (Conservação e Manejo da Vida Silvestre) pela Universidade Federal de Minas Gerais (1997) e doutor em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (2005). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Lavras. Tem experiência na área de Ecologia, com ênfase em Ecologia Aplicada à Conservação de Ambientes Aquáticos. <http://lattes.cnpq.br/9977308493978643> ORCID: 0000-0002-7938-1517



**Pedro Henrique Monteiro do Amaral:** graduado em Ciências Biológicas (2010) com especialização em Análise Ambiental pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2010). Possui Mestrado em Ecologia (2014) e Doutorado em Ecologia e Conservação da Biodiversidade pela UFJF (2021). Pós-Doutorado desenvolvido junto ao laboratório de Ecologia de Bentos (LEB) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e concluído pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/9414585222169602>, ORCID: 0000-0003-0623-0897



**Ricardo Ribeiro de Castro Solar:** Professor de Ecologia no Departamento de Genética, Ecologia e Evolução da Universidade Federal de Minas Gerais e integrante do Centro de Sínteses Ecológicas e Conservação (CSEC-UFMG). Mestre e doutor em Entomologia pela Universidade Federal de Viçosa. Sua pesquisa foca na Ecologia de Comunidades e busca compreender as causas e consequências da dinâmica e da manutenção da biodiversidade em ambientes tropicais sob influência antrópica. É bolsista de produtividade do CNPq (nível 2) e editor associado do Journal of Applied Ecology e da Revista Brasileira de Entomologia. <http://lattes.cnpq.br/9924177207371692>; <https://orcid.org/0000-0001-5627-4017>



**Rosalva Sulzbacher:** Licenciada em Ciências Biológicas pela Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), mestre em Ecologia Aplicada pela Universidade Federal de Lavras (UFLA) e doutoranda pelo mesmo programa. Atua na pesquisa de peixes de reservatório com ênfase em distribuição espacial, espécies não nativas e índices multimétricos. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/3239807904982743>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0420-6009>.



**Thaísa Sala Michelin:** Bióloga pela Universidade Estadual de Maringá - UEM (2008), Mestre em Ecologia e Evolução pela Universidade Federal de Goiás (2011) e Doutora em Ciências Ambientais pela UEM (2016). Professora e pesquisadora de ecologia na Universidade Federal do Pará desde 2016, atua em temas como ecologia de macrófitas aquáticas (com ênfase em espécies invasoras) e ecologia de ecossistemas aquáticos. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/4609629132683283>, ORCID: 0000-0001-9416-0758



**Tiago Chagas de Oliveira Tourinho:** Biólogo (2007), Mestre em Engenharia Ambiental (2014) e doutor em Ciências em Engenharia Ambiental pela UFRJ (2024), com foco em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e tecnologias sustentáveis de geração de energia. Atua como analista ambiental na AXIA Energia. É gestor e integrante da equipe técnica do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG pela AXIA Energia. Link cv Lattes-CNPq: <http://lattes.cnpq.br/9467168732840166>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1056-200X>.



# SUMÁRIO

CAPÍTULO

PÁGINA

1

Ecologia na prática de sustentabilidade

21

2

Pesquisa e Inovação no projeto IBI UHE Furnas & UFMG: metodologias de pesquisa, ciência básica e aplicabilidade

49

3

Metodologia de estruturação e padronização para armazenamento e gestão de dados ecológicos

69

4

Ferramentas ecológicas e geoespaciais no diagnóstico multi escalas ambiental da bacia da UHE Furnas

89

5

Biodiversidade aquática na bacia da UHE Furnas

121

6

A ciência cidadã como elo entre a pesquisa ecológica, setor elétrico e sociedade

169

7

Desenvolvimento do Índice Transdisciplinar de Integridade do reservatório da UHE Furnas (ITI-Furnas)

201

CAPÍTULO

1

# ECOLOGIA NA PRÁTICA DE SUSTENTABILIDADE

Marcos Callisto,  
Ricardo R. C. Solar,  
Felipe Manzano,  
Tiago C. O. Tourinho,  
Anderson S. Rocha,  
Gisele M. Santos,  
Alessandra A. P. Bueno,  
André Golgher,  
Moara Silva Morasche,  
Paulo S. Formagio

**Palavras-chave:**  
*transdisciplinaridade, mudanças globais, pesquisa, sustentabilidade.*

Como citar este capítulo:

Callisto, M., Solar, R., Manzano, F., Tourinho, T.C.O., Rocha, A.S., Santos, G.M., Bueno, A.A.P., Golgher, A., Morasche, M.S. & Formagio, P.S. (2026). Ecologia na prática de sustentabilidade. In: Callisto, M. & Alves, C.B.M. (eds.) Ecologia e Pesquisa Transdisciplinar no Setor Elétrico: Resultados e Aprendizados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG. Belo Horizonte, pp. 21-47.

## Resumo

Este livro resume as abordagens técnico-científicas, metodologias, resultados, inovações e perspectivas do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG. A equipe transdisciplinar reunida teve como motivação realizar uma avaliação integrada de qualidade ambiental na bacia da UHE Furnas utilizando a abordagem de integridade biótica. Com o objetivo de desenvolver uma metodologia de quantificação de impacto líquido positivo, foram levantadas pressões de atividades humanas, características de uso da terra, diversidade de habitats, qualidade de água e biodiversidade como resposta a um gradiente de condições ambientais. Neste capítulo introdutório abordamos a importância da água como recurso para a humanidade, incluindo a distribuição de bacias hidrográficas e os benefícios a populações humanas no Brasil. Descrevemos as etapas preparatórias e transdisciplinares do projeto IBI UHE Furnas & UFMG, a composição da equipe e parcerias nacionais e internacionais. Apresentamos os cursos de capacitação para formação de pessoal, incluindo estudantes de graduação e pós-graduação, professores de escolas, membros de comitês de bacia e técnicos de meio ambiente e do setor elétrico. Conceituamos a Ecologia como ciência e a nossa prática em sustentabilidade durante as pesquisas na bacia do reservatório da UHE Furnas. Abordamos, ainda, a sustentabilidade e a importância de investimentos do setor elétrico em cenário de perda de biodiversidade e urgência climática no século XXI. Por fim, descrevemos as aplicações práticas de Ecologia utilizadas na abordagem transdisciplinar na bacia da UHE Furnas. 💧

## 1

## Cenário ambiental global

Ao longo da história, a humanidade tem promovido profundas transformações nos ecossistemas terrestres e aquáticos, impulsionadas por mudanças no uso da terra, crescimento populacional, industrialização e alterações climáticas. Essas atividades intensificam as pressões sobre a natureza, como o desmatamento acelerado, a poluição, e exploração excessiva de recursos naturais. Em escala global, os nossos impactos vêm se acumulando de forma cada vez mais ampla e acelerada (Lewis & Maslin 2015). Adicionalmente, as mudanças climáticas globais têm causado alterações drásticas nos padrões sazonais de precipitação, como o aumento de chuvas torrenciais, alagamentos e longos períodos de seca extrema, com destaque para as regiões tropicais. Na América do Sul, períodos de El Niño e La Niña intensificam a imprevisibilidade climática e prejuízos nas grandes cidades em períodos chuvosos devido a alagamentos e perdas econômicas, sociais e de vidas humanas.

Essa crise se reflete em indicadores críticos: segundo o mais recente relatório da Plataforma Intergovernamental de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES, Díaz et al. 2019), das 8 milhões de espécies conhecidas, cerca de 1 milhão está atualmente ameaçado de extinção, e muitas delas serão extintas nas próximas duas décadas. Em outras palavras, estamos consumindo recursos naturais de maneira muito mais acelerada do que o ritmo de sua reposição e, dessa forma corroendo a capacidade de suporte do planeta em tolerar mudanças devido a atividades antrópicas. Estudos recentes confirmam que essas pressões não são localizadas: elas alteram significativamente a composição de comunidades biológicas e reduzem a diversidade local em ecossistemas terrestres, de água doce e marinhos. A biodiversidade é fundamental para o funcionamento dos ecossistemas, dos quais dependem a provisão de alimentos, água potável, saúde, lazer, regulação climática e proteção contra desastres naturais (CEBDS 2025; United Nations 2024). Considerando esse cenário, é importante entender que a perda de diversidade compromete o fornecimento de bens e serviços essenciais à manutenção de toda a vida no planeta (Díaz et al. 2015; Jaureguiberry et al. 2022), colocando em risco diretamente a estabilidade dos ecossistemas naturais, afetando não apenas a sociedade como um todo, mas também representando riscos concretos para setores produtivos e empresariais que dependem diretamente da estabilidade ecológica (CEBDS 2025; TNFD 2023). Esses efeitos atingem milhões de pessoas que estão diante de um futuro em que os estoques de alimentos serão mais vulneráveis a pragas e doenças, a oferta de água doce será irregular ou escassa, haverá perda da capacidade de enfrentar as consequências do aumento de emissões de gases de efeito estufa e de adaptação aos eventos climáticos extremos, além da perda de oportunidade de se beneficiar de produtos e serviços prestados pela natureza como cosméticos, medicamentos, condições adequadas de lazer, conhecimento, respeito cultural e paisagens (WWF-BRASIL 2021a; 2021b; DASGUPTA 2021; Natural Capital Coalition 2016; United Nations 2024; Cardinale et al. 2012).

Além da intensificação da pressão humana sobre o planeta, observa-se uma profunda desigualdade na contribuição para as mudanças climáticas. Estudos globais recentes apontam que a maior parte das emissões de gases de efeito estufa provém de uma pequena parcela da população. Em 2019, metade da população mundial mais pobre foi responsável por apenas 12% das emissões totais, enquanto os 10% mais ricos emitiram 48% do total (Chancel 2022). Ainda mais marcante, o 1% mais rico concentrou, sozinho, 23% do crescimento das emissões desde 1990. Em contraste, os grupos de baixa renda mantêm pegadas de carbono relativamente baixas; porém, são justamente os que sofrem de forma desproporcional os impactos negativos do aquecimento global, como secas extremas, inundações, crise alimentar e outras consequências climáticas (Birkmann et al. 2022). Essa assimetria revela não apenas uma injustiça na contribuição para o problema, mas também reforça a desigualdade social na vulnerabilidade aos seus efeitos. Como consequência, as mudanças globais têm modificado a estrutura e o funcionamento de comunidades biológicas e ecossistemas, alterando padrões de distribuição de espécies e a capacidade de ecossistemas em tamponar influências antrópicas (Steffen et al. 2015, Woodward et al. 2012).

Este panorama vem sendo acompanhado pelo Fórum Econômico Mundial, que tem alertado que a perda de biodiversidade em decorrência de atividades humanas gera riscos operacionais, regulatórios, financeiros e de reputação significativos para as empresas, além de estarem intrinsecamente ligados a outros riscos sociais, geopolíticos e ambientais (WEF 2025). No Relatório de Riscos Globais mais recente (2025), o Fórum destacou que os indicadores ambientais pesquisados figuram entre os 10 principais riscos de longo prazo. Neste contexto, prevê-se que eventos climáticos extremos se tornem ainda mais severos, ocupando o primeiro lugar na lista de riscos para a próxima década, seguido pela perda de biodiversidade e o colapso dos ecossistemas, mudanças críticas nos ecossistemas terrestres e a escassez de recursos naturais (WEF 2025).

Na busca pela sustentabilidade, análises críticas e o desenvolvimento de novas ferramentas de apoio à decisão tornam-se essenciais para auxiliar empresas na identificação, quantificação de riscos reais associados ao declínio da biodiversidade e a implementação de estratégias ambientais abrangentes (Ermgassen et al. 2022; TNFD 2023; White et al. 2024). Dentre as metas de sustentabilidade da Organização das Nações Unidas (ONU), mapear riscos à biodiversidade e adotar critérios de decisão com base científica são fundamentais para subsidiar compromissos corporativos, objetivando identificar impactos líquidos positivos e para propor ações estratégicas para o aperfeiçoamento de atitudes sustentáveis de longo prazo. Esses riscos abrangem não apenas ameaças operacionais diretas, mas também implicações como atrasos regulatórios, perdas financeiras e danos à reputação, considerando tanto os impactos gerados quanto as dependências empresariais em relação aos ecossistemas. Globalmente, governos, setor privado e instituições financeiras têm direcionado esforços para a aplicação rigorosa da hierarquia de mitigação, um modelo que prioriza evitar, minimizar e, por fim, compensar impactos sobre a biodiversidade e serviços ecossistêmicos. A premissa desses compromissos corporativos é que os danos causados às espécies e aos habitats naturais sejam compensados por iniciativas que gerem ganhos sociais, minimizem as perdas potenciais, promovam a conservação de biodiversidade e fortaleçam a provisão de bens e serviços ecossistêmicos, beneficiando tanto a natureza quanto as organizações, ao mitigar impactos negativos ou promover impactos positivos (TNFD 2023). Esses compromissos estão relacionados a iniciativas internacionais (p.ex. Aliança Internacional

para Extinção Zero) e conceitos mais amplos, tais como “dano zero”, “efeito líquido positivo” e “pegada ambiental zero”, que vêm sendo observados como compromissos corporativos em sustentabilidade.

## 2 Panorama da Gestão Hídrica e Pressões Antrópicas no Brasil

O Brasil se destaca pela grande disponibilidade de água doce e crescimento do número de pesquisas ecológicas sobre a biodiversidade. Apesar de representar apenas 0,01% da superfície do planeta (Balian et al. 2008), os ecossistemas aquáticos de água doce englobam 9,5% de todas as espécies de animais, especialmente em regiões tropicais (Barlow et al. 2018). No entanto, esses ecossistemas são constantemente ameaçados por pressões antrópicas, incluindo intenso desflorestamento, poluição, degradação de habitats, barramentos e retirada de matas ciliares (Dala-Corte et al. 2020; Sundar et al. 2020). Essas pressões produzem múltiplos estressores nos ecossistemas de água doce (Callisto et al. 2019b) que alteram os habitats físicos (p.ex. substratos, fluxo de água, abrigos) e a qualidade de água (p.ex. nutrientes, temperatura, turbidez), comprometendo a persistência e abundância de muitas espécies aquáticas (Callisto et al. 2019b). Assim, os estressores antrópicos atuam como filtros ambientais, regulando a composição e estrutura de comunidades (Castro et al. 2018; Firmiano et al. 2021). As consequências potenciais da perda de biodiversidade para o funcionamento de ecossistemas e serviços ambientais em escalas locais têm recebido considerável atenção nas últimas décadas, mas pouco se sabe sobre como a biodiversidade afeta os processos ecossistêmicos e sua estabilidade (Loreau et al. 2003).

Estimativas indicam que aproximadamente 48% do volume dos rios no planeta encontra-se regulado ou fragmentado devido ao represamento de suas águas (Graça et al. 2025a). Além de alterar a natureza do ambiente (de lótico para lêntico), muitas vezes o acúmulo de água em barramentos favorece alguns processos ecológicos indesejados, como blooms de algas e macrófitas aquáticas, causando sérios prejuízos à qualidade de água para consumo humano, especialmente devido à produção de toxinas (Barbosa et al. 2025). Essas alterações ecológicas, somadas à crescente demanda por água, evidenciam como a regulação dos rios afeta diretamente tanto o meio ambiente quanto as dinâmicas sociais e econômicas. Na América do Sul, o crescimento econômico e social dos países depende da disponibilidade de água para consumo, irrigação e geração de energia hidrelétrica, causando conflitos pela água como recurso (Graça et al. 2025b). Muitas vezes esses conflitos resultam em violência, marginalização e exclusão de minorias sociais, prejudicadas por não terem direito de acesso à água de qualidade (Shumilova et al. 2023).

A distribuição das populações humanas no Brasil segue a disponibilidade de água ao longo de bacias hidrográficas de grandes rios, com maior concentração nas regiões sudeste, sul e centro-oeste. No Brasil, algumas iniciativas têm sido implementadas na tentativa de desenvolver ferramentas de avaliação integrada de qualidade ambiental em bacias hidrográficas associadas a empreendimentos hidrelétricos. Nos estados de Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Paraná, Pará, Paraíba e Rio de Janeiro há pesquisadores que se dedicam a avaliar como pressões de atividades humanas alteram o uso do solo, observando-se substituição da cobertura de vegetação natural por agricultura, pasto, silvicultura e cidades. Essas análises são fundamentais porque permitem compreender os impactos cumulativos das transformações no uso do solo sobre os recursos hídricos e ecossistemas aquáticos. Muitas vezes o crescimento urbano mal planejado leva à perda de qualidade ambiental devido à ausência de tratamento de esgotos e lançamento de efluentes domésticos e industriais não adequadamente tratados diretamente em cursos d’água. Como consequência, observam-se perda de qualidade de água, simplificação de habitat, perda de biodiversidade e redução dos serviços ecossistêmicos oferecidos às populações humanas ribeirinhas.

Diante desse panorama, marcado por pressões antrópicas crescentes sobre os ecossistemas e a necessidade de ferramentas integradas de avaliação ambiental, torna-se fundamental realizar estudos que contribuam com o diagnóstico, monitoramento e a proposição de ações para mitigar e reverter esses impactos. Nesse contexto, a Ecologia, especialmente em sua interface com os desafios contemporâneos no Antropoceno, oferece bases conceituais e metodológicas robustas para interpretar as transformações ambientais em curso e orientar ações sustentáveis.

## 3 Ecologia no Antropoceno

A Ecologia é uma ciência transdisciplinar por excelência e de forte atuação teórico-prática, que possui seus fundamentos conceituais sólidos (Odum & Barrett 2004; Begon et al. 2021), aplicada em estudos sobre organismos, populações, comunidades e ecossistemas, e suas interações, subsidiando ações de conservação. Ao entendermos ecologia como a ciência que procura compreender os padrões de distribuição e abundância dos organismos (Krebs 1972), fica claro porquê ela é indispensável para entender os impactos das alterações ambientais, como: poluição, desmatamento, fragmentação de habitats, barramento de rios e mudanças climáticas sobre a estrutura e o funcionamento dos sistemas naturais. Na prática, os estudos ecológicos buscam entender, por exemplo, os mecanismos que levam à perda de espécies ou diminuição e eliminação de espécies sensíveis, assim como o aumento da distribuição e abundância de espécies tolerantes, oportunistas e invasoras, com implicações diretas para a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos.

Os fundamentos de ecologia teórica são discutidos e utilizados como ferramentas para compreender os efeitos de pressões antrópicas sobre os ecossistemas aquáticos e suas interfaces. Esse entendimento é construído através de conhecimentos sobre composição taxonômica, diversidade de espécies, diversidade funcional e processos ecológicos mantenedores de biodiversidade, incluindo produção primária, consumo e decomposição de matéria orgânica, fluxo de energia e ciclagem de nutrientes (Cardinale et al. 2012).

Nesse contexto destaca-se o conceito do Antropoceno, uma proposta de nova era geológica sucessora do Holoceno, marcada por influência humana intensa e duradoura nos sistemas e processos naturais (Boff 2022). A lista da IUCN 2024 incorporou cerca de 6 mil espécies à versão anterior, de 2023, aumentando para 163.040 espécies de animais, plantas e fungos avaliados. A IUCN verificou que 28% desse total, o equivalente a 45.321 espécies de plantas e animais, está ameaçado de extinção no mundo e 908 espécies já foram extintas.

Dentre os ecossistemas aquáticos, os riachos de cabeceira representam ambientes de elevada diversidade e complexidade biológica. Esses ambientes comumente localizados em bacias hidrográficas que drenam para empreendimentos hidrelétricos são moldados por vários eventos geológicos e estão sujeitos a mudanças climáticas e complexos mecanismos ecológicos que estruturam a distribuição de espécies animais, vegetais e microrganismos. No cenário atual de crise ambiental, os riachos sofrem múltiplos distúrbios associados a atividades humanas, colocando em risco importantes serviços ecossistêmicos que incluem água de qualidade, alimento, abrigo e proteção (Valente-Neto et al. 2025). Diante desses desafios é cada vez mais necessário repensar modelos de desenvolvimento que conciliem crescimento econômico, justiça social e conservação ambiental.

## 4

### Sustentabilidade no século XXI

Nesse contexto, a adoção de práticas sustentáveis deixou de ser uma tendência e tornou-se um imperativo estratégico no cenário empresarial contemporâneo. A sustentabilidade, enquanto conceito estruturante de políticas públicas e diretrizes corporativas, passou a ocupar espaço central nas agendas globais e, sobretudo, no Brasil, desde junho de 1992, quando ocorreu no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, também conhecida como Eco-92 ou Rio-92. Esse evento marcou a consolidação do debate ambiental iniciado duas décadas após a Conferência de Estocolmo (1972), que reuniu chefes de Estado, cientistas e organizações da sociedade civil para debater problemas ambientais e os limites para um crescimento econômico mundial sustentável (Sachs 2015; Alves 2023). Entre as duas conferências, um importante documento foi criado pelas Nações Unidas em 1987: o Relatório *Brundtland*, ou Nosso Futuro Comum. Este relatório apresentou a definição de desenvolvimento sustentável,

que ganhou destaque na Rio 92: “desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades” (WCED 1987; ANA 2022).

A necessidade de integrar sustentabilidade à gestão econômica e às estratégias empresariais foi reforçada pela Avaliação Ecológica do Milênio (Millennium Ecosystem Assessment – MEA), publicada em 2005. Esse estudo global lançado em 2001 reuniu cerca de 1300 cientistas de 95 países, além de outras 850 personalidades da ciência e da política, tendo como objetivo avaliar as consequências das alterações nos ecossistemas e formular as informações científicas necessárias aos tomadores de decisão para conservação e uso sustentável dos recursos naturais. Dentre os principais resultados alcançados foi revelado que dos 24 serviços ambientais essenciais para a vida (p.ex. água e ar limpos, regulação do clima, alimentos, energia, fibras, etc.), 15 deles se encontravam em processo de degradação acelerada (MEA-ONU 2010; Boff 2022). Essa constatação reforçou a urgência de um novo paradigma que conciliasse desenvolvimento econômico, responsabilidade socioambiental e integridade ecológica. Em 2010, durante a 10ª Conferência das Partes na Convenção da Diversidade Biológica ocorrida em Nagoya (Província de Aichi, Japão) foi estabelecido o Plano Estratégico para a Biodiversidade com a elaboração de um conjunto de 20 proposições denominadas Metas de Aichi. Todas as Metas de Aichi eram voltadas à redução da perda da biodiversidade em âmbito global, nacional e regional. A Assembleia Geral das Nações Unidas declarou que os anos entre 2011 e 2020 seriam conhecidos com a Década das Nações Unidas sobre Biodiversidade objetivando apoiar e promover a implementação dessas metas.

Em setembro de 2015, 193 países participantes da Assembleia Geral da ONU acordaram 17 objetivos globais: os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 (Quadro 1), consolidando a sustentabilidade como princípio orientador do desenvolvimento global. Os ODS são parte da Resolução 70/1, intitulada Transformando o nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, posteriormente resumida como Agenda 2030. Segundo Alves (2023), o parágrafo 54 da Resolução da Assembleia Geral das Nações Unidas estabelece os 17 objetivos e 169 metas específicas contemplando as dimensões relacionadas ao desenvolvimento social, ambiental e econômico, considerando pobreza, fome, saúde, educação, aquecimento global, igualdade de gênero, água, saneamento, energia, urbanização, meio ambiente e justiça social (ONU 2015; Sachs et al. 2016). A agenda 2030 está pautada em cinco eixos fundamentais: pessoas, prosperidade, paz, parcerias e planeta e representa, portanto, um plano de ação global para eliminar a pobreza extrema e a fome, oferecer educação de qualidade para todos, proteger o planeta e promover sociedades pacíficas e inclusivas até 2030, servindo como um guia para transformação de modelo de negócio, impulsionando inovação, gestão de riscos e geração de valor de forma alinhada a compromissos globais de impacto positivo.

Quadro 1: Descrição dos ODS e alinhamento aos pilares da Agenda 2030 (adaptado de Ramos et al. 2022).

ODS	Tema	Pilares
<b>ODS 1</b>	Erradicação da pobreza	Pessoas
<b>ODS 2</b>	Fome zero e Agricultura sustentável	Pessoas
<b>ODS 3</b>	Saúde e bem-estar	Pessoas
<b>ODS 4</b>	Educação de Qualidade	Pessoas
<b>ODS 5</b>	Igualdade de gênero	Pessoas
<b>ODS 6</b>	Água potável e saneamento	Pessoas
<b>ODS 7</b>	Energia Acessível e limpa	Pessoas
<b>ODS 8</b>	Trabalho decente e crescimento econômico	Pessoas
<b>ODS 9</b>	Indústria, inovação e infraestrutura	Pessoas
<b>ODS 10</b>	Redução das desigualdades	Pessoas
<b>ODS 11</b>	Cidades e comunidades sustentáveis	Planeta
<b>ODS 12</b>	Consumo e produção sustentáveis	Planeta
<b>ODS 13</b>	Ação contra a mudança global do clima	Planeta
<b>ODS 14</b>	Vida na água	Planeta
<b>ODS 15</b>	Vida terrestre	Planeta
<b>ODS 16</b>	Paz, justiça e instituições eficazes	Paz
<b>ODS 17</b>	Parcerias e meios de implementação	Parceria

Ao longo de dez anos após o estabelecimento das metas de Aichi os governantes mundiais foram encorajados a desenvolver e comunicar os resultados das estratégias nacionais para a implementação das medidas de conservação da biodiversidade, mas pouco se avançou. Em 2022, a necessidade de avançar em iniciativas para conservar a biodiversidade foram reforçadas pelo novo Marco Global da Biodiversidade (*Global Biodiversity Framework - GBF*), aprovado na 15ª Conferência das Partes da Convenção sobre Diversidade Biológica. Esse marco estabeleceu metas que enfatizam a importância do setor empresarial na contenção de perda de biodiversidade. Dentre elas, a Meta 15 incentiva o setor privado a monitorar e divulgar riscos e impactos ambientais, buscando reverter a perda de biodiversidade até 2030 e garantir padrões sustentáveis de produção econômica.

No âmbito das discussões contemporâneas sobre sustentabilidade, o conceito de ESG, sigla em inglês para Environmental, Social and Governance, no Brasil também chamado de ASG (Ambiental, Social e Governança, em português), tem sido amplamente utilizado como um referencial para organizar a análise de aspectos ambientais, sociais e institucionais associados às atividades humanas e produtivas. Inicialmente difundido no início dos anos 2000, sobretudo no contexto do mercado financeiro, o ESG passou a ser

empregado como uma lente conceitual para considerar riscos e oportunidades relacionados à sustentabilidade em processos de avaliação e decisão (UN Global Compact 2004; EXAME 2022).

A adoção de critérios ESG por diferentes setores da sociedade representa mudança de paradigma nas relações entre empresas e seus investidores. Essa abordagem incorpora transparência, ética e responsabilidade em suas operações, além de estratégias de longo prazo (Friede et al. 2015; Silva et al. 2025). O movimento é impulsionado por demandas regulatórias, pressão da sociedade civil e riscos ambientais cada vez mais evidentes, como os associados às mudanças climáticas, à escassez hídrica e à perda de biodiversidade (Eccles & Klimenko 2019). Didaticamente, Alves (2023) propôs um modelo em que as variáveis ambientais (E) e sociais (S) integram um mesmo círculo (Yin e Yang) representando a interdependência entre essas duas dimensões. Ambas repousam sobre uma base sólida, a governança (G), responsável por garantir condições de integridade, ética, transparência e eficácia necessárias para adoção dessas práticas (Figura 1).

Em um cenário empresarial cada vez mais orientado à transparência, a adoção de práticas ESG é vista não apenas como uma vantagem competitiva, mas como uma exigência de mercado e um indicativo de maturidade organizacional (Dwyer et al. 2022; Silva et al. 2025).

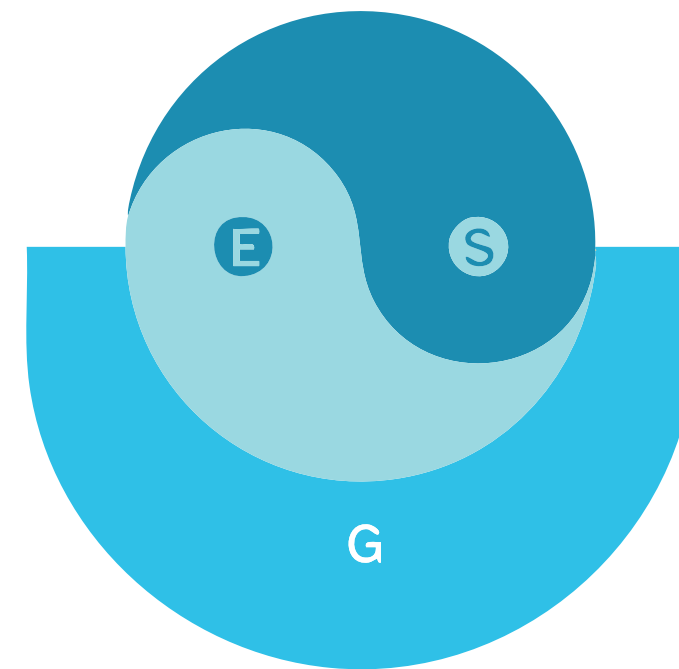


Figura 1: Conceituação ESG, adaptado de Alves (2023).

## 5 O Setor Elétrico em cenário de urgência climática no século XXI

O setor elétrico brasileiro, historicamente ancorado na geração hidrelétrica — que ainda responde por cerca de 56% da matriz elétrica nacional (EPE 2025) —enfrenta desafios crescentes diante do cenário de urgência climática e da intensificação de eventos extremos. A variabilidade no regime de chuvas, com períodos prolongados de seca seguidos por precipitações intensas e concentradas em curtos intervalos de tempo e espaço, tem comprometido a previsibilidade e a segurança hídrica dos reservatórios. Essa nova realidade exige uma gestão cada vez mais integrada, adaptativa e sensível às mudanças climáticas.

A bacia do Rio Grande, onde está localizado o reservatório da UHE Furnas, foco deste estudo, exemplifica bem essa complexidade. Com mais de 143 mil km<sup>2</sup> de área de drenagem, a bacia integra a Região Hidrográfica do Rio Paraná, sendo 60,2% de sua extensão em Minas Gerais e 39,8% em São Paulo. Abrange 393 municípios, onde vivem cerca de 9 milhões de pessoas, em uma região marcada pelos biomas Cerrado e Mata Atlântica. Em termos de domínio hídrico, 12,37% dos recursos da bacia pertencem à União (por serem interestaduais), enquanto 51,4% são de Minas Gerais e 36,23% de São Paulo (CBH-Grande 2022).

O próprio reservatório da UHE Furnas também ilustra bem essa complexidade, pois cumpre, além da função de geração de energia, um papel estratégico no armazenamento e regulação hídrica. Sua operação influencia diretamente diversos empreendimentos localizados a jusante, garantindo a retenção e o fornecimento de água em conformidade com critérios técnicos, ambientais e de segurança definidos por órgãos como a ANA, o ONS e o IBAMA. Esses órgãos estipulam e monitoram vazões e cotas para garantir uma operação segura e o atendimento a requisitos socioambientais, como a manutenção da vazão remanescente (ambiental), a proteção da vida aquática e a qualidade da água a jusante. Nesse contexto, é fundamental considerar os usos múltiplos da água armazenada no reservatório e seus impactos positivos sobre a paisagem e as atividades econômicas e sociais locais. Também é imprescindível reconhecer os riscos associados à perda da biodiversidade e às ações humanas que agravam as mudanças climáticas, comprometendo tanto a segurança do empreendimento quanto os serviços ecossistêmicos que ele promove.

Diante desse cenário, torna-se evidente que a sustentabilidade no setor elétrico vai muito além da eficiência operacional, por isso, a adoção de critérios ambientais que envolvam o conhecimento e o monitoramento de impactos e dependências, bem como o diálogo constante com as comunidades locais, compõem uma abordagem mais resiliente, transparente e alinhada aos princípios da sustentabilidade discutidos ao longo deste capítulo.

Assim, é necessário reconhecer que os desafios ambientais enfrentados pelo setor elétrico hoje não são apenas operacionais, mas estratégicos. Superá-los exige inovação, responsabilidade compartilhada e

o fortalecimento de parcerias entre as instituições de ensino e pesquisa, as empresas e a sociedade civil. É nesse contexto que o Projeto IBI UHE Furnas & UFMG se destaca como uma resposta concreta a essa demanda, ao propor uma abordagem transdisciplinar que integra conhecimento ecológico, indicadores socioeconômicos e ferramentas de gestão ambiental, com o objetivo de subsidiar decisões mais sustentáveis no setor energético.

## 6 Panorama da Gestão Hídrica e Pressões Antrópicas no Brasil



Equipe triando camarões no laboratório de campo. Foto: Mario Sacramento.

Um dos desafios centrais deste projeto de pesquisa consistiu em articular a integração de profissionais de distintas áreas do conhecimento, trabalhando em conjunto, e assegurando a transdisciplinaridade indispensável para alcançar o objetivo de desenvolver uma ferramenta metodológica inovadora de quantificação do impacto líquido positivo da Usina Hidrelétrica (UHE) Furnas no contexto da tão desejada sustentabilidade. Ao reunir pesquisadores das áreas de Ecologia, Zoologia, Geografia, Economia, Cartografia, Jornalismo, Sistemas de Informações, Engenharia Ambiental, Civil e Hidráulica, o exercício de trocas e aprendizados foi a realidade ao longo dos três anos de pesquisa. A estreita parceria e articulação entre os profissionais da academia e da área de meio ambiente e sustentabilidade do setor elétrico permitiu a realização de debates sobre planejamento amostral, escalas espaciais e definição de pontos de coleta em campo; metodologias e abordagens científicas, tratamento de dados, e abordagens de divulgação de resultados para as populações nos 35 municípios lindeiros.

A equipe central do projeto orbitou em cerca de 40 pessoas (Figura 2), mas sofreu mudanças do primeiro ao último dia do projeto, incluindo a chegada de novos parceiros (professores, pesquisadores, estudantes) ou a saída de colegas que buscavam outros desafios e oportunidades que estavam além daqueles propostos neste projeto. A realidade de um bolsista no Brasil, as incertezas econômicas e previdenciária e a busca por novas oportunidades de trabalho foram algumas das razões pelas quais alguns pesquisadores pós-doc se desligaram do projeto antes do término. Ao todo mais de 100 pessoas estiveram envolvidas em cerca de 15 áreas do conhecimento, de instituições brasileiras, sul-americanas (Uruguai, Venezuela, Argentina, Equador), europeias (Portugal, Espanha, Suíça, Inglaterra), Austrália, China e norte-americanas (US-EPA, Oregon State University), incluindo 10 professores de Ecologia, Zoologia, Geografia, Economia, Demografia da UFMG, UFLA e UEMG, 6 pesquisadores pós-doc, 10 estudantes de graduação, 6 mestrandos e 4 doutorandas, além de 2 técnicos de laboratório, 3 biólogos associados e 2 estudantes do ensino médio. As informações obtidas foram discutidas e consideradas em colaborações internacionais com colegas pesquisadores em diferentes partes do mundo, seja em co-autorias de artigos científicos publicados de 2023 a 2025 ou em eventos científicos internacionais (Figura 3).

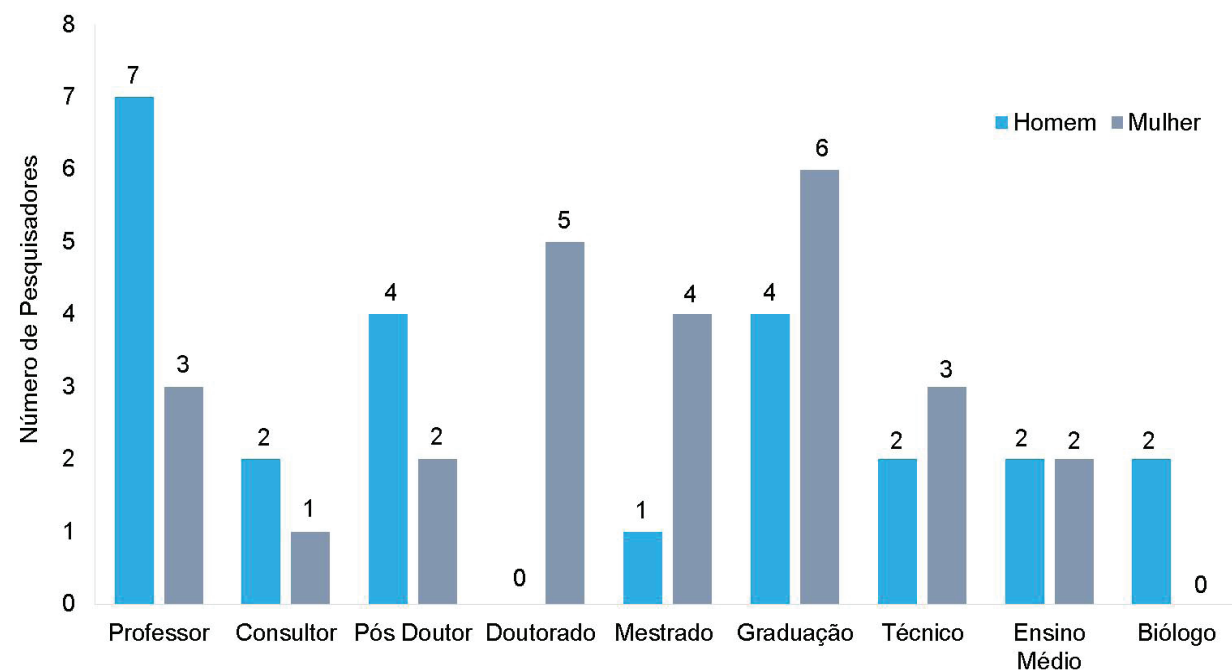


Figura 2: Composição equipe Projeto IBI UHE Furnas & UFMG.

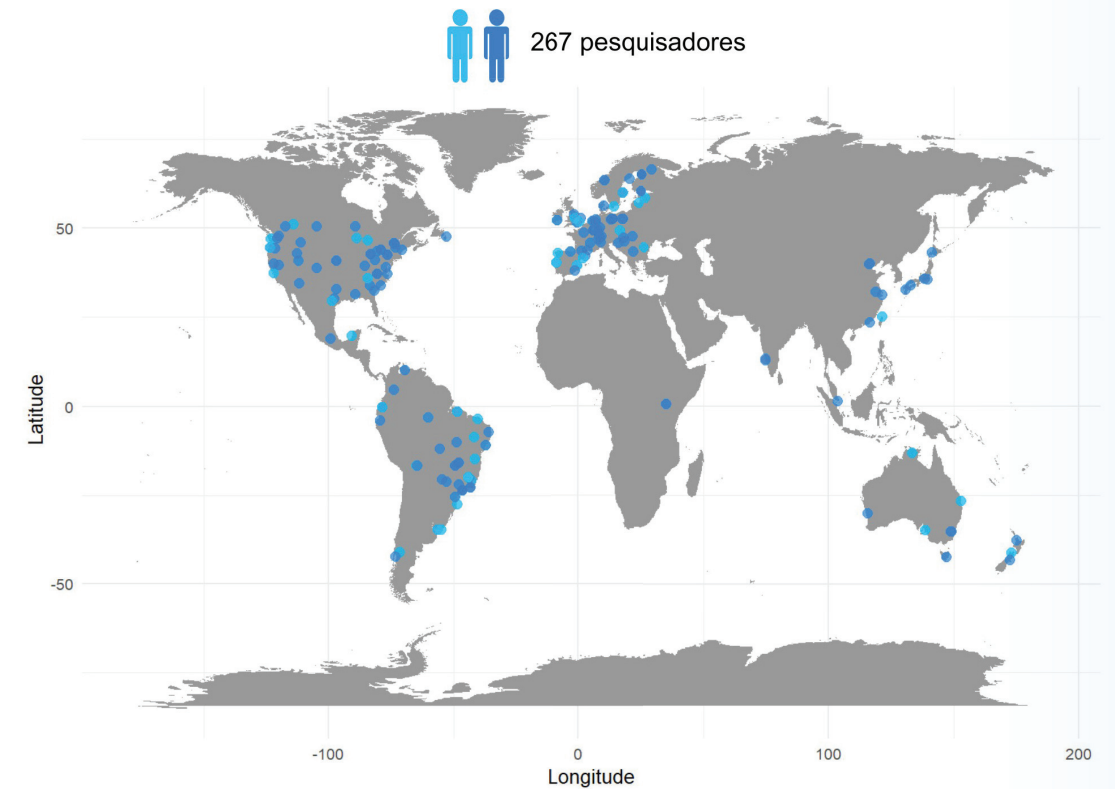


Figura 3: Pesquisadores e parceiros científicos em diferentes partes do planeta.

As discussões transdisciplinares foram um exercício que denominamos como *top-down* de formação de pessoal e desenvolvimento de novas ecotecnologias. Mas em nosso modelo, a pirâmide sempre teve em seu topo os estudantes e a formação de pessoal, de onde surgem novas ideias por onde necessariamente devem emergir e transitar as principais inovações e a sustentabilidade. Ao fomentar o aprender-fazendo, os jovens estudantes do ensino médio e graduação, pós-graduandos, pesquisadores pós-doc e professores puderam desenvolver, em equipe, as atividades de pesquisa e inovação necessárias. Desde a definição da pergunta norteadora do projeto (“Como as mudanças no uso do solo devido à ocupação humana alteram a qualidade de água, heterogeneidade de habitats, respostas de biodiversidade, e serviços ecossistêmicos na bacia da UHE Furnas?”) até a publicação da Cartilha ABCDEcologia e a preparação de dois jogos didáticos, a transdisciplinaridade foi exercida em sua plenitude (Callisto et al. 2024; 2025a; 2025b).

Como desdobramento natural da abordagem transdisciplinar adotada no Projeto, a formação de pessoas foi concebida como um eixo estruturante do estudo. A diversidade de áreas envolvidas e a complexidade dos temas abordados exigiram a articulação entre diferentes saberes e a construção de uma base comum de conhecimento técnico e metodológico entre todos os envolvidos.

Com o objetivo de padronizar metodologias e abordagens de estudo, em campo e no laboratório, na apresentação e interpretação de resultados, foram organizados Cursos de Capacitação (registro SIEX UFMG No. 103084 – Cursos de Capacitação Avaliação Ecológica Rápida (RAP) em bacias hidrográficas). Ao longo do projeto foram ofertados 16 cursos para 787 pessoas (490 mulheres e 297 homens), incluindo: (A) cursos de capacitação acadêmica (65 participantes em 4 cursos); (B) workshops anuais e divulgação de resultados do projeto (151 participantes em 2 eventos); (C) cursos de capacitação em ciência cidadã (328 participantes em 6 cursos) e (D) cursos de capacitação e treinamentos (243 participantes em 4 cursos)

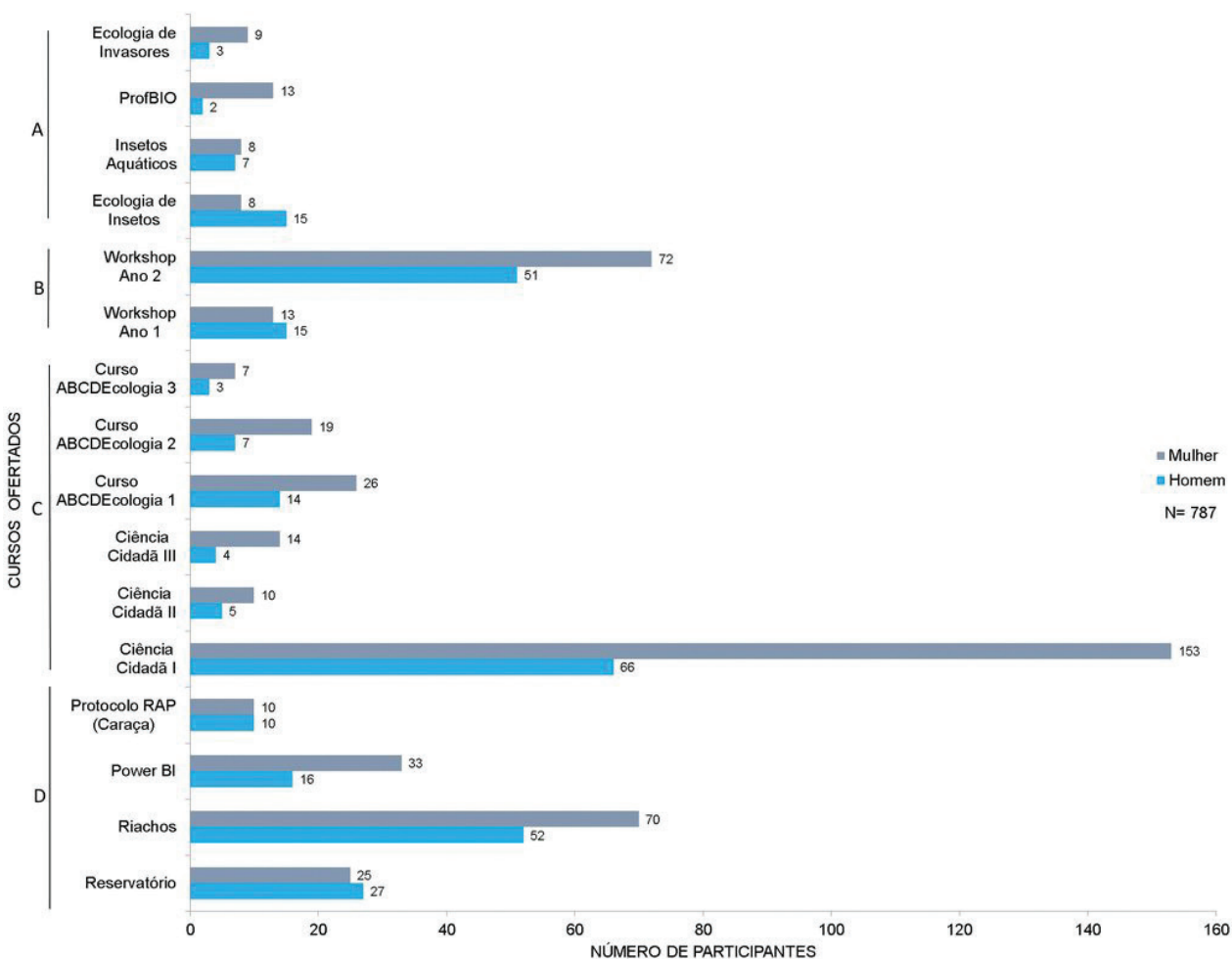


Figura 4: Número de inscritos nos Cursos de Capacitação (A: cursos de capacitação acadêmica, B: workshops anuais, C: cursos de capacitação em ciência cidadã, D: cursos de capacitação e treinamentos).

# 7

## Aplicações práticas de indicadores

Um dos principais êxitos do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG foi a construção de uma base sólida de dados capaz de traduzir, de forma objetiva e integrada, os múltiplos aspectos envolvidos na sustentabilidade socioambiental da bacia hidrográfica. A partir da abordagem transdisciplinar adotada, tornou-se essencial desenvolver ferramentas que permitissem não apenas compreender os impactos das pressões antrópicas sobre os ecossistemas, mas também mensurar, monitorar e comunicar esses efeitos de maneira acessível e cientificamente robusta. Nesse sentido, uma das formas de medir o desenvolvimento sustentável é através de indicadores capazes de refletir a complexidade das dimensões econômica, social e ambiental (Boff 2022).

Os indicadores de sustentabilidade são ferramentas que auxiliam decisões de políticas públicas, estratégias empresariais e ações intersetoriais, contribuindo na transição para modelos de desenvolvimento mais resilientes, equitativos e ambientalmente responsáveis (Silva et al. 2025). Bons indicadores devem ser sistemáticos, replicáveis, compreensíveis e úteis na formulação de políticas e na avaliação de impactos e desempenho, além de buscar capturar as interações entre os sistemas ecológicos e socioeconômicos de forma holística, contribuindo para abordagens mais realistas e integradas da sustentabilidade (Niemeijer & de Groot 2008).

Do ponto de vista econômico, podem ser adotados indicadores como: o consumo de energia por habitante; a participação de fontes de energia renovável na matriz energética; investimentos em proteção do meio ambiente por porcentagem do Produto Interno Bruto (PIB); e o fluxo de ajuda pública ao desenvolvimento como parte do PIB. Na esfera social, os indicadores podem incluir: taxa de mortalidade infantil; esperança de vida ao nascer; participação do gasto nacional com saúde no PIB; taxa de desemprego; participação de mulheres no mercado de trabalho; níveis de transparência da estrutura pública, de ética social e acesso a serviços públicos essenciais. Na dimensão ambiental, os indicadores buscam capturar pressões e respostas associadas à degradação e conservação dos ecossistemas, incluindo controle de substâncias agressivas para a camada de ozônio; emissão de gases de efeito estufa; consumo e disponibilidade de água; reutilização e reciclagem de resíduos; conservação ou resgate da cobertura vegetal; uso de agrotóxicos e fertilizantes; nível de cuidado consciente do capital natural e de responsabilidade socioambiental.

Assim, os indicadores de desenvolvimento sustentável são também baseados em indicadores sociais, econômicos e de saúde, necessários para orientar as políticas e decisões em todos os níveis da sociedade e devem representar todas as questões críticas em uma abordagem sistêmica e realista. Neste projeto os indicadores foram definidos de forma a contemplar aspectos relevantes da sociedade brasileira. Os indicadores sociais, econômicos e de saúde foram obtidos de bases oficiais dos governos federal e estadual. Os dados sobre população foram obtidos dos Censos Demográficos dos anos de 2000, 2010 e 2022 conduzidos pelo

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2025a). O Censo Demográfico é a principal fonte de informações sobre os municípios do país. Para este estudo, selecionamos dados referentes ao PIB, como o PIB total, o PIB per capita e o PIB por setor econômico (IBGE 2025c). Além disso, foram incorporados à análise os dados sobre o Valor Adicionado Bruto (VAB) do turismo (IBGE 2025d) e da piscicultura (IBGE 2023), e os Censos Agropecuários de 1996 e 2017 (IBGE 2025e) que são as principais fontes de dados sobre a produção agropecuária nacional, onde foram analisados o tamanho dos estabelecimentos agropecuários, a produção animal e vegetal, a área ocupada por culturas e pastagens, o tamanho dos rebanhos de bovinos, suínos e frangos, os principais produtos vegetais, o uso de irrigação, adubação, agrotóxicos e calcário, bem como diferentes formas de manejo ambiental. Todos esses dados foram organizados tendo como base a divisão municipal, e a análise da dinâmica temporal desses indicadores foi realizada considerando esse recorte geográfico.

Parte desses dados foi integrada e utilizada nas análises que incluía dados ambientais com informações sobre qualidade da água, peixes e macroinvertebrados bentônicos. Para garantir a compatibilidade entre os diferentes conjuntos de dados, foi necessário adequar o recorte geográfico. Como a amostragem aleatória dos pontos de coleta de dados biológicos não se baseou em limites administrativos, os dados municipais foram ajustados aos ecossistemas lênticos e lóticos. Quando o ponto de coleta estava localizado na parte interna de um município, atribuía-se a ele o valor correspondente àquele município. Esse procedimento foi aplicado a todos os pontos internos aos municípios, de forma que municípios com mais de um ponto tiveram os mesmos valores atribuídos a todos eles, o que resultou na redução da variabilidade dos dados. Por outro lado, os pontos situados na divisa entre dois municípios receberam a média dos valores de ambos. Em casos raros, quando o ponto se localizava na fronteira entre três municípios, aplicou-se o mesmo critério, estimando a média dos três valores. Por meio desse procedimento, foram obtidos os valores dos oitenta pontos nos ecossistemas lênticos (40) e lóticos (40).

Os indicadores foram claramente definidos, são replicáveis, compreensíveis e práticos, além de refletirem a diversidade de interesses e pontos de vista. A estrutura dos indicadores adotados reflete a diversidade de perspectivas envolvidas de forma que estes possam colaborar na composição de diversos índices, indicadores e *frameworks* de sustentabilidade como os considerados pelas bolsas Down Jones nos Estados Unidos, FTSE4Good da bolsa de Londres, Índice de Sustentabilidade Empresarial da B3 (ISE-B3) da bolsa de valores de São Paulo, *GRI – Global Reporting Initiative*, *SASB – Sustainability Accounting Standards Board*, *CDP – Carbon Disclosure Project*, *TCFD – Task Force on Climate-related Financial Disclosures*, *TNFD – Task Force on Nature-related Financial Disclosures*, *ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Agenda 2030)*, entre outros.



Riacho de cabeceira no Parque Estadual da Serra da Boa Esperança. Foto: Carlos B. M. Alves

## 8

### Aplicação de abordagem transdisciplinar na bacia da UHE Furnas

Os distúrbios por atividades antrópicas na bacia do reservatório da UHE Furnas foram avaliados por meio de uma abordagem transdisciplinar em múltiplas escalas, desde análises nos riachos que drenam para o reservatório até o espelho d'água de Furnas (Figura 5). Em campo, as amostragens foram realizadas em 40 pontos em riachos e 40 pontos na região litorânea do reservatório da UHE Furnas, selecionados conforme metodologia padronizada e utilizando critérios hierárquicos, aleatórios e espacialmente balanceados, permitindo escalar os resultados de diagnóstico de integridade ecológica para toda a bacia de drenagem (Capítulo 7, deste livro).

**Dentre as métricas sociais e econômicas para o reservatório, foram consideradas:**

- indicadores como a densidade populacional, que em 2022 atingiu 23,9 hab/km<sup>2</sup> no Brasil;
- valor da produção aquícola em 2022;
- contribuição ao primeiro setor em 2020;
- produção de vegetais por estabelecimento em 2017;
- produção de aves, café, irrigação, cítricos e cereais em 2017;
- consumo de água por criações como suínos, bovinos, ovinos e aves; consumo de água na agricultura de subsistência e pela população (m<sup>3</sup>/s);
- índice de conflitos fundiários;
- proporção de demandas pelo uso da água (outorga).

**As métricas de uso da terra incluíram:**

- largura de mata ciliar em 2017;
- proporção de cobertura vegetal (*buffer* 500m);
- proporção de agricultura (*buffer* 500 m);
- superfície total de drenagem;
- fluxo subterrâneo.

Essas métricas foram utilizadas como variáveis predictoras em análises de modelagem ecológica para identificar quais explicam a qualidade de água, composição taxonômica de espécies de peixes, insetos aquáticos, moluscos e camarões na bacia da UHE Furnas (Callisto et al. em preparação).



Análises laboratório de campo. Foto: Pedro Amaral

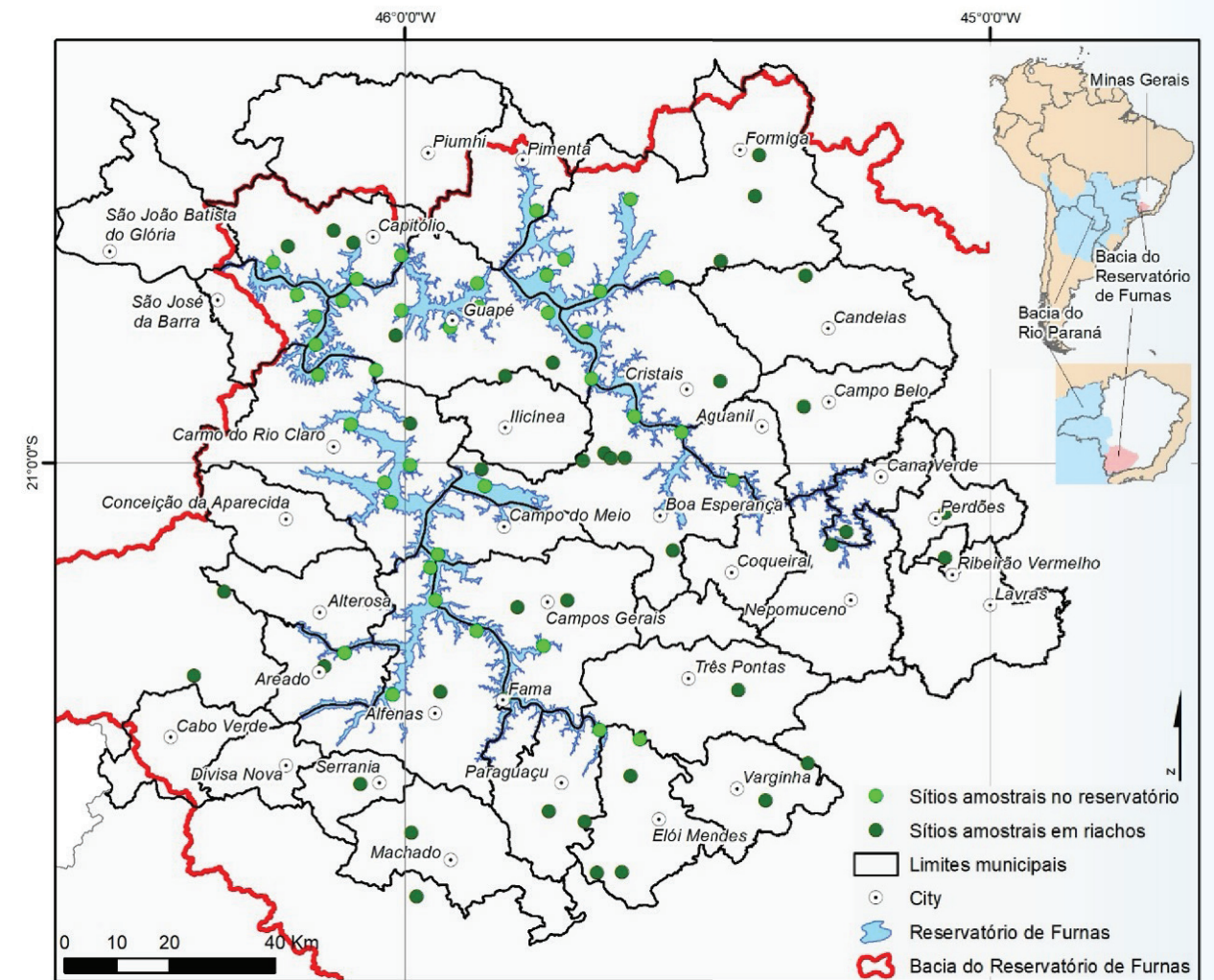


Figura 5: Bacia de drenagem, sítios amostrais e principais municípios em riachos e no entorno do reservatório da UHE Furnas, alto Rio Grande.

Neste livro, descrevemos as abordagens de pesquisa do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG e o desenvolvimento de um framework com desenvolvimento de ecotecnologias inovadoras. No Capítulo 2 apresentamos a metodologia científica empregada. No capítulo 3 são descritas as inovações em estruturação, padronização, armazenamento e gestão de dados. No capítulo 4, descrevemos as ferramentas ecológicas e geoespaciais empregadas no diagnóstico multiescalar da bacia da UHE Furnas. No Capítulo 5, apresentamos dados primários sobre a biodiversidade aquática na bacia da UHE Furnas. As atividades de educação ambiental, monitoramento ambiental e ciência cidadã são apresentados no capítulo 6. E, no capítulo 7, apresentamos o desenvolvimento do Índice Transdisciplinar de Integridade do reservatório da UHE Furnas.

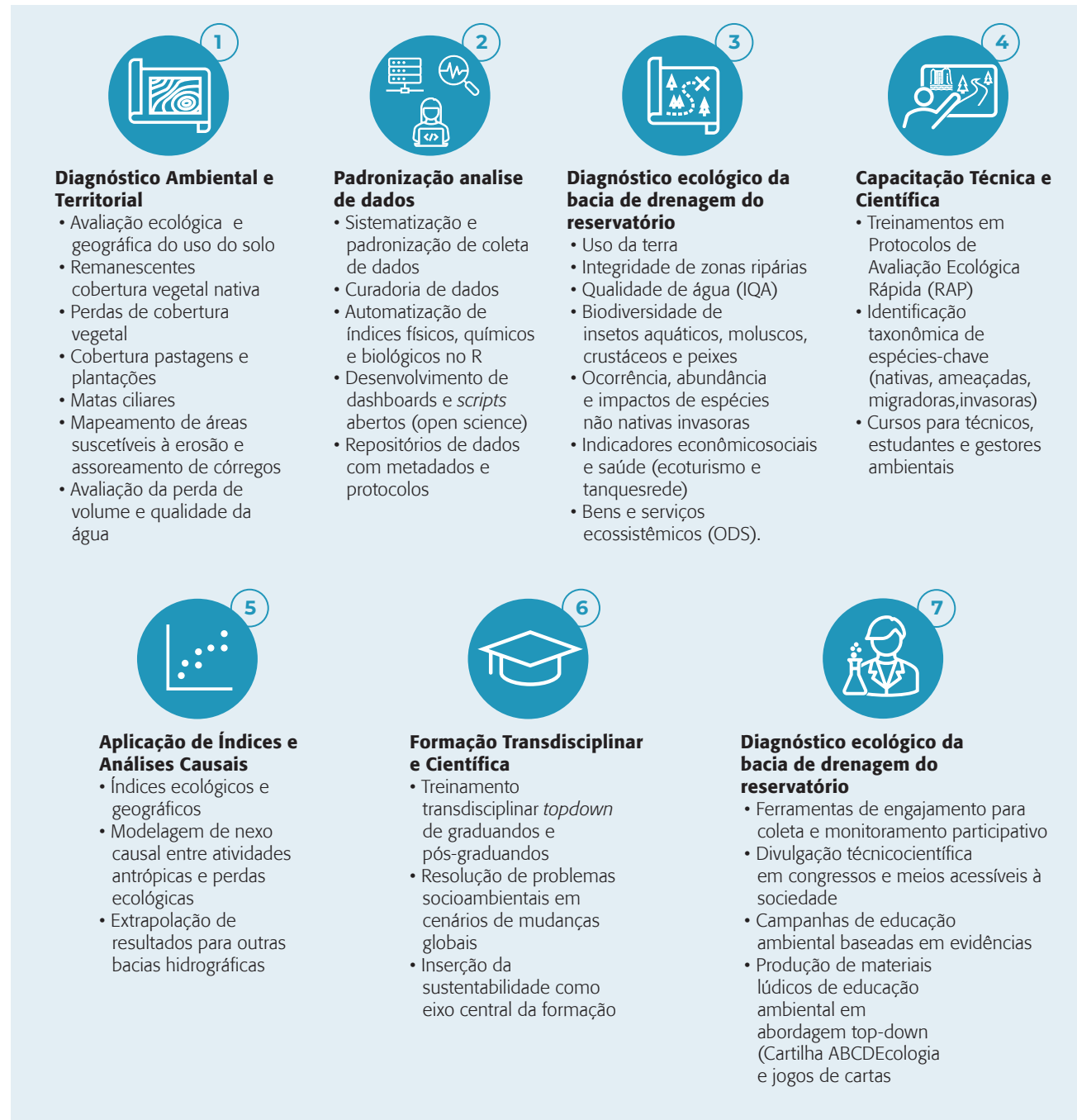


Figura 6: Framework da abordagem transdisciplinar utilizada na avaliação de distúrbios antrópicos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG as bolsas de pesquisa de iniciação científica, mestrado, doutorado e produtividade em pesquisa (MC 304060/2020-8, RS 308350/2022-7, PSP 302328/2022-0; AG 302586/2021-0).

## Referências

- Alves, R.R. 2023. ESG: o presente e o futuro das empresas. Editora Vozes, Petropolis, 276pp.
- Alves, R.R. 2024. Por que, a partir de agora, as empresas realmente serão sustentáveis? A força do ESG. Editora Alta Books, Rio de Janeiro, 195pp.
- Barbosa, J.E.L., Severino, J.S., Costa, S.Y.L., Terra, B.F., Medeiros, E.S.F., Menezes, R.F. 2025. Rivers of the Northeast. In: Graça, M.A.S., Callisto, M., Teixeira de Mello, F., Rodriguez-Olarte, D. (eds) Rivers of South America. Elsevier, 437-465. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823429-7.00009-4>.
- Balian, E.V, Segers, H., Lévêque, C., Martens, K. 2008. The Freshwater Animal Diversity Assessment: an overview of the results. *Hydrobiologia* 595:627–637. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9246-3>.
- Barlow, J., França, F., Gardner, T.A., Hicks, C.C., Lennox, G.D., Berenguer, E., Castello, L., Economo, E.P., Ferreira, J., Guénard, B., Gontijo Leal, C., Isaac, V., Lees, A.C., Parr, C.L., Wilson, S.K., Young, P.J., Graham, N.A.J., 2018. The future of hyperdiverse tropical ecosystems. *Nature* 559, 517–526. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0301-1>.
- Begon, M., Townsend, C. R. 2021. Ecology: From Individuals to Ecosystems. 5th Edition. Wiley-Blackwell. 864pp.
- Bird M.I., O’Grady D., Ulm S. 2016. Humans, water, and the colonization of Australia. *PNAS* 113: 11477-11482. [www.pnas.org/cgi/doi/10.10173/pnas.1608470113](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.10173/pnas.1608470113).
- Birkmann, J., Liwenga, E., Pandey, R., Boyd, E. Djalante, R., Gemenne, F., Leal Filho, W. Pinho, P.F., Stringer, L., Wrathall, D. 2022. Poverty, Livelihoods and Sustainable Development. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner, O.H., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1171–1274, doi:10.1017/9781009325844.010.
- Boccaletti, G. 2022. Água: uma biografia. Ed. Saida de Emergencia, Porto, 366pp.
- Boff, L. 2022. Sustentabilidade: o que é, o que não é. 5ª edição revista e ampliada, Editora Vozes, Petropolis, 222 pp.
- Callisto, M., Döhler, B.B., Delayte, F.H., Silva, L.M., Milani, M.G., Silva, M.V.C.M., Pinho, M., Fróes, M., Alves, P.H.S., Lucena, P., Vieira, B.S., Madureira, K.H., Alonso, M.B., Sulzbacher, R., Rocha, A.S., Salvador, G.N., Santos, G.M., França, J.S., Amaral, P.H.M., Bueno, A.A.P., Domingues, G.F. 2024. Cartilha ABCDEcologia: inovação eco-tecnológica transdisciplinar em Educação Ambiental. Projeto IBI UHE Furnas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 72pp. Doi:10.5281/zenodo.14013756.
- Callisto, M., Döhler, B.B., Delayte, F.H., Silva, L.M., Milani, M.G., Silva, M.V.C.M., Pinho, M., Fróes, M., Alves, P.H.S., Lucena, P., Vieira, B.S., Madureira, K.H., Alonso, M.B., Sulzbacher, R., Rocha, A.S., Salvador, G.N., Santos, G.M., França, J.S., Amaral, P.H.M., Bueno, A.A.P., Domingues, G.F. 2025. Isso é ESG?

- Jogo didático-educacional ODS e Sustentabilidade. Projeto IBI UHE Furnas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 78 cartas. Doi: 10.5281/zenodo.15284780.
- Callisto, M., Döhler, B.B., Delayte, F.H., Silva, L.M., Milani, M.G., Silva, M.V.C.M., Pinho, M., Fróes, M., Alves, P.H.S., Lucena, P., Vieira, B.S., Madureira, K.H., Alonso, M.B., Sulzbacher, R., Rocha, A.S., Salvador, G.N., Santos, G.M., França, J.S., Amaral, P.H.M., Bueno, A.A.P., Domingues, G.F., Alves, C.B.M. 2025. É de casa? Jogo didático-educacional Invasões biológicas no reservatório da UHE Furnas, Projeto IBI UHE Furnas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 41 cartas. Doi: 10.5281/zenodo.15284298.
- Callisto, M., Moreno, P., Macedo, D.R. 2019c. Biomonitoramento e pressões da urbanização: uma abordagem integrada entre Ecologia e Geografia na bacia do rio das Velhas. *Revista Espinhaço*, 8: 2-12.
- Callisto, M., Macedo, D.R., Linares, M.S., Hughes, R.M. 2019a. Multi-status and multi-spatial scale assessment of landscape effects on benthic macroinvertebrates in the Neotropical Savanna. In: Hughes, R.M., Infante, D.M., Wang, L., Chen, L., Terra, B.F. (orgs.). *Advances in Understanding Landscape Influences on Freshwater Habitats and Biological Assemblages*. Bethesda, MD: American Fisheries Society Symposium, 90:275-302.
- Callisto, M., Macedo, D.R., Castro, D.M.P., Alves, C.B.M. 2019b. Bases Conceituais para conservação e manejo de bacias hidrográficas. Belo Horizonte, Brasil: Cemig - Companhia Energética de Minas Gerais.
- Cardinale, B., Duffy, J.E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Tilman, D., Wardle, D., Kinzig, A., Daily, G., Loreau, M., Grace, J., Larigauderie, A., Srivastava, D. & Naeem, S. 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*. 486. 59-67. 10.1038/nature11148.
- Castro, D.M.P., Dolédec, S., Callisto, M. 2018. Land cover disturbance homogenizes aquatic insect functional structure in neotropical savanna streams. *Ecological Indicators*. 84:573-582.
- CBH-GRANDE – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Grande. Belo Horizonte: CBH-Grande, 2022. Disponível em: <<https://www.cbhriogrande.org.br>>. Acesso em: 22 set. 2025.
- Chancel, L. 2022. Global carbon inequality over 1990–2019. *Nat Sustain*. 5: 931–938. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00955-z>.
- Dala-Corte, R.B., Melo, A.S., Siqueira, T., et al., 2020. Thresholds of freshwater biodiversity in response to riparian vegetation loss in the Neotropical region. *J. Appl. Ecol*. 57: 1391–1402.
- Dasgupta, P. 2021. *The Economics of Biodiversity - The Dasgupta Review*. London: HM Treasury. 604pp.
- Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J., Joly, C., Lonsdale, M.,... Zlatanova, D. 2015. The IPBES Conceptual Framework – connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 14: 1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>.
- Díaz S., Settele, J., Brondízio ,E.S., ... Zayas, C.N. 2019. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science* 366. Doi: 10.1126/science.aax3100.
- Douglas, D., Mateusz, G., Richard, L., Maitena, P. 2022. The Business Impact of ESG Performance. June. [https://www.moodyanalytics.com/-/media/article/2022/esg\\_business\\_impact\\_june2022.pdf](https://www.moodyanalytics.com/-/media/article/2022/esg_business_impact_june2022.pdf).
- Eccles, R.G., Klimenko, S. 2019. *The Investor Revolution*. Harvard Business Review, 12pp.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2025: Ano base 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet.pdf>. Acesso em: 22 set. 2025.
- Ermgassen, O.S.E, Howard, M., Bennun, L., Addison, P., Bull, J., Loveridge, R., Pollard, E., Starkey, M. 2022. Are corporate biodiversity commitments consistent with delivering ‘nature-positive’ outcomes? A review of ‘nature-positive’ definitions, company progress and challenges. *J. Clean. Prod*. 379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134798>.
- EXAME, 2022. O que é ESG, a sigla que virou sinônimo de sustentabilidade. *Revista Exame*. Disponível em: <https://exame.com/esg/o-que-e-esg-a-sigla-que-virou-sinonimo-de-sustentabilidade>. Acessado em: 04 de outubro de 2022.
- Firmiano, K.R., Castro, D.M.P., Linares, M.S., Callisto, M. 2021. Functional responses of aquatic invertebrates to anthropogenic stressors in riparian zones of Neotropical savanna streams. *Science of the Total Environment* 753: 141865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141865>.
- Friede, G., Busch, T. & Bassen, A. 2015. ESG and financial performance: Aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*. 5: 210-233. 10.1080/20430795.2015.1118917.
- Graça, M.A.S., Callisto, M., Teixeira de Mello, F., Rodriguez-Olarte, D. (eds) *Rivers of South America*. Elsevier, Amsterdam. 1048 pp.
- Graça, M.A.S., Latrubesse, E.M., Callisto, M., Teixeira de Mello, F., Rodríguez-Olarte, D. 2025. Introduction to rivers of South America. In: Graça, M.A.S., Callisto, M., Teixeira de Mello, F., Rodriguez-Olarte, D. (eds) *Rivers of South America*. Elsevier 1-17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823429-7.00023-9>
- Graça, M.A.S., Wantzen, K.M., Teixeira de Mello, F., Callisto, M., Rodríguez-Olarte, D. 2025. An agenda for conservation of South American rivers. In: Graça, M.A.S., Callisto, M., Teixeira de Mello, F., Rodriguez-Olarte, D. (eds) *Rivers of South America*. Elsevier 985-1003. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823429-7.00025-2>.
- Jaureguiberry, P., Titeux, N., Wiemers, M.; Bowler, D.E., Coscieme, L., Guerra, C.A., Golden, A.S., Jacob, U., Takahashi, Y., Settele, J., Díaz, S., Molnár, Z., Purvis, A. 2022. The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Sci. Adv*. 8. Doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm9982>.
- Krebs, C. J. 1972. *Ecology. The experimental analysis of distribution and abundance*. 694pp.
- Lewis, S, Maslin, M. 2015. Defining the Anthropocene. *Nature* 519: 171–180. <https://doi.org/10.1038/nature14258>.
- Loreau, M., Mouquet, N., Holt, R.D. 2003. Meta-ecosystems: a theoretical framework for a spatial ecosystem ecology. *Ecology Letters* 6: 673-379.
- Mace, G.M. 2014. Whose conservation? *Science* 345: 1558-1560. Doi: 10.1126/science.1254704
- Natural Capital Coalition. 2016. “Natural Capital Protocol”. Disponível em: [www.naturalcapitalcoalition.org/protocol](http://www.naturalcapitalcoalition.org/protocol).
- Niemeijer, D., Groot, R.. 2008. A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecological Indicators*. 8. 14-25. 10.1016/j.ecolind.2006.11.012.

- Odum, E. P., Barrett, G. W. 2004. *Fundamentals of Ecology*. 5th Edition. Thomson Brooks/Cole. 624pp.
- ONU. 2015. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Resolução A/RES/70/1.
- Padua, J. A., Saramago, V. 2023. O Antropoceno na perspectiva da análise histórica: uma introdução. *Topoi* (Rio de Janeiro). 24: 659-669. 10.1590/2237-101x02405401.
- Ramos, W., Barros, S. Veloso, L. 2022. Estratégias ESG e os objetivos de desenvolvimento sustentável. *Framework conceitual e de gestão*. Editora CRV, Curitiba, 137pp.
- Sachs J. D. 2015. *The Age of Sustainable Development*. New York: Columbia University Press. 543p.
- Sachs, J. D., Schmidt-Traub, G., Kroll, C., Lafortune, G., Fuller, G. 2016. *SDG Index and Dashboards – Global Report 2016*. Bertelsmann Stiftung & Sustainable Development Solutions Network. 512pp.
- Salameh, M.T.B., Alraggad, M., Harahsheh, S.T. 2021. The water crisis and the conflict in the Middle East. *Sustainable Water Resources Management* 7. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-021-00549-1>.
- Salameh, M.T.B., Alraggad, M., Harahsheh, S. T. 2021. The water crisis and the conflict in the Middle East. *Sustainable Water Resources Management*, 7(5): 69-75.
- Shumilova, O., Tocker, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J.A., Gleick, P. 2023. Impact of the Russia-Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability* 6: 578-586. <https://www.nature.com/articles/s41893-023-01068-x>
- Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., De Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernandez-Agüero, J.A., Gleick, P. 2023. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6(5): 578-586.
- Silva, G.C., Regan, E.C., Pollard, E.H.B. Addison, P.F.E. 2019. The evolution of corporate no net loss and net positive biodiversity commitments: understanding appetite and addressing challenges. *Business Strategy and the Environment*, 28:1481-1495.
- Silva, A., Souza, É., Leal, R., Arruda, F., Bezerra, D. 2025. Sustentabilidade empresarial como vantagem competitiva: Práticas ESG na administração de negócios do século XXI. *IOSR Journal of Business and Management*. 27. 18-38. 10.9790/487X-2706081838.
- Sundar, S., Heino, J., Roque, F.O., Simaika, J.P., Melo, A.S., Tonkin, J.D., Nogueira, D.G., Silva, D.P. 2020. Conservation of freshwater macroinvertebrate biodiversity in tropical regions. *Aquatic Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 30: 1238-1250.doi: 10.1002/aqc.3326.
- TNFD (Taskforce on Nature-related Financial Disclosures). 2023. *Recommendations of the Taskforce on Nature-related Financial Disclosures*. 154pp.
- UN Global Compact. 2004. *Who Cares Wins: Connecting Financial Markets to a Changing World*. 58pp.
- UNITED NATIONS. 2024. *System of Environmental-Economic Accounting - Ecosystem Accounting*. Department of Economic and Social Affairs - United Nations. New York, Statistical Papers Series F No. 124, 393pp.
- Valente-Neto, F., Mello, J.L.S., Pestana, G.C., Shimabukuro, E.M., Siqueira, A., Covich, A.P., Saito, V.S. 2025.

- Ecological perspectives on the organization of biodiversity in Neotropical streams. *Hydrobiologia* 852: 3025-3047. <https://doi.org/10.1007/s10750-024-05631-1>.
- Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R., Davies, P.M. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467: 555-561. <https://doi.org/10.10138/nature09440>.
- WCED – World Commission on Environment and Development. 1987. *Our Common Future*. Oxford University Press, 300pp.
- White, T.B, Bromwich, T., Bang, A., Bennun, L, Bull, J., Clark, M., Milner-Gulland, E.J., Prescott, G.W., Starkey, M., Ermgassen, O.S.E., Booth, H. 2024. The “nature-positive” journey for business: A conceptual research agenda to guide contributions to societal biodiversity goals. *One Earth*. 7. 1373-1386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.07.003>.
- Wilson, E.O. 2002. *The Future of Life*. Harvard University Press, 250pp.
- Woodward, G., Gessner, M.O., Giller, P.S. 2012. Continental-scale effects of nutrient pollution on stream ecosystem functioning. *Science* 336: 1438-1440. <https://doi.org/10.1126/science.1219534>
- World Economic Forum. *Global Risks Report 2025: A world of growing divisions*. Geneva: World Economic Forum, 2025. Disponível em: [https://esgnews.com/wpcontent/uploads/2025/02/WEF\\_Global\\_Risks\\_Report\\_2025-1.pdf](https://esgnews.com/wpcontent/uploads/2025/02/WEF_Global_Risks_Report_2025-1.pdf). Acessado em: 28 abr. 2025.
- WWF-BRASIL. 2021a. Como a perda de biodiversidade afeta a mim e as outras pessoas? World Wide Fund for Nature – WWF. Disponível em: [https://www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/especiais/biodiversidade/consequencias\\_perda\\_biodiversidade/](https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/especiais/biodiversidade/consequencias_perda_biodiversidade/). Acessado em 03 de outubro de 2022.
- WWF-BRASIL. 2021b. Benefícios e custos do uso da biodiversidade. World Wide Fund for Nature – WWF. Disponível em: [https://www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/especiais/biodiversidade/beneficios\\_custos\\_biodiversidade/](https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/especiais/biodiversidade/beneficios_custos_biodiversidade/). Acessado em 03 de outubro de 2022. ●

CAPÍTULO

# 2

## PESQUISA E INOVAÇÃO NO PROJETO IBI UHE FURNAS & UFMG: METODOLOGIAS DE PESQUISA, CIÊNCIA BÁSICA E APLICABILIDADE

Ricardo R. C. Solar,  
Paulo S. Pompeu,  
Carlos B. M. Alves  
& Marcos Callisto

**Palavras-chave:**

*biodiversidade, sustentabilidade,  
hidrelétricas, ciência aplicada,  
modelo PSR, natureza positiva.*

Como citar este capítulo:

Solar, R.R.C., Pompeu, P.S., Alves, C.B.M. & Callisto, M. (2026). Pesquisa e Inovação no Projeto IBI UHE Furnas & UFMG: Metodologias de Pesquisa, Ciência Básica e Aplicabilidade. In: Callisto, M. & Alves, C.B.M. (eds.) Ecologia e Pesquisa Transdisciplinar no Setor Elétrico: Resultados e Aprendizados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG. Belo Horizonte, pp. 49-67.

## Resumo

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos, metodológicos e aplicados do Projeto IBI UHE Furnas & uFMG, uma parceria entre Universidades e o setor elétrico, voltada ao desenvolvimento de conhecimento técnico-científico sobre os efeitos de pressões antrópicas em áreas sob influência de empreendimentos hidrelétricos. O projeto parte do reconhecimento das crescentes alterações induzidas pelo uso e ocupação da terra sobre a biodiversidade aquática e os ecossistemas associados, adotando uma abordagem analítica orientada por evidências científicas. Com base em uma pergunta central que articula ciência básica e aplicação prática sobre os efeitos do uso da terra na qualidade da água, heterogeneidade de habitats e biodiversidade, a equipe delineou um estudo pautado por rigor metodológico e transdisciplinaridade. O capítulo discute a adoção do modelo Pressão–Estado–Resposta (PSR) como estrutura analítica para relacionar impactos antrópicos a indicadores ecológicos, destacando o uso de réplicas verdadeiras e o controle de fatores de confusão no desenho amostral. A operacionalização incluiu amostragens em 80 pontos (riachos e reservatório), capacitação de estudantes e aplicação de protocolos de ciência cidadã. Os dados gerados subsidiam práticas de monitoramento e gestão, reforçando a importância da padronização e da integração entre ciência, educação ambiental e inovação tecnológica. Conclui-se que o projeto representa um exemplo bem-sucedido de pesquisa inspirada no “Quadrante de Pasteur”, em que o conhecimento ecológico fundamenta ações concretas de restauração e planejamento ambiental. ●

1

## Histórico do Projeto

A biodiversidade ocupa posição central na agenda global, impelindo empresas a adotarem estratégias denominadas *nature positive*, que são aquelas que visam prevenir e reverter a perda de componentes naturais, alinhando-se às metas de restauração de ecossistemas (Miller et al. 2024; White et al. 2024). Os diversos ecossistemas terrestres, somados aos recursos hídricos nele disponíveis, sustentam e provisionam serviços essenciais como regulação climática e segurança hídrica e alimentar, fundamentais para atividades humanas e econômicas. Contudo, a intensificação de pressões de origem antrópica, como mudanças no uso da terra, sobre-exploração de recursos naturais, poluição e alterações climáticas são uma ameaça à integridade desses sistemas e exigem respostas urgentes de toda a sociedade (Barlow et al. 2018; Cabernard et al. 2024, Wilker et al. 2024). É nesse contexto que o conceito *nature positive* emerge como proposta transformadora, buscando redefinir a relação entre sociedade, economia e meio ambiente por meio de ganhos líquidos para a natureza (Baggaley et al. 2023). Ainda assim, sua aplicação prática enfrenta riscos por interpretações reducionistas, que podem limitar sua eficácia em gerar benefícios tangíveis para a biodiversidade ou avançar em objetivos socioambientais integrados (Milner-Gulland 2022; zu Ermgassen et al. 2022, Maron et al. 2024).

Assim, com o reconhecimento da perda de biodiversidade como ameaça ao capital natural, instituições financeiras e corporações têm despertado para a necessidade de transformações profundas para mitigar riscos estratégicos (p. ex. financeiros, regulatórios e reputacionais), associados ao esgotamento ambiental (Smith et al. 2020; White et al. 2024). O Marco Global de Biodiversidade (GBF), estabelecido na COP15 (2022), reforçou essa necessidade urgente, ao incluir metas como a Meta 15, que demanda do setor privado transparência na divulgação de impactos e compromissos concretos estabelecidos para reverter a perda de biodiversidade até 2030, visando à redução de impactos negativos e aumento dos impactos positivos sobre a biodiversidade (White et al. 2024). Além disso, a Meta 15 visa à redução de impactos negativos e aumento dos positivos sobre a biodiversidade. Na COP16, realizada em 2024, muitos dos debates destacaram a urgência em desenvolver métricas robustas capazes de medir impactos positivos das atividades, aliando padrões regulatórios a modelos de negócio que integrem proteção e restauração ambiental (Miller et al. 2024). Essas diretrizes exigem não apenas a quantificação de dependências e riscos ligados à natureza, mas também a proposição de ações de mitigação. Tais práticas oferecem vantagens estratégicas para todos os atores, como fortalecimento de reputação, redução de riscos regulatórios e diferenciação de mercado; além de vantagens operacionais, como aumento da resiliência climática, redução de custos e acesso a novas oportunidades econômicas (Miller et al. 2024). Entretanto, a carência de dados operacionais detalhados, a complexidade na seleção de métricas confiáveis e a conciliação entre interesses corporativos e socioambientais permanecem como um dos maiores desafios à aplicação do conceito (Booth et al. 2024). Entre os múltiplos caminhos para superar os desafios, está o envolvimento de vários setores da sociedade (entre empresas, governos e

academia), facilitando inovações tecnológicas e políticas, além de embasar práticas de monitoramento em evidências científicas (Stokes 1997; Devenish et al. 2022). Parcerias com universidades, por exemplo, podem viabilizar acesso ao conhecimento mais recente sendo desenvolvido no setor acadêmico (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos 2024), além de viabilizar interações com a sociedade por meio de ações de ciência cidadã e educação ambiental, fortalecendo a base técnica para decisões sustentáveis e disseminando boas práticas junto aos diversos extratos da sociedade (p.ex. escolas, membros de comitês de bacia, associações de pescadores). Essa sinergia, além de reduzir incertezas metodológicas, também alinha os modelos de negócio e desenvolvimento econômicos às demandas contemporâneas por transparência e impacto líquido positivo, consolidando a transição para uma economia regenerativa (Kadykalo et al. 2021).

Assim, para evitar distorções, é essencial compreendermos o conceito como um compromisso amplo, capaz de orientar ações setoriais concretas. Empresas do setor elétrico, por exemplo, além de prestarem o serviço do fornecimento de energia, têm papel estratégico nessa transição, ao adotar medidas como conservação de habitats, mitigação de impactos operacionais e investimento em restauração, promovendo mudanças transformadoras rumo à sustentabilidade ambiental (Miller et al. 2024). O Projeto IBI UHE Furnas & UFMG foi um investimento em pesquisa e inovação, com resultados práticos e desenvolvimento de metodologias que resultaram em inovações ecotecnológicas com potencial aplicação em unidades hidrológicas de outros empreendimentos hidrelétricos no Brasil.

2

## Quais foram as perguntas que motivaram o projeto?

Inicialmente, o Projeto IBI UHE Furnas & UFMG tinha o desafio de realizar um diagnóstico atual de condições ambientais na bacia de drenagem do reservatório da UHE Furnas, avaliando múltiplas escalas espaciais, incluindo usos da terra, integridade de zonas ripárias, diversidade de habitats físicos no reservatório e em riachos afluentes, qualidade de água, biodiversidade, bens e serviços ecossistêmicos. Assim, foram aplicados índices ecológicos e geográficos que quantificam gradientes de condições ambientais, desde o melhor cenário (condições de referência, regiões ou ecossistemas minimamente alterados por atividades humanas e, no reservatório, regiões com Máximo Potencial Ecológico (conceito utilizado para ecossistemas construídos pelo homem) até o pior cenário (ecossistemas aquáticos severamente degradados por atividades humanas, como o lançamento de esgotos e degradação da região ripária). Por se tratar de ambientes de origem antrópica, reservatórios não possuem áreas de referência genuínas. A avaliação de qualidade ambiental e integridade biótica foi realizada buscando avaliar o uso e ocupação da terra, a qualidade de água, o ambiente físico e elementos de biodiversidade nos riachos de cabeceira que drenam para o reservatório

da UHE Furnas. Este inventário de biodiversidade incluiu espécies de peixes, insetos aquáticos, moluscos e crustáceos. Em paralelo aos levantamentos de qualidade ambiental e integridade biótica realizados pela equipe de pesquisadores da UFMG & UFLA, atividades de educação ambiental foram realizadas em escolas com professores e estudantes e capacitações para graduandos e pós-graduandos na UFMG, UFLA e UEMG. Estas atividades incluíram iniciativas de Ciência Cidadã, por meio de cursos de capacitação, desenvolvimento de Protocolo de Avaliação Ecológica Rápida (RAP) da Integridade de Matas Ciliares e Serviços Ecossistêmicos, aplicação de Protocolo RAP de Diversidade de Habitats, avaliação de qualidade de água e de bioindicadores bentônicos (insetos aquáticos, moluscos e crustáceos) e peixes. Estudantes e seus professores foram previamente capacitados a avaliar a qualidade ambiental de microbacias próximas às suas escolas e, a partir do conhecimento da integridade ecológica, debateram possíveis soluções para reabilitação e conservação de qualidade de água e biodiversidade.

Em síntese, o desafio inicial assumido pela equipe de pesquisadores deste projeto era avaliar de forma transdisciplinar como as atividades antrópicas alteram os usos da terra e ocupação do solo, integridade de zonas ripárias, qualidade de água e biodiversidade. As atividades de pesquisa e educação ambiental/ciência cidadã realizadas na bacia do reservatório da UHE Furnas foram um exercício transdisciplinar para desenvolver um *roadmap* de abordagens e etapas de estudos, como base fundamental para garantir a sustentabilidade ambiental na bacia.

### 3

## Motivações em Pesquisa e Inovação

O impulso contemporâneo a pesquisas e inovações científicas está cada vez mais orientado pela busca de soluções que combinem valor de mercado com sustentabilidade ambiental e social. Investir em ciência, tecnologia e inovação apresenta excelente potencial para fomentar o desenvolvimento econômico e a integração social (Schneegans et al. 2021). Nesse contexto, universidades e empresas unem esforços em projetos de relevância socioambiental; por exemplo, no campo da eficiência e diversificação energética; traduzindo a pesquisa acadêmica em aplicações práticas para o setor elétrico. A UNESCO destaca que a ciência é fundamental para um futuro sustentável, fornecendo soluções a desafios globais como acesso à energia limpa e segurança alimentar (*UN capacity-building programme on technology facilitation for SDGs - Working Team 6 2022*). Instituições brasileiras ilustram esse alinhamento estratégico: parcerias entre a Universidade e o setor elétrico (via UHE Furnas – AXIA Energia e outras empresas) têm buscado gerar inovações tecnológicas que conciliem conhecimento científico básico e valor de mercado, com benefícios ambientais e sociais tangíveis.

Essa orientação de pesquisa, aplicada à sustentabilidade, reflete as metas de desenvolvimento econômico e social delineadas em agendas internacionais. Conforme apontado pela UNESCO, direcionar a ciência para problemas reais pode criar empregos e aumentar a renda, ao mesmo tempo em que resolve demandas fundamentais da sociedade (*UN capacity-building programme on technology facilitation for SDGs - Working Team 6 2022*). Nessa perspectiva, o projeto IBI UHE FURNAS & UFMG se insere em um cenário voltado ao desenvolvimento sustentável; enfatiza-se que suas iniciativas buscam gerar valor de mercado de longo prazo e impacto social positivo, sem aqui entrar em detalhes metodológicos. Em síntese, o esforço colaborativo entre universidade e empresa busca equilibrar progresso científico, viabilidade econômica e benefícios comunitários, reafirmando o papel da pesquisa e inovação na promoção de soluções energéticas sustentáveis e socialmente inclusivas. A inserção de novas práticas na empresa, advindas da pesquisa, são exemplos da incorporação de novos conceitos e de avanços no sentido da sustentabilidade. Por outro lado, a formação de profissionais no ensino médio, graduação e pós-graduação em práticas transdisciplinares os capacita a buscar soluções sustentáveis para os problemas emergenciais de mudanças globais.

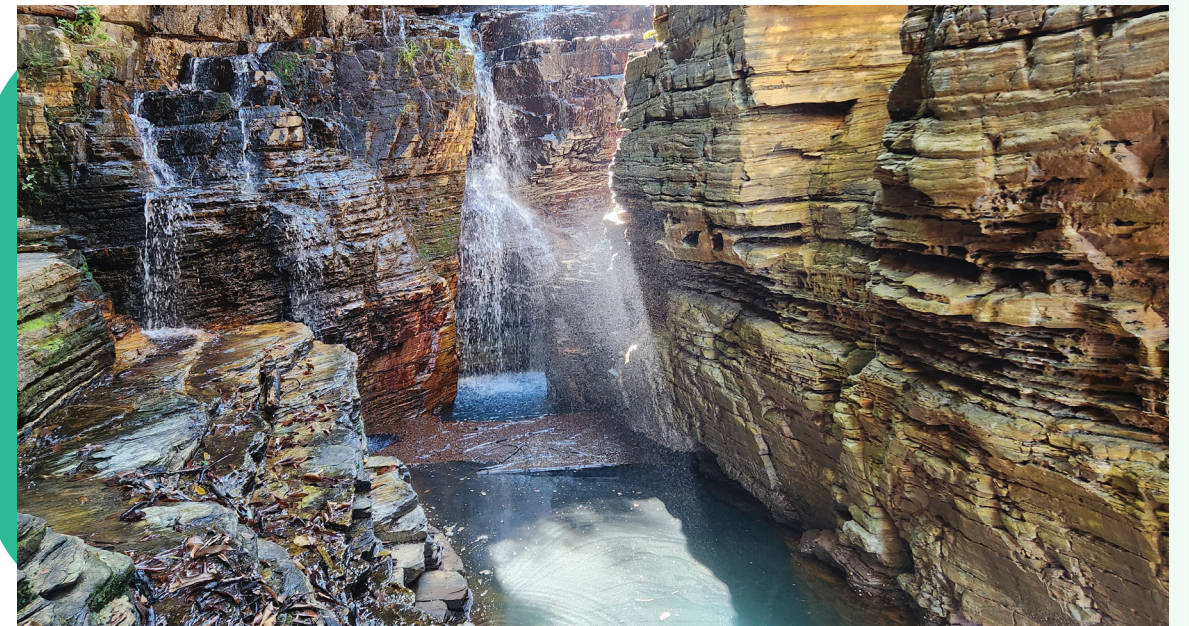


Foto: Mario Sacramento.

## 4 Utilização do método científico no delineamento do estudo

**Pergunta central do projeto: Como as mudanças no uso da terra devido à ocupação humana alteram a qualidade de água, heterogeneidade de habitats, respostas de biodiversidade e serviços ecossistêmicos na bacia?**

A pergunta central do projeto busca integrar objetivos de compreensão teórica e aplicação prática, questionando, por exemplo, como as pressões antrópicas no entorno da UHE Furnas afetam a qualidade ecológica e a biodiversidade na bacia. Essa formulação de problema situa-se claramente no “Quadrante de Pasteur” (Stokes 1997), em que a busca por entendimento fundamental anda de mãos dadas com objetivos práticos. Conforme Stokes (1997), esse tipo de pesquisa *user-inspired* não vê tensão irreconciliável entre conhecimento puro e sua utilidade; ao contrário, constitui reconstrução da visão tradicional que opõe ‘entendimento’ e ‘uso’, a partir do exemplo dos estudos de Pasteur em microbiologia. Suas investigações foram decisivas tanto para o avanço do conhecimento básico; como a consolidação da biogênese como explicação para a origem da vida, quanto para aplicações práticas; como o desenvolvimento da pasteurização e a consequente preservação de alimentos e bebidas (Stokes 1997). A abordagem epistemológica inspira-se em Chalmers (2013) ao reconhecer que não existe um único método científico obrigatório; a ciência envolve múltiplos métodos e inferências, combinando hipóteses e experimentação. Assim, a questão central do projeto é formulada de modo a permitir tanto a investigação teórica rigorosa (qualidade ecológica, biodiversidade) quanto aplicação prática (gestão ambiental), em consonância com o argumento de Stokes sobre pesquisa motivada pela curiosidade e pela utilidade.

## 5 Pressões, condição, resposta (modelo Pressão – Estado – Resposta – PSR)

O modelo Pressão–Estado–Resposta (PSR, em inglês) é utilizado como arcabouço conceitual para articular indicadores ambientais no projeto. Este modelo clássico, proposto por Rapport et al. (1985) e pela Organisation For Economic Co-Operation and Development (1993) descreve como as ações humanas (**pressões**) alteram o **estado** do meio ambiente e motivam **respostas** sociais ou políticas. Em linhas gerais, por pressão, nos referimos a fatores antrópicos (como poluição, exploração de recursos, alterações hidrológicas); por estado, ao conjunto de condições físicas e bióticas resultantes (qualidade da água, estrutura do habitat, composição da fauna e flora); e por respostas as estratégias de gerenciamento ou mitigação. No contexto deste projeto, pode-se aplicar o modelo PSR para identificar e categorizar variáveis-chave de avaliação ecológica. Neste projeto, o modelo de modelagem baseado em PSR foi utilizado para identificar e categorizar critérios e indicadores relevantes de avaliação de saúde ecológica (Gayen & Datta 2023). Esse referencial metodológico é a base da seleção de indicadores ambientais alinhados a pressões específicas e fornece coerência lógica às análises planejadas.

## 6 Nexo causal: pressões antrópicas, qualidade ecológica, biodiversidade

Nesse modelo proposto no Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, pode-se identificar um encadeamento de nexos causais: pressões antrópicas intensificam a degradação ambiental, o que, por sua vez, afeta negativamente a biodiversidade aquática e os serviços ecossistêmicos. Outras práticas humanas insustentáveis (contaminação por agroquímicos, desmatamento, eutrofização de rios urbanos, alteração de fluxos hídricos etc.) degradam a qualidade do ecossistema, reduzindo a complexidade de habitat e alterando os recursos disponíveis, com reflexos na biodiversidade e seus serviços ecossistêmicos. Estas abordagens podem ser incorporadas nas avaliações, quando pertinentes. Esse agravamento do “estado” ambiental limita as condições de sobrevivência das espécies. Por exemplo, estudos documentam que diversas atividades humanas produzem efeitos letais ou severos, funcionando como “grandes estressores à vida aquática” nos ecossistemas fluviais (Leal et al. 2020). Em termos gerais, uma maior pressão leva ao pior estado ecológico (p. ex. menor oxigenação da água, eutrofização e perda de ecossistemas ripários), e isso resulta na piora de indicadores ecológicos, como a redução na riqueza de espécies sensíveis, aumento na abundância de espécies resistentes, facilitação para invasões por espécies não nativas e homogeneização de comunidades biológicas (Solar et al. 2015). No nosso modelo de pressão-estado-resposta, fica explícita essa cascata: as pressões elevam indicadores de pressão (poluição, uso de solo), alteram os indicadores de estado (qualidade da água, estrutura de habitat, cobertura vegetal) e mostram ações (monitoramento, políticas ambientais, recomposição de matas ciliares, tratamento de esgotos) para mitigar impactos. Assim, há consistência conceitual ao relacionar empiricamente pressões humanas, índices de integridade ecológica e métricas de biodiversidade, reforçada pela literatura em ecologia de conservação e experiências da equipe em diversas áreas no Brasil.



Foto: Ricardo R. C. Solar.

7

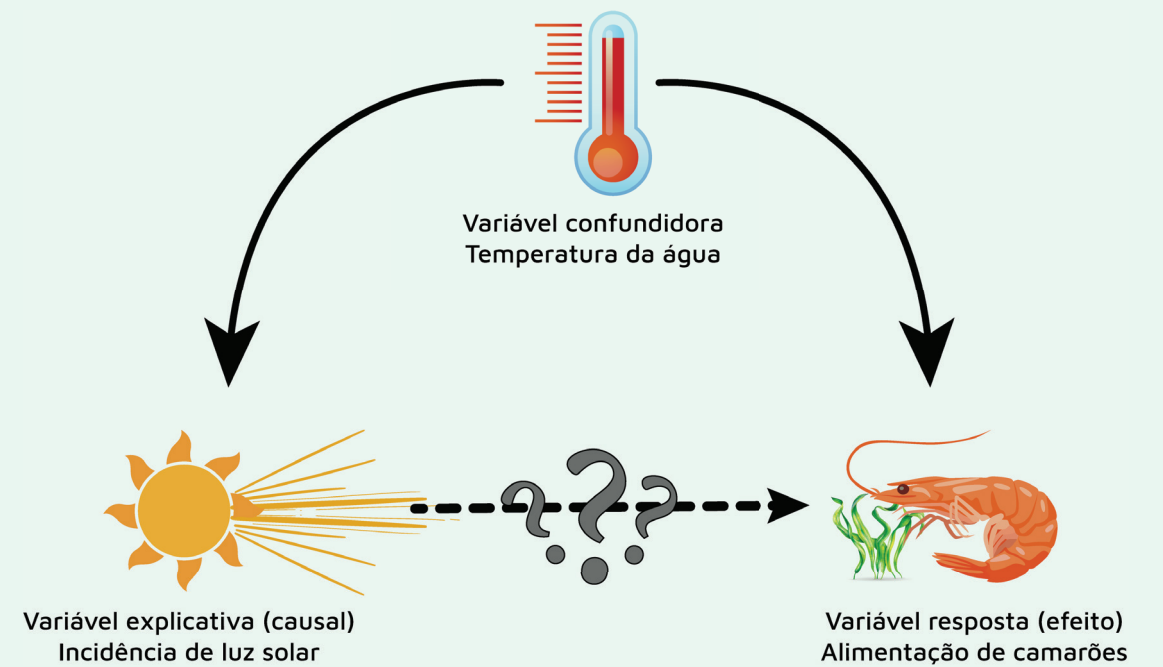
## Desenho amostral: conceitual

O desenho amostral define, em termos gerais, como se coletarão dados para responder à pergunta central de um projeto de pesquisa. Este planejamento é fundamental e considera todas as variáveis de interesse (p.ex. parâmetros físicos e químicos de qualidade de água, atributos das comunidades biológicas) e toda a estrutura de distribuição em escalas espacial e temporal de interesse. Seguindo preceitos de desenho experimental rigoroso (Ruxton & Colegrave 2017) identificam-se, em primeiro lugar, as unidades de amostragem (p.ex. regiões do reservatório, pontos de coleta em diferentes habitats), de modo a garantir cobertura representativa do ambiente. Em seguida, planeja-se a amostragem considerando replicação e controle de fatores de confusão. Por exemplo, na seleção dos pontos, optamos por utilizar um método padronizado e já conceituado de seleção de locais de coleta aleatoriamente balanceado, todavia garantindo representação de todo o território (ver Capítulo 4). Dando sequência ao processamento de dados, são realizadas análises em laboratório (triagem, contagem de indivíduos, identificação dos taxa, em seus diversos níveis - famílias, gêneros e espécies). Por fim, todas as informações geradas em campo e laboratório, após digitalização e conferência, são submetidas a análises estatísticas para o cálculo de métricas e índices. Todas essas discussões, que inicialmente podem parecer muito conceituais, asseguram que cada fator relevante (como características da paisagem, usos antrópicos do reservatório, geomorfologia do local, etc.) seja levado em conta, minimizando ao máximo as fontes de confusão em relação à pergunta de interesse. A clareza no desenho amostral é fundamental para manter coerência metodológica, bem como para garantir que os resultados sejam estatisticamente robustos. Experimentos mal planejados não só desperdiçam tempo, recursos e materiais, pois não produzem os dados suficientes para responder à questão de pesquisa, mas também podem exigir repetição de ensaios, ampliando ainda mais os custos. Em estudos com organismos vivos, esse desperdício se traduz em estresse e sofrimento desnecessários aos animais, o que reforça a necessidade de um desenho experimental criterioso que minimize o número de indivíduos utilizados sem comprometer a qualidade dos resultados (Ruxton & Colegrave 2017).

No projeto IBI UHE Furnas & UFMG foram desenvolvidos projetos de conclusão de curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado. Todos os estudantes formados e que participaram da equipe de pesquisas foram treinados em Cursos de Capacitação, Treinamentos em Campo e participaram ativamente de equipes que realizaram amostragens em campo e do processamento de amostras em laboratório. Todos os dados obtidos foram integrados em um banco de dados comum, com regras para inserção de informações e acesso (ver Capítulo 3) como base para o cálculo de métricas e índices. Em síntese, o desenho amostral do projeto e os cuidados metodológicos de planejamento, realização de amostragens em campo e, processamento em laboratório favoreceram a formação transdisciplinar de estudantes, a integração entre colegas de diversas áreas e a geração de conhecimentos de forma inovadora, transdisciplinar e integrada.

### BOX 1: Fatores de confusão

Fatores de Confusão são variáveis que interferem (confundem) na relação que desejamos investigar entre um fator de interesse (A) e um resultado (B), porque influenciam ambos simultaneamente. Por exemplo, ao avaliar como a quantidade de luz solar (A) afeta a taxa de captura de alimentos por crustáceos (B); a temperatura da água (C) pode ser um fator que aumenta igualmente a captura de alimentos. Como não é possível separar a quantidade de luz solar incidente do aumento de temperatura causado, isso pode mascarar o efeito isolado da luz que queremos medir. Ainda pior, se não houve planejamento ou simplesmente a consciência da existência dessa variável, pode-se assumir um efeito de A em B que é totalmente espúrio. Em estudos de campo, confusões também surgem quando diferenças não planejadas, como medir dois pontos em dias distintos, podem distorcer as variáveis medidas, caso fatores como uma chuva torrencial recente não sejam levados em conta e aumentem a turbidez e a quantidade de fluxo de água em um riacho. Reconhecer e controlar esses fatores, seja por meio de desenho experimental adequado (aleatorização, réplicas suficientes, blocos, contrabalanceamento) ou, quando possível, por análises estatísticas, é essencial para garantir que as conclusões reflitam de fato a influência do fator sob investigação. Estar atualizado quanto ao “estado da arte” desse planejamento, às dificuldades conhecidas, particularidades das novas áreas de estudo, logística, etc., também é essencial para o sucesso do projeto.



## 8 Desenho amostral: réplicas e pseudorréplicas

Por fim, ao propor um delineamento experimental, é imprescindível que tenhamos total clareza e distinção entre os conceitos de réplicas verdadeiras e pseudorréplicas (Hurlbert 1984). A réplica verdadeira é a menor unidade experimental à qual um tratamento é aplicado de forma independente, de modo que cada amostra possa estimar isoladamente a variabilidade natural do sistema e garantir resultados estatísticos válidos (Heffner et al. 1996). É sobre as réplicas independentes que aplicamos o mesmo tratamento ou condição experimental, com o objetivo de estimar a variabilidade inerente ao sistema e permitir inferências estatísticas robustas. Colocando de maneira ainda mais simples, cada réplica deve constituir uma entidade separada na qual medimos nossas variáveis, de modo que os valores obtidos em uma amostra não possam influenciar e nem sejam influenciados pela medida em outra amostra. Ter réplicas independentes é indispensável para estimar a variabilidade natural dentro de cada tratamento e realizar inferência estatística confiável.

Quando essa premissa de independência amostral é corrompida, ou quando há interdependência entre as amostras, temos a pseudorrepliação. A pseudorrepliação ocorre quando medidas repetidas em uma mesma unidade experimental, ou unidades experimentais que não são estatisticamente independentes são tratadas, de maneira errônea, como réplicas verdadeiras em análises estatísticas (Hurlbert 1984). Essa falha pode inflar artificialmente o tamanho amostral e levar a conclusões equivocadas sobre os efeitos de interesse. Ruxton & Colegrave (2017) enfatizam a importância de evitar a todo custo, na fase de delineamento experimental a pseudorrepliação, pois ela viola os pressupostos de independência estatística e leva a conclusões enviesadas. Na forma de um exemplo prático, teríamos pseudorréplicas no caso de, com o objetivo de entender a variação de condições de qualidade de águas em riachos, medíssemos centenas de pontos dentro de um mesmo riacho, em vez de avaliar riachos distintos. Observe aqui que é fácil distinguir a diferença, pois ao medir pontos no mesmo riacho, estas amostras estão todas sujeitas (dependentes) às condições daquele riacho. Nesse caso, a única forma de obtermos réplicas verdadeiras é medir diferentes riachos na paisagem e tratar cada um deles como uma réplica verdadeira. Foi o que fizemos no Projeto IBI UHE Furnas & UFMG: 40 pontos amostrais em riachos independentes, aleatorizados e balanceados ao longo de um gradiente de condições ambientais. Além disso, utilizamos 40 pontos dentro do reservatório, que a depender da pergunta, representam pseudorréplicas, mas são importantes para que tivéssemos uma representação fiel das condições na região litorânea desse reservatório. Esse cuidado garante a validade dos testes estatísticos e a robustez dos resultados inferidos, permitindo conclusões consistentes e com aplicação prática à gestão, conservação e investimentos de restauração.

É importante lembrar, todavia, que a fronteira entre réplicas verdadeiras e pseudorréplicas não é limite estanque, e que não há uma fórmula mágica para determinar onde terminam as réplicas e começam as pseudorréplicas (Davies & Gray 2015). Na verdade, esse limite é totalmente dependente da escala ecológica da pergunta e do nível de inferência desejado. Como observam Hurlbert (1984) e Oksanen (2001), o que

conta como réplica verdadeira em experimentos de escala local pode configurar pseudorrepliação quando o objetivo é extrapolar resultados para níveis maiores, como paisagens ou biomas. Nesse sentido, a definição de unidade experimental deve ser intensamente planejada e adequada caso-a-caso e estritamente pensada quanto à pergunta ecológica de interesse. Reconhecer previamente os tipos de informações levantadas (sejam no formato de réplicas verdadeiras ou pseudorréplicas) é fundamental para a aplicação das análises e testes corretos, e extrair os melhores resultados corretos dos dados coletados. Assim, se estamos interessados em variações entre múltiplos sítios de estudo, cada sítio individual será uma réplica e as amostras dentro dos sítios serão consideradas pseudorréplicas (Figura 1). Todavia, se nosso interesse é avaliar a variabilidade dentro de um único sítio amostral, as amostras podem constituir réplicas naquela escala. Dessa forma, para evitar a pseudorrepliação, é fundamental que o desenho experimental especifique de forma inequívoca qual será a unidade de replicação (por exemplo, se cada sítio de estudo ou cada subamostra dentro de um sítio constitui a réplica verdadeira), defina com clareza a escala de inferência desejada (se as conclusões devem ser aplicadas ao nível local, ao da paisagem ou ao de um bioma) e descreva detalhadamente como essa estrutura hierárquica de “blocos” (sítios) e “subunidades” (amostras) será operacionalizada na análise estatística, assegurando que cada inferência aconteça exatamente no nível pretendido (Ruxton & Colegrave 2017).

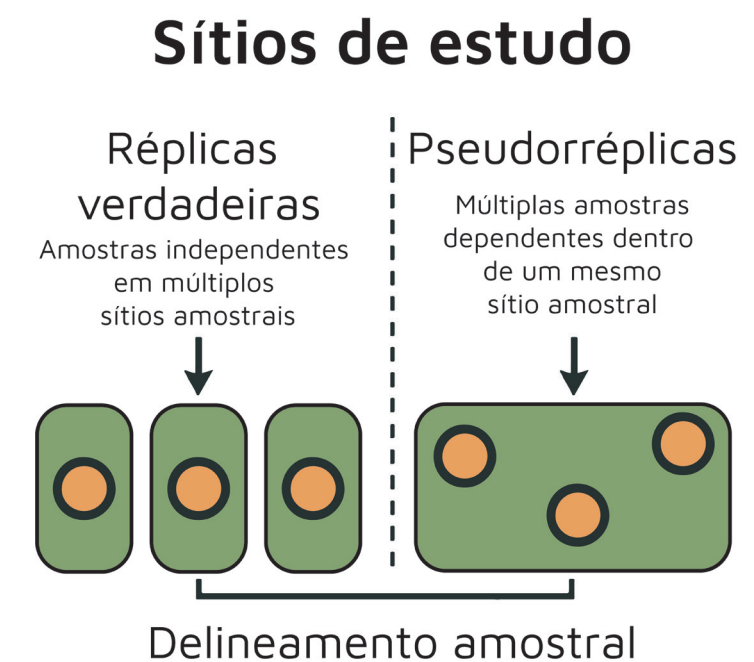


Figura 1: Representação esquemática da diferença entre replicações verdadeiras e pseudorrepliações em estudos ecológicos. À esquerda, as replicações verdadeiras são obtidas a partir de múltiplos sítios de estudo independentes, permitindo inferências mais robustas. À direita, as pseudorrepliações ocorrem quando múltiplas amostras são coletadas dentro de um único sítio, sem replicação espacial, o que pode comprometer a validade estatística dos resultados. Adaptado de conceitos discutidos por Hurlbert (1984).

## 9 Operacionalização das atividades de campo – do método científico para a aplicação

Esta questão é fundamental quando na definição de desenhos experimentais, uma vez que, sem réplicas verdadeiras suficientes, pode-se concluir que não há diferença entre amostras ou uma relação não é existente, quando, na verdade, ela existe, mas o teste não teve “força” para detectá-la. Em estatística, tal fato é descrito como erro do tipo II. Em outras palavras, uma relação existente, por exemplo entre uma pressão (poluição) e uma resposta biológica (número de espécies locais) pode não ser detectada simplesmente porque não se observou o número de réplicas necessárias.

Com base nas experiências anteriores da equipe, considerando a metodologia de amostragem de 40 sítios amostrais em riachos e 40 sítios amostrais na região litorânea do reservatório, foram planejadas as amostragens em períodos propícios. A logística abarcou todo o planejamento para hospedagem, alimentação e deslocamento com veículos 4x4 alugados para acesso a todos os locais, com 4 pessoas em cada veículo. As equipes foram compostas por especialistas responsáveis por todos os dados primários a serem coletados em campo, incluindo: preenchimento de protocolos de habitat físico, mensuração de parâmetros físicos e químicos de qualidade da água, biodiversidade de macroinvertebrados bentônicos e peixes, além do registro fotográfico do local e atividades desenvolvidas. Todas as amostras (água, invertebrados e peixes) foram identificadas em campo (nome do ponto, data, número da amostra, transecto). Ainda em campo, por meio de montagem de um laboratório avançado, foram realizadas análises limnológicas e preparação para análises posteriores na UFMG, lavagem, triagem e identificação prévia dos taxa de macroinvertebrados, e o registro fotográfico das espécies de peixes, moluscos e crustáceos.

As coletas realizadas adotando a abordagem RAP, com diminuição de 11 (número utilizado em projetos anteriores similares) para 6 transectos por ponto, resultaram em um número 50% menor de amostras a serem triadas (Hughes et al. 2026). Embora os custos em campo sejam similares entre as amostragens (11 x 6), a realização de triagens em campo e laboratório otimizou o tempo gasto no processamento de amostras. Essa otimização resulta na disponibilidade de dados em um tempo menor (6 meses) do que o tempo gasto em projetos anteriores (aproximadamente 1-2 anos). Os custos do processamento devem levar em consideração a qualificação da equipe envolvida. Mesmo contando com pós-doutorandos, os custos em campo deste projeto representaram 1,6% de seu valor total, contra 5,1%, se comparado a projetos similares realizados anteriormente pela equipe deste projeto em bacias de outros empreendimentos hidrelétricos.

## 10

## Síntese: uso e aplicação dos dados em um cenário prático

A integração dos resultados deste estudo em contextos de gestão ambiental requer uma abordagem estruturada e baseada em evidências, apoiada na utilização sistemática de indicadores ambientais integrados. Os dados gerados sobre os impactos das mudanças no uso da terra, na qualidade da água, na heterogeneidade de habitats e na biodiversidade oferecem subsídios técnicos para qualificar a análise e o aprimoramento de práticas de monitoramento ambiental, por meio da incorporação de métricas específicas (e.g. índices de integridade ecológica) aos sistemas de monitoramento corporativo, bem como reforçando práticas já existentes. Nesse sentido, a identificação espacializada de áreas com maior grau de degradação ambiental com trechos do reservatório associados a cargas elevadas de nutrientes, processo de eutrofização ou redução da cobertura de vegetação ripária, pode apoiar a priorização técnica de ações que contribuam para uma avaliação mais objetiva e assertiva de riscos ambientais, operacionais e regulatórios. Além disso, a correlação estabelecida entre pressões antrópicas e declínio de serviços ecossistêmicos (como regulação hídrica) reforça a utilidade de abordagens baseadas em indicadores para a compreensão de dependências ambientais e vulnerabilidades associadas ao uso de recursos naturais, especialmente água e solo.

A adoção do modelo Pressão–Estado–Resposta (PSR) permite traduzir resultados científicos em planos de ação concretos (Organisation For Economic Co-Operation and Development 1993, Gayen & Datta 2023). Por exemplo, indicadores de “pressão” (e.g., desmatamento em áreas de influência) podem acionar alertas para intervenções preventivas, enquanto métricas de “estado” (e.g., diversidade de espécies aquáticas) servem como base para metas de conservação. Muitas vezes, programas de monitoramento ambiental são realizados simplesmente para atender exigências dos órgãos ambientais, sem a internalização do potencial dos resultados em alterar procedimentos internos. Projetos executados ao longo do tempo, por diferentes empresas contratadas, podem trazer informações incomparáveis, impossibilitando comparações espaciais e temporais (Dias et al. 2022). A padronização de metodologias garante a comparabilidade dos resultados. A empresa pode revisar seus protocolos de avaliação contínua, melhorando a qualidade dos desenhos amostrais, utilização de réplicas verdadeiras (e.g., monitoramento em múltiplos riachos independentes) para evitar vieses e garantir robustez estatística (Hurlbert 1984; Ruxton & Colegrave 2017). A internalização desses processos passará pela capacitação técnica das equipes, com workshops sobre métodos de amostragem e interpretação de dados ecológicos, alinhados às diretrizes da Meta 15 do GBF.

Nesse sentido, as parcerias com as universidades, como a colaboração UFMG-AXIA Energia são estratégicas para operacionalizar descobertas. A ciência cidadã (Capítulo 5), por exemplo, pode ser integrada a programas de educação ambiental com comunidades locais, envolvendo moradores na coleta de dados sobre qualidade da água ou biodiversidade, fortalecendo o engajamento social e a transparência corporativa (França et al. 2019). Simultaneamente, a modelagem preditiva desenvolvida no projeto permite antever

cenários de risco (e.g., eutrofização do reservatório sob diferentes taxas de desmatamento, ou em função dos parques aquícolas instalados), apoiando decisões estratégicas como a alocação de recursos para restauração de áreas-chave, favorecendo a priorização de áreas de alto valor de conservação e heterogeneidade ambiental (Solar et al. 2015; Leal et al. 2020).

Desafios associados à seleção e ao aprimoramento de métricas confiáveis para a avaliação de impactos ambientais têm avançado de forma significativa na literatura e na prática científica recente. Nesse contexto, os resultados obtidos neste estudo evidenciam o potencial do uso integrado de indicadores ambientais, operacionais e socioeconômicos como ferramenta analítica para qualificar a compreensão de trade-offs entre diferentes objetivos de gestão, como a eficiência produtiva e a conservação dos ecossistemas (Kadykalo et al. 2021; Devenish et al. 2022). A incorporação progressiva de critérios e indicadores ambientais em instrumentos de planejamento, monitoramento e comunicação institucional deve ser compreendida como parte de um processo contínuo de aprimoramento técnico, alinhado às boas práticas de transparência e ao diálogo com diferentes públicos.

## Conclusões

O Projeto IBI UHE Furnas & UFMG aponta para o valor da ciência aplicada como ferramenta estratégica para promover sustentabilidade socioambiental em empreendimentos hidrelétricos. Desde que adotado um desenho amostral rigoroso, com réplicas verdadeiras e controle de fatores de confusão, é possível gerar dados confiáveis sobre os efeitos das pressões antrópicas na qualidade da água, biodiversidade e serviços ecossistêmicos. A adoção do modelo Pressão–Estado–Resposta (PSR) permite estruturar indicadores ambientais em uma lógica causal, facilitando a tradução do conhecimento científico em ações concretas de monitoramento, mitigação e restauração. Ao mesmo tempo, o envolvimento direto de comunidades locais, escolas e técnicos por meio da ciência cidadã fortalece a integração entre pesquisa, educação e engajamento social, ampliando o impacto transformador do projeto.

Destaca-se, ainda, a formação de uma geração de pesquisadores capacitados em abordagens transdisciplinares, com experiências práticas de campo e laboratório. Esse legado técnico-científico contribui não apenas para a excelência acadêmica, mas também para o avanço de políticas públicas e práticas empresariais alinhadas às metas globais de biodiversidade (como a Meta 15 do GBF), aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU e aos princípios ESG.

## Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG as bolsas de pesquisa de iniciação científica, mestrado, doutorado e produtividade em pesquisa (RS 308350/2022-7; PSP 302328/2022-0, MC 304060/2020-8).

## Referências

- Baggaley, S., Johnston, M., Dimitrijevic, J., Le Guen, C., Howard, P., Murphy, L., Booth, H., Starkey, M. 2023. Nature positive for business Developing a common approach. IUCN. 32pp.
- Barlow, J., França, F., Gardner, T.A., Hicks, C.C., Lennox, G.D., Berenguer, E., Castello, L., Economo, E.P., Ferreira, J., Guénard, B., Gontijo Leal, C., Isaac, V., Lees, A.C., Parr, C.L., K. Wilson, S., Young, P.J., Graham, N.A.J. 2018. The future of hyperdiverse tropical ecosystems. *Nature* 2018 559:7715 559:517–526.
- Booth, H., Milner-Gulland, E.J., McCormick, N., Starkey, M. 2024. Operationalizing transformative change for business in the context of Nature Positive. *One Earth* 7:1235–1249.
- Cabernard, L., Pfister, S., Hellweg, S. 2024. Biodiversity impacts of recent land-use change driven by increases in agri-food imports. *Nature Sustainability*. 7:11 7:1512–1524.
- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2024. Percepção pública da C&T no Brasil-2023. CGEE, Brasília. 30pp.
- Chalmers, A.F. 2013. *What Is This Thing Called Science?* 4th edition. Hackett Publishing Company, Inc., Cambridge, MA. 66pp.
- Davies, G.M., Gray, A. 2015. Don't let spurious accusations of pseudoreplication limit our ability to learn from natural experiments (and other messy kinds of ecological monitoring). *Ecology and Evolution* 5:5295–5304.
- Devenish, K., Desbureaux, S., Willcock, S., Jones, J.P.G. 2022. On track to achieve no net loss of forest at Madagascar's biggest mine. *Nature Sustainability* 5:498–508.
- Dias, A.M.S., Cook, C., Massara, R.L., Paglia, A.P. 2022. Are Environmental Impact Assessments effectively addressing the biodiversity issues in Brazil? *Environmental Impact Assessment Review* 95:106801.
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E.S., Ngo, H.T., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K.A., Butchart, S.H.M., Chan, K.M.A., Garibaldi, L.A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S.M., Midgley, G.F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razzaque, J., Reyers, B., Chowdhury, R.R., Shin, Y.J., Visseren-Hamakers, I., Willis, K.J., Zayas, C.N. 2019. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science* 366: eaax3100.
- França, J.S., Solar, R., Hughes, R.M., Callisto, M. 2019. Student monitoring of the ecological quality of neotropical urban streams. *Ambio* 48:867–878.
- Gayen, J., Datta, D. 2023. Application of pressure–state–response approach for developing criteria and indicators of ecological health assessment of wetlands: a multi-temporal study in Ichhamati floodplains, India. *Ecological Processes* 12:1–20.
- Heffner, R.A., Butler IV, M.J., Reilly, C.K. 1996. Pseudoreplication revisited. *Ecology* 77: 2558–2562.
- Hurlbert, S.H. 1984. Pseudoreplication and the Design of Ecological Field Experiments. *Ecological Monographs* 54:187–211.
- Hughes, R. M., Solar, R., Callisto, M., Pompeu, P.S., Macedo, D.R., Caiafa, L., Alves, C.B.M. 2026. Increasing the cost-effectiveness of neotropical stream assessments based on physical habitat, fish, and macroinvertebrates. *Water Biology and Security*, 100607.

- Kadykalo, A.N., Buxton, R.T., Morrison, P., Anderson, C.M., Bickerton, H., Francis, C.M., Smith, A.C., Fahrig L. 2021. Bridging research and practice in conservation. *Conservation Biology* 35:1725–1737.
- Leal, C.G., Lennox, G.D., Ferraz, S.F.B., Ferreira, J., Gardner, T. A., Thomson, J.R., Berenguer, E., Lees, A.C., Hughes, R.M., Mac Nally, R., Aragão, L.E.O.C., De Brito, J.G., Castello, L., Garrett, R.D., Hamada, N., Juen, L., Leitão, R.P., Louzada, J., Morello, T.F., Moura, N.G., Nessimian, J.L., Oliveira-Junior, J.M.B., Oliveira, V.H.F., De Oliveira, V.C., Parry, L., Pompeu, P.S., Solar, R.R.C., Zuanon, J., Barlow, J. 2020. Integrated terrestrial-freshwater planning doubles conservation of tropical aquatic species. *Science* 370:117-121.
- Maron, M., Quétier, F., Sarmiento, M., ten Kate, K., Evans, M.C., Bull, J.W., Jones, J.P.G., zu Ermgassen, S.O.S., Milner-Gulland, E.J., Brownlie, S., Treweek, J., von Hase, A. 2024. 'Nature positive' must incorporate, not undermine, the mitigation hierarchy. *Nature Ecology and Evolution* 8:14–17.
- Miller, J., Williams, H., McDermott, P., Lewis, V. 2024. Power Plant 2.0 - A guidebook to electrify in harmony with nature. <https://www.eurelectric.org/publications/power-plant-2-0-a-guidebook-to-electrify-in-harmony-with-nature/>.
- Milner-Gulland, E.J. 2022. Don't dilute the term Nature Positive. *Nature Ecology and Evolution* 6:1243–1244.
- Oksanen, L. 2001. Logic of experiments in ecology: Is pseudoreplication a pseudoissue? *Oikos* 94: 27–38.
- OECD- Organization for Economic Co-Operation and Development. 1993. OECD Core Set Of Indicators for Environmental Performance Reviews: A synthesis report by the Group on the State of the Environment. Paris. 30pp.
- Rapport, D.J., Regier, H.A., Hutchinson, T.C. 1985. Ecosystem Behavior Under Stress. 9: 22-27. <https://doi.org/10.1086/284368> 125:617–640.
- Ruxton, G.D., Colegrave, N. 2017. *Experimental Design for the Life Sciences*. 4th edition. Oxford University Press, Oxford, UK. 222pp.
- Schneegans, S., Lewis, J., Straza, T. 2021. Relatório de Ciências da UNESCO: A corrida contra o tempo por um desenvolvimento mais inteligente – Resumo executivo. Page (Schneegans, S., Lewis, J., Straza, T. Eds.). 1st edition. UNESCO Publishing, Paris. 49pp.
- Smith, T., Beagley, L., Bull, J., Milner-Gulland, E.J., Smith, M., Vorhies, F., Addison, P.F.E. 2020. Biodiversity means business: Reframing global biodiversity goals for the private sector. *Conservation Letters* 13: e12690.
- Solar, R.R.C., Barlow, J., Ferreira, J., Berenguer, E., Lees, A.C., Thomson, J.R., Louzada, J., Maués, M., Moura, N.G., Oliveira, V.H.F., Chaul, J.C.M., Schoereder, J.H., Vieira, I.C.G., Mac Nally, R., Gardner, T.A. 2015. How pervasive is biotic homogenization in human-modified tropical forest landscapes? *Ecology Letters* 18:1108–1118.
- Stokes, D. 1997. *Pasteur's Quadrant: Basic Science and Technological Innovation*. First edition. Brookings Institution Press, Washington, DC. 199pp.
- System of Environmental Economic Accounting |. (n.d.) . <https://seea.un.org/>.
- UN capacity-building programme on technology facilitation for SDGs - Working Team 6. 2022. Science, Technology and Innovation for Achieving the SDGs: Guidelines for Policy Formulation. <https://sdgs.un.org/tfm/interagency-task-team/capacity>.

- White, T.B., Bromwich, T., Bang, A., Bennun, L., Bull, J., Clark, M., Milner-Gulland, E.J., Prescott, G.W., Starkey, M., zu Ermgassen, S.O.S.E., Booth, H. 2024. The "nature-positive" journey for business: A conceptual research agenda to guide contributions to societal biodiversity goals. *One Earth* 7:1373–1386.
- Wilker, I., Queiroz, A.C.M., Ribas, C.R., Morini, M.S.C., Lasmar, C.J., Schmidt, F.A., Feitosa, R.M. Nogueira, A., Baccaro, F.B., Ulysséa, M.A., Izzo, T., Paolucci, L.N., Quinet, Y.P., Vargas, A.B., Harada, A.Y., Sobrinho, T.G., Marques, T.G., Souza, J.L.P., Del-Claro, K., Lange, D., Santos, J.C., Silva, R.R., Campos, R.B.F., Albuquerque, E.Z., Rabello, A.M., Solar, R.R.C., Soares, S.A., Carvalho, K.S., Moraes, A.B., Torezan-Silingardi, H.M., Nahas, L., dos Santos, I.A., Costa-Milanez, C.B., Esteves, F.A., Frizzo, T., daRocha, W., Martello, F. Diehl-Fleig, E. 2024. A systematic review of the land use change effects on ant diversity in Neotropics. *Biological Conservation* 299:110778.
- zu Ermgassen, S.O.S.E., Howard, M., Bennun, L., Addison, P.F.E., Bull, J.W., Loveridge, R., Pollard, E., Starkey, M. 2022. Are corporate biodiversity commitments consistent with delivering 'nature-positive' outcomes? A review of 'nature-positive' definitions, company progress and challenges. *Journal of Cleaner Production* 379:134798. 📌



CAPÍTULO

3

# METODOLOGIA DE ESTRUTURAÇÃO E PADRONIZAÇÃO PARA ARMAZENAMENTO E GESTÃO DE DADOS ECOLÓGICOS

Luana Caiafa,  
Marcos Callisto  
& Ricardo R. C. Solar

## **Palavras-chave:**

*Armazenamento de dados; automação em ambiente R; gestão de dados ecológicos; metadados; padronização de dados; segurança de dados.*

Como citar este capítulo:

Caiafa, L., Callisto, M. & Solar, R.R.C. (2026). Metodologia de Estruturação e Padronização para Armazenamento e Gestão de Dados Ecológicos. In: Callisto, M. & Alves, C.B.M. (eds.) Ecologia e Pesquisa Transdisciplinar no Setor Elétrico: Resultados e Aprendizados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG. Belo Horizonte, pp. 69-87.

## Resumo

A implementação de sistemas padronizados para a coleta e análise de dados ecológicos, como demonstrado na inovação ecotecnológica do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, reforça os benefícios da padronização das bases de dados para melhorar a precisão, reprodutibilidade e eficiência no processamento de grandes volumes de informações. A integração entre planilhas de campo e rotinas automatizadas no *software* livre R viabilizou a extração rápida, confiável e rastreável de métricas e índices biológicos, fundamentais para a quantificação do impacto líquido positivo e para uma tomada de decisão mais informada. Além de otimizar a gestão de dados, a padronização desempenha um papel essencial na pesquisa científica e na gestão ambiental, melhorando a integridade, acessibilidade e interoperabilidade das informações, com segurança. Além disso, a equipe se resguarda quanto ao acesso às informações centralizadas, atualizadas, verificadas e validadas. A adoção de padrões de vocabulários de bancos de dados amplamente reconhecidos, como o Darwin Core, facilita a integração de dados entre diferentes instituições e permite análises comparativas mais robustas, ampliando sua aplicabilidade na conservação da biodiversidade e na definição de políticas ambientais – essencialmente atuando de maneira sinérgica com ampliação do impacto líquido positivo, com o ganho de conhecimento científico. Além disso, a adoção de plataformas colaborativas e repositórios digitais avançados promove o compartilhamento seguro e persistente desses conjuntos de dados gerados, favorecendo sua preservação e reutilização em múltiplos contextos. A automação das etapas de curadoria e análise minimiza erros e acelera a produção científica, reforçando a gestão ambiental baseada em evidências robustas. Assim, iniciativas como essa não apenas impulsionam a sustentabilidade dos recursos naturais, mas também estabelecem bases sólidas para o monitoramento de longo prazo e a conservação da biodiversidade. Por fim, a experiência gerada neste projeto não se resume ao seu escopo e pode ser replicada e escalada para projetos futuros lidando com dados de biodiversidade, ou mesmo ser adaptada para a gestão de informação em outras áreas da AXIA Energia e de demais setores interessados na gestão eficiente da informação obtida nos estudos. 💧

## 1

## Introdução

Em estudos ambientais, especialmente em monitoramentos de longo prazo no setor elétrico, a coleta e análise de dados são essenciais para compreender padrões e processos que regem a biodiversidade e os ecossistemas. No entanto, a obtenção dessas informações exige alto investimento, e sua utilidade depende diretamente de como são armazenadas, documentadas, analisadas e disponibilizadas (Hampton et al. 2013). A falta de padronização na coleta e organização dos dados de diferentes projetos das empresa compromete a confiabilidade dos dados, inviabiliza análises replicáveis e dificulta a comparabilidade com outros estudos (Medová et al. 2022). Em Ecologia, esse problema é agravado pela diversidade de métodos utilizados, formatos de arquivos e terminologias empregadas por diferentes grupos de pesquisadores, tornando os bancos de dados altamente heterogêneos (Jones et al. 2006; Poisot et al. 2019; Felipe & Nascimento 2024).

Os dados ambientais podem ser obtidos de múltiplas formas, seja por meio de observações diretas em campo, ou por meio de experimentos laboratoriais, bases de dados abertas e até simulações computacionais, abrangendo uma vasta gama de variáveis ambientais e biológicas (Sagarin & Pauchard 2010; Hampton et al. 2013). Em geral, esses registros são armazenados em planilhas digitais (mais frequentemente no Microsoft Excel®), e muitas vezes acompanhados de anotações em cadernos de campo. Esses dados podem ser classificados de acordo com diferentes dimensões, como espacial e temporal. Os dados espaciais correspondem à localização georreferenciada das observações ou amostras, incluindo o nome da localidade, código do ponto, coordenadas (latitude e longitude), altitude, identificação de biomas, ecossistemas ou áreas protegidas. Por outro lado, os dados temporais indicam o momento da coleta, podendo estar organizados em diferentes escalas (diária, sazonal, anual) e nos mais diferentes formatos (por exemplo, AAAA\_mm\_dd para datas, que configura um estilo nativo para a maioria dos computadores) (McGill 2016). Essa coleta de dados parte da premissa de que o acúmulo de dados ao longo do tempo possibilita a ampliação das escalas espaciais e temporais de análise, possibilitando a detecção de padrões antes não identificados (Martins & Vanz 2022).

Em projetos ambientais, a geração de dados abrange múltiplas disciplinas científicas e exige que as análises procedam de forma integrada, colaborativa e fundamentalmente transdisciplinar. Exemplos, como no caso desse projeto, avaliando ecossistemas aquáticos, incluem informações sobre uso e ocupação do solo, limnologia, dados de diversos grupos biológicos (macroinvertebrados, peixes, macrófitas aquáticas, cnidários, entre outros) e medidas hidráulicas de habitat físico, exigindo a participação de equipes oriundas de múltiplas áreas do conhecimento. Essa complexidade inerente à abordagem transdisciplinar requer métodos rigorosamente fundamentados, capazes de maximizar a extração de resultados e assegurar a qualidade das análises (Dalton et al. 2021).

Contudo, sem um processo estruturado de curadoria dos dados coletados, informações valiosas podem ser perdidas, estimadas de maneira enviesada, ou mesmo se perderem e tornarem-se inacessíveis

– seja pela ausência de organização adequada dos dados, seja pela falta de interpretação ou uso de ferramentas analíticas inapropriadas –, reduzindo drasticamente o impacto da pesquisa na conservação e gestão ambiental, ou limitando o potencial alcance dos resultados. A gestão eficiente de dados ecológicos começa ainda na fase de planejamento, com a definição criteriosa do delineamento experimental – discutido no Capítulo 2 –, que determina quais informações primárias serão coletadas e como serão obtidas. Esse processo não se limita apenas à coleta em campo, mas envolve todo um fluxo contínuo que inclui a tabulação, curadoria – que envolve a conferência entre dados coletados e digitados, padronização de formatos e nomenclaturas, além do controle de qualidade – bem como o armazenamento, a publicização e a apresentação de informações. Além disso, destaca-se a crescente acumulação de volumosos conjuntos de dados resultantes de biomonitoramentos de longo prazo, o que exige também o desenvolvimento de uma cultura sólida de validação e armazenamento padronizado desses dados. Dentre os problemas mais comuns, destacamos nomenclaturas inconsistentes, ausência de metadados e formatos de arquivos inadequados que, em várias situações, dificultam ou mesmo inviabilizam a utilização de valiosos dados em projetos futuros ou, ainda mais preocupante, podem levar à apresentação de informações erradas em Ecologia, onde as consequências da má gestão dos dados nem sempre são imediatamente perceptíveis. Como muitos dos dados são necessários para comparação em grandes janelas temporais – por vezes de décadas – o risco de desperdício de tempo, recursos financeiros e humanos e da informação gerada é muito alto.

Nesse contexto, o investimento em processos de estruturação, padronização e armazenamento seguro de dados configura-se como um requisito técnico fundamental para assegurar a integridade, a rastreabilidade e a comparabilidade das informações ao longo do tempo. Além disso, essa abordagem amplia a utilidade dos dados como base informacional para análises ambientais, planejamento e avaliação de ações de conservação, apoiando processos de tomada de decisão fundamentados em evidências (Hampton et al. 2013). Nesse sentido, a gestão eficaz de dados ecológicos contribui ainda – com referência no debate sobre sustentabilidade – com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), ao fornecer informações confiáveis para o monitoramento ambiental, a conservação da biodiversidade e a avaliação do uso sustentável dos recursos naturais.

Portanto, o armazenamento e o acesso seguro de dados ambientais tornam-se componentes fundamentais na gestão de dados desses projetos em bacias de empreendimentos hidrelétricos, garantindo a integridade, disponibilidade, segurança e utilidade das informações coletadas. Quando grandes volumes de dados são gerados por monitoramentos e experimentos em campo, sensoriamento remoto, análises em laboratório e todas as demais fontes possíveis, é imprescindível que esses dados estejam sendo coletados, validados e armazenados de forma estruturada e eficiente (Drucker 2011). Uma das principais considerações no armazenamento de dados ecológicos é a escolha entre armazenamento físico ou na nuvem, o que pode impactar a flexibilidade, custos e escalabilidade dos dados, sendo adequado avaliar as vantagens e limitações de cada solução (Gupta et al. 2022). Vale destacar que essa abordagem integrada, que vai desde o planejamento e da coleta até o armazenamento, análises e uso das informações, é prontamente replicável a outras abordagens e setores da economia, como mineração, infraestrutura, saneamento, entre outras.

Por fim, a apresentação clara e acessível dos dados, por meio de gráficos, tabelas ou infográficos, é essencial para facilitar sua interpretação e aplicação prática (Gould 2017; Poisot et al. 2019). Além disso, a padronização dos formatos de arquivos e da estrutura de metadados (ver Box 1), associada ao uso de ferramentas digitais, melhora a acessibilidade e a interoperabilidade entre diferentes conjuntos de informações. Esse processo não apenas reduz o risco de perda ou mau uso dos dados, mas também amplia seu potencial de reutilização, promovendo sínteses mais robustas do conhecimento ecológico (Drucker 2011).

**Box 1. O que são Metadados?**

Metadados são informações estruturadas que descrevem, explicam e contextualizam dados primários, garantindo que possam ser compreendidos e reutilizados ao longo do tempo. Funcionam como um "manual de instruções" dos dados, detalhando onde, quando, como, por que e por quem foram coletados.

As informações dos metadados são críticas porque os dados ecológicos frequentemente envolvem variáveis complexas, como protocolos de hábitat físico em diferentes ambientes, dados biológicos, espécies invasoras, que só fazem sentido quando acompanhadas de contexto espacial, temporal e metodológico em que foram coletados.

**Os Metadados:**

↳ Facilitam a **interpretação** dos dados – Permitem que qualquer pessoa, mesmo sem conhecimento prévio, compreenda as informações e as fórmulas utilizadas nas análises.

↳ Garantem a **reprodutibilidade científica** – Possibilitam que outros pesquisadores repliquem metodologias ou identifiquem possíveis limitações em estudos anteriores.

↳ Facilitam a **interoperabilidade** – Viabilizam a combinação de dados de diferentes fontes, auxiliando em análises amplas, como modelos de impacto ambiental e estudos de biodiversidade.

↳ Alinham-se aos **Princípios FAIR** (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) – Asseguram que os dados sejam organizados para serem localizados, acessados, integrados e reutilizados de forma eficiente.

**Metadados na Prática**

Diferentes tipos de dados exigem formatos específicos e metadados bem estruturados para evitar erros de interpretação. A padronização dos dados ecológicos envolve definir nomenclaturas, unidades de medida e descrições detalhadas da origem e do contexto das informações, facilitando sua recuperação e integração com outras bases de dados.

Foi o que colocamos em prática no nosso projeto, e será detalhado a seguir.

Neste capítulo, exploramos a importância da padronização de dados ecológicos e os desafios envolvidos em seu gerenciamento. Serão destacadas boas práticas que aprimoram a qualidade e a aplicabilidade das informações na pesquisa e na tomada de decisão, com ênfase nas soluções adotadas do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG e seu papel como inovação ecotecnológica, na construção e cálculo do impacto líquido positivo.

**2**

**Metodologia de padronização e aplicação no projeto**

O projeto IBI UHE Furnas & UFMG, envolveu, entre seus eixos metodológicos, a organização, o processamento e o cálculo de métricas e índices ecológicos em ambiente R (R Core Team 2024), como suporte analítico às avaliações ambientais desenvolvidas ao longo do estudo. A caracterização dos habitats físicos foi realizada com base no protocolo de avaliação utilizado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA) (Peck et al. 2006), que foi traduzido, testado e validado para as condições tropicais (Callisto et al. 2014). Após a aplicação deste protocolo rápido (RAP) em campo, todas as 682 páginas de protocolos (240 pg. referentes a reservatórios e 442 pg. referentes aos riachos) foram tabuladas pela mesma pessoa no *software* Microsoft Excel®, utilizando um vocabulário padronizado de nomes de colunas e variáveis. Em seguida, todas as planilhas foram revisadas e conferidas detalhadamente, buscando minimizar erros na inserção dos dados e assegurar a maior consistência possível na análise das informações coletadas. Os protocolos físicos foram digitalizados e arquivados para acesso rápido, caso algumas consultas futuras fossem necessárias. Com isso, a metodologia de padronização de dados foi dividida em cinco etapas principais:

1. Padronização das planilhas de campo e definição das métricas a serem calculadas;
2. Construção de planilhas de metadados, conforme descrito no Box 1;
3. Construção de planilhas gabarito (planilhas acessórias com os dados necessários da literatura para cálculo das métricas biológicas);
4. Automação dos cálculos de métricas e índices no *software* R;
5. Verificação e validação dos dados.

A primeira etapa envolveu a definição das métricas a serem calculadas e a padronização das planilhas utilizadas durante o trabalho de campo. Baseadas no objetivo do projeto, na literatura especializada da área e em experiências anteriores com projetos semelhantes, equipes responsáveis pela coleta de dados de habitat físico, macroinvertebrados bentônicos, parâmetros físicos e-químicos de qualidade da água e de peixes selecionaram previamente as 199 métricas mais relevantes a serem calculadas (Figura 1; Quadro 1).

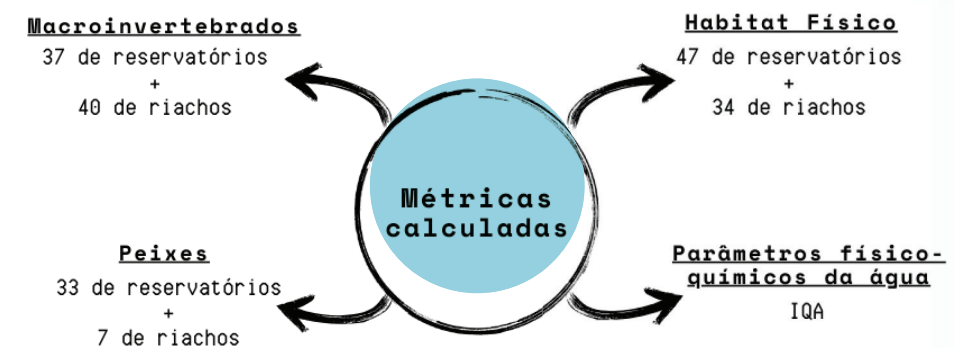


Figura 1. Distribuição de métricas previamente selecionadas para o cálculo.

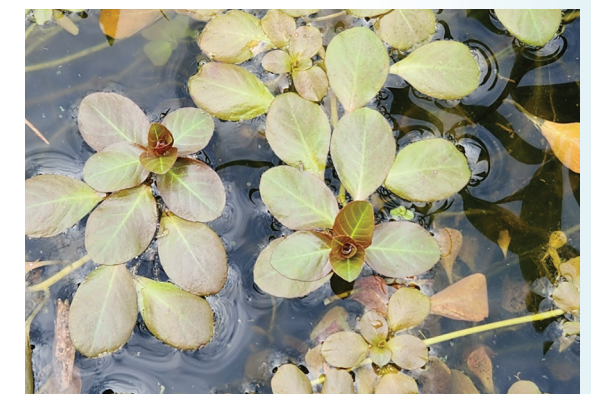
Quadro 1. Métricas previamente selecionadas para o cálculo.

<p><b>Macroinvertebrados</b> <b>(77 métricas)</b></p>	<p><b>Reservatórios:</b> Índice de Shannon-Wiener (shannon_res); Índice de Simpson (Simpson); Índice de Pielou (Pielou); Riqueza de espécies (richness); Abundância de espécies (abundance); Densidade (Densidade_m2); Riqueza de EPT (ept_rich); Abundância de EPT (ept_abund); Riqueza de espécies temporariamente anexadas (rich_attached); Riqueza de espécies de respiração branquial (rich_gill); Razão EPT/Chironomidae (ept_chi); % Chironomidae (percent_CHI); % EPT (percent_EPT); % Odonata (percent_Odo); % Gastropoda (percent_gastro); % Chironomidae + Oligochaeta (percent_CHOL); Razão EPT/Chironomidae + Oligochaeta indivíduos (ept_chol); % Riqueza de Sensíveis (percent_rich_sens); % Abundância de Sensíveis (percent_abund_sens); % Riqueza de Tolerantes (percent_rich_tole); % Abundância de Tolerantes (percent_abund_tole); % Riqueza de Resistentes (percent_rich_resi); % Abundância de Resistentes (percent_abund_resi); Biological Monitoring Working Party (BMWP); Average Score Per Taxon (ASPT); % Coletores-catadores (percent_abund_gather_collector); % Raspadores (percent_abund_scraper); % Fragmentadores (percent_abund_shredder); % Coletores-filtradores (percent_abund_filtering_collector); % Predadores (percent_abund_predator); % raspadores/fragmentadores + catadores + filtradores (percent_scrap_shred_collect_filt); % coletores-filtradores/coletores-catadores (percent_collect_filt_collect_gath); % raspadores + filtradores/catadores (percent_scraper_filt_collect); % fragmentadores/filtradores + catadores (percent_shre_gath_filt_collect); Estabilidade do substrato (estabilidade); Autotrofia e Heterotrofia (autotrofia); Transporte de sedimentos (sedimentos).</p> <p><b>Riachos:</b> Índice de Shannon-Wiener (shannon_res); Índice de Simpson (Simpson); Índice de Pielou (Pielou); Riqueza de espécies (richness); Abundância de espécies (abundance); Densidade (Densidade_m2); Riqueza de EPT (ept_rich); Abundância de EPT (ept_abund); Riqueza de espécies temporariamente anexadas (rich_attached); Riqueza de espécies de respiração branquial (rich_gill); Razão EPT/Chironomidae (ept_chi); % Chironomidae (percent_CHI); % EPT (percent_EPT); % Odonata (percent_Odo); % Gastropoda (percent_gastro); % Chironomidae + Oligochaeta (percent_CHOL); Razão EPT/Chironomidae + Oligochaeta indivíduos (ept_chol); % Riqueza de Sensíveis (percent_rich_sens); % Abundância de Sensíveis (percent_abund_sens); % Riqueza de Tolerantes (percent_rich_tole); % Abundância de Tolerantes (percent_abund_tole); % Riqueza de Resistentes (percent_rich_resi); % Abundância de Resistentes (percent_abund_resi); Biological Monitoring Working Party (BMWP); Average Score Per Taxon (ASPT); % Coletores-catadores (percent_abund_gather_collector); % Raspadores (percent_abund_scraper); % Fragmentadores (percent_abund_shredder); % Coletores-filtradores (percent_abund_filtering_collector); % Predadores (percent_abund_predator); % raspadores/fragmentadores + catadores + filtradores (percent_scrap_shred_collect_filt); % coletores-filtradores/coletores-catadores (percent_collect_filt_collect_gath); % raspadores + filtradores/catadores (percent_scraper_filt_collect); % fragmentadores/filtradores + catadores (percent_shre_gath_filt_collect); Estabilidade do substrato (estabilidade); Autotrofia e Heterotrofia (autotrofia); Transporte de sedimentos (sedimentos); (MMI_Ferreira); (MMI_Macedo); (MMI_Silva).</p>
---	--

<p><b>Habitat Físico</b> <b>(81 métricas)</b></p>	<p><b>Reservatórios:</b> Área média da cobertura total de macrófitas submergentes (amfcSubmerg); Área média da cobertura total de macrófitas emergentes (amfcEmergent); Área média da cobertura total de macrófitas flutuantes (amfcFloating); Cobertura total de macrófitas emergentes e flutuantes (amfcFltEmg); Área média de abrigo de vegetação herbácea (fcfcAquatic); Área média de abrigo de matacão (fcfcBoulders); Área média de madeiras ou arbusto &lt;0.3m DAP (fcfcBrush); Área média de abrigo de margem escavada (fcfcLedges); Área média de abrigo de árvores vivas inundadas &gt;0.3 m DAP (fcfcLivetrees); Área média de abrigo de vegetação pendurada (fcfcOverhang); Área média de abrigo de madeiras &gt; 0.3 m DAP (fcfcSnag); Cobertura total de abrigos naturais de peixes (fciNatural); Presença de distúrbios não-agrícolas na zona ripária (hiiNon_Rip); Presença de distúrbios agrícolas na zona ripária (dentro da parcela) (hiiAg_Rip); Área média de cobertura de dossel por árvores grandes (Dossel &gt;5 m altura) (rvfcCanBig); Área média de cobertura de dossel por árvores pequenas (Dossel &gt;5 m altura) (rvfcCanSmall); Área média de cobertura de vegetação rasteira inundada (Vegetação rasteira &lt;0.5 m altura) (rvfcGndInundated); Área média de cobertura de vegetação rasteira por arbustos lenhosos (Vegetação rasteira &lt;0.5 m altura) (rvfcGndWoody); Área média de cobertura de sub-bosque por arbustos lenhosos (Sub-bosque 0.5 a 5 m altura) (rvfcUndWoody); Área total de cobertura de vegetação lenhosa no sub-bosque + vegetação rasteira (rviLowWood); Área total de cobertura de vegetação de árvores grandes (dossel) + árvores pequenas (dossel) + vegetação lenhosa (sub-bosque) + vegetação lenhosa (vegetação rasteira) (rviWoody); Fração média da cobertura de substrato rochoso na zona litorânea (bsfcBedrock); Fração média da cobertura de matacão na zona litorânea (bsfcBoulders); Fração média da cobertura de blocos na zona litorânea (bsfcBlocks); Fração média da cobertura de cascalho na zona litorânea (bsfcGravels); Fração média da cobertura de areia na zona litorânea (bsfcSand); Fração média da cobertura de silte, argila ou lama na zona litorânea (bsfcSilt); Lakeshore Anthropogenic Disturbance Index (RDis_IX); Riparian Vegetation Cover Complexity Index (RVegQ_2); (RVegQ_7); (RVegQ_8); bsfcBedrock + fcfcBoulders (ssiNATBedBld); Littoral Cover Complexity Index (LitCvrQ_b); (LitCvrQ_c); (LitRipCvQ_2b); (LitRipCvQ_7b); (LitRipCvQ_8b); (LitRipCvQ_2c); (LitRipCvQ_7c); (LitRipCvQ_8c); Lakeshore Physical Habitat Quality Index (LkShoreHQ_2b); (LkShoreHQ_7b); (LkShoreHQ_8b); (LkShoreHQ_2c); (LkShoreHQ_7c); (LkShoreHQ_8c).</p>
---	--



Corydalus. Foto: Beatriz Pego.



Ludwigia helminthorrhiza. Foto: Mario Sacramento.

<p><b>Habitat Físico</b> (81 métricas)</p>	<p><b>Riachos:</b> Porcentagem de substratos finos (PCT_FN); Porcentagem de seixos (PCT_CB); Porcentagem de cascalho grosso (PCT_GC); Porcentagem de bancos de folhas (PCT_Litter); Porcentagem de matação (250 a 4000 mm) (PCT_BL); Porcentagem de substrato arenoso (PCT_SA); Porcentagem de rocha (PCT_BDRK); Porcentagem de raízes (PCT_RT); Porcentagem de serrapilheira fina (PCT_SF); Porcentagem de algas (PCT_AL); Porcentagem de madeira (PCT_WD); Porcentagem de substrato orgânico (PCT_ORG); Diâmetro médio do substrato (LSUB_DMM); Porcentagem de todos os tipos de piscinas (PCT_Pool); Velocidade média da água (m/s) (XVEL); Vazão de água (FLOW_2); Média de solo exposto (XGB); Média de cobertura rasteira por ervas e não lenhosas (XGH); Média de cobertura rasteira por ervas e lenhosas (XGW); Cobertura média de vegetação ripária (XC); Cobertura total média de vegetação de sub-bosque (XM); Cobertura total média de vegetação rasteira (XG); Cobertura total de vegetação ripária (XCMG); Cobertura média de plantas lenhosas (XCMGW); Cobertura de dossel no canal (XCENMID); Largura média do leito sazonal (XBKF_W); Altura média do leito sazonal (XBKF_H); Profundidade do talvegue sazonal (XBKF_D); Média de imersão do substrato (canal + margens) (%) (XEMBED); Largura média molhada (XWIDTH); Declividade média (cm) (XSLOPE); Média de abrigos grandes (XFC_BIG).</p>
<p><b>Peixes</b> (40 métricas)</p>	<p><b>Reservatórios:</b> Riqueza de espécies (richness); Abundância de indivíduos (abundance); Biomassa total por unidade amostrada (biomassa); Índice de Shannon-Wiener (shannon_res); Índice de Pielou (Pielou); Índice de Simpson (Simpson); Número de categorias tróficas (GTF_count2); % de espécies detritívoras (percent_rich_detrit); % de indivíduos detritívoros (percent_detrit); % de espécies invertívoras (percent_rich_invert); % de indivíduos invertívoros (percent_invert); % de espécies onívoras (percent_rich_oniv); % de indivíduos onívoros (percent_oniv); % de espécies piscívoras (percent_rich_pisc); % de indivíduos piscívoros (percent_pisciv); % de espécies herbívoras (percent_rich_herbiv); % de indivíduos herbívoros (percent_herbiv); % de espécies com cuidado parental (rich_parent_care); % de indivíduos com cuidado parental (parent_care_abund); Riqueza de espécies migratórias (rich_migrat); % de indivíduos migratórios (percent_migrat_ind); Abundância de espécies migratórias (migrat_abund); % de espécies migratórias (percent_migrat_sp); Abundância de espécies nativas (native_abund); Riqueza de espécies nativas (rich_native_sp); % de espécies nativas (percent_native_sp); % de abundância nativas (percent_native_ind); % de biomassa nativas (perc_native_biomass); Quantidade de biomassa exóticas (biomassa_exoticos); % de biomassa exóticas (perc_exotic_biomass); % de espécies exóticas (rich_exotic_sp); % de indivíduos exóticos (percent_exotic_ind); Taxa entre espécies nativas e exóticas (ratio_nat_ex).</p> <p><b>Riachos:</b> Riqueza de espécies (richness); Abundância de indivíduos (abundance); % de indivíduos Loricariidae (percent_loricariidae); % de indivíduos Characiformes (percent_characiformes); % de indivíduos Trichomycteridae (percent_trichomycteridae); % de indivíduos Invertívoros (percent_invertívoros); % de indivíduos Poecilia reticulata (percent_poecilia_ret).</p>
<p><b>Parâmetros físico-químicos da água</b></p>	<p><b>Reservatórios e Riachos:</b> Índice de Qualidade da Água (IQA)</p>

A partir de um procedimento de treinamento antes da coleta de dados em campo, as equipes desenvolveram planilhas em que as equipes de campo registravam as variáveis brutas necessárias para o cálculo das métricas e índices ambientais previamente definidos. A orientação para tabulação de dados nas planilhas foi a de realizar o registro de informações da menor unidade de coleta (e.g. ponto/indivíduo/amostra), que continham informações associadas (e.g. ao indivíduo coletado foram associados dados de identificação, local de coleta, filo, classe, ordem, família, gênero, espécie, tamanho corporal, biomassa, etc.). A padronização de identificadores únicos para eventos de coleta de dados, como adotado no Darwin Core, é uma prática essencial para evitar duplicação e garantir a rastreabilidade das informações. O uso de um identificador único, como o Event\_ID, permite a (i) vinculação de diferentes tipos de dados a um mesmo evento, seja ele um indivíduo, um ponto de coleta ou uma amostra; (ii) a rastreabilidade dos dados ao longo do tempo e do espaço; e a (iii) facilitação da integração com bancos de dados regionais e globais que já utilizam o mesmo protocolo. Para garantir consistência, todas as colunas dessas planilhas foram padronizadas com uma descrição clara do que representam (metadados) e com formatação uniforme das variáveis, incluindo, por exemplo, a definição de separadores de decimais (utilizamos pontos, por exemplo) e consistência na forma de registrar unidades e categorias, evitando ambiguidades durante a importação dos dados para o software R.

O uso de identificadores consistentes e de planilhas em formato aberto (facilmente exportadas dos arquivos em Excel), interoperável, e que os computadores possam facilmente utilizar para processamento (por exemplo, CSV), melhora a comunicação entre os diferentes softwares e permite que as análises sejam mais consistentes entre diferentes estudos (Borer et al. 2009; Hart et al. 2016). Nesse contexto, a estrutura lógica de uma planilha torna os dados mais acessíveis e evita redundâncias, melhorando a eficiência no processamento e na análise. Uma planilha bem estruturada segue princípios fundamentais para a disposição dos dados. De modo geral, as linhas devem representar uma medição da menor unidade, como identificação do indivíduo, local de coleta ou amostra. Já as colunas devem conter variáveis ou atributos específicos dessa menor unidade (McGill 2016) (Figura 2).

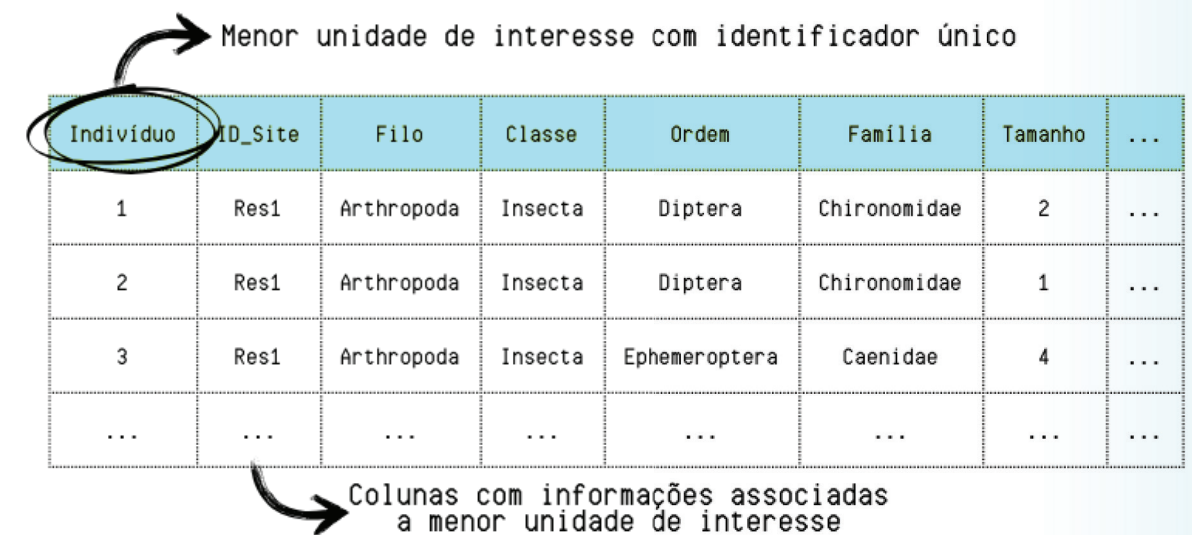


Figura 2. Exemplo da estrutura lógica da planilha de campo para macroinvertebrados.

A etapa seguinte consistiu na criação de planilhas gabarito, que funcionaram como uma base de referência para todas as informações utilizadas no cálculo dos índices biológicos. As planilhas gabarito incluíram informações compiladas da literatura que precisam ser utilizadas nos cálculos de métricas como, por exemplo, o escore BMWP, sensibilidade e grupo funcional de cada família, no caso de macroinvertebrados (Figura 3).

Filo	Classe	Ordem	Família	Score_BMWP	Sensibilidade	Grupo funcional	...
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Dytiscidae	4	Tolerante	Predador	...
Arthropoda	Insecta	Diptera	Chironomidae	2	Resistente	Caçador-coletor	...
Arthropoda	Insecta	Ephemeroptera	Caenidae	4	Tolerante	Caçador-coletor	...

Colunas com informações extraídas da literatura e que serão utilizadas nos cálculos das métricas selecionadas

Figura 3. Exemplo da estrutura e de informações contidas na planilha gabarito para macroinvertebrados.

Foram construídas planilhas de metadados, que incluíram (i) os nomes de cada uma das colunas ou métricas calculadas; (ii) a informação associada e (iii) fórmulas matemáticas para o cálculo das métricas, além de detalhes sobre os responsáveis pelo projeto e as licenças de uso dos dados (Figura 4).

Coluna	Informação	Fórmula
ID_Site	Identificação do site	NA
richness	Riqueza de espécies	nº de táxons distintos
abundance	Abundância de espécies	soma do nº total de indivíduos na amostra
ept_abund	Abundância de EPT	soma das abundâncias de Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera
percent_ept	Porcentagem de EPT	(ept_abund/abundance)*100
BMWP	Biological Monitoring Working Party: Usa a riqueza de espécies correlacionada a sua sensibilidade à poluição ambiental	(soma total dos scores de cada espécie no sitio amostral)
ASPT	Average Score Per Taxon	{BMWP/richness}
...	...	...

Figura 4. Exemplo de metadados para macroinvertebrados.

Com as planilhas de campo e gabarito padronizadas, os dados foram processados por meio da elaboração de rotinas (*scripts*) no *software* estatístico R (R Core Team 2025). Baseando-se na planilha de metadados, que apresentava as fórmulas das métricas e índices ambientais, foi destinado grande esforço para desenvolver *scripts* específicos para o cálculo, garantindo que todos os cálculos fossem automatizados e reprodutíveis. Com essa automação, esses cálculos agora podem ser realizados de forma mais rápida e eficiente, uma vez que os *scripts* podem ser executados mantendo o mesmo formato de cálculo sempre que necessário. Quando necessário, os códigos que compõem o script foram documentados com comentários para esclarecer sua lógica e facilitar a compreensão por outros pesquisadores. Esses *scripts* são extensos e incluem as fórmulas necessárias para calcular as métricas de interesse, por exemplo, de diversidade e abundância de macroinvertebrados, além de índices mais complexos (Figura 5).

Identificação do script, com autores e data

```
#####
# IBI-FURNAS
# Authors: Ricardo Solar and Luana Caiafa
# June 2023
#####

library(vegan)
library(dplyr)
library(tidyverse)
library(reshape2)
library(gtools)
library(proxy)

##### Macroinvertebrates
##### 1 Community structure
setwd("C:/Users/...")
data <- read.csv("2024_04_04_bentos_campo.csv", header=TRUE,
fileEncoding="latin1", stringsAsFactors = T, sep = ",")
```

Carregando pacotes do R necessários para cálculos do script

Abrindo planilha de dados

Códigos com as fórmulas para o cálculo das métricas

```
# Richness of families
res <- dcast(database2, ID_Site~Family, value.var = "Family")
rownames(res) <- res[,1]
{richness <- specnumber(res[,-(1:2)])}

# Abundance
{abundance <- rowSums(res[,-(1:2)])}

# Shannon-Wiener Diversity Index
{shannon_res <- diversity(res[,-(1:2)], index = "shannon")}

# Pielou Evenness's Index
{Pielou <- shannon_res/log(richness)}

# EPT: Ephemeroptera, Trichoptera and Plecoptera abundance
EPTdata <- dplyr::filter(database2, Order == "Ephemeroptera" |
Order == "Plecoptera" | Order == "Trichoptera" | Order == "AAA")
EPT <- dcast(EPTdata, ID_Site~Family, value.var = "Family")
rownames(EPT) <- EPT[,1]
{ept_abund <- rowSums(EPT[,-(1:2)])}

# Ephemeroptera, Trichoptera and Plecoptera richness
{ept_rich <- specnumber(EPT[,-(1:2)])}
```

Figura 5. Trechos do *script* para cálculo de métricas de macroinvertebrados.

A padronização permitiu que os dados fossem processados de forma eficiente, gerando uma nova planilha com os resultados calculados automaticamente sempre que demandado pelos usuários (Figura 6). Por fim, esse formato permite acomodar mudanças de classificação como, por exemplo, mudanças taxonômicas, recalculando os índices em questão de poucos minutos.

ID_Site	richness	abundance	shannon	pielou	ept_rich	BMWP	...
Res1	10	159	1.49	0.65	2	43	...
Res2	6	99	0.66	0.36	0	24	...
Res3	5	75	0.28	0.17	2	18	...
Res4	11	364	0.99	0.41	3	37	...
...	...	...	...	...	...	...	...



**Métricas calculadas para cada site**

Figura 6. Planilha com métricas de macroinvertebrados calculadas.

Após a realização dos cálculos, todos os dados e índices foram revisados para garantir a precisão e consistência dos resultados. A verificação envolveu a comparação dos resultados automatizados com cálculos manuais, quando necessário, e a identificação de possíveis erros. As planilhas foram verificadas para garantir que seguiam os padrões estabelecidos e que as descrições e metadados estavam corretos. Eventuais inconsistências foram corrigidas para garantir a qualidade dos dados e a reprodutibilidade dos cálculos.

No projeto, optou-se por utilizar um serviço de nuvem para armazenamento dos dados, garantindo grande espaço de memória a baixo custo, confiabilidade e facilidade de recuperação das informações. Para garantir a organização e rastreabilidade, adotou-se uma nomenclatura padronizada para os arquivos, que inclui a data da última atualização e a versão dos arquivos, seguindo o padrão "AAAA\_mm\_dia - NOMEDOARQUIVO". Quando um arquivo é atualizado, a versão anterior é movida para uma subpasta "Histórico", assegurando a preservação da memória de registros. Considerando que muitos dos dados envolvem informações sensíveis, como locais de espécies ameaçadas ou áreas de conservação, foi estabelecido um controle de acesso rigoroso para evitar acessos não autorizados. O acesso aos dados é gerido com base em funções, garantindo que apenas usuários autorizados possam consultar ou manipular os dados conforme necessário. Assim, a equipe tem a segurança de trabalhar com dados conferidos, verificados e atualizados, sem risco de utilizar informações obsoletas ou versões defasadas. Essa prática de gestão de dados segue princípios éticos, garantindo a proteção das informações sem comprometer a transparência e a disponibilidade para a pesquisa científica (Medová et al. 2022; Gould 2017; Gupta et al. 2022).

### 3 Discussão

A padronização dos dados não apenas facilita sua comparabilidade entre estudos e reutilização por outros pesquisadores e gestores ambientais (Amaral et al. 2021), mas também está diretamente ligada a práticas éticas na ciência. Garantir que os dados sejam bem estruturados e documentados preserva seu valor a longo prazo, evitando a perda de informações devido a mudanças tecnológicas ou falhas na documentação, e assegura que decisões ambientais sejam fundamentadas em evidências confiáveis (Davoli et al. 2022; Negret et al. 2022). Em síntese, o armazenamento e a gestão de dados ecológicos apresentam diversos desafios que podem, em última instância, comprometer sua qualidade e usabilidade.

Um dos principais desafios na Ecologia, especialmente ao se tentar compatibilizar informações de diferentes fontes ou de dados preexistentes, é a heterogeneidade dos formatos de dados. Dados podem ser coletados de múltiplas formas – como amostras de água, observações de espécies e relatórios de campo – e armazenados em diversos formatos, incluindo planilhas, arquivos de texto e anotações manuscritas. A ausência de um padrão unificado para armazenar essas informações dificulta sua análise conjunta, elevando o risco de erros e a complexidade na integração (Hampton et al. 2013; McGill 2016; Hart et al. 2016). Outro desafio crítico é a falta de metadados. Para que os dados sejam compreendidos e reutilizados por outros, informações detalhadas sobre o processo de coleta – como localização, data e método – precisam ser rigorosamente documentadas (McGill 2016; Hassenstein & Vanella 2022). O uso de ferramentas digitais, como planilhas padronizadas ou plataformas específicas para o armazenamento, é fundamental para assegurar que essas informações não se percam e sejam facilmente acessíveis por pesquisadores e gestores, otimizando a utilidade dos dados ao longo do tempo.

No contexto brasileiro, os licenciamentos e monitoramentos ambientais, por muito tempo, foram realizados sem metodologias efetivamente padronizadas, desde a Resolução CONAMA nº 001/1986 (BRASIL 1986) que estabeleceu critérios para a avaliação de impacto ambiental, resultando em muitas informações que, em grande parte dos casos, mostram-se incomparáveis no tempo e no espaço, limitando as conclusões. O projeto IBI UHE Furnas & UFMG, ao adotar uma metodologia adaptada da experiência da agência ambiental dos Estados Unidos da América (US-EPA) (Peck et al. 2006), traduzida, validada (Callisto et al. 2014) e agora implementada com armazenamento e cálculos padronizados, representa um avanço significativo na gestão de dados de monitoramento ambiental. Essa padronização permitiu maior potencial de replicação e comparabilidade dos dados em escalas temporal e espacial, enfrentando diretamente os desafios históricos de incoerência e falta de integração dos dados. Esses avanços metodológicos fortalecem a base científica necessária para implementar ações alinhadas aos ODS, promovendo uma gestão ambiental mais transparente, integrada e orientada para resultados sustentáveis.

Destacamos também a utilização do padrão Darwin Core como uma estratégia eficaz no armazenamento dos nossos dados, pois garante a padronização e a integração dos dados coletados em diferentes localidades e momentos, facilitando sua recuperação e análise eficiente. Desenvolvido pela organização Biodiversity

Information Standards, o Darwin Core é um padrão de metadados para dados de biodiversidade, composto por um vocabulário controlado de termos que descrevem ocorrências de espécies, amostras e recursos associados, visando facilitar o compartilhamento, a integração e a interoperabilidade entre bases de dados biológicos (Biodiversity Information Standards 2025). Esse padrão é fundamental para a organização e disseminação de dados ecológicos, facilitando o acesso e a integração para pesquisadores e gestores ambientais. Iniciativas como o Global Biodiversity Information Facility (GBIF 2025) e o Sistema de Informação sobre a Biodiversidade Brasileira (SiBBR 2025) desempenham papel essencial nesse processo, pois utilizam o Darwin Core ao nomear os dados que entram em suas plataformas, contribuindo para a catalogação de coleções biológicas e a compatibilidade com outros padrões internacionais. A adoção desse padrão no Projeto IBI UHE Furnas & UFMG é uma inovação importante, pois fortalece a integração entre diferentes bases de dados, amplia a acessibilidade das informações e contribui para o avanço da pesquisa ecológica e para a formulação de políticas ambientais baseadas em dados consistentes (Felipe & Nascimento 2024; Biodiversity Information Standards 2025).

Dentro do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, temos um exemplo positivo da utilização dessa padronização. Durante o desenvolvimento deste projeto, por exemplo, algumas espécies tiveram seus nomes alterados em função de revisões taxonômicas (como *Megalampodus eques* e *Phalloceros circummontanus*), e uma das maiores famílias de peixes neotropicais, Characidae, foi desmembrada em três famílias. Nessa situação, mostrou-se importante a adoção do padrão Darwin Core, dado que foi possível, de maneira relativamente simples, acomodar essas mudanças taxonômicas, quanto também harmonizar os dados de diferentes grupos taxonômicos, como peixes e macroinvertebrados aquáticos ao longo de todo o projeto, assegurando comparações confiáveis no tempo e entre diferentes pontos de amostragem, o que elevou significativamente a precisão de nossas análises ecológicas (McGill 2016; Hart et al. 2016; Hassenstein & Vanella 2022).

A interoperabilidade entre sistemas também é um desafio central, especialmente em projetos como o Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, que envolvem a coleta de dados por diversas instituições e disciplinas. A integração de dados coletados em diferentes locais requer a utilização de sistemas e ferramentas compatíveis (Borer et al. 2009; Hart et al. 2016; Hassenstein & Vanella 2022). Superar os desafios do armazenamento e gestão de dados no Projeto IBI UHE Furnas & UFMG exigiu a adoção de boas práticas na estruturação dos dados, alinhadas com padrões internacionais e com a documentação adequada dos processos de coleta. Além de favorecer a integração e reutilização dos dados por diferentes instituições e plataformas, a adoção de padrões como o Darwin Core também fortalece a robustez técnica das informações produzidas, podendo garantir a existência de dados de base (*baseline*) em casos de necessidade de comparação frente a, por exemplo, desastres ambientais. Dados organizados com critérios claros de coleta, padronização e curadoria ganham legitimidade e podem ser utilizados como *baseline* em estudos futuros ou em processos judiciais, especialmente em casos de impactos ambientais. Nessas situações, registros públicos e transparentes, baseados em metodologias consistentes, têm maior valor probatório do que dados coletados de forma aleatória, sem controle ou documentação adequada.

Por fim, compreende-se que o gerenciamento do acesso aos dados garante a qualidade e a sustentabilidade do armazenamento de dados ao longo do tempo. As estratégias de curadoria e arquivamento de dados devem ser implementadas para garantir que, mesmo após a conclusão de um projeto, os dados possam ser acessados e reutilizados por outros pesquisadores ou tomadores de decisão (Poisot et al. 2019; Medová et al. 2022). Em última instância, o armazenamento e o acesso adequados aos dados não apenas garantem a integridade das informações, mas também possibilitam que esses dados possam ser usados de maneira eficaz para embasar decisões científicas e apoiar processos de tomada de decisão em diferentes instâncias.

## Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG as bolsas de pesquisa de iniciação científica, mestrado, doutorado e produtividade em pesquisa. LC é bolsista de doutorado da CAPES - Código de Financiamento 001; RS e MC são bolsistas de produtividade CNPq (308350/2022-7 e 304060/2020-8).

## Referências

- Amaral, F.B.M., Arakaki, A.M.S., Furnival, A.C.M. 2021. Metadados e padrão de metadados para editoras universitárias brasileiras. RDBCI 19: e021032. <https://doi.org/10.20396/rdbci.v19i00.8667482>. Biodiversity Information Standards. 2025. Standards: from Darwin Core to WGSRPD standards aid the exchange of biodiversity information. Acessado em 2025, Fev 15, em <https://www.tdwg.org/standards/>.
- BRASIL. 1986. Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Publicada no Diário Oficial da União, 17 fev. 1986, Seção 1, p. 2548-2549. Acessado em 2025, Mai 9, em [https://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=745](https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=745).
- Borer, E.T., Seabloom, E.W., Jones, M.B., Schildhauer, M. 2009. Some simple guidelines for effective data management. Bull Ecol Soc Am 90(2): 205-214. <https://doi.org/10.1890/0012-9623-90.2.205>.
- Callisto, M., Alves, C.B.M., Lopes, J.M., Castro, M. 2014. Condições ecológicas em bacias hidrográficas de empreendimentos hidrelétricos. Cemig - Companhia Energética de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. Acessado em 2025, Jun 26, em [https://www.cemig.com.br/wpcontent/uploads/2020/07/Indice\\_de\\_Integridade\\_Biotica.pdf](https://www.cemig.com.br/wpcontent/uploads/2020/07/Indice_de_Integridade_Biotica.pdf).
- Cardoso, P., Stoev, P., Georgiev, T., Senderov, V., Penev, L. 2016. Species conservation profiles compliant with the IUCN Red List of threatened species. Biodivers Data J (4): e10356. <https://doi.org/10.3897/BDJ.4.e10356>,

- Dalton, A., Wolff, K., Bekker, B. 2021. Multidisciplinary research as a complex system. *Int J Qual Methods* (20):16094069211038400. <https://doi.org/10.1177/16094069211038400>.
- Davoli, M., Ghoddousi, A., Sabatini, F.M., Fabbri, E., Caniglia, R., Kuemmerle, T. 2022. Changing patterns of conflict between humans, carnivores and crop-raiding prey as large carnivores recolonize human-dominated landscapes. *Biol Conserv* 269: 109553. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109553>.
- Drucker, D.P. 2011. Avanços na integração e gerenciamento de dados ecológicos. *Nat Conserv* 9(1):115-120. <https://doi.org/10.4322/natcon.2011.016>.
- Felipe, C.B.M., Nascimento, B.L.C. 2024. Padrões de metadados para o domínio da biodiversidade: uma análise do cenário brasileiro. XXX Congresso Brasileiro de Biblioteconomia e Documentação 1-14. Acessado em 2024, Nov 12, em <https://portal.febab.org.br/cbbd2024/article/view/3214>.
- Fritz, S., See, L., Carlson, T. et al 2019. Citizen science and the United Nations sustainable development goals. *Nat Sustain* 2(10):922-930. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0390-3>.
- GBIF. 2025. Global Biodiversity Information Facility. Acessado em 2025, Fev 20, em <https://www.gbif.org>
- Gould, R. 2017. Data literacy is statistical literacy. *Stat Educ Res J* 16(1):22-25. <https://doi.org/10.52041/serj.v16i1.209>.
- Global Biodiversity Information Facility. 2025. GBIF: The Global Biodiversity Information Facility. Acessado em 2025, Jun 20, em <https://www.gbif.org>.
- Gupta, I., Singh, A.K., Lee, C.N., Buyya, R. 2022. Secure data storage and sharing techniques for data protection in cloud environments: A systematic review, analysis, and future directions. *IEEE Access* 10:71247-71277. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188110>.
- Hampton, S.E., Strasser, C.A., Tewksbury, J.J., Gram, W.K., Budden, A.E., Batcheller, A.L., Duke, C.S., Porter, J.H. 2013. Big data and the future of ecology. *Front Ecol Environ* 11(3):156-162. <https://doi.org/10.1890/120103>
- Hart, E.M., Barmby, P., LeBauer, D., Michonneau, F., Mount, S., Mulrooney, P., Poisot, T., Woo, K.H., Zimmerman, N.B., Hollister, J.W. 2016. Ten simple rules for digital data storage. *PLoS Comput Biol* 12(10): e1005097. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005097>.
- Hassenstein, M.J., Vanella, P. 2022 Data quality—concepts and problems. *Encycl* 2(1): 498-510. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010032>.
- Illanas, S., Fernández-López, J., Vicente, J., Ruiz-Rodríguez, C., Lopez-Padilla, S., Sebastian-Pardo, M., Preite, L., Gomez-Molina, A., Acevedo, P., Blanco-Aguiar, J.A, 2025. Presence-only data for wild ungulates and red fox in Spain based on hunting yields over a 10-year period. *Sci Data* 12(1): 236. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04574-z>.
- Jones, M.B., Schildhauer, M.P., Reichman, O.J., Bowers, S. 2006. The new bioinformatics: integrating ecological data from the gene to the biosphere. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 37(1): 519-544. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110031>.
- Martins, M.R., Vanz, S.A.S. 2022. A prática da comunicação científica por meio do compartilhamento e reuso de dados de pesquisa na Ecologia. Congresso Brasileiro de Ciências da Comunicação 45. Acessado em 2024, Nov 15, em <https://portalintercom.org.br/anais/nacional2022/resumo/0803202223473262eb334476fc3.pdf>

- McGill, B. 2016. Ten commandments for good data management. *Dynamic Ecology (Blog)*. Acessado em 2025, Fev 11, em <https://dynamicecology.wordpress.com/2016/08/22/ten-commandments-for-good-data-management/>
- Medová, J., Sedmáková, Z., Uhrecký, B., Valovicová, L. 2022. Designing activities to develop statistical literacy in primary pupils while conducting physics laboratory work in informal settings *Educ Sci* 12(4):246. <https://doi.org/10.3390/educsci12040246>.
- Negret, P.J., Atkinson, S.C., Woodworth, B.K., Tor, M.C., Allan, J.R., Fuller, R.A., Amano, T. 2022. Language barriers in global bird conservation. *Plos One* 17(4): e0267151. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267151>.
- ONU. 2025. Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Acessado em 2025, Mai 15, em <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.
- Peck, D.V., Lazorchak, J., Klemm, D.J. 2006. Environmental Monitoring and Assessment Program – Surface Water Western Pilot Study: Field Operations Manual for Wadeable Streams. Washington, DC. 245pp.
- Poisot, T., Bruneau, A., Gonzalez, A., Gravel, D., Peres-Neto, P. 2019. Ecological data should not be so hard to find and reuse. *Trends Ecol Evol* 34(6): 494-496. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.04.005>.
- R Core Team. 2024. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing [online]. Acessado em 2025, Nov 10, em <http://rproject.org>.
- Sagarin, R., Pauchard, A. 2010. Observational approaches in ecology open new ground in a changing world. *Front Ecol Environ* 8(7): 379-386. <https://doi.org/10.1890/090001>.
- SiBBR. 2025. Sistema de Informação sobre a Biodiversidade Brasileira. Acessado em 2025, Fev 20, em <https://sibbr.gov.br>

CAPÍTULO

# 4

## FERRAMENTAS ECOLÓGICAS E GEOESPACIAIS NO DIAGNÓSTICO MULTI ESCALAR AMBIENTAL DA BACIA DA UHE FURNAS

Diego R. Macedo,  
Getulio Fonseca Domingues,  
Marden S. Linares,  
André Golgher  
& Marcos Callisto

**Palavras-chave:**

*Uso e cobertura da terra,  
fragilidade ambiental, perda de solo,  
indicadores socioeconômicos,  
transformações da paisagem,  
reservatório.*

Como citar este capítulo:

Macedo, D.R., Domingues, G. F., Linares, M.S., Golgher, A. & Callisto, M. (2026). Ferramentas Ecológicas e Geoespaciais no Diagnóstico Multi Escalar Ambiental da Bacia da UHE Furnas. In: Callisto, M. & Alves, C.B.M. (eds.) Ecologia e Pesquisa Transdisciplinar no Setor Elétrico: Resultados e Aprendizados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG. Belo Horizonte, pp. 89-119.

## Resumo

Este capítulo apresenta uma abordagem integrada para o diagnóstico ambiental e socioeconômico da bacia do reservatório da UHE Furnas. A metodologia combinou ferramentas geoespaciais e dados socioeconômicos para avaliar a influência da presença do reservatório sobre os ecossistemas aquáticos e a dinâmica territorial. A análise multiescalar incluiu desde o uso e cobertura da terra, a aplicação de índices de fragilidade ambiental e perda de solo até dados socioeconômicos, considerando diferentes recortes espaciais (municípios limieiros e não limieiros, bacia, sub-bacias, *buffer* de 35 km, região litorânea e pontos de amostragem em riachos e no reservatório). As coletas seguiram um desenho amostral probabilístico e espacialmente balanceado, permitindo representar adequadamente o gradiente de condições ambientais. Os resultados mostraram elevada predominância de pastagens e agricultura, baixa cobertura florestal e altos índices de fragilidade ambiental, especialmente nas áreas limieiras ao reservatório. No entanto, a perda de solos foi mais intensa nas regiões não limieiras. A análise socioeconômica revelou que os 35 municípios limieiros, embora mais especializados em agricultura (particularmente o cultivo do café) e aquicultura, não apresentaram desempenho econômico superior ao restante da bacia. Atividades como turismo e piscicultura em tanques-rede cresceram, mas sem reverter a perda relativa de dinamismo econômico. Os dados reforçam a importância de integrar conservação ambiental e planejamento territorial, utilizando metodologias robustas e espacialmente explícitas como subsídio à gestão dos recursos hídricos. 💧

## 1

## Introdução

Os ecossistemas lóticos e lênticos desempenham papel fundamental na provisão de serviços ecossistêmicos, incluindo abastecimento de água e produção de alimentos, regulação climática, ciclagem de nutrientes, suporte à biodiversidade, incremento de atividades econômicas, além da promoção de serviços culturais e de lazer (Wantzen 2023; Zalewski & Wantzen 2023). No entanto, esses sistemas estão entre os mais degradados em escala global devido à crescente pressão de atividades antrópicas (Malmqvist & Rundle 2002; Dudgeon et al. 2006).

Entender os padrões e mecanismos da biodiversidade e como essa se organiza no espaço e no tempo é imprescindível para que sejam desenvolvidas estratégias efetivas para sua conservação (Allan 2004; Linares et al. 2023). Isso significa que as condições e tendências ecológicas dos ecossistemas aquáticos devem ser monitoradas considerando múltiplos impactos sinérgicos em bacias hidrográficas buscando entender sua estrutura, processos ecológicos e as funções dos ecossistemas (Hill et al. 2017; Leitão et al. 2018). Entender como os diferentes usos do solo afetam as condições ambientais e a biodiversidade em riachos de cabeceira é uma estratégia mais eficaz para reabilitar e conservar a biodiversidade e os serviços ambientais dos ecossistemas lóticos do que focar apenas nas condições ambientais locais de forma isolada (Dudgeon et al. 2006; Fath 2022). Assim, são necessárias metodologias capazes de estimar os efeitos dos diferentes usos do solo sobre a estrutura e funcionamento desses ecossistemas.

Avaliações ambientais em bacias hidrográficas devem considerar amostragens visando avaliar padrões de distribuição de espécies, variações temporais e suas relações com parâmetros físicos e químicos da água e dos habitats. No entanto, existe uma série de limitações quanto ao tempo de amostragem, processamento em laboratório do material coletado, organização e análise dos dados obtidos, disponibilidade de recursos humanos e aporte financeiro para execução da avaliação ambiental. Estas limitações podem ser minimizadas através da utilização de um desenho amostral probabilístico e espacialmente balanceado, visto que os estudos de avaliação de integridade ecológica em bacias hidrográficas são tipicamente identificados por sua localização geográfica (Stevens & Olsen 2004; Macedo et al. 2019). Essa abordagem evita vieses na seleção de pontos e cobertura de toda variedade de ambientes na bacia em estudo (desde áreas em condições de referência até sítios severamente degradados por atividades humanas). Atualmente, essa abordagem de amostragem espacial é utilizada tanto em escala nacional quanto regional nos EUA (Faustini et al. 2009; Paulsen et al. 2020; Angermeier et al. 2026), e também em vários projetos de pesquisa no Brasil (Macedo et al. 2014b; Callisto et al. 2019).

## 2

## Escalas espaciais

Neste projeto IBI UHE Furnas & UFMG adotou-se uma abordagem multiescalar para a análise dos impactos ambientais e socioeconômicos associados ao reservatório da UHE Furnas. As diferentes escalas espaciais consideradas permitiram uma compreensão mais abrangente e detalhada das dinâmicas socioeconômicas e de ocupação do solo em curso. A escala regional foi representada pela comparação entre os municípios limítrofes ao reservatório (os 35 municípios que são oficialmente reconhecidos como banhados pelo reservatório, quadro 1) e os demais municípios na bacia hidrográfica, visando avaliar a distribuição dos benefícios dos serviços ecossistêmicos. Em escala intermediária foi delimitado um *buffer* de 35 km ao redor do espelho d'água do reservatório (Callisto et al. 2019), utilizado para análise do uso e cobertura da terra. A fragilidade ambiental das áreas mais diretamente influenciadas pela presença do reservatório da UHE Furnas foi calculada para toda a área da bacia através do mapeamento de sub-bacias, além das escalas de riachos e região litorânea do reservatório. Por fim, em escala local, foram definidos sítios amostrais específicos em ambientes lóticos (riachos) e lêntico (reservatório), nos quais foram aplicados protocolos de avaliação de habitats físicos, de coleta de macroinvertebrados bentônicos e peixes e realizadas análises de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos (Figura 1).

Quadro 1 – Municípios da bacia de Furnas.

ESTADO	MUNICÍPIOS
<b>LINDEIROS</b>	
<b>MINAS GERAIS</b>	Aguanil, Alfenas, Alterosa, Areado, Boa Esperança, Cabo Verde, Campo Belo, Campo do Meio, Campos Gerais, Cana Verde, Candeias, Capitólio, Carmo do Rio Claro, Conceição da Aparecida, Coqueiral, Cristais, Divisa Nova, Elói Mendes, Fama, Formiga, Guapé, Illicínea, Lavras, Machado, Nepomuceno, Paraguaçu, Perdões, Pimenta, Piumhi, Ribeirão Vermelho, São João Batista do Glória, São José da Barra, Serrania, Três Pontas e Varginha.
<b>RESTANTE DA BACIA</b>	
<b>MINAS GERAIS</b>	Aiuruoca, Alagoa, Alfredo Vasconcelos, Andrelândia, Antônio Carlos, Arantina, Baependi, Barbacena, Barroso, Bocaina de Minas, Bom Jardim de Minas, Bom Sucesso, Borda da Mata, Brasópolis, Cachoeira de Minas, Camacho, Camanducaia, Cambuí, Cambuquira, Campanha, Campestre, Carandaí, Careaçú, Carmo da Cachoeira, Carmo de Minas, Carrancas, Carvalhópolis, Carvalhos, Conceição da Barra de Minas, Caxambu, Conceição das Pedras, Conceição do Rio Verde, Conceição dos Ouros, Congonhal, Consolação, Cordislândia, Coronel Xavier Chaves, Córrego do Bom Jesus, Cristina, Cruzília, Delfim Moreira, Dom Viçoso, Dolores de Campos, Espírito Santo do Dourado, Estiva, Gonçalves, Heliadora, Ibertioga, Ibituruna, Ijaci, Ingaí, Itajubá, Itamonte, Itanhandu, Itumirim, Itutinga, Jesuânia, Juruáia, Lagoa Dourada, Lambari, Liberdade, Luminárias, Madre de Deus de Minas, Maria da Fé, Marmelópolis, Minduri, Monsenhor Paulo, Monte Belo, Muzambinho, Natércia, Nazareno, Olímpio Noronha, Oliveira, Paraisópolis, Passa Quatro, Pedralva, Piedade do Rio Grande, Piranguçu, Piranguinho, Poco Fundo, Pouso Alegre, Pouso Alto, Prados, Resende Costa, Ressaquinha, Ritópolis, Santa Cruz de Minas, Santana da Vargem, Santana do Garambeu, Santana do Jacaré, Santa Rita de Ibitipoca, Santa Rita do Sapucaí, Santo Antônio do Amparo, São Bento Abade, São Francisco de Paula, São Gonçalo do Sapucaí, São Joao da Mata, São Joao del Rei, São Jose do Alegre, São Lourenço, São Sebastiao da Bela Vista, São Sebastiao do Rio Verde, São Tiago, São Thome das Letras, São Vicente de Minas, Sapucaí Mirim, Senador Amaral, Senador Jose Bento, Seritinga, Serranos, Silvanópolis, Soledade de Minas, Tiradentes, Turvelândia, Virginia e Wenceslau Braz.
<b>SÃO PAULO</b>	Campos do Jordao, Santo Antônio do Pinhal e São Bento do Sapucaí

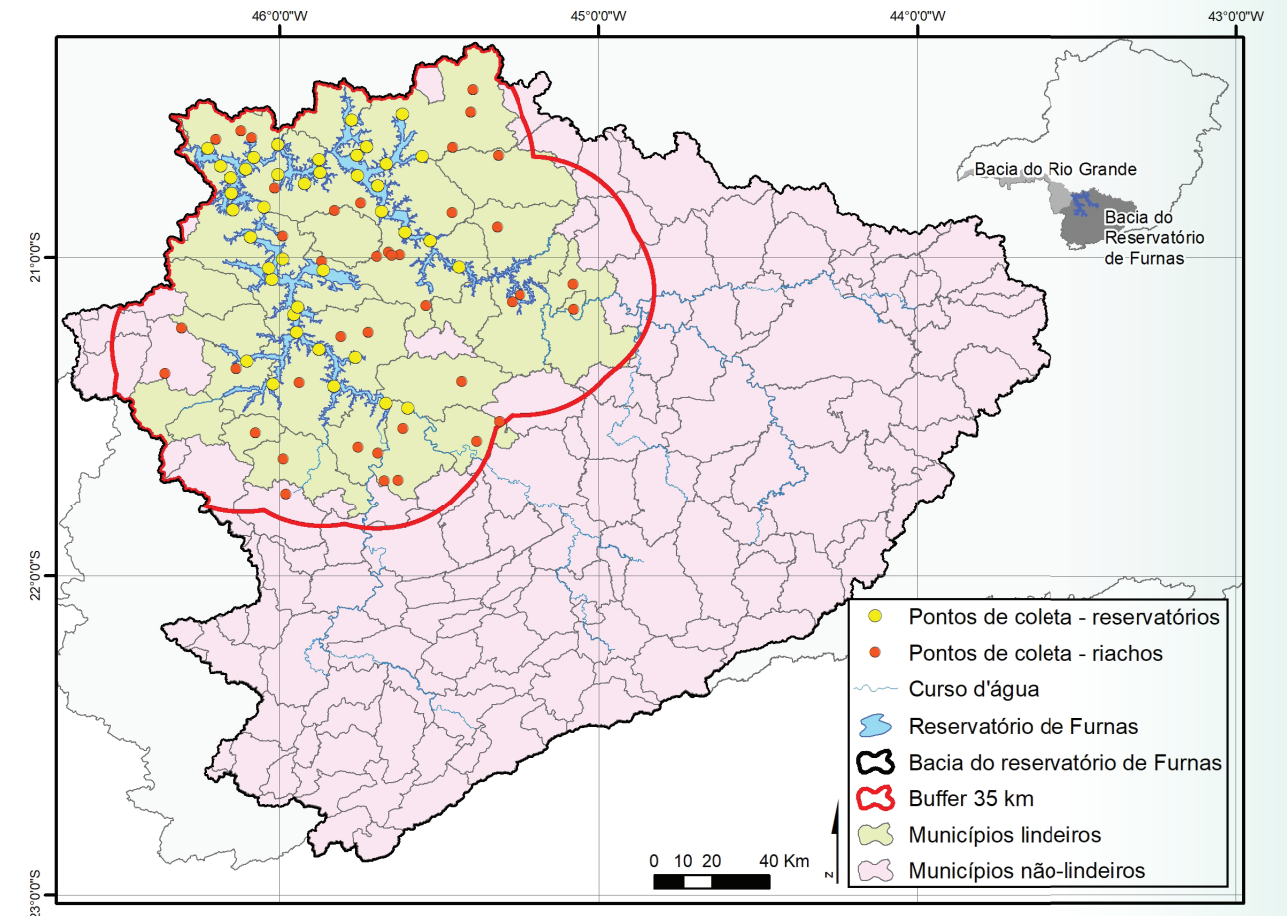


Figura 1. Organização multiescalar da área de estudo.

### 3

## Definição da Rede Amostral

A definição da rede de amostragem para as avaliações locais utilizada neste projeto foi desenvolvida com uso de Sistemas Informativos Geográficos (SIGs) e pacotes estatísticos. Esta abordagem metodológica é baseada em GRTS (Generalized Random-Tessellation Stratified), onde o desenho amostral é hierárquico e espacialmente balanceado (riachos de 1ª, 2ª e 3ª ordem), e pode ser aplicado a pontos, linhas e polígonos definidos em um SIG (Stevens & Olsen 2004). Para as amostragens no reservatório da UHE Furnas, utilizamos a metodologia de amostragens considerando o desenho espacialmente balanceado para definir 40 parcelas amostrais na região litorânea, equidistantes na margem. Para garantir um gradiente de condições ecológicas, 16 pontos foram escolhidos através da abordagem de melhor julgamento profissional - *best professional judgment approach* (Whittier et al. 2007). Esses locais representam o máximo potencial ecológico (8 pontos) e em locais com ocupação urbana/balneários (8 pontos) (Figura 2).

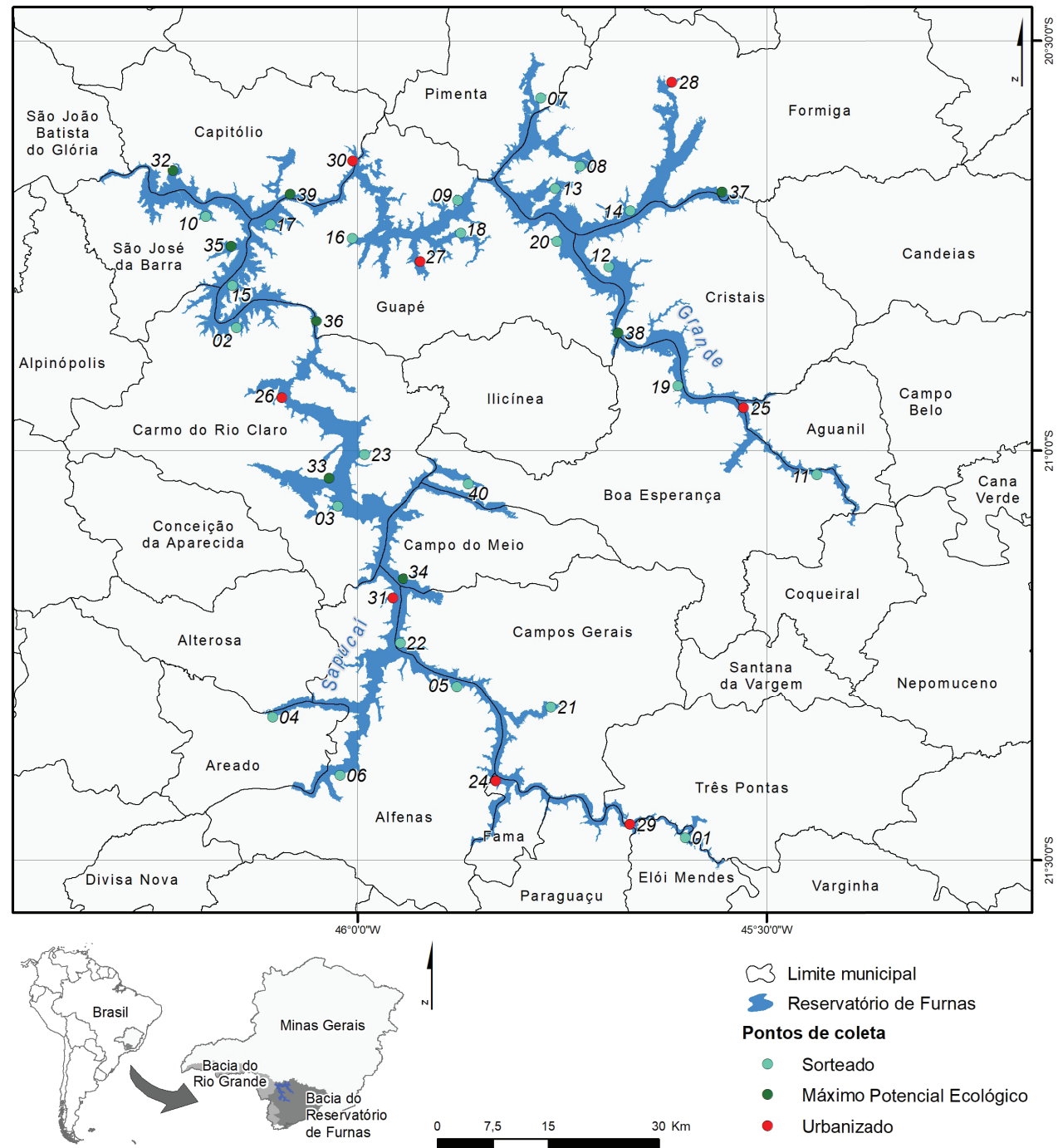


Figura 2. Mapa com os pontos de amostragem definidos para a campanha no reservatório da UHE Furnas, em abril de 2023.

A amostragem em riachos foi realizada dentro do *buffer* de 35 km a partir das margens do reservatório. O desenho amostral espacialmente balanceado foi executado em trechos de rios de ordens e dimensões de largura e profundidade semelhantes – *wadeable streams*, ou seja, rios capazes de serem atravessados a pé por um adulto mediano (Kaufmann et al. 1999). Foram sorteados 40 pontos espacialmente balanceados, definidos como a malha principal, e 40 pontos definidos como reservas. Estes pontos foram presencialmente reconhecidos em conjunto com potenciais sites de referência e degradados - *best professional judgment approach* (Whittier et al. 2007), para que a malha final contendo 40 sites fosse definida para as coletas na estação seca de 2023 (Figura 3).



Figura 3: Desenho amostral dos riachos a montante da UHE Furnas.

# 4 Avaliação do Uso do Solo

O uso e cobertura do solo em uma bacia hidrográfica e no entorno do reservatório possuem estreita ligação com a qualidade ambiental e com a biota aquática (Macedo et al. 2014a). Usos antropogênicos, notadamente a influência urbana e atividades de agricultura, diminuem a cobertura de vegetação nativa, inclusive das zonas ripárias, o que causa a degradação dos habitats físicos, aumento das taxas de sedimentação, alterações hidrológicas, oscilações na temperatura da água e aumento da disponibilidade de nutrientes nos ecossistemas aquáticos (Bryce et al. 2010). Nas etapas de planejamento das coletas, foi utilizado o mapeamento do uso e cobertura do solo realizado pelo Projeto MapBiomias (2025) (Figura 4).

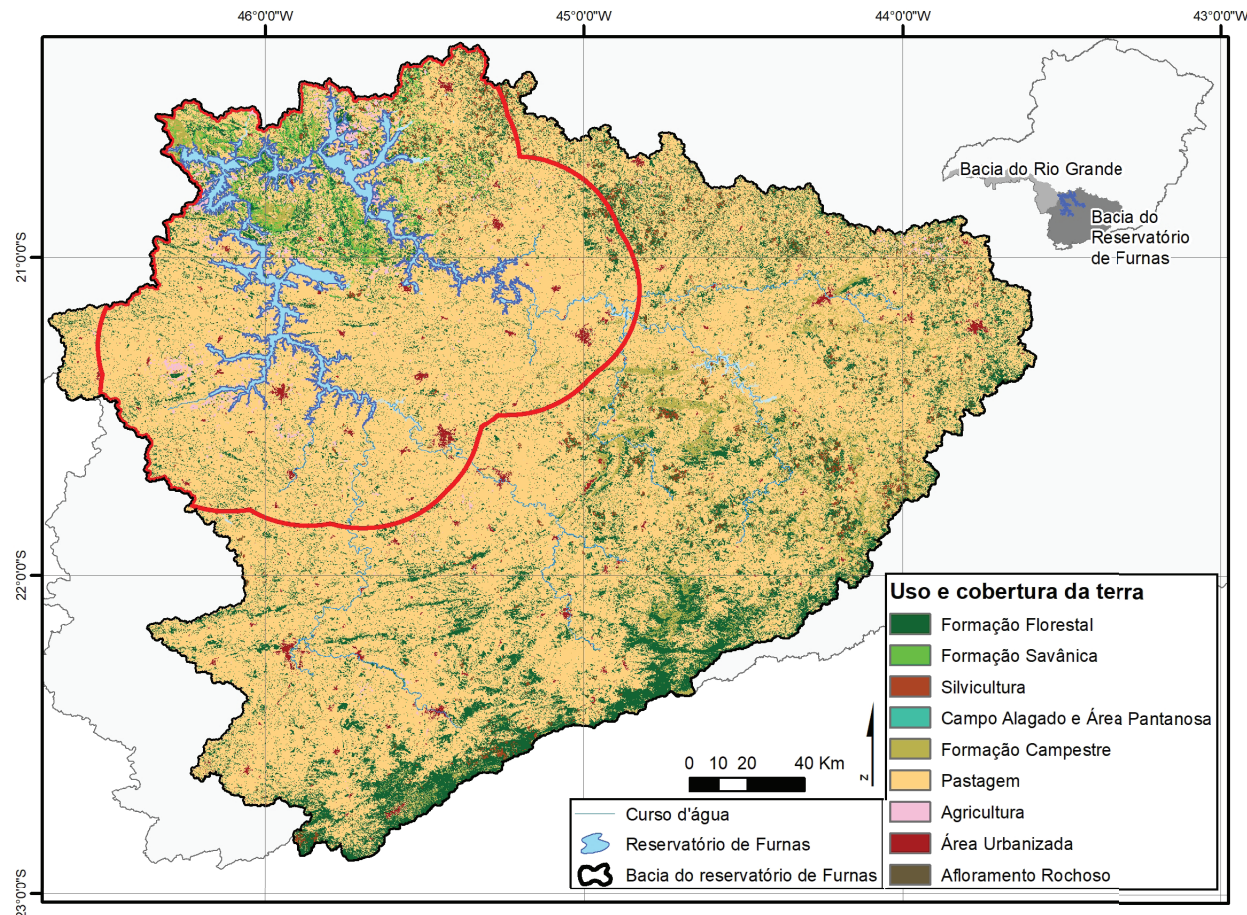


Figura 4. Uso e cobertura do solo preliminares do projeto IBI Furnas & UFMG.

O mapeamento do uso e cobertura da terra neste projeto foi elaborado para as sub-bacias de drenagem a montante dos riachos amostrados e em um raio de 500 metros de cada estação amostral localizada no reservatório da UHE Furnas. Foi utilizada a classificação baseada em objetos (Lopes et al. 2022), em imagens do Satélite Sentinel-2, com resolução espacial de 10 metros, fornecido pela Agência Espacial Europeia (Figura 5).

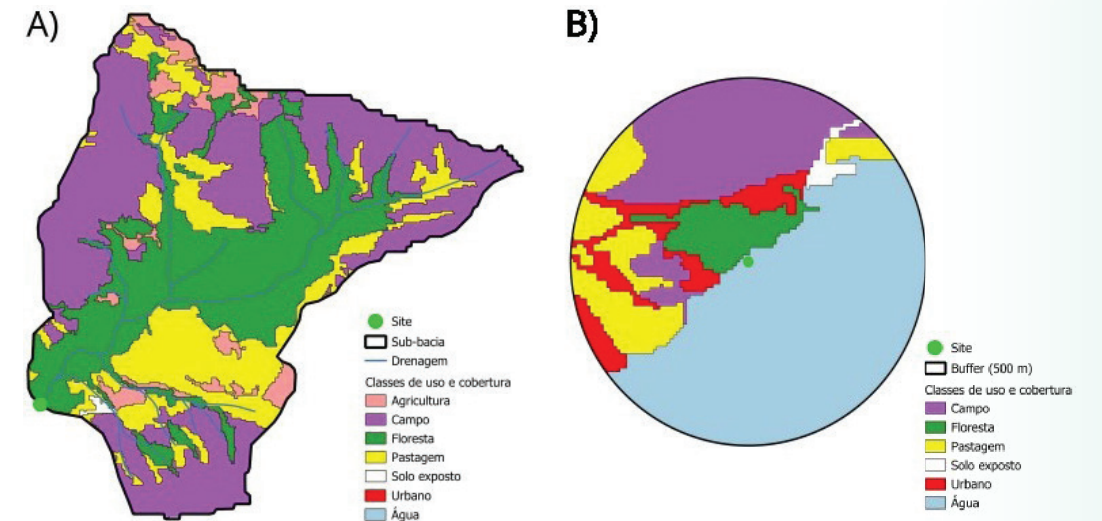


Figura 5: Exemplo do mapeamento em escala A) de sub-bacia e B) e de *buffer* litorâneo (500 m).

O levantamento do uso do solo na bacia da UHE Furnas mostrou que a bacia (no geral e dentro do *buffer* de 35 km) é predominantemente coberta (>50%) por pastagens e áreas agrícolas (Tabela 1), cujo impacto nos cursos d'água geralmente está associado ao aumento do aporte de sedimentos e presença de excesso de nutrientes (sobretudo nitrogênio e fósforo - eutrofização) advindos de fertilizantes agrícolas (Mello et al. 2020). No *buffer* de 35 km, além das maiores concentrações de áreas agrícolas (>20%), observa-se que as formações florestais representam 12,7% da cobertura, que são números bastante baixos, o que potencialmente aumenta os graus de fragilidade ambiental da bacia (Macedo et al. 2018).

Tabela 1. Distribuição qualitativa das classes de uso e cobertura da terra na bacia da UHE Furnas e no *buffer* de 35 km do reservatório.

Classe de Uso e Cobertura	% Bacia UHE Furnas	% <i>Buffer</i> 35 Km UHE Furnas
Formação Florestal	18,36	12,71
Formação Savânica	0,57	1,76
Silvicultura	2,12	1,49
Área Pantanosa	0,15	0,49
Formação Campestre	3,74	1,12
Pastagem	37,00	31,56
Agricultura	13,95	21,86
Área Urbanizada	1,16	1,16
Afloramento Rochoso	0,16	0,02

Ao comparar os resultados da composição do uso e cobertura da terra em quatro recortes espaciais (Figura 6), observa-se que as áreas de pastagem predominam em todas as escalas espaciais, com destaque para a bacia da UHE Furnas (cerca de 40%) e o *buffer* de 35 km (acima de 30%). A agricultura é a principal atividade econômica no entorno do reservatório, superando 40% e 20%, respectivamente. A cobertura florestal é mais expressiva nas sub-bacias e na área do reservatório, enquanto o reflorestamento apresenta maior proporção no *buffer*. Áreas urbanas, de campo e solo exposto representam proporções menores, mas com variações relevantes entre os recortes espaciais. Esses padrões refletem a heterogeneidade de uso do solo na região e suas implicações sobre a qualidade ambiental dos ecossistemas aquáticos, sendo especialmente relevantes para a interpretação dos dados de fragilidade ambiental, qualidade da água e biodiversidade apresentados ao longo deste capítulo.

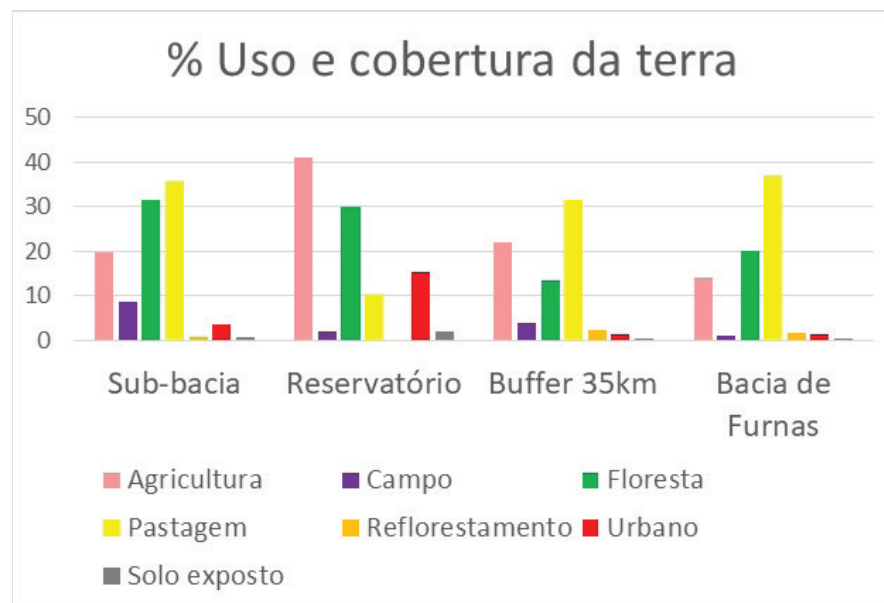


Figura 6 – Distribuição percentual do uso e cobertura da terra em diferentes escalas de análise no entorno do reservatório da UHE Furnas.

# 5

## Índice de Fragilidade Ambiental

A quantificação de propriedades ambientais, como fragilidade e conservação, é essencial para orientar decisões sobre manejo e recuperação de recursos naturais (Villa & McLeod 2002). Para isso, é fundamental integrar aspectos sociais e geobiofísicos na análise de impactos ambientais (Macedo et al. 2018). A elaboração do Índice de Fragilidade Ambiental (IFA) para a bacia da UHE Furnas (ver Figura 1) foi baseada na sobreposição entre vulnerabilidades potenciais intrínsecas da região de estudo por meio de elementos da paisagem natural (altimetria, declividade, geologia e pluviosidade) e pressões antrópicas (porcentagem de cobertura natural, densidade de rodovias, distância de rodovias e distância de centros urbanos) utilizando Sistemas Informativos

Geográficos. Os dados de pluviosidade foram extraídos do Worldclim (Fick & Hijmans 2017) para as 1.427 Ottobacias (e.g., divisão da bacia da UHE Furnas em sub-bacias utilizadas pela Agência de Águas e Saneamento Básico para gestão dos recursos hídricos), bem como para as 40 sub-bacias a montante dos pontos de riachos e os *buffers* de 500 metros ao redor dos sítios amostrais no reservatório. Os dados de altimetria e declividade foram derivados do modelo SRTM (USGG 2015). A predominância de cada unidade geológica nas Ottobacias, sub-bacias e *buffers* foi obtida a partir da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (IBGE 2024a). A vegetação natural foi mapeada com dados do programa Copernicus, utilizando imagens Sentinel-2 (10 m) e algoritmos de inteligência artificial (Buchhorn et al. 2020). As classes “vegetação florestal”, “vegetação arbustiva” e “vegetação herbácea alagada” foram reclassificadas como “vegetação natural”, e a porcentagem de cobertura vegetação natural foi calculada para cada unidade. Para escalas menores, utilizaram-se dados primários do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG.. Foram mensuradas a distância média de cada Ottobacia, bacia ou *buffer* até cidades e rodovias, além da densidade de estradas pavimentadas, não pavimentadas e “off-road” (km/km<sup>2</sup>). Os dados de infraestrutura viária foram extraídos do OpenStreetMap (OpenStreetMap Foundation 2024), e as distâncias de cidades, do IBGE (2024a). Os fatores de paisagem natural e pressões antrópicas foram padronizados em uma escala de fragilidade de 1 a 5, considerando a variabilidade da área de estudo e parâmetros teóricos (Macedo et al. 2018), permitindo sua agregação e comparação.

A fragilidade ambiental é influenciada por fatores de importância variável (Macedo et al. 2018). Este estudo utilizou o Processo Analítico Hierárquico (AHP) (Saaty 1977), amplamente empregado em análises ambientais multicritério e adotado pelo Governo do Estado de Minas Gerais na Avaliação Ambiental Integrada (Minas Gerais 2022). O método compara fatores em pares, atribuindo pesos que organizam as variáveis hierarquicamente. A relação entre fatores é representada em uma matriz de pesos, na qual cada fator recebe uma nota proporcional à sua importância, garantindo que a soma dos pesos totalize 1 (Macedo et al. 2018). O Índice de Fragilidade Ambiental (IFA) é calculado pelo somatório dos fatores padronizados, ponderados de acordo com os pesos atribuídos na matriz de julgamento. Para garantir a coerência dessa matriz, foi aplicada a razão de consistência (RC) (Saaty 1977). No presente estudo, o valor obtido foi 0,0049, demonstrando alta consistência nas comparações entre os fatores. O IFA foi calculado para a bacia hidrográfica a montante da UHE Furnas. Para a sua delimitação, foram utilizadas as Ottobacias, disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2017), por serem compatíveis com a legislação brasileira de recursos hídricos (Brasil 1997). Essa classificação hierárquica de unidades de drenagem é semelhante às unidades hidrológicas dos EUA (Omernik et al. 2017) e tem sido aplicada em estudos brasileiros (Macedo et al. 2018). Além disso, o índice foi aplicado em escala mais detalhada nos 80 sítios amostrais do projeto IBI UHE Furnas & UFMG, sendo 40 na região litorânea do reservatório e 40 em riachos de 1ª a 3ª ordens, situados dentro do *buffer* de 35 km do reservatório (Figura 1). A rede amostral seguiu um desenho probabilístico e espacialmente balanceado (Macedo et al. 2019), reduzindo viés de seleção. Essa abordagem tem sido amplamente empregada em estudos ambientais as bacias associadas de empreendimentos hidrelétricos em Minas Gerais (Callisto et al. 2019).

A análise da bacia da UHE Furnas revelou predominância de fragilidade ambiental moderada (2,5-3) e alta (3-3,5) (Figura 7). Destaca-se a porção sul da bacia, especialmente em municípios não lindeiros no braço do rio Sapucaí, que apresenta níveis mais elevados de fragilidade em comparação ao restante da bacia.

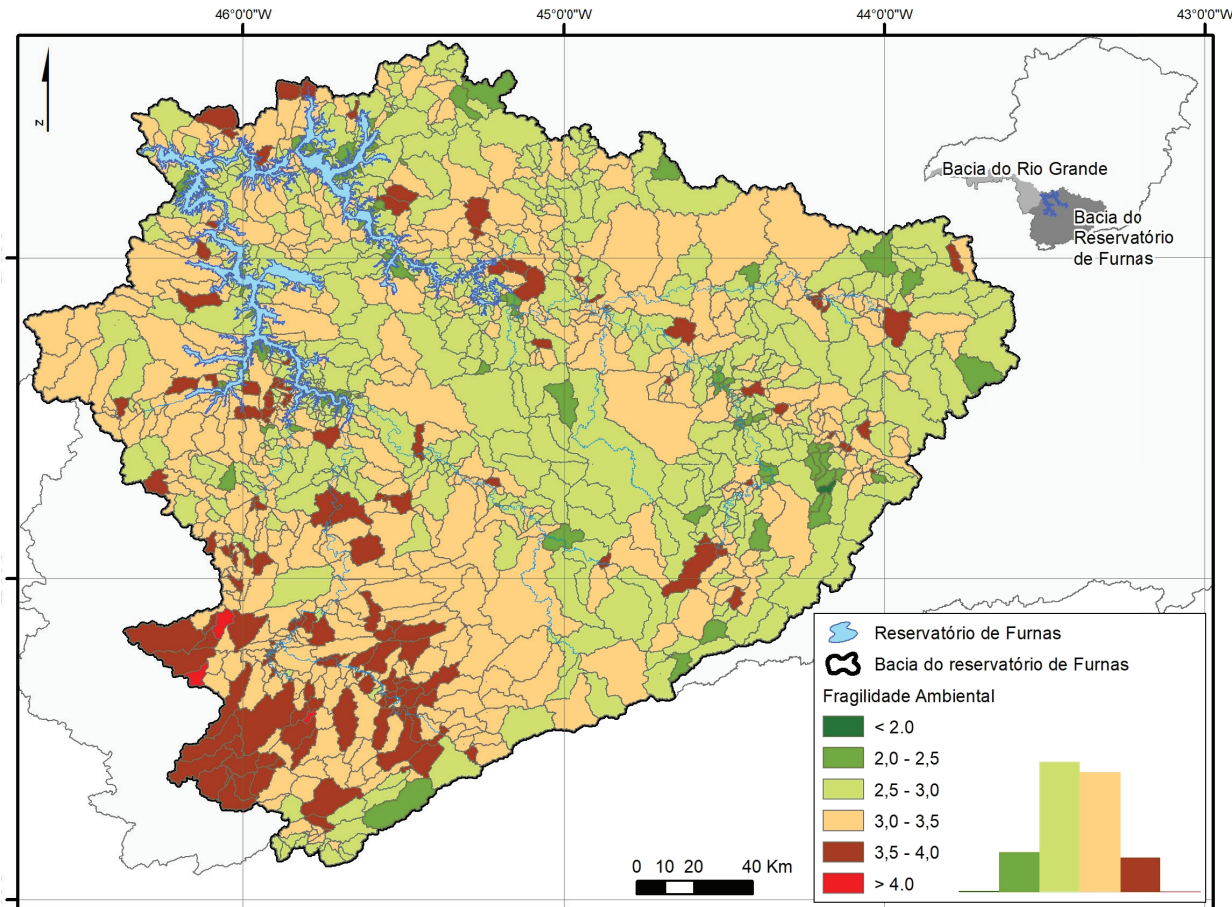


Figura 7. Índice de Fragilidade Ambiental da bacia da UHE Furnas.

Nos riachos, o padrão geral é semelhante ao da bacia, com exceção de uma maior ocorrência de sites com fragilidade extrema (>3,5) (Figura 8). Essa distribuição se deve à seleção intencional de alguns pontos impactados (*hand-picked sites*) (Whittier et al. 2007), assegurando um gradiente representativo de condições ecológicas para o projeto IBI UHE Furnas & UFMG.

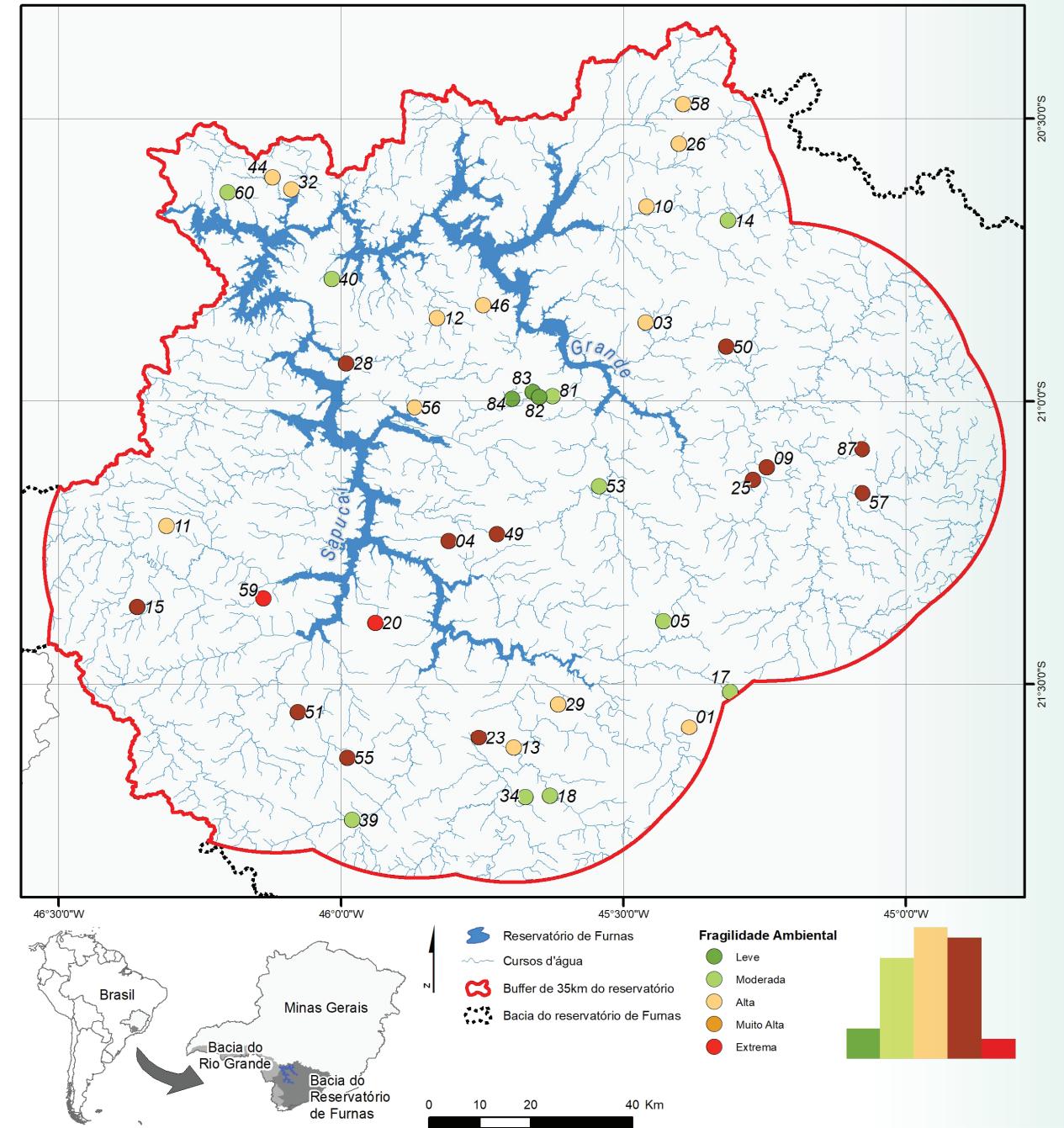


Figura 8. Índice de Fragilidade Ambiental nos 40 sites de riachos amostrados na bacia da UHE Furnas.

Na região de entorno do reservatório, observa-se um padrão distinto com predominância de fragilidade muito alta (3,5-4,0) (Figura 9). Esse ambiente artificial atrai maior presença humana, o que intensifica os impactos ambientais (Von Sperling 2012). No entanto, a distribuição espacial da fragilidade na região litorânea não apresenta um padrão bem definido. Esses resultados evidenciam a influência da ocupação antrópica sobre a fragilidade ambiental e reforçam a necessidade de estratégias de conservação direcionadas às áreas mais vulneráveis.

O Índice de Fragilidade Ambiental (IFA) é um indicador essencial para avaliar impactos ambientais, refletindo a susceptibilidade do ambiente à erosão e seus efeitos ecológicos. Seus valores estão diretamente relacionados ao grau de impacto ambiental, ou seja, quanto maior o índice, maior o risco ambiental (Kaufmann et al. 1999; Bryce et al. 2010). No entanto, o IFA é baseado em características geiofísicas e antrópicas, sem relação direta com a UHE Furnas. A metodologia adotada oferece subsídios para que tomadores de decisão priorizem recursos financeiros e humanos em ações de manejo e conservação, garantindo a disponibilidade de serviços ecossistêmicos. A análise integrada permite identificar como fatores naturais e pressões antrópicas afetam as sub-bacias e o entorno do reservatório, possibilitando intervenções mais eficazes em áreas prioritárias.

Os resultados reforçam a importância da vegetação na proteção do solo, subsidiando estratégias para prolongar a vida útil do reservatório da UHE Furnas. A abordagem adotada, que considera a bacia hidrográfica como unidade de análise, está alinhada à moderna gestão de recursos hídricos (Brasil, 1997). Além disso, a redução de sedimentos finos contribui para a conservação da biodiversidade em ecossistemas fluviais (Kaufmann et al. 1999; Bryce et al. 2010) e lacustres (Lenhardt et al. 2008; Molozzi et al. 2013). Por fim, o IFA está em consonância com a legislação brasileira, que reconhece a água como um recurso natural limitado e de valor econômico. Instrumentos como o Plano de Recursos Hídricos (PRH) e o Plano Ambiental de Conservação e Uso do Reservatório Artificial (PACUERA) podem se beneficiar dessa abordagem integrada, combinando aspectos sociais e geiofísicos na gestão ambiental.

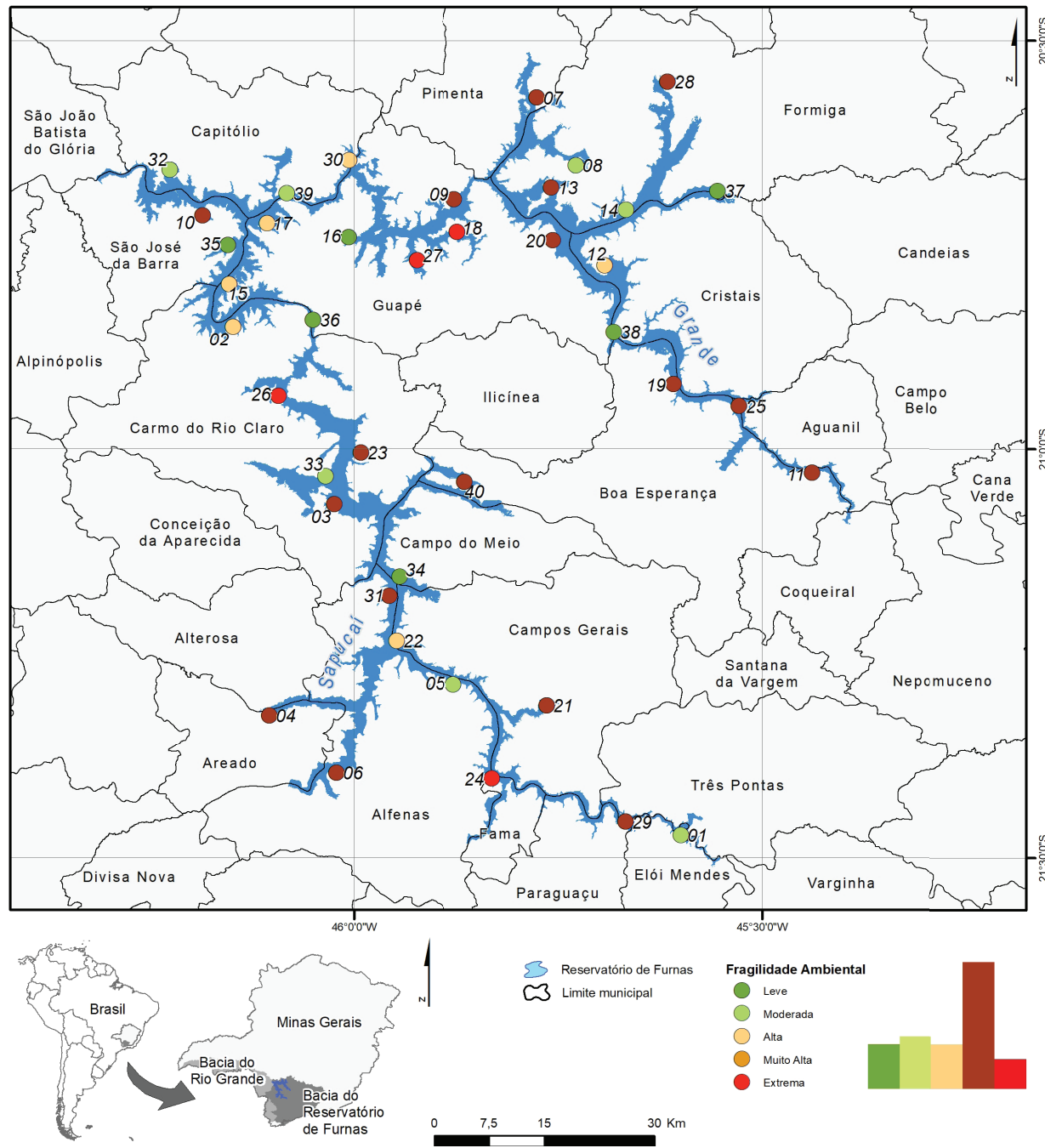


Figura 9. Índice de Fragilidade Ambiental nos 40 sítios amostrais na região litorânea da UHE Furnas.



Foto: Marcos Callisto

# 6

## Estimativa da perda de solos

Para estimar a perda de solos na bacia de drenagem da UHE Furnas, utilizou-se a RUSLE3D, uma adaptação tridimensional da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE), que permite modelar com maior precisão os processos erosivos em áreas de relevo complexo (Mitasova & Mitas 1999). A bacia da UHE Furnas foi subdividida em duas subáreas: as áreas lindeiras, adjacentes ao reservatório, e as áreas não lindeiras, localizadas em altitudes superiores e mais distantes do corpo d'água (ver Figura 1). Essa subdivisão possibilitou uma análise comparativa, examinando a influência da topografia, do uso do solo e da posição geográfica sobre as taxas de erosão lindeiros e não lindeiros ao reservatório da UHE Furnas.

A RUSLE3D estima a perda de solo média anual em toneladas por hectare a nível de pixel das camadas matriciais a partir de cinco fatores principais: R (erosividade de chuvas), K (erodibilidade do solo), LS (topografia), C (cobertura e uso do solo) e P (práticas de manejo conservacionista, não aplicadas neste estudo). O fator topográfico tridimensional LS3D foi calculado de acordo com a fórmula:

$$LS3D = (m + 1) (U/22.1)^m (\sin (\beta)/0.09)^n$$

onde,

$U$  é a área de contribuição específica por unidade de largura (medida do fluxo de água) em metros ( $m^2/m$ ),

$\beta$  é o ângulo de inclinação em graus,

22,1 é o comprimento da parcela padrão da USLE em metros,

0,09 = 9% = 5,15° é a inclinação da parcela padrão da USLE.

Os valores dos expoentes variam entre  $m = 0,2 - 0,6$  e  $n = 1,0 - 1,3$ , onde os valores mais baixos são utilizados para escoamento laminar predominante e os valores mais altos para escoamento concentrado em sulcos.

Esse método, ao substituir o comprimento de encosta pelo conceito de área de contribuição específica, permite representar melhor o acúmulo de escoamento ao longo do terreno, refletindo a intensidade do transporte de sedimentos em áreas de relevo acidentado.

Os fatores R, K, e C foram determinados conforme as características climáticas e edáficas da bacia da UHE Furnas:

- **Fator R (Erosividade de Chuvas):** Calculado a partir de dados históricos de precipitação fornecidos pelo Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), que apresenta uma série temporal contínua e detalhada, necessária para estimar a energia erosiva das chuvas anuais e compreender seu impacto no potencial de erosão;

- **Fator K (Erodibilidade do Solo):** Estimado com base nas propriedades físicas e químicas dos solos da bacia, refletindo a suscetibilidade intrínseca dos diferentes tipos de solo à erosão. Solos mais suscetíveis, com menor coesão entre partículas, tendem a possuir valores de K mais elevados, indicando uma maior vulnerabilidade à ação do escoamento superficial;

- **Fator C (Cobertura e Uso do Solo):** Determinado para diferentes coberturas do solo na bacia da UHE Furnas, com base em literatura científica e dados do MapBiomas. Os valores atribuídos aos diferentes tipos de cobertura são apresentados a seguir:

- Café: 0,1126 (Prochnow et al. 2005);
- Eucalipto: 0,12 (Silva et al. 2014);
- Floresta: 0,0001 (Bertoni & Lombardi Neto 2008);
- Pasto: 0,22 (Silva et al. 2014);
- Agricultura Intensiva: 0,55 (Weill & Sparovek 2008);
- Vegetação Campestre: 0,001 (Beskow et al. 2009);
- Áreas Urbanas e Corpos d'água: 0, não contribuindo diretamente para a erosão.

Esses valores de C refletem a capacidade de proteção variável que cada tipo de cobertura do solo oferece contra a erosão. Áreas de floresta, por exemplo, apresentam um valor de C extremamente baixo (0,0001) devido à sua densa vegetação, que reduz a energia do impacto da chuva e protege o solo contra o escoamento superficial. Em contrapartida, áreas de agricultura, onde o solo tende a estar exposto em pelo menos parte do ano, têm um fator C mais alto (0,55), indicando maior vulnerabilidade ao transporte de sedimentos.

Os resultados da aplicação da RUSLE3D na bacia de drenagem de Furnas mostraram uma diferença nas taxas de perda de solo entre as áreas lindeiras e não lindeiras ao longo do período analisado (1985–

2023). As áreas não lindeiras, situadas em altitudes médias de aproximadamente 1.057,6 metros e com uma declividade média de 11,82 graus, apresentaram as maiores taxas de perda de solo, com valores médios variando entre 6,0 e 7,0 t/ha/ano. Esse padrão de erosão elevado nessas áreas pode ser atribuído ao relevo mais acidentado, que favorece o escoamento concentrado e, conseqüentemente, intensifica o transporte de sedimentos. A extensão territorial das áreas não lindeiras, que ocupam cerca de 36.000 km<sup>2</sup>, combinada com a inclinação média acentuada, resulta em uma capacidade erosiva significativa nessas regiões. O desvio padrão da declividade, de 7,66 graus, indica uma alta variabilidade topográfica, o que contribui para o aumento da susceptibilidade ao processo erosivo ao longo das encostas íngremes e das áreas de relevo irregular (Figura 10).

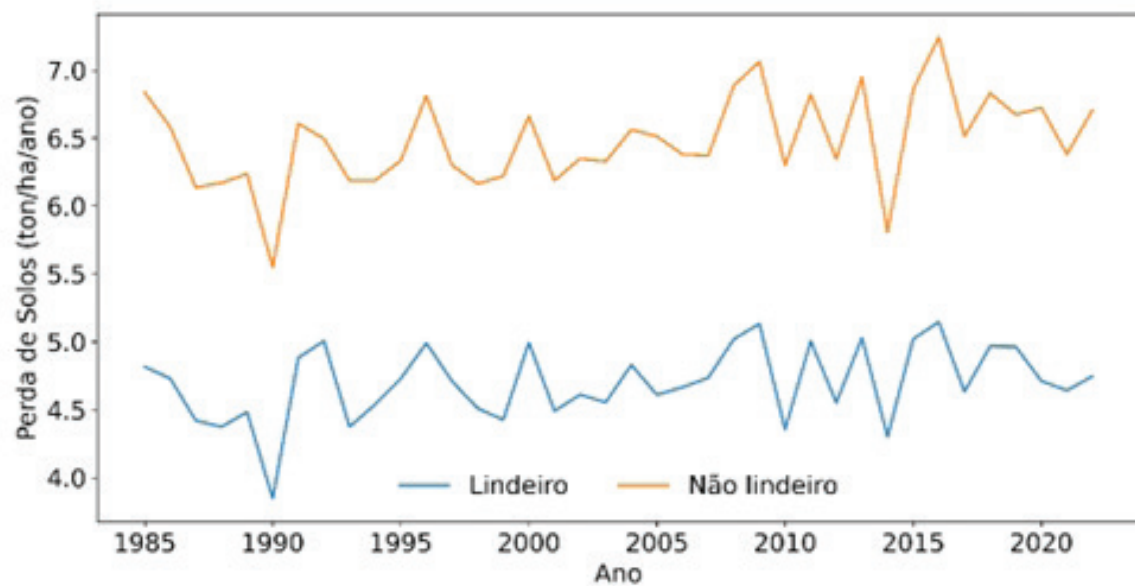


Figura 10. Média de perda de solos estimadas para as áreas lindeiras e não lindeiras ao reservatório de Furnas.

A distribuição espacial das taxas de perda de solo geradas pelos mapas de erosão revelou que as áreas com maior inclinação e solo exposto, especialmente nas áreas não lindeiras, registram as maiores taxas de erosão. Os mapas mostram que a combinação de altas declividades e agropecuária, predominantemente nas áreas não lindeiras, resulta em um aumento na perda de solos. Em contraste, as áreas lindeiras, com menor declividade, exibem menores taxas de perda de solo (Figura 11).

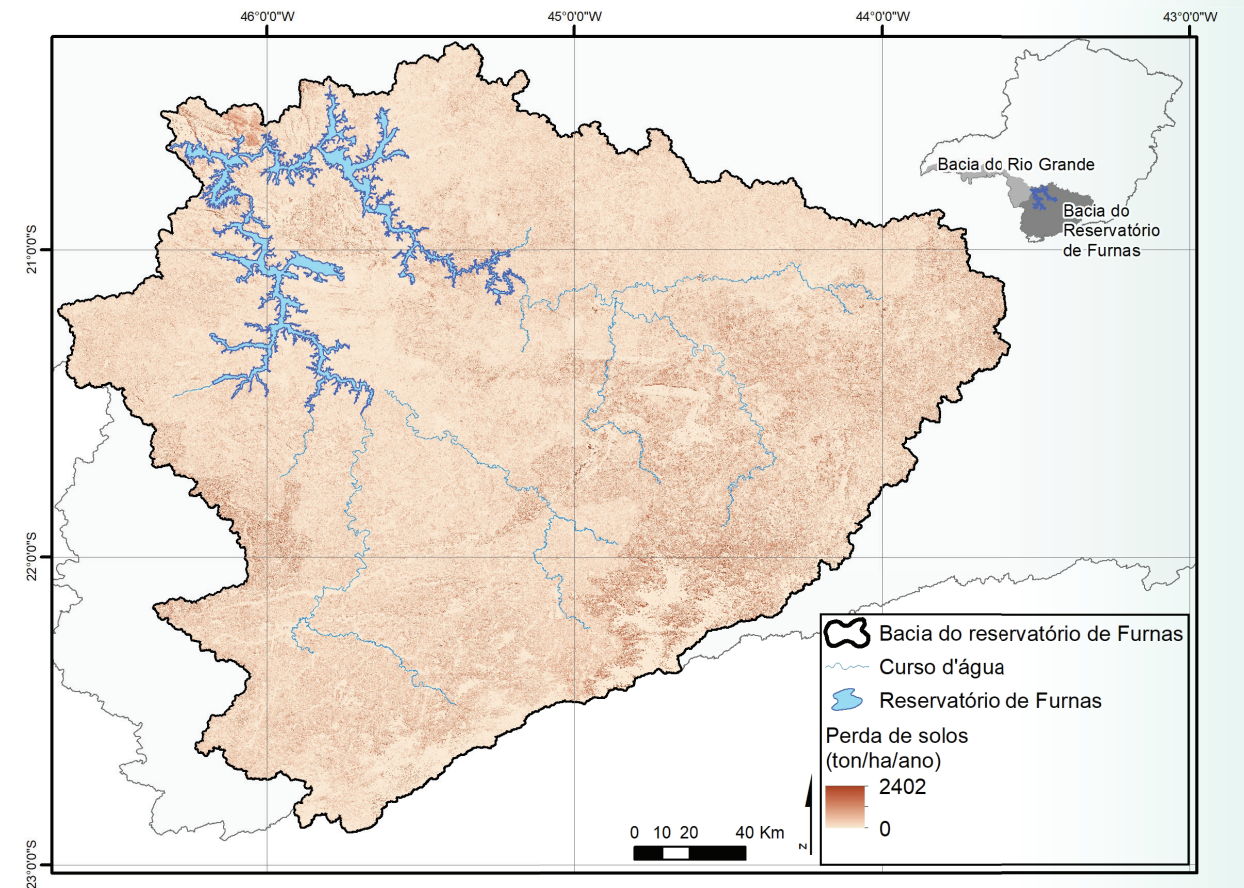


Figura 11. Distribuição espacial da perda de solos na bacia de drenagem do reservatório de Furnas.

# 7

## Análise do desenvolvimento socioeconômico e do uso da terra no entorno do reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas

A análise do desenvolvimento socioeconômico dos municípios do entorno da UHE Furnas permite avaliar em que medida os serviços ecossistêmicos oferecidos pelo reservatório influenciaram a dinâmica populacional, econômica e ambiental na região. Foram utilizados os censos demográficos de 2000, 2010 e 2022 (2002, 2010, 2023a) e agropecuários de 1996 e 2017 (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 1999, 2019), além de dados econômicos (IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2023b, 2023c, 2024b), com o objetivo de comparar os 35 municípios lindeiros ao reservatório com os demais inseridos na bacia hidrográfica de aproximadamente 52.200 km<sup>2</sup>.

A evolução da população entre 2000 e 2022 nos municípios lindeiros ao reservatório foi semelhante à observada nos demais municípios da bacia (Tabela 2). Houve um processo de envelhecimento populacional generalizado, similar em ambas as áreas, com redução do número de crianças e adolescentes e aumento da população idosa. As implicações dessas transformações na demanda por escolas e aumento da demanda por serviços de saúde e previdência, com potenciais impactos sobre a capacidade de investimento dos municípios (Wong & Carvalho 2006).

Tabela 2 – Evolução da população nos 35 municípios lindeiros ao reservatório da UHE Furnas em comparação ao restante da bacia entre 2000 e 2022.

VARIÁVEL	Municípios Lindeiros	Restante da Bacia	Proporção da população da bacia no entorno do reservatório da UHE Furnas (%)
População em 2000	822.909	1.448.150	36,2
População em 2010	890.290	1.555.075	36,4
População em 2022	937.927	1.623.416	36,6
População de 0 a 19 anos em 2000	304.361	531.687	36,4
População de 0 a 19 anos em 2010	265.938	465.620	36,4
População de 0 a 19 anos em 2022	223.792	379.728	37,1
População de 20 a 59 anos em 2000	437.639	768.905	36,3
População de 20 a 59 anos em 2010	511.522	886.206	36,6
População de 20 a 59 anos em 2022	535.637	924.963	36,7
População com 60 anos ou mais em 2000	80.909	147.558	35,4
População com 60 anos ou mais em 2010	112.830	203.249	35,7
População com 60 anos ou mais em 2022	178.498	318.725	35,9

Fonte: Censos Demográficos de 2000, 2010 e 2022 (IBGE 2002, 2011, 2024).

Em termos econômicos, a participação dos municípios lindeiros no PIB total da bacia diminuiu de aproximadamente 39,5% em 2002 para 37,5% em 2020 (Tabela 3). O setor agropecuário seguiu a mesma tendência, assim como a indústria, que apresentou retração acentuada. Os setores de serviços e administração pública permaneceram mais estáveis, com leve crescimento no último caso. Esses dados sugerem uma perda relativa de dinamismo econômico dos municípios lindeiros frente ao restante da bacia.

Tabela 3 – Participação dos 35 municípios lindeiros ao reservatório da UHE Furnas.

ANO	PIB	Valor adicionado por setor			
		Agropecuária	Indústria	Serviços	Administração pública
2002	38,8	43,2	39,5	39,6	35,9
2004	39,3	46,3	40,1	39,2	35,8
2006	40,6	46,9	42,4	40,4	35,9
2008	39,6	43,5	40,2	40,3	36,0
2010	39,6	43,0	36,5	41,9	36,2
2012	39,3	43,1	36,8	41,2	36,2
2014	37,2	37,4	32,6	39,6	36,0
2016	37,4	42,0	35,5	38,0	36,0
2018	37,8	42,7	35,0	38,6	36,2
2020	37,5	41,3	34,3	38,7	36,5

Fonte: Produto Interno Bruto dos Municípios, 2024 (IBGE, 2024b).

O turismo, apontado como uma das principais vocações econômicas do entorno do reservatório desde o Plano de Desenvolvimento do Lago de Furnas (PDLF) (Pozzer & Ferrão 2018), apresentou crescimento real no valor adicionado bruto (VAB), mas esse crescimento não foi mais acentuado nos municípios lindeiros em comparação ao restante da bacia. Municípios como Capitólio e Aguanil destacaram-se com crescimento acima de 100% entre 2010 e 2019, enquanto outros apresentaram estagnação ou retração (Tabela 4).

Tabela 4 – Participação dos 35 municípios lindeiros ao reservatório da UHE Furnas no turismo na bacia da UHE Furnas e Valor Adicionado Bruto (VAB) real do turismo.

Ano	Proporção na bacia	VAB turismo real (R\$ mil em 2010)
2010	36,7	384.658
2012	36,4	450.569
2014	36,3	462.857
2016	36,5	427.093
2018	36,4	438.442
2019	35,4	502.594

Fonte: Pesquisa Mensal de Serviços, 2010-21 (IBGE, 2023b).

A piscicultura em tanques-rede também foi analisada como atividade relacionada aos serviços ecossistêmicos do reservatório da UHE Furnas. Entre 2013 e 2022, a produção aumentou de R\$ 27 milhões para R\$ 45 milhões em valores reais, sendo a tilápia a principal espécie cultivada (Tabela 5). Três municípios – Alfenas, Guapé e Carmo do Rio Claro – concentravam 75% da produção total. Apesar do crescimento, a participação relativa dos municípios limieiros na produção aquícola da bacia manteve-se estável, com tendência a ligeiro declínio.

Tabela 5 – Produção da aquicultura no reservatório da UHE Furnas entre 2013 e 2022.

Ano	Valor total real produzido em Furnas (1000 reais)	Quantidade de tilápia (ton)	Porcentagem do valor total de tilápia	Proporção do entorno na bacia de Furnas
2013	27.512	4.702	86	75,5
2015	30.859	5.156	93	70,1
2017	27.051	5.513	93	58,5
2019	39.661	6.148	78	69,6
2021	45.015	7.048	90	71,3
2022	45.282	7.255	90	72,6

Fonte: Pesquisa Pecuária Municipal, 2013-22 (IBGE, 2023c).

O setor agropecuário, por sua vez, passou por transformações relevantes entre os censos agropecuários de 1996 e 2017 (Tabela 6). A área ocupada por lavouras no entorno de Furnas passou de 1/3 para quase 2/3 do total, enquanto as pastagens diminuíram. A evolução no restante da bacia foi menos marcante.

Tabela 6 – Área ocupada por lavouras e pastagens.

ANO	Lavouras		Pastagens	
	1995	2017	1995	2017
Entorno de Furnas	33,3	64,5	66,7	35,5
Restante da Bacia	22,2	44,4	77,8	55,6

Fonte: Censos Agropecuários, 1996 e 2017 (IBGE 1999, 2019).

O número de estabelecimentos agropecuários cresceu entre 1996 e 2017 em ambas as áreas, mas aumentou no entorno de Furnas, sendo que a proporção de estabelecimentos no entorno de Furnas passou de 31,7% para 35,0% do total (Tabela 7). No entorno do reservatório da UHE Furnas, aumentou o número de ocupados no período, tendência contrária à observada no restante da bacia, implicando em um aumento na participação de ocupados com relação a MG, de 34,8% para 39,5% do total. Esse padrão de uso intensivo de mão de obra é associado à produção de café, mais presente no entorno do reservatório da UHE Furnas,

onde mais de 60% dos estabelecimentos agropecuários produzem esse vegetal, fato que refletiu em maior uso de agrotóxicos, adubos e calagem, com impactos sobre os corpos d’água da região. Por exemplo, mais de 66% dos estabelecimentos agropecuários no entorno do reservatório da UHE Furnas faziam uso de agrotóxicos, número muito superior ao registrado no restante da bacia. Apesar da maior produção de café, o valor relativo da produção vegetal, animal e de bovinos apresentou um pequeno declínio relativo no entorno da UHE Furnas. Em contrapartida, a produção de suínos apresentou um ganho relativo do entorno de Furnas quando comparado ao restante da bacia.

Tabela 7 – Dados agropecuários dos estabelecimentos agropecuários no entorno do reservatório da UHE Furnas e restante da bacia em 1995 e 2017.

VARIÁVEIS	Proporção no Entorno do Reservatório (%)	
	Ano	
	1995	2017
Número de estabelecimentos agropecuários	31,7	35,0
Pessoal ocupado	34,8	39,5
Produção vegetal	51,3	50,2
Produção animal	36,5	33,0
Bovinos	35,6	33,6
Suínos	36,7	42,3

Fonte: Censos Agropecuários 1996 e 2017 (IBGE 1999, 2019).

Com relação à proteção ambiental, observou-se que os municípios limieiros apresentaram uma ligeira maior proporção de estabelecimentos agropecuários com medidas de manejo e conservação no geral, sendo que o plantio em nível e proteção de encostas eram as mais comuns (Tabela 8).

Tabela 8 – Estabelecimentos agropecuários com recursos hídricos na bacia da UHE Furnas.

	Entorno do reservatório da UHE de Furnas	Restante da Bacia
Plantio em nível	24,9	18,0
Proteção e/ou conservação de encostas	11,1	6,9
Rotação de culturas	10,7	15,4
Pousio ou descanso de solos	9,2	14,7
Reflorestamento para proteção de nascentes	7,2	6,3
Recuperação de mata ciliar	6,8	5,2
Estabilização de voçorocas	2,0	1,0
Manejo florestal	1,8	1,5
Todas as intervenções	51,9	48,0

Fonte: Censo Agropecuário de 2017 (IBGE 2019).

Os resultados da comparação entre os municípios limieiros ao reservatório da UHE de Furnas e o restante da bacia são sintetizados e discutidos à luz dos serviços ecossistêmicos (Tabela 9). As populações de ambas as áreas evoluíram de forma bastante similar. As proporções da população da bacia no entorno do reservatório da UHE Furnas são utilizadas como marco de comparação para as demais variáveis.

Embora o entorno do reservatório da UHE Furnas apresentasse no início do período analisado um PIB per capita superior ao dos demais municípios da bacia (+), essa vantagem foi progressivamente reduzida entre 1995 e 2017, indicando perda relativa de dinamismo econômico (-). Setores com potencial de aproveitamento dos serviços ecossistêmicos do reservatório, como o turismo e a aquicultura, não conseguiram reverter essa tendência. Observou-se ainda uma intensificação do uso da terra nas áreas limieiras, com avanço das lavouras sobre pastagens – especialmente o cultivo de café –, mas sem correspondente aumento no valor da produção vegetal. Ao contrário, houve declínio relativo da produção animal, com exceção da produção suína, acompanhado por fragmentação fundiária, aumento do número de propriedades e redução do tamanho médio dos estabelecimentos, o que pode ter limitado ganhos de produtividade, mesmo com maior uso de mão de obra.

Tabela 9 – Síntese dos indicadores socioeconômicos em conjunto.

Indicador	Resultado		
	Início	Fim	Evolução
População	*	*	*
PIB geral	+	*	-
PIB agropecuário	+	*	-
PIB industrial	+	-	-
PIB de demais serviços	+	+	-
PIB de administração pública	*	*	+
VAB de turismo	*	-	-
VAB de aquicultura	+	+	*
Proporção de lavoura	+	+	+
Proporção de pastagens	-	-	-
Valor da produção vegetal	+	+	-
Proporção de estabelecimentos agropecuários com café	+	+	+
Valor da produção animal	*	-	-
Número de cabeças de bovinos	*	-	-
Número de cabeças de suínos	*	+	+
Número de cabeças de aves	+	-	-
Produção de leite	-	-	-
Produção de ovos	+	-	-
Número de estabelecimentos agropecuários	-	*	+
Tamanho dos estabelecimentos agropecuários	+	*	-
Número de ocupados nos estabelecimentos agropecuários	*	+	+

Fonte: elaborada pelos autores.

A análise integrada dos dados ecológicos, espaciais e socioeconômicos revelou que, embora o reservatório da UHE Furnas represente uma fonte importante de serviços ecossistêmicos para a região, os benefícios não foram distribuídos de forma equitativa nem plenamente aproveitados ao longo do tempo. A comparação entre municípios limieiros e não limieiros mostrou que não houve atração populacional significativa para o entorno do reservatório, e que o dinamismo econômico dessa região perdeu força relativa a partir de 2012, mesmo com o crescimento da piscicultura em tanques-rede e do turismo.

Além disso, os resultados indicam que, embora os municípios limieiros apresentem maior especialização em determinadas atividades agropecuárias, como o cultivo do café, essas transformações não resultaram em aumentos proporcionais de produtividade ou valor agregado. A fragmentação fundiária e a intensificação do uso de agroquímicos – especialmente agrotóxicos – impõem desafios adicionais à conservação da qualidade da água no reservatório.

Essa constatação reforça a necessidade de políticas integradas que articulem conservação ambiental, uso racional dos recursos hídricos e planejamento territorial, apoiadas por diagnósticos espaciais detalhados e monitoramento contínuo. O uso de metodologias probabilísticas de amostragem, ferramentas geoespaciais e indicadores ecológicos demonstrou ser eficaz para gerar informações robustas e comparáveis, essenciais para subsidiar o manejo adaptativo da bacia hidrográfica.

## Conclusão

O presente capítulo apresentou a integração entre ferramentas geográficas e econômicas para a avaliação ambiental em bacias hidrográficas associadas a grandes reservatórios. A aplicação de desenhos amostrais probabilísticos, modelagens de perda de solo e índices de fragilidade ambiental permitiram compreender a distribuição dos impactos ambientais e revelar desigualdades no aproveitamento dos serviços ecossistêmicos. Apesar do potencial do reservatório da UHE Furnas como vetor de desenvolvimento regional, os dados sugerem que os benefícios econômicos e ecológicos ainda não foram plenamente realizados nos municípios limieiros. A manutenção da biodiversidade aquática, a redução da vulnerabilidade ambiental e o fortalecimento de atividades sustentáveis como turismo, aquicultura e agricultura de baixo impacto devem ser priorizadas.

A metodologia aplicada no Projeto IBI UHE Furnas & UFMG pode ser replicada em outras regiões do Brasil, fornecendo subsídios técnicos para a elaboração de planos de bacia hidrográfica, conservação e uso do território baseados em evidências. A abordagem adotada está em consonância com os princípios da gestão integrada de recursos hídricos e com os objetivos de desenvolvimento sustentável, sendo essencial para garantir o equilíbrio entre conservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico. As informações obtidas nas análises elaboradas, em conjunto com as informações biológicas (Capítulo 5), farão parte do desenvolvimento do Índice Transdisciplinar de Integridade da UHE Furnas (Capítulo 7).

## Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG as bolsas de pesquisa de iniciação científica, mestrado, doutorado e produtividade em pesquisa (DRM 311002/2023-4; AG 302586/2021-0; MC 304060/2020-8).

## Referências

- Allan, J.D. 2004. Landscapes and Riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 35: 257–284. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>.
- ANA - Agência Nacional de Águas. 2017. Mapa digital de Ottobacias. Scale 1:100,000. ANA - Agência Nacional de Águas, Brasília, Brazil. [https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/5b97dc790ebc4307938d8a5b089c1aab\\_0/about](https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/5b97dc790ebc4307938d8a5b089c1aab_0/about).
- Bertoni J., Lombardi Neto F. 2008. *Conservação do solo* 6. ed. São Paulo: Ícone. 355pp.
- Beskow, S., Mello, C.R., Norton, L.D., Curi, N., Viola, M.R., Avanzi, J.C. 2009. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena* 79:49–59. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.010>.
- Brazil. 1997. Lei Federal 9433. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1o da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, qu. In: Presidência da República. Casa Civil. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm). Accessed 22 Mar 2015.
- Bryce, S.A., Lomnický, G.A., Kaufmann, P.R. 2010. Protecting sediment-sensitive aquatic species in mountain streams through the application of biologically based streambed sediment criteria. *Journal of the North American Benthological Society* 29:657–672. <https://doi.org/10.1899/09-061.1>
- Buchhorn, M., Lesiv, M., Tsendbazar, N.E., Herold, M., Bertels, L., Smet, S. 2020. Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2. *Remote Sensing* 12:1044. <https://doi.org/10.3390/rs12061044>.
- Callisto, M., Macedo, D.R., Castro, D.M.P. de, Alves, C.B.M. 2019. Bases Conceituais para conservação e manejo de bacias hidrográficas. Cemig - Companhia Energética de Minas Gerais, Belo Horizonte. 212pp.
- Dudgeon, D., Arthington, A.H., Gessner, M.O., Kawabata, Z-I, Knowler, D.J., Leveque, C., Naiman, R.J., Prieur-Richard, A-H, ... Sullivan, C.A. 2006. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 81:163–82. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>.
- Fath, B.D. 2022. Challenges in sustainable resource management. *Frontiers Media SA*. <https://doi.org/10.3389/fsrma.2022.943359>.
- Faustini, J.M., Kaufmann, P.R., Herlihy, A.T., Paulsen, S.G. 2009. Assessing stream ecosystem condition in the United States. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 90:309–310. <https://doi.org/10.1029/2009EO360001>.
- Fick, S.E., Hijmans, R.J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37:4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Hill, R.A., Fox, E.W., Leibowitz, S.G., Olsen, A.R., Thornburgh, D.J., Weber, M.H. 2017. Predictive mapping of the biotic condition of conterminous U.S. rivers and streams. *Ecological Applications* 27:2397–2415. <https://doi.org/10.1002/eap.1617>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2024a. Catálogo de Geosserviço. In: Infra Estrutura Nacional de Dados Espaciais. <https://geoservicos.ibge.gov.br/geoserver/ows>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2002. Censo Demográfico 2000. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. Censo Demográfico 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2023a. Censo Demográfico 2022. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 1999. Censo Agropecuário 1996. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. Censo Agropecuário 2017. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2023b. Pesquisa Mensal de Serviços - PMS. IBGE, Rio de Janeiro, Brazil.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2023c. Pesquisa Pecuária Municipal - PPM. IBGE, Rio de Janeiro, Brazil.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2024b. Produto Interno Bruto - PIB dos Municípios. IBGE, Rio de Janeiro, Brazil.
- Kaufmann, P.R., Levine, P., Robison, E.G., Seeliger, C., Peck, D.V. 1999. *Quantifying Physical Habitat in Wadeable Streams*. EPA/620/R-99/003. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. 158pp.
- Leitão, R.P., Zuanon, J., Mouillot, D., Leal, C.G., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Villeger, S., Pompeu, P.S., Kasper, D., dePaula, F.R., Ferraz, S.F.B., Gardner, T.A. 2018. Disentangling the pathways of land use impacts on the functional structure of fish assemblages in Amazon streams. *Ecography* 41:219–232. <https://doi.org/10.1111/ecog.02845>.
- Lenhardt, M., Markovic, G., Gacic, Z. 2008. Decline in the index of biotic integrity of the fish assemblage as a response to reservoir aging. *Water Resources Management* 23:1713–1723. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9348-3>.
- Linares, M.S., Macedo, D.R., Hughes, R.M., Castro, D.M.P., Callisto, M. 2023. The past is never dead: Legacy effects alter the structure of benthic macroinvertebrate assemblages. *Limnetica* 42:55–67. <https://doi.org/10.23818/limn.42.05>.
- Lopes, D.S., Nóbrega, R.A.A., Macedo, D.R. 2022. Towards a robust approach for multitemporal landcover dataset: 3 decades of landcover changes in Piauí, Brazil. *Revista Brasileira de Cartografia* 74:197–213.

- <https://doi.org/10.14393/rbcv74n1-62751>.
- Macedo, D.R., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Callisto, M. 2018. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. *Science of The Total Environment* 635:1267–1279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.216>.
- Macedo, D.R., Hughes, R.M., Ligeiro, R., Ferreira, W.R., Castro, M.A., Junqueira, N.T., Oliveira, D.R., Firmiano, K.R., Kaufmann, P.R., Pompeu, P.S., Callisto, M. 2014a. The relative influence of catchment and site variables on fish and macroinvertebrate richness in Cerrado biome streams. *Landscape Ecology* 29:1001–1016. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0036-9>.
- Macedo, D.R., Pompeu, P.S., Morais, L., Castro, M., Alves, C.B.M., França, J.S., Sanches, B.O., Agra, J.U.M., Callisto, M. 2014b. Sampling site selection, land use and cover, field reconnaissance, and sampling. In: Callisto M, Hughes RM, Lopes JM, Castro MA (eds) *Ecological conditions in hydropower basins. Serie Peixe Vivo 3*. Companhia Energética de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, pp 61–83.
- Macedo, D.R., Callisto, M., Pompeu, P.S., Castro, D., Silva, D.R.O., Carvalho, D.R., Santos, G.B., Becker, B., Sanches, B., Alves, C.B.M. 2019. Escalas Espaciais e Comunidades Aquáticas. In: Callisto, M., Macedo, D.R., Castro, D.M.P., Alves CB (Org. ). (ed) *Bases Conceituais para Conservação e Manejo de Bacias Hidrográficas*. Cemig - Companhia Energética de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, pp 29–62.
- Malmqvist, B., Rundle, S. 2002. Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental Conservation* 29:134-156. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000097>.
- Mello, K.D., Taniwaki, R.H., Paula, F.R., Valente, R.A., Randhir, T.O., Macedo, D.R., Leal, C.G., Rodrigues, C.B., Hughes, R.M. 2020. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. *Journal of Environmental Management* 270:110879. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110879>.
- Minas Gerais. 2022. Avaliação Ambiental Integrada de Projetos Hidrelétricos no Estado de Minas Gerais. Comitê Gestor da Avaliação Ambiental Integrada, Belo Horizonte. <https://feam.br/avaliacao-ambiental-integrada-aai-de-projetos-hidrelétricos>.
- Mitasova, H., Mitas, L. 1999. Modeling soil detachment with RUSLE 3d using GIS. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Molozzi, J., Salas, F., Callisto, M., Marques, J.C. 2013. Thermodynamic oriented ecological indicators: Application of Eco-Exergy and Specific Eco-Exergy in capturing environmental changes between disturbed and non-disturbed tropical reservoirs. *Ecological Indicators* 24:543–551. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.002>
- Omernik, J.M., Griffith, G.E., Hughes, R.M., Glover, J.B., Weber, M.H. 2017. How Misapplication of the Hydrologic Unit Framework Diminishes the Meaning of Watersheds. *Environmental Management* 60:1–11. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0854-z>
- OpenStreetMap Foundation. 2024. Open Street Map. <http://www.openstreetmap.org>. Acessado em 20 Dec 2017.
- Paulsen, S.G., Peck, D.V., Kaufmann, P.R., Herlihy, A.T. 2020. Rivers and Streams: Upgrading Monitoring of the Nation's Freshwater Resources - Meeting the Spirit of the Clean Water Act. In: *Water Quality - Science, Assessments and Policy*. IntechOpen, London, UK, pp 50–74
- Prochnow, D., Dechen, S.C.F., De Maria I.C., Castro, O.M., Vieira, S.R. 2005. Razão de perdas de terra e fator C da cultura do cafeeiro em cinco espaçamentos, em Pindorama (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 29:91–98. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000100010>.
- Projeto Mapbiomas. 2025. Coleções Mapbiomas: Coleção 9 (1985-2023) da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. <https://brasil.mapbiomas.org/map/colecao-9/>.
- Saaty, T.L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15:234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Silva, M.A., Silva, M.L.N., Curi, N., Oliveira, A.H., Avanzi, J.C., Norton, L.D. 2014. Water erosion risk prediction in eucalyptus plantations. *Ciência e Agrotecnologia* 38:160–172. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200007>
- Stevens, D.L., Olsen, A.R. 2004. Spatially balanced sampling of natural resources. *Journal of the American Statistical Association* 99:262–278. <https://doi.org/10.1198/016214504000000250>.
- USGS - United States Geological Survey. 2015. SRTMGL1: NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second V003. Land Processes Distributed Active Archive Center. United States Geological Survey, Washington, DC. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-srtmg1-003>.
- Villa, F., McLeod, H. 2002. Environmental vulnerability indicators for environmental planning and decision-making: Guidelines and applications. *Environmental Management* 29:335–348. <https://doi.org/10.1007/s00267-001-0030-2>.
- Von Sperling, E. 2012. Hydropower in Brazil: Overview of positive and negative environmental aspects. *Energy Procedia* 18:110–118. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.023>.
- Wantzen, K.M. 2023. River Culture: Living with the River, Loving the River, Taking Care of the River. *Blue Papers* 2: 1-195. DOI: <https://doi.org/10.58981/bluepapers.2023.1>.
- Weill, M.A.M., Sparovek, G. 2008. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP): I-Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32:801–814. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200034>
- Whittier, T.R., Stoddard, J.L., Larsen, D.P., Herlihy, A.T. 2007. Selecting reference sites for stream biological assessments: best professional judgment or objective criteria. *Journal of the North American Benthological Society* 26:349–360. [https://doi.org/10.1899/0887-3593\(2007\)26\[349:SRSFSB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1899/0887-3593(2007)26[349:SRSFSB]2.0.CO;2).
- Wong, L.L.R., Carvalho, J.A. 2006. O rápido processo de envelhecimento populacional do Brasil: sérios desafios para as políticas públicas. *Revista Brasileira de Estudos de População* 23:5–26. <https://doi.org/10.1590/S0102-30982006000100002>.
- Zalewski, M., Wantzen, K.M. 2023. Ecohydrology and river culture: synergies for the enhancement of river and catchment sustainability. In: *River Culture-Life as a Dance to the Rhythm of the Waters*. UNESCO Publishing Paris, pp 807–819. 📍

CAPÍTULO

# 5

## BIODIVERSIDADE AQUÁTICA NA BACIA DA UHE FURNAS

Marcos Callisto, Anderson S. Rocha,  
Karoline H. Madureira, Pedro H. Amaral,  
Rosálva Sulzbacher, Gilberto N. Salvador,  
Beatriz F. G. Pego, Getúlio Fonseca  
Domingues, Marden S. Linares, Alessandra  
A.P. Bueno, Carlos B. M. Alves, Lucília S.  
Miranda, Keila V. S. Marques, Thaisa S.  
Michelan, Paulo S. Pompeu,  
Ricardo R. C. Solar, Felipe V. Manzano &  
Paulo S. Formagio

### **Palavras-chave:**

*qualidade de água, quantidade de água, limiares ecológicos, peixes, invertebrados aquáticos, cnidários, moluscos, crustáceos, bioindicadores de qualidade de água.*

Como citar este capítulo:

Callisto, M., Rocha, A.S., Madureira, K.H., Amaral, P., Sulzbacher, R., Salvador, G.N., Pego, B.F.G., Fonseca, G.F., Linares, M.S., Bueno, A.A.P., Alves, C.B.M., Miranda, L.S., Marques, K.V.S., Michelan, T.S., Pompeu, P.S., Solar, R.R.C., Manzano, F.V. & Formagio, P.S. (2026). Biodiversidade Aquática na Bacia da UHE Furnas. In: Callisto, M. & Alves, C.B.M. (eds.) Ecologia e Pesquisa Transdisciplinar no Setor Elétrico: Resultados e Aprendizados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG. Belo Horizonte, pp. 121-167

## Resumo

Este capítulo apresenta uma análise integrada da biodiversidade aquática na bacia da UHE Furnas, reunindo avaliações de qualidade da água, estrutura das comunidades biológicas e padrões espaciais de degradação ambiental em ambientes lóticos e lênticos. A qualidade das águas é examinada à luz da legislação ambiental brasileira, permitindo identificar gradientes ambientais e áreas mais vulneráveis no contexto da bacia hidrográfica da UHE Furnas. O capítulo também explora a resposta das comunidades de macroinvertebrados bentônicos ao assoreamento de riachos, por meio da identificação de limiares ecológicos e pontos de ruptura (tipping points), evidenciando mudanças abruptas na composição e no funcionamento das comunidades ao longo de gradientes de pressão ambiental. A diversidade biológica é investigada em múltiplas escalas espaciais, utilizando métricas de diversidade alfa, beta, gama e zeta, o que permite uma compreensão abrangente da heterogeneidade e da conectividade entre habitats aquáticos. Adicionalmente, é analisada a distribuição de espécies não nativas e invasoras de diferentes grupos taxonômicos, incluindo crustáceos, moluscos, cnidários, macrófitas aquáticas e peixes, discutindo-se os padrões de ocorrência no contexto ambiental da bacia. Os resultados revelam uma elevada diversidade da biota aquática associada ao reservatório da UHE Furnas e aos sistemas afluentes, com destaque para a comunidade de insetos aquáticos.💧

1

## Introdução

Os ecossistemas aquáticos continentais desempenham papel central no funcionamento das paisagens naturais e na manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais, como o fornecimento de água, a ciclagem de nutrientes, a regulação dos fluxos hidrológicos e o suporte à biodiversidade. A biodiversidade aquática, representada por comunidades de macroinvertebrados bentônicos, peixes, macrófitas, microrganismos e outros grupos associados, é um componente-chave desses sistemas, pois reflete a integração entre processos físicos, químicos e biológicos que sustentam sua estrutura e funcionamento (Allan, 2004; Dudgeon et al. 2006).

No contexto do desenho amostral adotado neste estudo, os resultados referentes a 35 parâmetros físicos, químicos, biológicos e microbiológicos de qualidade da água foram mensurados nos 80 sítios amostrais em riachos e na região litorânea do reservatório da UHE Furnas. Estes resultados possibilitaram realizar um diagnóstico da qualidade da água frente aos limites legais estabelecidos na Resolução Conama N°357/2005 para águas classe II e à classificação do estado ecológico conforme determinado pela legislação estadual em Minas Gerais (DN COPAM 08/2022), através do cálculo do Índice de Qualidade de Água (IQA, Figura 1). Esses dados são fundamentais e permitem subsidiar a implementação de medidas de gestão integrada de recursos hídricos na bacia do rio Grande, incluindo a aplicação de modelos preditivos como o MINASPACS (Cordeiro et al. 2025). Os resultados vêm sendo apresentados e discutidos em eventos técnicos do Setor Elétrico, como por exemplo, o Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE, Recife 2025), permitindo sua incorporação em projetos em curto prazo, e contribuindo para agilizar a tomada de decisão para conservação de recursos hídricos no país. Esta articulação política de gestão de recursos hídricos é urgente frente aos ambiciosos prazos de atendimento às metas do Marco Global para a Biodiversidade (GBF, em inglês).

O cálculo do IQA utiliza nove atributos: potencial hidrogeniônico (pH); nitrato; fósforo total; turbidez; temperatura; oxigênio dissolvido; sólidos totais; coliformes fecais e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), com seus respectivos pesos relativos ( $w_i$ ). O cálculo do índice fornece resultados em intervalos de classes que variam de 0 – 100, sendo: 0 – 25, qualidade muito ruim; 26 – 50, qualidade ruim; 51 – 70, qualidade média; 71 – 90, qualidade boa; e 91 – 100, qualidade excelente (Figura 1).



Foto: Carlos B. M. Alves

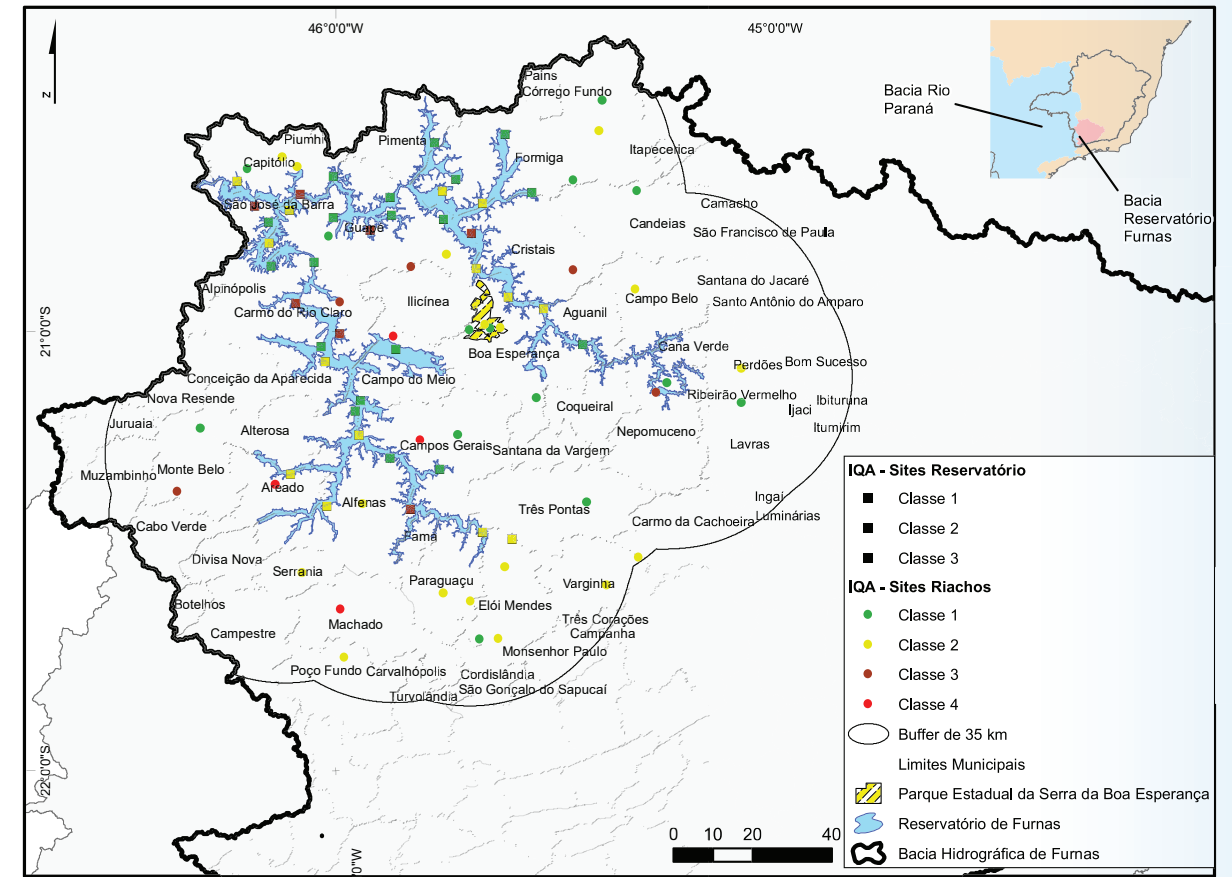


Figura 1: Resultados do cálculo do Índice de Qualidade de Água em 80 sítios amostrais na bacia do reservatório da UHE Furnas.

A legislação brasileira, juntamente com os órgãos reguladores, constitui o referencial jurídico que fundamenta o presente projeto, direcionando a identificação de fontes potenciais de poluição e a avaliação da qualidade da água em pontos de amostragem localizados em bacias hidrográficas. Assim, a Resolução CONAMA nº 357/2005, norma nacional de classificação de recursos hídricos no Brasil, define os corpos d'água em cinco classes, desde especial a classes 1 a 4, sendo 4 a pior qualidade. Essa legislação também estabelece os usos permitidos para cada categoria e impõe limites para o lançamento de efluentes, orientando o monitoramento contínuo e a adoção de medidas preventivas e corretivas para assegurar o equilíbrio entre conservação ambiental e usos múltiplos deste recurso (Brasil, 2005).

O diagnóstico geral revela que 83,4 % dos 97 sítios avaliados enquadram-se nas classes 1 e 2, demonstrando resultados majoritariamente positivos para a bacia da UHE Furnas, que possui águas de boa qualidade, que podem ser utilizadas para diferentes fins com baixo risco de contaminação. A presença dessas classes reforça a importância da conservação ambiental e do monitoramento contínuo de qualidade da água para que se possa garantir a manutenção desses altos padrões de qualidade, e mesmo uma melhora das condições na região, buscando uma gestão ainda mais sustentável dos recursos hídricos na

bacia da UHE Furnas. As águas de classe 2 são a meta de classificação no Estado de Minas Gerais e podem representar um equilíbrio entre conservação ambiental e uso sustentável de água para múltiplos fins. Vale observar que os resultados evidenciam a predominância de águas que, embora adequadas a múltiplos usos, demandam atenção contínua para manutenção de sua qualidade.

Estudos futuros podem se beneficiar da aplicação de modelagens matemáticas do transporte de sedimentos erodidos ao longo da bacia de drenagem, abrangendo os municípios a montante do reservatório, como forma de aprofundar a compreensão dos processos de assoreamento na UHE Furnas.

A classificação dos corpos d'água é de grande importância na gestão dos recursos hídricos, seja para atividades econômicas ou para as comunidades locais. Porém, além das categorias estabelecidas em Lei, podem ser utilizados indicadores de qualidade da água. Um índice amplamente usado no Brasil é o Índice e Qualidade das Águas (IQA). O IQA é um índice que foi desenvolvido pela *National Sanitation Foundation (NSF)* dos Estados Unidos em 1970, seu cálculo é obtido através da ponderação de parâmetros físicos, químicos e biológicos em amostras de água, variando de zero (qualidade ruim) a 100 (qualidade excelente). No Brasil, de acordo com informações da Agência Nacional das Águas (ANA), o IQA começou a ser utilizado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) a partir de 1974, para avaliar a condição ambiental das águas doces superficiais no estado. Nas décadas seguintes, outros estados brasileiros adotaram e adaptaram o IQA e, em Minas Gerais, os valores de IQA são utilizados desde 1997 pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) para determinação de qualidade de águas no estado.

A amostragem realizada mostra que, de maneira geral, as águas na bacia da UHE Furnas são de boa qualidade, permitindo uma ampla gama de usos e evidenciando condições ambientais favoráveis. Contudo, a ocorrência de dados que apontam qualidade apenas regular exige atenção redobrada por parte dos gestores públicos e da sociedade civil, uma vez que podem refletir sinais de fragilidade ecológica e de uso dos recursos hídricos, o que se torna mais crítico em contextos de emergência climática e durante períodos de escassez hídrica. Considerando que se trata de um reservatório sujeito a fortes variações sazonais de volume ao longo do ano hidrológico, é necessário monitorar ainda com maior rigor os períodos de estiagem, quando ocorre perda de capacidade de diluição de poluentes, enquanto a produção de esgoto e outros resíduos é constante ao longo do ano. Essa dinâmica impõe desafios adicionais à manutenção da qualidade da água tornando evidente que a resiliência hídrica da região depende de estratégias de gestão integradas e compartilhadas, envolvendo diferentes atores institucionais e escalas de atuação.

## 2 Principais pressões de atividades humanas sobre a qualidade e quantidade de água no reservatório UHE Furnas

Os resultados dos estudos cartográficos de mapeamento de áreas com maior risco à perda de solos na bacia de drenagem da UHE Furnas evidenciaram que as principais fontes de sedimentos que podem ser carregadas para o reservatório estão fora da área dos 35 municípios lindeiros (área de 36.039 Km<sup>2</sup>), mas

contidas na área total de 52.500 Km<sup>2</sup> da bacia (Figura 2).

A partir do mapeamento cartográfico gerado pelo projeto IBI UHE Furnas & UFMG, torna-se possível identificar e analisar áreas prioritárias para restauração de cobertura vegetal nativa visando minimizar a erosão e reduzir o aporte de sedimentos para o reservatório da UHE Furnas. Essas informações constituem subsídios técnicos relevantes para o planejamento e a priorização de ações e investimentos assertivos relacionados à gestão ambiental e atendimento de condicionantes da Licença de Operação do empreendimento.

A incorporação desse tipo de abordagem tem potencial para ampliar a avaliação das taxas de aporte de sedimentos ao reservatório, considerando diferentes condições hidrológicas e de uso do solo. Essas análises devem ser compreendidas como instrumentos técnicos de apoio à interpretação de tendências e incertezas associadas aos processos sedimentares. Portanto, contribuindo para o entendimento de seus possíveis efeitos sobre o funcionamento do reservatório, inclusive no que se refere à geração de energia, em horizontes temporais distintos.

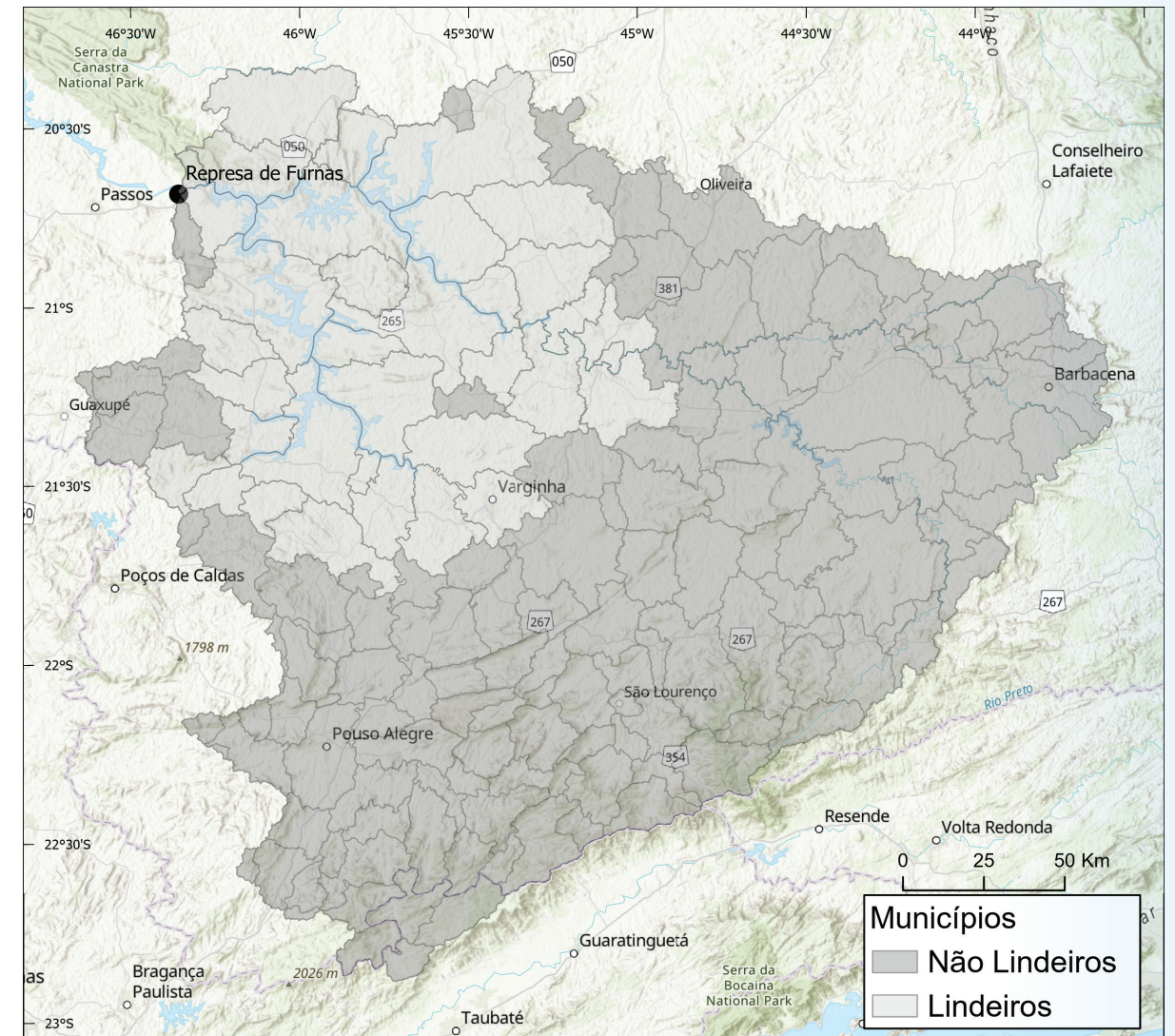


Figura 2- Bacia de drenagem e principais municípios no entorno do reservatório da UHE Furnas, alto Rio Grande.

3

### Limiares ecológicos e *tipping points* de macroinvertebrados em resposta ao assoreamento de riachos

A retirada de cobertura vegetal e a redução da cobertura natural de zonas ripárias expõem o solo e causam erosão, levando sedimentos para os riachos que drenam para o reservatório da UHE Furnas. Este aporte de sedimentos finos causa o assoreamento de cursos d'água, podendo colocar em risco o tempo de vida do reservatório para geração de energia hidrelétrica. A perda dos poços mais profundos e a homogeneização de substratos de fundo em função do assoreamento é um processo amplamente estudado em todo o planeta (p.ex., McKenzie et al. 2023). No artigo de Amaral et al. (2025) conseguimos definir os limiares de resposta taxonômica e funcional de macroinvertebrados aquáticos ao assoreamento dos 40 riachos amostrados na bacia do reservatório estudados na UHE Furnas. Utilizamos diversos índices, entre eles o Índice de Distúrbio Local (LDI), o Índice de Distúrbio na Bacia (CDI) e o Índice de Distúrbio Integrado (IDI) (Ligeiro et al. 2013). Além deles, utilizamos estimativa de percentual de habitats disponíveis para os organismos, o que inclui pedras, seixos, cascalho, areia e sedimentos finos (silte e argila), caracterizando a qualidade ambiental desses riachos. Em seguida, com a identificação dos organismos e os dados de composição taxonômica de macroinvertebrados aquáticos, fizemos a classificação segundo as características funcionais (Tabela 1). Foram calculados índices que nos permitem medir a diversidade funcional da comunidade biológica: riqueza funcional (FRic), uniformidade funcional (FEve), divergência funcional (FDiv) (Villéger et al. 2008) e dispersão funcional (FDis) (Laliberté & Legendre 2010) – BOX 1. O conjunto de características funcionais utilizado para quantificar a diversidade funcional e a composição taxonômica dos macroinvertebrados foram aplicados para a Análise de Taxa Indicadores de Limiares Ecológicos (TITAN).



Foto: Ricardo R. C. Solar.

Tabela 1 - Características funcionais dos macroinvertebrados.

Características	Categoria	Código
<b>Locomoção</b>	Escavador	Escavador
	Rastejante	Rastejante
	Agarrador	Agarrador
	Nadador	Nadador
	Voador	Voador
<b>Forma do Corpo</b>	Cilíndrico	Cilíndrico
	Achatado	Achatado
	Esférico	Esférico
	Hidrodinâmico	Hidrodinâmico
<b>Tamanho</b>	≤ 1.6	Pequeno
	≥ 1.7	Médio
	≥ 6.2	Grande
<b>Respiração</b>	Branquial	Branquial
	Plastrão	Plastrão
	Integumento	Tegumento
	Espiráculo	Espiráculo
<b>Voltinismo</b>	≤ 1 reprodução/ano	Univoltismo
	> 1 reprodução/ano	Multivoltismo
<b>Estratégia de alimentação</b>	Catador-coletor	Catador
	Fragmentador	Fragmentador
	Raspador	Raspador
	Filtrador-coletor	Filtrador
	Predador	Predador

**BOX 1 - Métricas de Diversidade Funcional**

A diversidade funcional refere-se à variedade e à distribuição das características biológicas (traços ou atributos, ou *traits* – em inglês) dos organismos dentro de uma comunidade ecológica. Ao considerar não apenas o número de espécies, mas também as diferenças em atributos como tamanho corporal, hábito alimentar ou modo de locomoção, a diversidade funcional oferece uma visão mais direta sobre o funcionamento dos ecossistemas, sua resiliência e sua capacidade de resposta a perturbações. Comunidades com alta diversidade funcional tendem a explorar de forma mais completa os recursos disponíveis, manter processos ecológicos essenciais e resistir melhor a impactos ambientais. Os principais índices utilizados são detalhados a seguir, e sua formulação matemática pode ser encontrada em Villeger et al. (2008) e Laliberté & Legendre (2010).

**• Riqueza Funcional (FRic)**

- Mede o volume ocupado pela comunidade em um espaço funcional multidimensional (tipicamente obtido através de análises PCA ou PCoA sobre traços funcionais medidos).
- Representa a extensão máxima das combinações de traços ecológicos funcionais presentes na comunidade.
- Calcula-se como “o volume do casco convexo” que engloba todos os pontos (espécies) no espaço de traços funcionais.

**• Uniformidade Funcional (FEve)**

- Avalia o quão regularmente as espécies preenchem o espaço funcional, ou “quão iguais” são as comunidades.
- Baseia-se nas distâncias mais curtas entre as espécies ao longo de uma “árvore de mínimo caminho” (minimum spanning tree) no espaço de traços funcionais.
- Varia de 0 (alta aglomeração de espécies em poucas regiões do espaço funcional) a 1 (distribuição perfeitamente regular).

**• Divergência Funcional (FDiv)**

- Quantifica o grau em que as espécies mais abundantes estão afastadas do centro de massa do conjunto de traços.
- Valores altos indicam que as espécies dominantes ocupam as extremidades do espaço funcional, sugerindo uso máximo dos recursos disponíveis.
- O seu cálculo envolve diferenças ponderadas entre as distâncias de cada espécie ao centroide e à mediana da comunidade.

**• Dispersão Funcional (FDis)**

- Propõe-se como uma média ponderada das distâncias de cada espécie ao centroide do conjunto de traços, ponderada pela abundância.
- É resistente a valores extremos e às lacunas de dados de abundância absoluta.
- Reflete a variabilidade funcional geral da comunidade, sem ser influenciada pelo número total de espécies, permitindo comparar comunidades distintas.

O fluxograma (Figura 3) ilustra a predição das alterações esperadas nos índices de diversidade funcional de macroinvertebrados bentônicos diante do aumento da deposição de sedimentos finos no leito de riachos. Esse processo tende a simplificar os habitats, o que se reflete em padrões específicos de mudanças nos componentes de diversidade funcional.

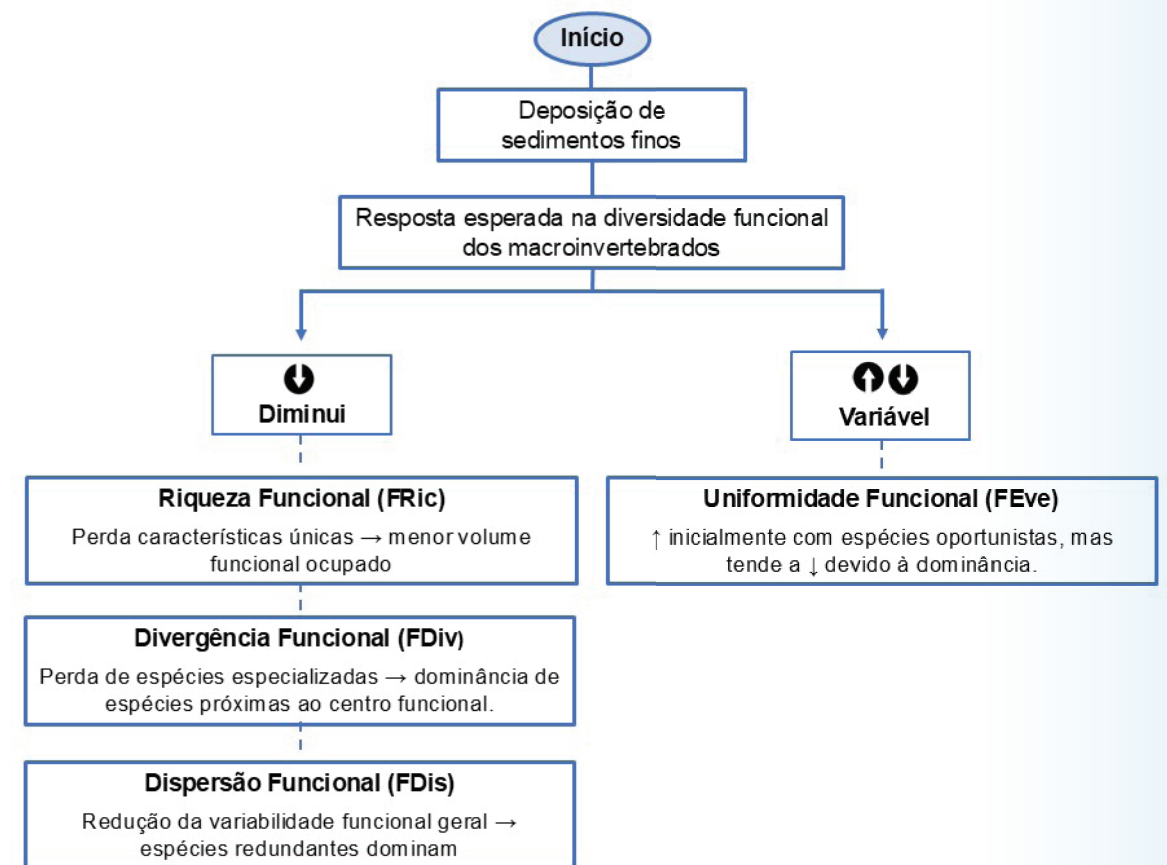


Figura 3- Respostas esperadas dos índices de diversidade funcional de macroinvertebrados ao aumento de sedimentos finos em riachos.

Por fim, a “Análise de Táxons Indicadores de Limiar Ecológico” (TITAN, do inglês *Threshold Indicator Taxa ANalysis*) é um método estatístico desenvolvido para detectar mudanças abruptas na composição de comunidades bióticas ao longo de gradientes ambientais. O TITAN permite distinguir quais espécies são “indicadoras positivas” (aumentam abruptamente após o limiar) e “indicadoras negativas” (diminuem ou desaparecem), assim oferecendo uma ferramenta de diagnóstico robusta de pontos de mudança críticos em ecossistemas, apoiando tomadas de decisão em conservação e gestão ambiental.

Os resultados da análise TITAN evidenciam que, em riachos com mais de 18% de substrato fino, ocorrem perdas funcionais em assembleias de macroinvertebrados (Figura 4). As características de respiração branquial, corpo achatado e hidrodinâmico, estratégia de alimentação fragmentador e modo de locomoção

rastejador mostraram-se sensíveis ao aumento de sedimentos, apresentando uma resposta negativa. Por outro lado, as características de corpo esférico e respiração de tegumento demonstraram maior tolerância, respondendo positivamente ao aumento de sedimentos (Figura 4). Um gradiente de condições ambientais foi ilustrado com base nos resultados da análise TITAN, representando as alterações nas características funcionais das assembleias de macroinvertebrados em resposta ao aumento da deposição de sedimentos finos (Figura 5).

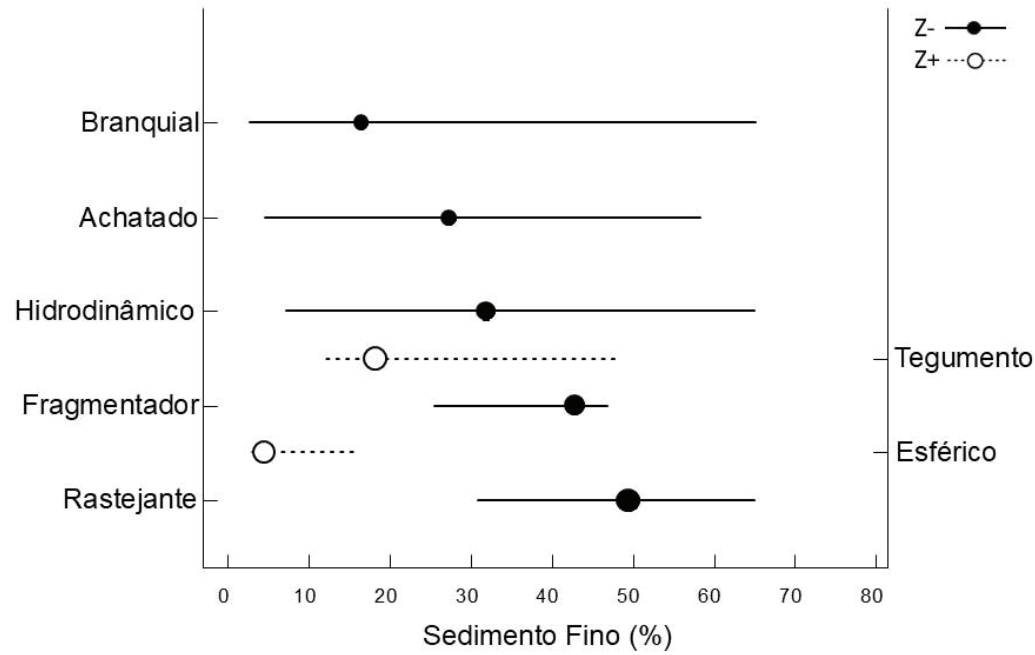


Figura 4- Características funcionais identificadas pela análise TITAN em resposta à variação na porcentagem de sedimentos finos. Linhas (sólidas ou tracejadas; Z- e Z+ respectivamente) representam intervalos de confiança de 95% dos pontos de mudança observados (círculos pretos ou abertos; Z- e Z+ respectivamente).

Quanto à composição taxonômica, os resultados indicaram que a partir de 5% de cobertura do leito do riacho por substrato arenoso já ocorrem perdas taxonômicas (Figura 6). As famílias Leptohiphidae (Ephemeroptera), Leptoceridae (Trichoptera), Gripopterygidae (Plecoptera), Leptophlebiidae (Ephemeroptera), Perlidae (Plecoptera) e Elmidae (Coleoptera) foram sensíveis ao aumento de sedimentos finos, apresentando resposta negativa. Em contraste, Planorbidae (Gastropoda), Glossiphoniidae (Hirudinea) e Sphaeriidae (Bivalvia) mostraram-se tolerantes, com resposta positiva (Figura 6).

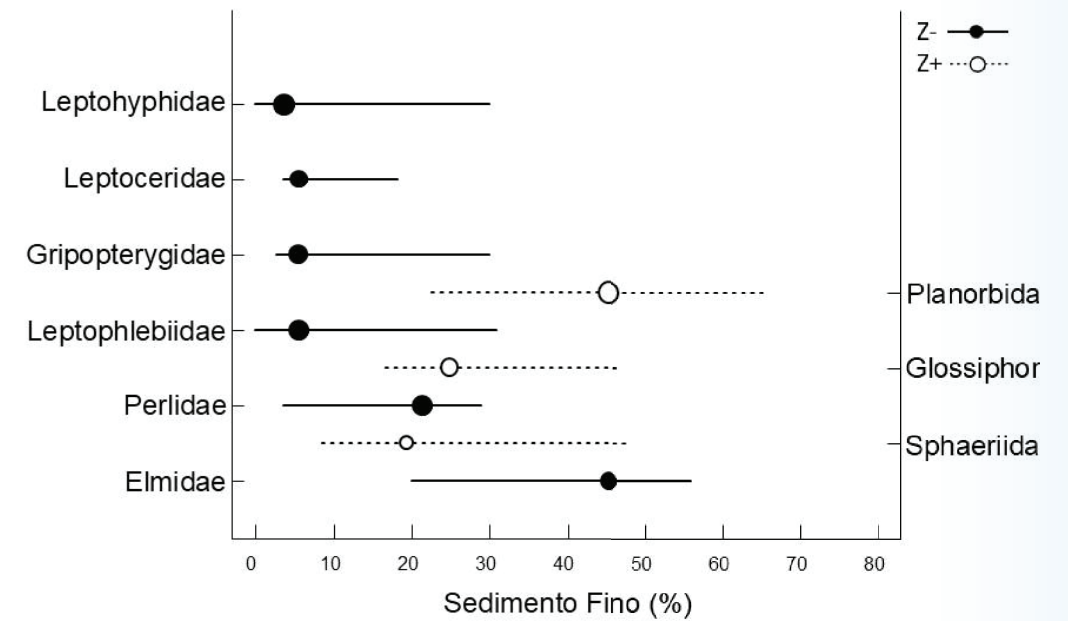


Figura 6- Táxons indicadores identificados pela análise TITAN em resposta à variação na porcentagem de sedimentos finos. Linhas (sólidas ou tracejadas; Z- e Z+ respectivamente) representam intervalos de confiança de 95% dos pontos de mudança observados (círculos pretos ou abertos; Z- e Z+ respectivamente).

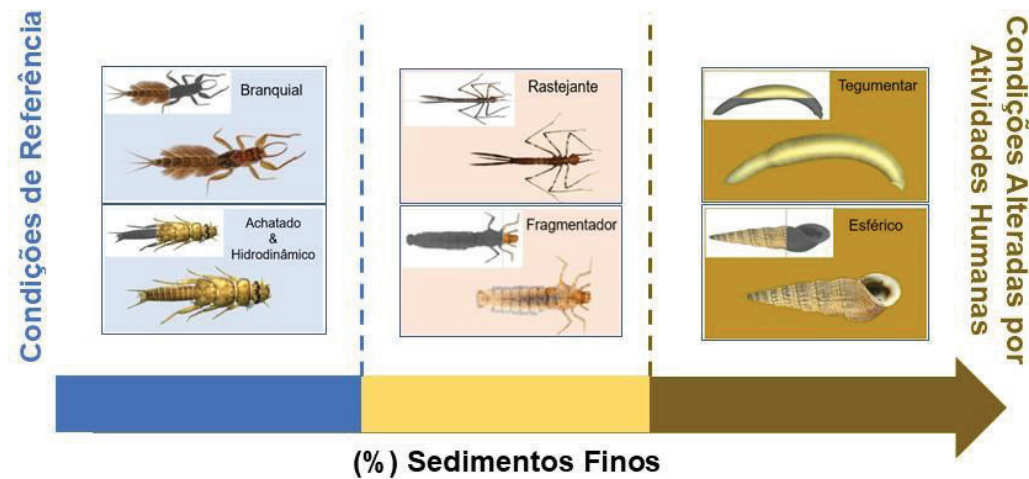


Figura 5- Gradiente ambiental com respostas funcionais de macroinvertebrados ao aumento de sedimentos finos em riachos.

Os riachos do Cerrado são especialmente vulneráveis devido à geologia da região e à intensa expansão agrícola ocorrida nas últimas décadas (Macedo et al. 2018). A maior parte dos substratos dos riachos estudados era composta por sedimentos finos (granulometria inferior a 16 mm). Locais com maiores porcentagens de sedimentos finos têm menor disponibilidade de microhabitats para grupos de organismos especializados, favorecendo assim organismos mais generalistas, levando à homogeneização funcional do habitat (Mathers et al. 2022). Isso reforça a importância do manejo do uso da terra e de outros fatores que aumentam a vulnerabilidade das bacias hidrográficas à erosão e à outras causas de sedimentação. Recomendamos que programas de monitoramento de agências ambientais que atuem em empreendimentos hidrelétricos, empresas de saneamento, e agências de controle ambiental considerem os limiares de perda de biodiversidade além de características e diversidade funcional de macroinvertebrados bentônicos em monitoramentos ambientais. Os bioindicadores bentônicos são sentinelas ambientais e oferecem alerta prematuro da homogeneização biológica decorrente da perda de cobertura vegetal natural e substituição por outros tipos de usos da terra devido a pressões de atividades humanas. Além disso, recomendamos

também que investimentos de reabilitação de qualidade ambiental busquem mitigar o assoreamento de riachos de cabeceira em bacias de empreendimentos hidrelétricos. A erosão decorrente de atividades de agricultura e urbanização, somada ao aumento da frequência e extensão de vazões extremas em função de mudanças climáticas, tem aumentando o transporte de sedimentos em riachos. A estrutura e composição funcional de macroinvertebrados bentônicos são importantes sinais de alerta à degradação ambiental, cruciais em programas de monitoramento de longo prazo e investimentos de reabilitação no planeta.

## 4 Diversidade de bioindicadores de qualidade de água (diversidades alfa, beta, gama e zeta)

Biodiversidade é definida como a diversidade de organismos vivos em uma determinada área. Este amplo conceito pode ser avaliado de diversas formas. Biodiversidade pode referir ao número de espécies (diversidade taxonômica, e que é sinônimo de riqueza), à variedade de funções ecológicas (diversidade funcional) ou ao número de diferentes caminhos evolutivos (diversidade filogenética) presentes entre os organismos de uma área, dentre outras formas. Comum a todas essas formas de se medir a biodiversidade são as diferentes partições espaciais, definidas como diversidade Alfa, Beta, Gama e Zeta.

Diversidade Alfa é uma medida de diversidade em escala local, enquanto a diversidade Gama é uma medida da diversidade em escala regional. importante salientar que a definição de escalas local e regional é dependente do objetivo do estudo em questão (após Tuomisto 2010, Chao et al. 2012). Então, por exemplo, no Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, a riqueza, uma métrica de diversidade taxonômica que mede o número de táxons, em cada um dos 40 pontos de coleta é a diversidade Alfa, uma vez que é uma medida de diversidade daquilo que dentro do nosso desenho amostral é definido como local. A diversidade Gama representada pela mesma métrica de riqueza seria o conjunto de todos os táxons coletados nos 40 locais amostrados. A diversidade beta representa o quão único ou diferente é a diversidade local (Alfa) com relação ao conjunto dos locais que formam a diversidade de região (Gama) (Whittaker 1960, Tuomisto 2010). A diversidade Zeta, por sua vez, é um conceito que representa a quantidade média de táxons compartilhadas por grupos de dois ou mais locais (Hui & McGeoch 2014). O número de locais comparados nesses grupos é chamado de ordem zeta, e avaliar como os padrões de diversidade zeta mudam com o aumento da ordem zeta pode fornecer explicações sobre os processos ecológicos que afetam a distribuição de táxons raros (ordens zeta inferiores) e comuns (ordens zeta superiores) e suas diferenças (Latombe et al. 2017). Como o número de táxons compartilhados diminui à medida que a ordem zeta aumenta, comparar a diversidade zeta para múltiplas ordens zeta ajuda a diferenciar a contribuição da biodiversidade local de táxons raros daquela de táxons comuns (Latombe et al. 2019).

Neste contexto, a diversidade zeta foi utilizada para caracterizar a variação espacial na composição de espécies de múltiplas comunidades. Isso facilita o cálculo de como a biodiversidade é estruturada em múltiplas escalas espaciais com a mesma linguagem matemática (Erős et al. 2020). No artigo publicado por Linares et al. (2025) utilizamos abordagens analíticas baseadas em dados de distribuição espacial de insetos aquáticos em riachos na bacia da UHE Furnas considerando táxons raros com distribuição limitada e táxons comuns com distribuição ampla. Assumimos que os insetos aquáticos podem ser influenciados por diferentes processos ecossistêmicos ou responder de forma distinta a fatores ambientais dependendo de sua capacidade de dispersão. Como os táxons raros têm menor probabilidade de serem compartilhados entre diferentes locais do que os táxons comuns, as métricas de diversidade tradicionais (diversidade alfa e beta) dão aos táxons raros um peso desproporcional e dificilmente detectam padrões exibidos por táxons mais comuns (Latombe et al. 2017), o que cria uma lacuna na compreensão da influência dos impactos antropogênicos na biodiversidade. Testamos a hipótese de que perturbações na escala espacial de dentro dos riachos são as mais importantes para a variação espacial de táxons de insetos aquáticos. Previmos que distúrbios na escala de dentro dos riachos (utilizando a porcentagem de sedimentos finos como *proxy*) evidenciarão a maior importância relativa em todas as ordens zeta testadas (2 a 10).

Nossos resultados mostram que os diferentes táxons que compõem conjuntos de macroinvertebrados respondem de forma distinta a diferentes escalas de distúrbios antropogênicos. Portanto, recomendamos fortemente a incorporação de múltiplas extensões espaciais para conservar ecossistemas lóticos. Selecionar apenas condições locais para gerenciar ecossistemas de riachos não é suficiente para conservá-los (Agra et al. 2024; Martins et al. 2021). Isso significa que as condições e tendências ecológicas do ecossistema lótico devem ser monitoradas considerando múltiplos impactos sinérgicos de bacias hidrográficas que afetam a estrutura, os processos e as funções do ecossistema (Hill et al. 2017; Leitão et al. 2018).

Essa abordagem integrada para conservar a biodiversidade lótica é particularmente pertinente para o gerenciamento de barragens hidrelétricas e suas bacias de drenagem. Os reservatórios hidrelétricos fornecem às populações humanas próximas o acesso à água, irrigação de plantações e aquicultura (Arias et al. 2011). Consequentemente, as regiões ao redor desses reservatórios se tornam centros de atividades antropogênicas, incluindo agricultura intensiva e urbanização. Ambas as atividades afetam a biodiversidade aquática em múltiplas extensões espaciais (Ferreira et al. 2022; Pinto et al. 2014). Portanto, recomendamos a aplicação do gerenciamento integrado em múltiplas extensões espaciais, como a proteção de grandes áreas de conservação, zonas ripárias e corredores de dispersão. Essa abordagem ajuda a reduzir a resistência da paisagem à dispersão de espécies e cargas de sedimentos finos em riachos. Consequentemente, é uma estratégia mais eficaz para reabilitar e manter a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos do ecossistema lótico do que qualquer outra abordagem isolada (Dudgeon et al. 2006; Geist 2011).

5

## Espécies não nativas e invasoras no reservatório da UHE Furnas

A introdução de espécies não nativas em um dado ecossistema é uma das principais causas de perda de biodiversidade em escala global, logo após a perda de habitats (Miller et al. 1989; Moyle & Leidy 1992). Nos últimos anos, o número de espécies dulcícolas exóticas e invasoras na América do Sul aumentou consideravelmente, impulsionado principalmente por mudanças climáticas e pela degradação dos ecossistemas aquáticos, incluindo fatores como exploração para pesca e urbanização (Darrigran et al. 2025). Soma-se a esta tendência a fiscalização precária, a falta de conhecimento e conscientização da população e a quase inexistência de punições e condenações dos responsáveis. A introdução dessas espécies frequentemente ocasiona alterações substanciais na estrutura e composição das comunidades biológicas locais, resultando em desequilíbrios ecológicos e impactando processos fundamentais, como a ciclagem de nutrientes (Flood et al. 2020; Gallardo et al. 2016). Além dos danos ambientais, há também preocupações socioeconômicas relevantes, como a redução de tamanho e abundância de espécies de interesse comercial (Cuthbert et al. 2021; Turbelin et al. 2022), prejuízos a empreendimentos hidrelétricos por assoreamento e redução do tempo de vida (Turbelin et al. 2022) e riscos à saúde humana (Schindler et al. 2015). Os resultados de Madureira et al. (2025) e Sulzbacher et al. (2025a) identificaram 16 espécies não nativas de organismos bentônicos e peixes no reservatório da UHE Furnas.

No reservatório da UHE Furnas identificamos a ocorrência de três espécies de crustáceos *Macrobrachium amazonicum* (Heller, 1862); *Macrobrachium pantanalense* Dos Santos, Hayd & Anger, 2013; *Dilocarcinus pagei* Stimpson, 1861, uma espécie de bivalve *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), uma espécie de gastrópodo *Melanoides tuberculata* (Müller, 1774) (Figura 7), uma espécie de cnidário *Cordylophora caspia* (Pallas, 1771) e 11 espécies de peixes não nativos: *Megalampodus eques* (Steindachner, 1882); *Metynnis lippincottianus* Cope, 1870; *Knodus aff. moenkhausii* (Eigenmann & Kennedy, 1903); *Cichla kelberi* Kullander & Ferreira, 2006; *Cichla piquiti* Kullander & Ferreira, 2006; *Coptodon rendalli* (Boulenger, 1897); *Poecilia reticulata* Peters, 1859; *Poecilia vivipara* Bloch & Schneider, 1801; *Gymnotus cf. pantanal* Fernandes, Albert, Daniel-Silva, Lopes, Crampton & Almeida-Toledo, 2005; *Gymnotus cf. paraguensis* Albert & Crampton, 2003 (Figura 8).

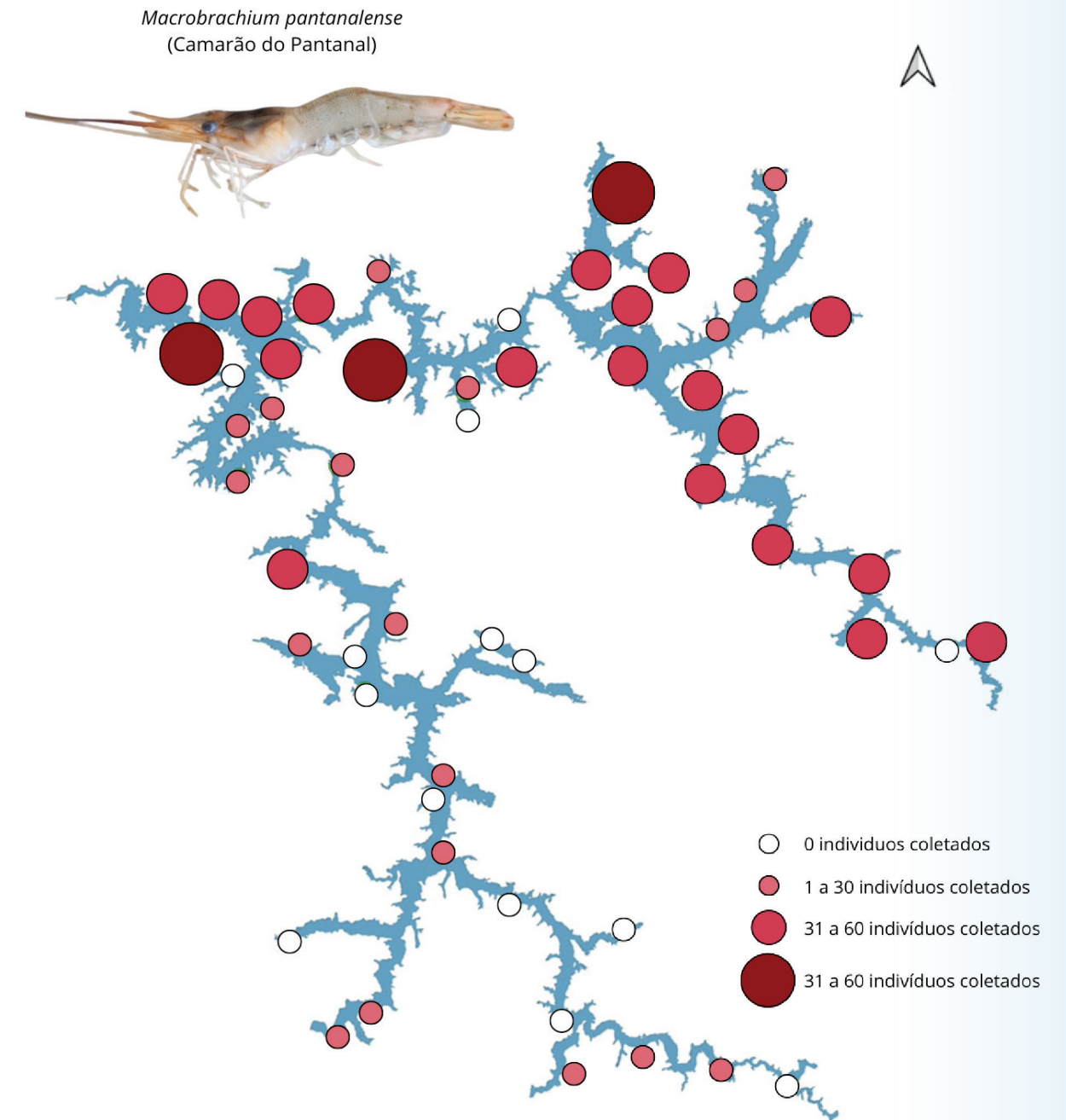


Figura 7A

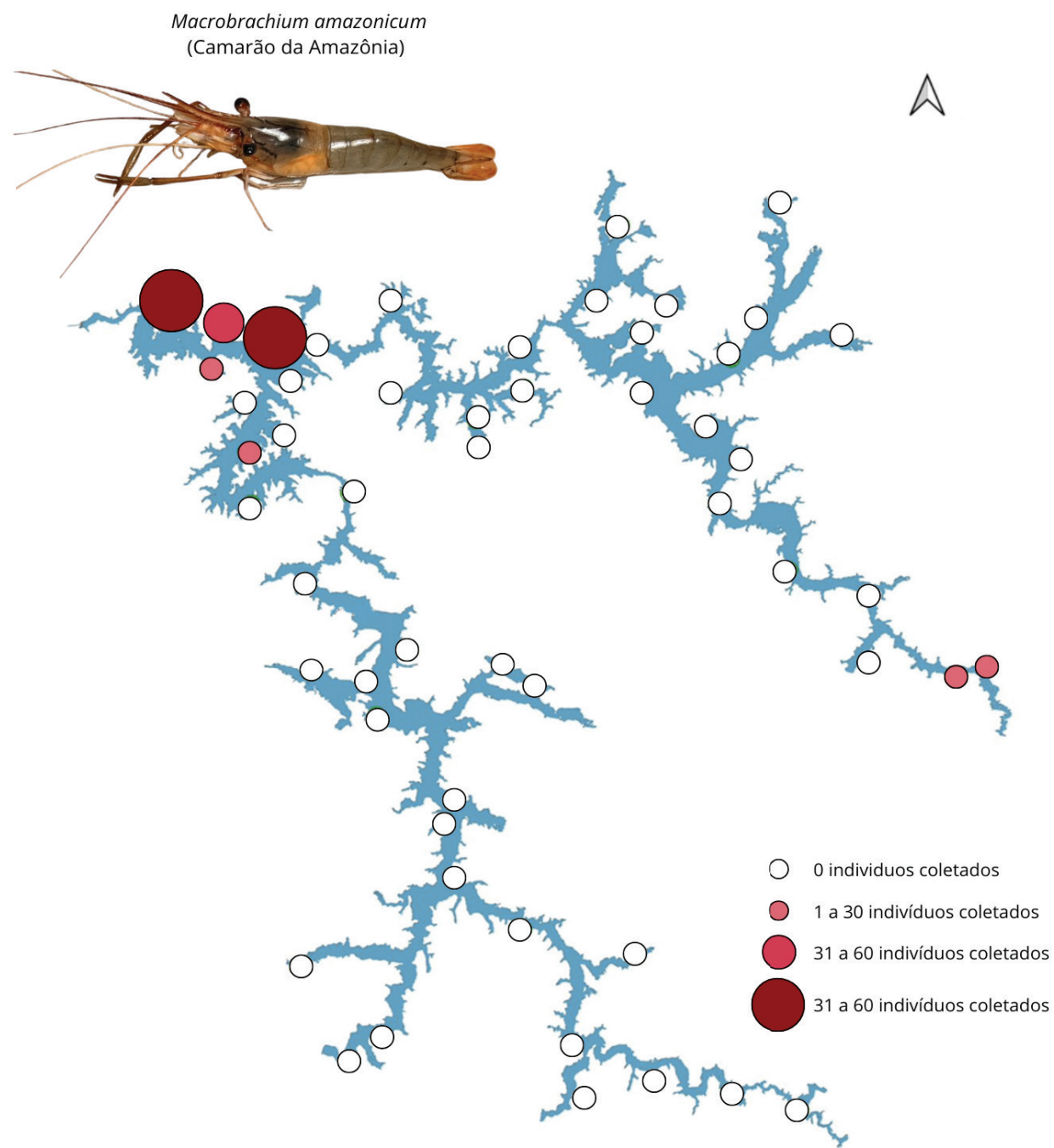


Figura 7B

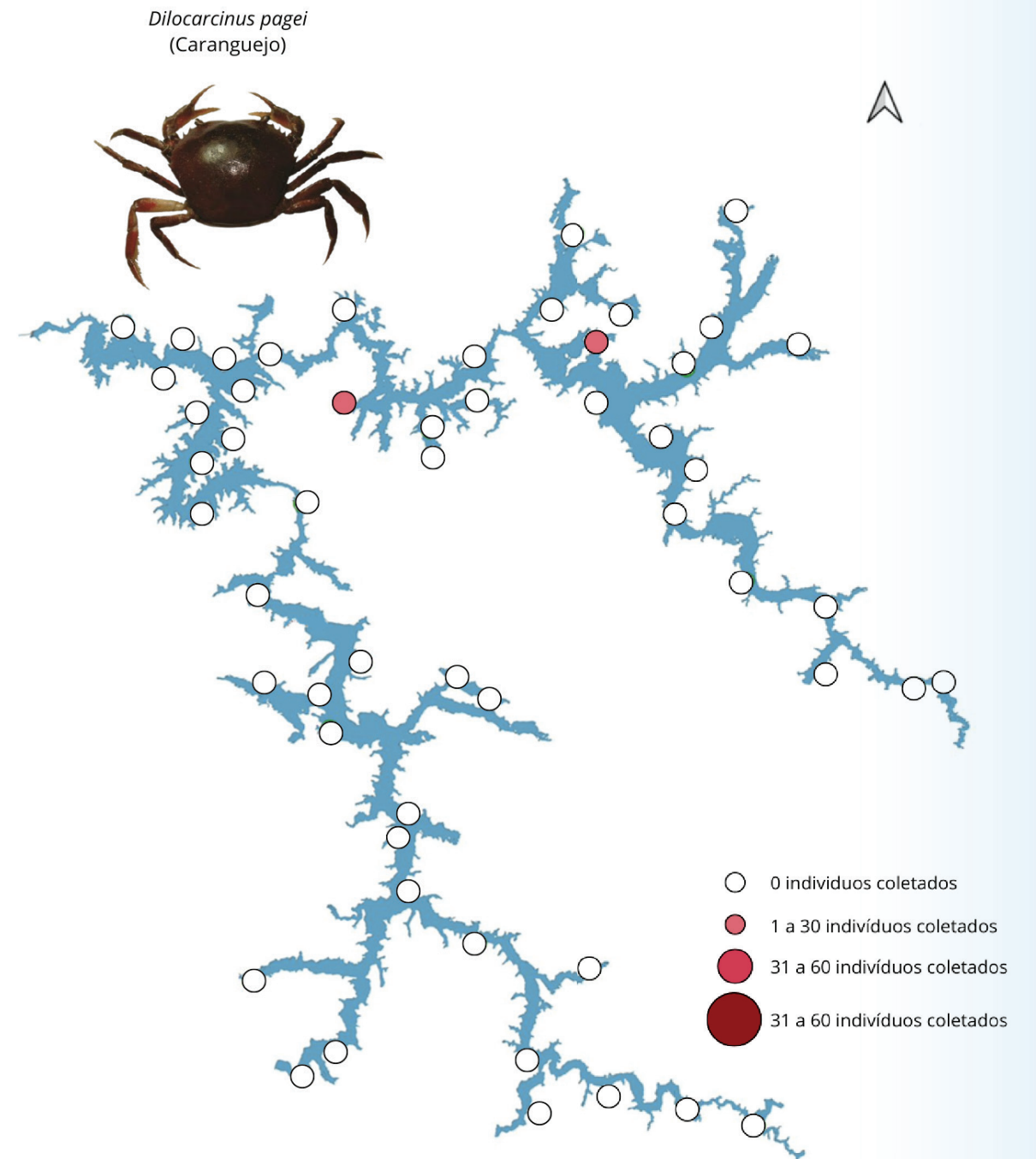


Figura 7C

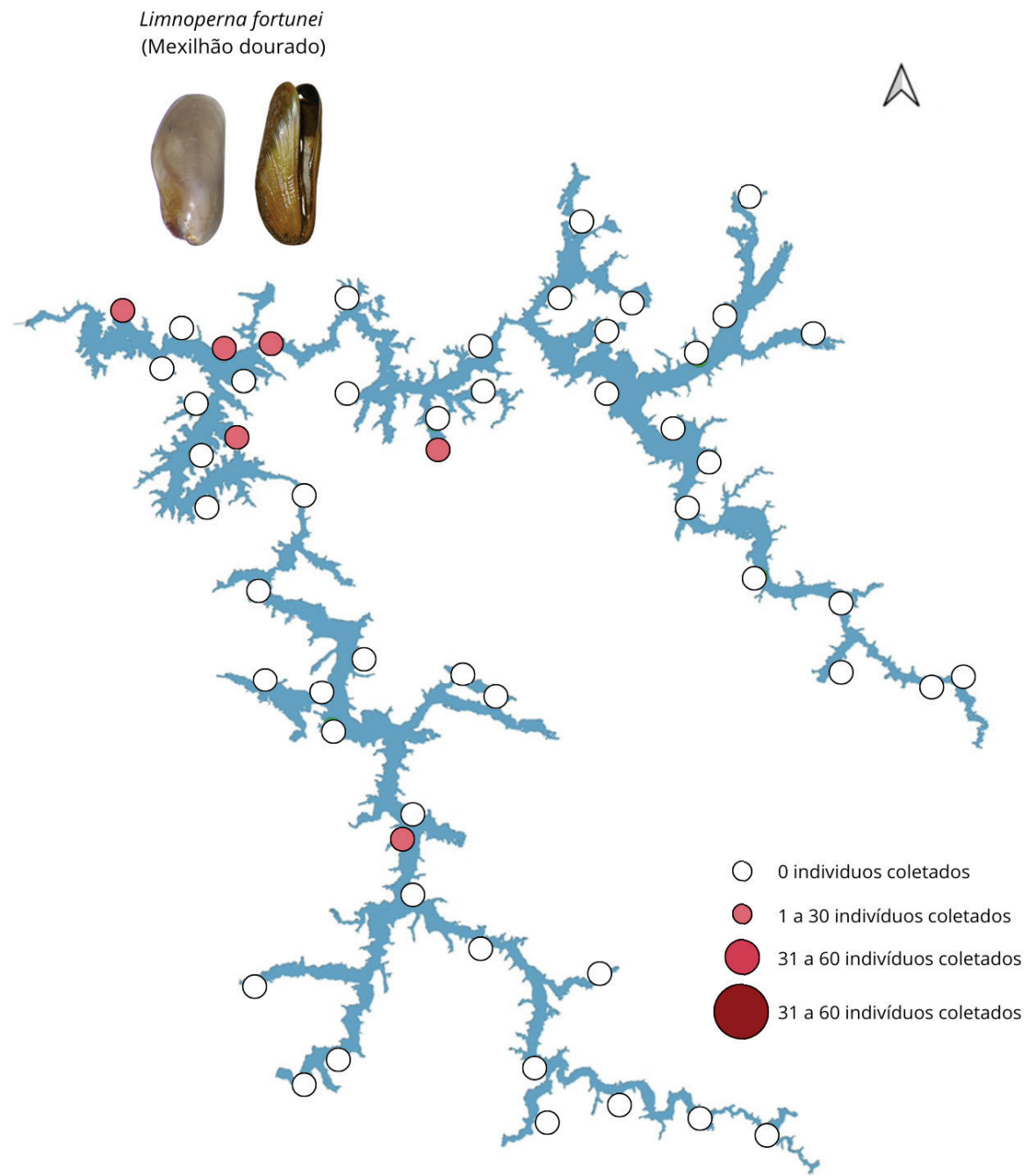


Figura 7D

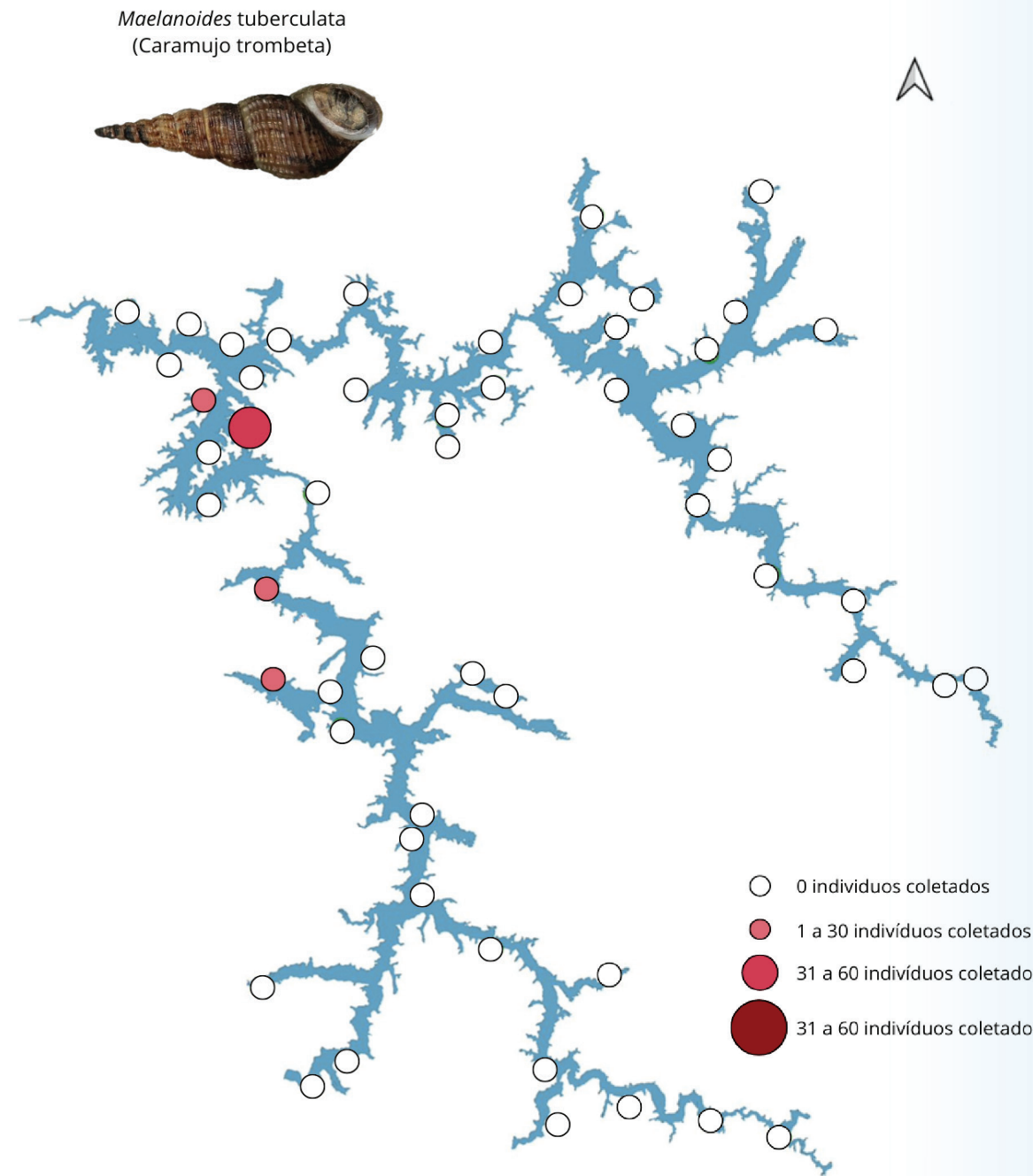
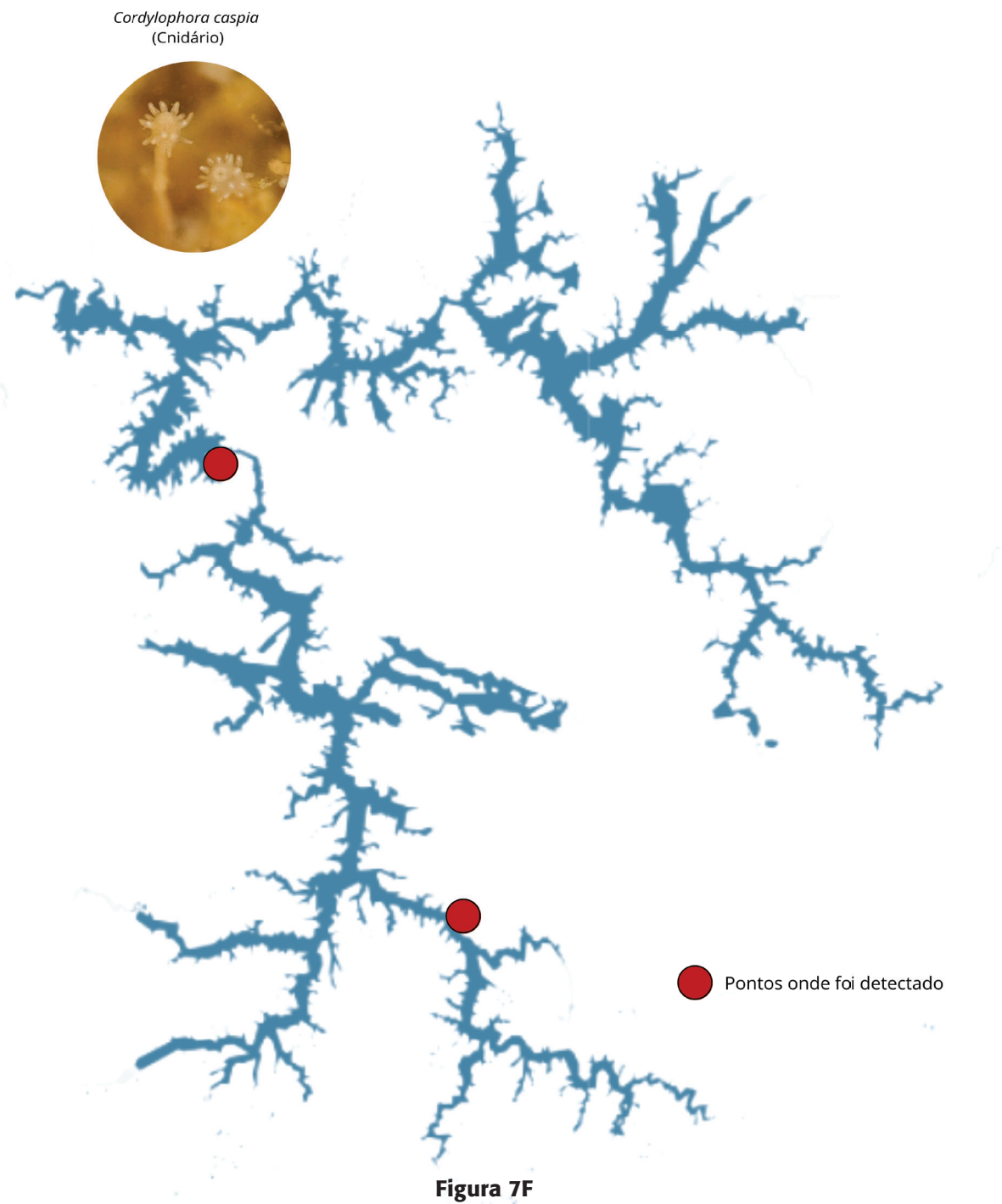


Figura 7E



Figuras 7 A,B,C,D,E e F - Distribuição das espécies não nativas de crustáceos, moluscos e cnidário no reservatório da UHE Furnas.

As amostragens de organismos bentônicos evidenciaram distribuição heterogênea das espécies de crustáceos com domínio de *M. pantanalense*, corroborando a hipótese de que as características de habitat físico explicam a distribuição desta espécie na região litorânea do reservatório da UHE Furnas. A probabilidade de ocorrência desta espécie é positivamente correlacionada à cobertura total de macrófitas aquáticas emersas e flutuantes, ao Índice de Complexidade de Cobertura na Região Litorânea e valores de Demanda Bioquímica de Oxigênio (Madureira et al. 2025). Em geral, camarões de água doce são macro consumidores de matéria orgânica e atuam na fragmentação de folhas de plantas aquáticas, contribuindo nos processos de ciclagem de nutrientes e fluxo de energia, manejando macrófitas e participando do processo de bioturbação. A ocorrência de *M. pantanalense* em regiões do reservatório da UHE Furnas com maiores valores de DBO é uma evidência de maior acúmulo de matéria orgânica disponível e, portanto, mais alimento disponível para os camarões. Um impacto negativo dos efeitos adversos de um alto valor de DBO é a redução da concentração de oxigênio dissolvido na água, o que ainda não é um fator limitante no reservatório da UHE Furnas, mas que merece atenção. Como consequência das atividades de piscicultura em tanques-rede em algumas regiões do reservatório da UHE Furnas observamos tendência à mudança de estado trófico, onde é possível que ocorra aumento da DBO e, conseqüente, redução da disponibilidade de oxigênio dissolvido. Em outras palavras, o impacto positivo à economia devido à criação de peixes em gaiolas coloca em risco a qualidade de água, com potencial de incremento de biomassa de espécies não nativas de crustáceos como o *M. pantanalense*. Salienta-se ainda que este tipo de piscicultura é muito susceptível a escapes de peixes criados, tornando-se uma fonte contínua de propágulos de peixes invasores que, no caso do reservatório da UHE Furnas, refere-se principalmente à tilápia (*Oreochromis* sp.).

Além disso, nossos resultados evidenciaram que o aumento de heterogeneidade de habitats na região litorânea do reservatório da UHE Furnas (avaliado pelo Índice de Complexidade de Cobertura Litorânea) facilita, ainda que indiretamente, a ocorrência de espécies não nativas de crustáceos. A invasão de espécies de crustáceos tem interferido na pesca artesanal e esportiva, pois muitos pescadores utilizam camarões como iscas para capturar tucunaré e outras espécies de peixes no reservatório da UHE Furnas, uma vez que estes invertebrados são hoje presas dos peixes na região. Este processo é conhecido como “*invasional meltdown*” (colapso de invasão), que ocorre quando o estabelecimento de um invasor (p.ex. camarões não nativos) favorece outras espécies invasoras (p.ex. tucunaré).

Nesse sentido, uma medida que poderia ser implementada para o manejo seria fomentar a pesca esportiva e artesanal, focada nas espécies invasoras. Ainda que sua eficiência deva ser avaliada com cuidado, pois métodos de pesca costumam ser não seletivos, a atividade pesqueira poderia contribuir para a redução e/ou controle dos estoques de ambas as espécies invasoras (tucunaré, por meio da captura, e camarão, como isca) sem provocar prejuízos socioeconômicos às comunidades ribeirinhas. Apesar de ainda não ter sido registrado para a região de estudo, camarões de água doce, como o *M. amazonicum*, são amplamente utilizados para consumo humano em outros locais do país, sendo um recurso de impacto econômico positivo com potencial de exploração para as espécies do reservatório da UHE Furnas. Por outro lado, há

um potencial de mudanças em cascata na estrutura do reservatório da UHE Furnas devido ao aumento da presença e abundância de espécies não nativas de camarões e as consequências econômicas e ecológicas, incluindo qualidade de água para abastecimento, geração de energia, turismo, lazer e outras espécies aquáticas como peixes.

Outro exemplo de interação entre espécies invasoras no reservatório da UHE Furnas é a associação entre o mexilhão-dourado *L. fortunei* e o cnidário *C. caspia*. O cnidário fixa-se a substratos artificiais e a estrutura filamentosa de suas colônias promove condições propícias para facilitar a colonização de outras espécies (Moreteau & Khalanski 1994), como o mexilhão-dourado (Portella et al. 2009). No reservatório da UHE Furnas, nos dois locais em que identificamos *C. caspia* (Tabela 2; em boias e tanques-redes de piscicultura) havia também, em abundância variada, mexilhão-dourado. Os filamentos de *C. caspia* podem gerar grandes acúmulos e causar o entupimento de tubulações para captação de água para abastecimento, sistemas de resfriamento, grades, filtros e redes em reservatórios hidrelétricos, elevando os custos de manutenção e impactando na geração de energia e outras atividades econômicas em reservatórios (de Paula et al. 2024).

É importante ressaltar que este é o primeiro registro do cnidário para a UHE Furnas. Ao longo do Rio Grande, *C. caspia* também foi registrada nos reservatórios da UHE Engenheiro José Mendes Junior (Funil) (de Paula et al. 2024) e da UHE Água Vermelha (CETESB 2024). Há registros de sua ocorrência em reservatórios no Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Pará (de Paula et al. 2024; Tabela 2). Entretanto a dispersão geográfica de *C. caspia* ocorre de forma silenciosa no Brasil, uma vez que a presença do animal é subnotificada por falta de conhecimento sobre sua identificação. Assim, é fundamental estabelecer um diagnóstico da distribuição da espécie em reservatórios brasileiros, com monitoramento sazonal das colônias, visando investigar seu impacto econômico, ecológico e sua interação com outros organismos em reservatórios.

As amostragens de espécies de peixes com a metodologia RAP deste projeto permitiram o registro de 2.036 organismos com tamanho de corpo pequeno (p.ex. caracídeos que vivem associados a macrófitas aquáticas). Ao todo, foram identificadas 22 espécies nativas (48% da abundância) e 11 espécies não nativas (52%). A piaba *Knodus aff. moenkhausii* foi a espécie não nativa mais amplamente distribuída, tendo sido coletada em 10 dos 40 sítios amostrais. A proporção em biomassa entre as espécies nativas e não nativas registrada no reservatório da UHE Furnas é apresentada na Figura 8. Em 11 sítios não houve captura de peixes. Dentre as variáveis de qualidade de água relacionadas à composição e distribuição das espécies de peixes no reservatório da UHE Furnas, turbidez e nitrato foram positivamente correlacionadas, enquanto temperatura e oxigênio dissolvido, negativamente (Sulzbacher et al. 2025a).

Tabela 2- Distribuição geográfica de *Cordylophora caspia* no Brasil.

Estados	Localidades	Latitude	Longitude
PA	UHE Tucuruí, Rio Tocantins	-3.833254	-49.649774
GO	UHE São Simão, Rio Paranaíba	-19.018683	-50.500142
MS	Três Lagoas, Rio Paraná	-20.750000	-51.666667
MG*	UHE Furnas, Rio Grande*	-20.822222	-46.091667
MG*	UHE Furnas, Rio Grande*	-21.303611	-45.838333
MG	UHE Engº. José Mendes Júnior (Funil), Rio Grande	-21.143139	-45.036194
SP	UHE José Ermirio de Moraes (Água Vermelha), Rio Grande	-20.049921	-49.895167
SP	UHE Barra Bonita, Rio Tietê	-22.519730	-48.533905
SP	Rio Escuro, Ubatuba	-23.493534	-45.165528
RJ	UHE Funil, Rio Paraíba do Sul	-22.530213	-44.564161
PR	UHE Itaipu, Rio Paraná	-25.380154	-54.575871
PR	UHE Gov. José Richa (Salto Caxias), Rio Iguaçu	-25.541667	-53.497500
PR	UHE Salto Osório, Rio Iguaçu	-25.537985	-53.008446
PR	UHE Salto Santiago, Rio Iguaçu	-25.628405	-52.613305
PR	UHE Gov. Ney Braga de Barros (Segredo), Rio Iguaçu	-25.794127	-52.114842

Fontes: CETESB 2024; de Paula et al. 2024; \*dado oriundo deste projeto.

Foi também observado por Sulzbacher et al. (2025a) que, no reservatório da UHE Furnas, a riqueza e abundância de espécies nativas são maiores nas regiões mais distantes da barragem (regiões fluvial e intermediária), assim como a riqueza total e abundância. A ocorrência de espécies não nativas de peixes aumenta na região lacustre (a cerca de 50 km da barragem). A distribuição das espécies de peixes está associada à concentração de sólidos totais, oxigênio dissolvido, temperatura e turbidez. A probabilidade de capturar pelo menos um peixe é maior nas regiões fluviais e intermediárias, e em locais com maiores valores do índice de diversidade de habitat físico e maiores concentrações de sólidos totais na água.

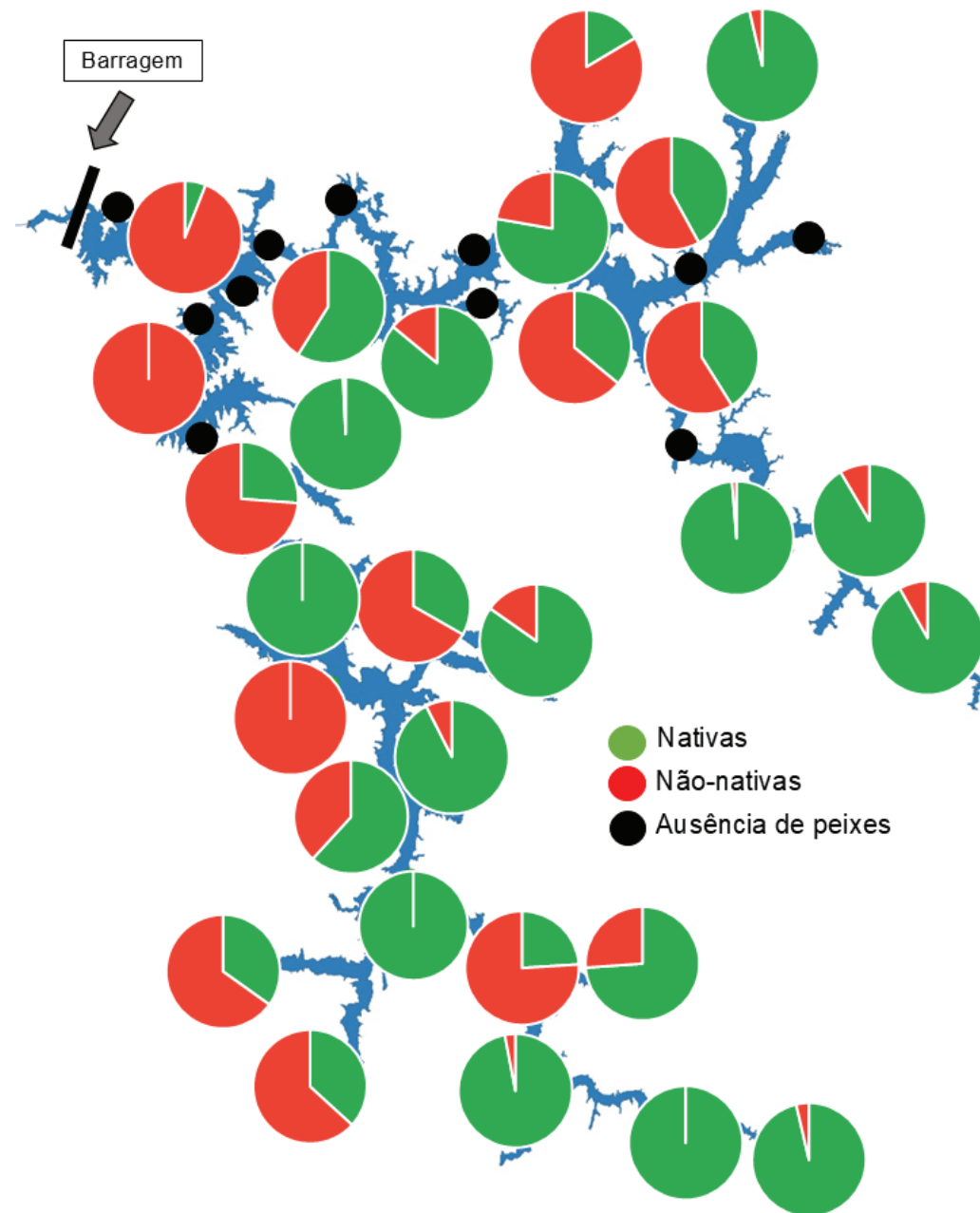


Figura 8: Distribuição de biomassa (peso corporal em gramas) das espécies nativas e não nativas de peixes no reservatório da UHE Furnas.

Neste projeto registrou-se 15 novas ocorrências de espécies da ictiofauna para a região, representando 13,46% de incremento ao conhecimento da riqueza de espécies nativas e de 61,53% de espécies não nativas. Além disso, cerca de metade das espécies de peixes coletadas neste projeto foram registradas cientificamente pela primeira vez no reservatório da UHE Furnas. Com estes resultados, o número de espécies de peixes conhecidas para o reservatório passa para 65, sendo 51 nativas e 14 não nativas.

O conhecimento sobre a composição de espécies não nativas, sua distribuição espacial na região litorânea do reservatório, sua biomassa e interações ecológicas com outras espécies nas cadeias alimentares, bem como de seu papel nos processos ecológicos de ciclagem de nutrientes e fluxo de energia, são subsídios fundamentais à proposição de medidas de manejo. Do mesmo modo, a identificação de condições ambientais chave e o conhecimento sobre os requerimentos ecológicos das espécies não nativas que foram detectadas no reservatório servem como subsídio ao seu monitoramento e eventual controle. Recomendamos o aprofundamento no conhecimento da composição de espécies, distribuição e dinâmica espaço-temporal de outros grupos biológicos, como as macrófitas, que podem atuar como facilitadores do estabelecimento de outras espécies não nativas no reservatório. Medidas mitigadoras devem incluir ainda políticas restritivas de deflorestamento de zonas ripárias, controle de carreamento de sedimentos e nutrientes, a adoção de práticas sustentáveis de agricultura, adoção de medidas para evitar a introdução de espécies não nativas e a criação de zonas de tamponamento no entorno do reservatório. Estas zonas de tamponamento deverão incluir faixas de vegetação natural para evitar a erosão de solo, conter sedimentos, nutrientes e poluentes antes que cheguem ao ecossistema aquático. Estas medidas de monitoramento e mitigação deverão ser trabalhadas em atividades de educação ambiental com estudantes e professores de escolas, membros de comitês de bacia, técnicos de meio ambiente de empresas, do governo e do terceiro setor, a fim de capacitá-los a monitorar qualidade de água e biodiversidade de espécies nativas e não nativas que vivem no reservatório da UHE Furnas. Por fim, as práticas de manejo devem ser aliadas à sensibilização ambiental da população da bacia de drenagem e do entorno do reservatório para evitar futuras introduções de espécies não nativas, e conscientização sobre quais são e o que fazer com as espécies já introduzidas. Este somatório de esforços de manejo contribuirá para garantir a manutenção dos bens e serviços ecossistêmicos para as populações de habitantes nos 35 municípios limítrofes ao reservatório da UHE Furnas.

## 6

### Biodiversidade de ictiofauna nos riachos que drenam para o reservatório de Furnas

Nos riachos da bacia de drenagem da UHE Furnas foram capturados 2.904 peixes pertencentes a 44 espécies, sendo 41 com distribuição natural para a bacia e apenas 3 não nativas (*Gymnotus* cf. *pantanal*, *Knodus* aff. *moenkhausii* e *Poecilia reticulata*). A espécie mais bem distribuída foi *Phalloceros circummontanus*, registrada em 17 riachos (Sulzbacher et al. 2025b). Das espécies nativas, *Lophiobrycon weitzmani* é classificada na categoria da IUCN “quase ameaçada” (NT – *near threatened*) pelo ICMBio. A espécie mais abundante também foi *Phalloceros circummontanus* (939 indivíduos), seguida por *Psalidodon paranae* (459 indivíduos) e *K. aff. moenkhausii* (329 indivíduos). O riacho com maior riqueza apresentou 12 espécies de peixes, enquanto o de menor riqueza abrigou apenas uma. A maior abundância de peixes em um riacho foi de 228 indivíduos, e a menor, apenas quatro, coletados com esforço padronizado.

A ictiofauna de riachos é altamente associada aos fatores locais tais como vegetação ripária e oxigênio dissolvido (Caetano et al. 2016; Cruz & Pompeu 2020). Nos riachos da bacia de drenagem da UHE Furnas, os componentes naturais da paisagem podem estar associados de formas distintas à riqueza de espécies. Por exemplo, no trabalho de Salvador et al. (2025a), os autores destacam que a riqueza de peixes esteve positivamente associada à porcentagem de raízes e negativamente associada ao banco de folhas e cobertura de arbustos. Neste mesmo trabalho verificou-se que a porcentagem de sedimentos finos (considerado como *proxy* de assoreamento em riachos) reduziu a equitabilidade, o que pode estar associado à maior dominância daquelas espécies resistentes a este impacto.

Diferentemente do reservatório, onde as espécies não nativas representaram boa parte da ictiofauna total, nos riachos estudados a maior parte da riqueza registrada foi de espécies nativas. O compartilhamento dessas espécies alóctones entre riachos e reservatório é outro ponto interessante. Todas as espécies não nativas capturadas nos riachos também estão presentes no reservatório, porém o contrário não acontece (Sulzbacher et al. 2025b). Reservatórios são conhecidos como facilitadores de processos de invasões biológicas, auxiliando na transposição dessas etapas. Isso é parte da explicação da riqueza de espécies não nativas encontradas no reservatório da UHE Furnas e poderia ser um indicativo de atuação desse reservatório como fonte doadora para os riachos. Porém, os resultados de Sulzbacher et al. (2025b) não corroboraram esta hipótese. Ao invés disso, os resultados das análises sugerem que o impacto local nos riachos é a principal variável explicativa da presença de espécies não nativas nestes ambientes, independente da proximidade com o reservatório.

A fragmentação dos riachos por pequenos barramentos e açudes também gera um impacto sobre a fauna de peixes dos riachos da região. Em um contexto geral, Salvador et al. (2025b) observaram que bacias mais fragmentadas tendem a ter uma queda na abundância tanto de peixes nativos quanto não nativos.

## 7

### Biodiversidade de insetos aquáticos

Essa fragmentação afeta de forma mais contundente espécies da família Trichomycteridae. Por outro lado, amostragens realizadas a até 2 km de distância de um açude podem ter suas abundâncias influenciadas positivamente, indicando que essas estruturas podem interferir na abundância dos peixes de uma localidade. Esses resultados são importantes por mostrarem a influência de estressores de paisagem sobre a fauna de peixes e que muitas vezes são ignorados nos estudos científicos.

No total, foram coletados 24.585 indivíduos de macroinvertebrados aquáticos, que foram identificados em 75 táxons, sendo 90% deles insetos aquáticos e que vivem nos riachos que drenam para o reservatório da UHE Furnas. Como esperado, Chironomidae (Diptera) foi o táxon mais abundante, com 14.066 indivíduos amostrados (57% do total), seguido por Simuliidae (Diptera) com 2.827 amostrados (11% do total) e Baetidae (Ephemeroptera) com 1.177 indivíduos amostrados (5% do total). Os representantes da ordem Diptera ocupam uma ampla variedade de habitats, e a família Chironomidae é a mais amplamente distribuída, ocorrendo desde águas limpas até ambientes poluídos, sendo frequentemente o grupo mais abundante em ecossistemas aquáticos continentais (Oviedo-Machado & Reinoso-Flórez 2018). Devido à sua alta resistência a condições ambientais adversas, Chironomidae é classificada entre os grupos resistentes à poluição aquática (Callisto et al. 2001). Sua diversidade torna essa família uma ferramenta fundamental em programas de biomonitoramento, especialmente em bacias hidrográficas sob forte impacto de atividades antrópicas (Rossaro et al. 2022).

Entre os insetos sensíveis encontrados nos riachos da bacia de drenagem da UHE Furnas, destacam-se os Ephemeroptera, representados principalmente pela família Baetidae, os Plecoptera, principalmente Gripopterygidae (1% do total), e os Trichoptera, com maior representatividade de Hydropsychidae (4% do total). Esses grupos, conhecidos como EPT, são frequentemente associados a riachos de menor tamanho que atravessam áreas florestadas. Em geral, essas ordens de insetos são sensíveis a perturbações antrópicas e, portanto, amplamente utilizadas como indicadores de qualidade ambiental (Bispo & Oliveira 2007). No entanto, algumas espécies de Ephemeroptera apresentam respostas distintas às alterações na estrutura física e na qualidade da água. Enquanto algumas, são restritas a ambientes de alta qualidade, desaparecem rapidamente diante de impactos antrópicos, outras conseguem sobreviver e até aumentar em densidade em áreas afetadas por poluentes, como os provenientes de esgotos domésticos. A família Baetidae, por exemplo, apresenta maior tolerância e é frequentemente encontrada em águas com sinais de poluição ambiental, como áreas de pastagem (Amaral et al. 2015).

Vale destacar a presença de outras famílias de insetos aquáticos tolerantes a pressão de atividades antrópicas nos riachos estudados, como Elmidae (Coleoptera), com 1.102 indivíduos amostrados (3% do total), Libellulidae (Odonata), com 312 indivíduos amostrados (1% do total), e Veliidae (Heteroptera), com 62 indivíduos amostrados (0,25% do total). Elmidae, popularmente conhecidos como *riffle beetles* (besouros-

de-correnteza), são cosmopolitas e ocorrem principalmente em ambientes lóticos, sendo poucas as espécies encontradas em ambientes lênticos. Com aproximadamente 1.300 espécies em 140 gêneros, tanto as larvas quanto os adultos possuem hábitos alimentares detritívoros e herbívoros, permanecendo submersos durante toda a vida. Apesar disso, não nadam ativamente, permanecendo agarrados ao substrato (White 2009; Yee & Kehl 2015). As larvas são bem adaptadas a áreas sob diferentes usos da terra, inclusive aquelas impactadas por atividades humanas (Braun et al. 2014). Nos riachos da bacia de drenagem da UHE Furnas, larvas do gênero *Heterelmis* (Figura 9) foram mais abundantes do que as de outros gêneros da mesma família. Essas larvas possuem corpo cilíndrico e exibem fileiras de tubérculos ao longo de todos os segmentos corporais. Estudos em região Neotropical têm encontrado larvas de *Heterelmis* associadas a riachos sem matas ciliares e em substrato orgânico e inorgânico (Braun et al. 2018b), com ocorrência mais frequente em riachos com mata ciliar desmatada (Braun et al. 2018a) e resistência a condições de hipóxia (González-Córdoba et al. 2020), sugerindo sua tolerância a diferentes condições ambientais relacionadas a perturbações humanas. Libellulidae (libélulas) e Veliidae (percevejos) são organismos predadores, capazes de colonizar uma ampla variedade de habitats (Hamada et al. 2014). De modo geral, esses grupos apresentam resiliência a impactos ambientais, sendo frequentemente encontrados em locais sujeitos a modificações antrópicas, como áreas agrícolas e urbanizadas.



Figura 9: Larva do gênero *Heterelmis* (Coleoptera: Elmidae) coletada em riachos na bacia de drenagem do reservatório da UHE Furnas.

A composição faunística de insetos aquáticos encontrada reflete a heterogeneidade ambiental dos riachos da bacia de drenagem da UHE Furnas, evidenciando a coexistência de táxons com diferentes graus de sensibilidade e tolerância a impactos antrópicos. A predominância de Chironomidae e Simuliidae sugere a influência de perturbações ambientais, enquanto a presença de EPT indica a manutenção de trechos com boas condições ecológicas. Além disso, a ocorrência de outros grupos, como Odonata, Coleoptera e Heteroptera, reforça a capacidade desses riachos de sustentar uma fauna diversa, mesmo sob diferentes pressões ambientais antrópicas. Os resultados deste estudo ressaltam a importância do biomonitoramento contínuo dos riachos, permitindo avaliar os efeitos das atividades humanas sobre a biodiversidade aquática e subsidiar estratégias de conservação desses ecossistemas.

## 8

### Relação entre Variáveis Ambientais e Tamanho Corporal de Macroinvertebrados Predadores

O tamanho corporal é uma característica funcional amplamente utilizada em estudos ecológicos por refletir aspectos fundamentais da biologia dos organismos, como metabolismo, história de vida e posição trófica (Woodward et al. 2005). Em ambientes lóticos, como riachos, a ocorrência dos macroinvertebrados é influenciada por múltiplos fatores ambientais, incluindo qualidade da água, estrutura do habitat físico e vegetação ripária (Kaufmann et al. 2022; Zelnik & Muc 2020). Áreas com cobertura florestal tendem a oferecer maior sombreamento e menor aporte de sedimentos ao riacho, favorecendo condições ecológicas mais estáveis, enquanto trechos próximos a pastagens, cultivos agrícolas e áreas urbanizadas alteram as condições originais afetando a biodiversidade aquática e os processos ecológicos (Allan 2004).

A matriz de uso do solo, por sua vez, influencia a entrada de nutrientes, sedimentos e luz nos sistemas aquáticos, podendo afetar a estrutura das comunidades bentônicas (De Castro et al. 2017; Lenat & Crawford, 1994; Silva et al. 2025). Diferentes tipos de substrato (areia, cascalho, detritos, etc.) e regimes de fluxo (piscina, lento, rápido, etc.) alteram micro habitats, abrigos e ocorrência de organismos (Amaral et al. 2015; De Castro et al. 2017), o que pode ter efeito seletivo sobre indivíduos de tamanhos distintos. Neste contexto, investigamos se o tamanho médio dos macroinvertebrados predadores em riachos da bacia da UHE Furnas responde às variações de condição ambiental. Foram relacionadas métricas de qualidade ambiental, via índices de distúrbio local, da microbacia e integrado (LDI, CDI e IDI), índice de qualidade da água (IQA) e características físicas do habitat (tipo de substrato, tipo de fluxo e cobertura da mata ripária sobre o leito do riacho). Ao explorar essas relações, buscamos avaliar o potencial do tamanho corporal dos organismos como indicador funcional da condição ambiental em ecossistemas lóticos tropicais.

Os riachos amostrados na bacia do reservatório da UHE Furnas apresentaram ampla heterogeneidade ambiental, refletindo variações em uso e cobertura do solo, tipos de substrato no canal e dinâmica hidrológica. Os trechos amostrados incluíram desde riachos localizados em áreas com cobertura de vegetação nativa bem preservada, com ampla cobertura ripária e boa conectividade longitudinal, até ambientes impactados por atividades agropecuárias e áreas urbanas, com margens expostas, sedimentos finos predominantes e trechos de fluxo reduzido. O substrato foi composto majoritariamente por silte, argila e areia, com ocorrência de detritos orgânicos principalmente em trechos de fluxo lento. A percentagem de cobertura vegetal, avaliada com o uso de densiômetro, variou de 0 a 100%, refletindo diferentes graus de preservação da vegetação ripária.

Para testar a hipótese de que o tamanho corporal dos macroinvertebrados reflete a qualidade ambiental do meio, selecionamos os macroinvertebrados predadores das ordens Plecoptera (família Perlidae), Odonata e Megaloptera, coletados durante as campanhas de amostragens em julho e setembro de 2023, nos 40

riachos que drenam para o reservatório da UHE Furnas.. Os organismos foram identificados até o nível de gênero (Hamada et al. 2018, 2019; Mugnai et al. 2010), fotografados com câmera de alta resolução acoplada à lupa estereoscópica (Leica Microsystems) e medidos em comprimento corporal no software ImageJ (Figura 10).



Figura 10. Exemplo dos macroinvertebrados estudados. Plecoptera (*Kempnyia*) Odonata (*Macrothemis*), Megaloptera (*Corydalus*).

Para análise estatística foi utilizado um modelo linear misto generalizado (GLMM) com distribuição Gamma (link log), para cada grupo de organismos, tendo o tamanho médio dos indivíduos como variável resposta. Utilizamos o pacote MuMIn para gerar um conjunto de modelos plausíveis (com AICc < 10) e aplicar a média dos modelos (model averaging) para selecionar àqueles com maior poder de explicação, com base no Critério de Informação de Akaike corrigido (AICc). A avaliação dos resíduos foi realizada por meio do pacote DHARMA, assegurando a adequação dos modelos. Os resultados foram apresentados na forma de gráficos com os coeficientes estimados e seus respectivos intervalos de confiança, destacando as variáveis com maior peso na explicação do padrão observado para cada grupo de macroinvertebrados. Inicialmente, verificamos a colinearidade entre as variáveis quantitativas, e identificamos alta correlação do IDI com outras variáveis ( $r > 0,7$ ), o que levou à sua exclusão do modelo. Como o IDI é calculado a partir do CDI e LDI (Ligeiro et al. 2013), sua exclusão do modelo não acarreta perda de informação. Para os grupos Plecoptera e Megaloptera as covariáveis incluídas no modelo foram LDI, CDI, IQA, tipo de substrato, tipo de fluxo, cobertura vegetal média e período de coleta, além dos efeitos aleatórios de sítio amostral e gênero. Para o grupo Odonata, foi acrescida ao modelo a covariável Sensibilidade, visto que dentro deste grupo ocorrem famílias com diferentes níveis de sensibilidade a alterações ambientais.

Os resultados dos modelos (model averaging) indicam que o tamanho corporal dos organismos estudados foi influenciado por múltiplas variáveis ambientais e, em Odonata, pelo período de coleta (Figura 11).

Substratos tipo argila/lama e seixo apresentaram tendência negativa para Odonata (Figura 11). A porcentagem de cobertura vegetal, o substrato tipo bloco e os tipos de fluxo suave rápido e suave lento tiveram efeito positivo significativo para o tamanho de Megaloptera (Figura 12). Estes padrões podem estar relacionados com as características de mobilidade e alimentação dos organismos. Megaloptera são organismos normalmente associados a locais de água corrente e substratos rochosos, enquanto Odonata são predadores bastante móveis na coluna d'água, portanto, substratos distintos podem influenciar a ocorrência de organismos presas e a atividade de forrageamento dos predadores (Folsom & Collins 1984; Oliveira & Nessimian 2010).

O aumento de LDI teve efeito positivo significativo sobre o tamanho médio para Megaloptera (Figura 12). O cálculo deste índice inclui variáveis físicas do canal e seu entorno (Ligeiro et al. 2013), o que corrobora com os efeitos encontrados para os diferentes tipos de substrato e fluxo. Substratos de maior granulometria, como bloco, seixo e cascalho, estão associados com maior integridade do canal, ao passo que substratos finos, como areia e silte, são associados a ambientes com maior ocorrência de perturbação, com aporte de sedimentos no leito do canal e conseqüente processo de homogeneização de habitat em curso. Substratos tipo cascalho e banco de folhas foram significativos com efeito positivo para Odonata e negativo para Megaloptera.

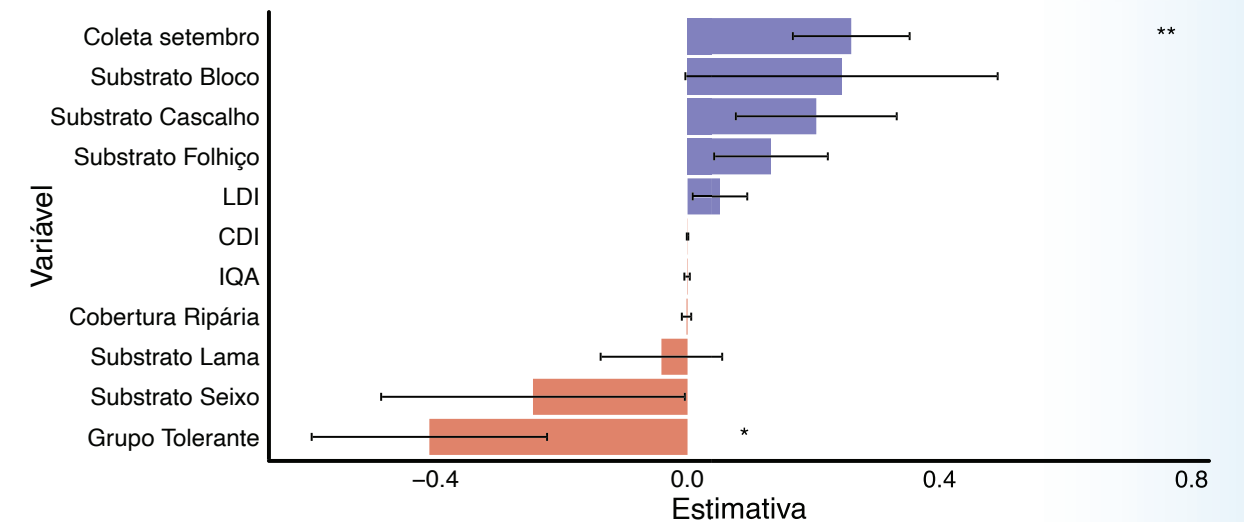


Figura 11: Influência de variáveis ambientais sobre o tamanho corporal médio de Odonata em riachos.

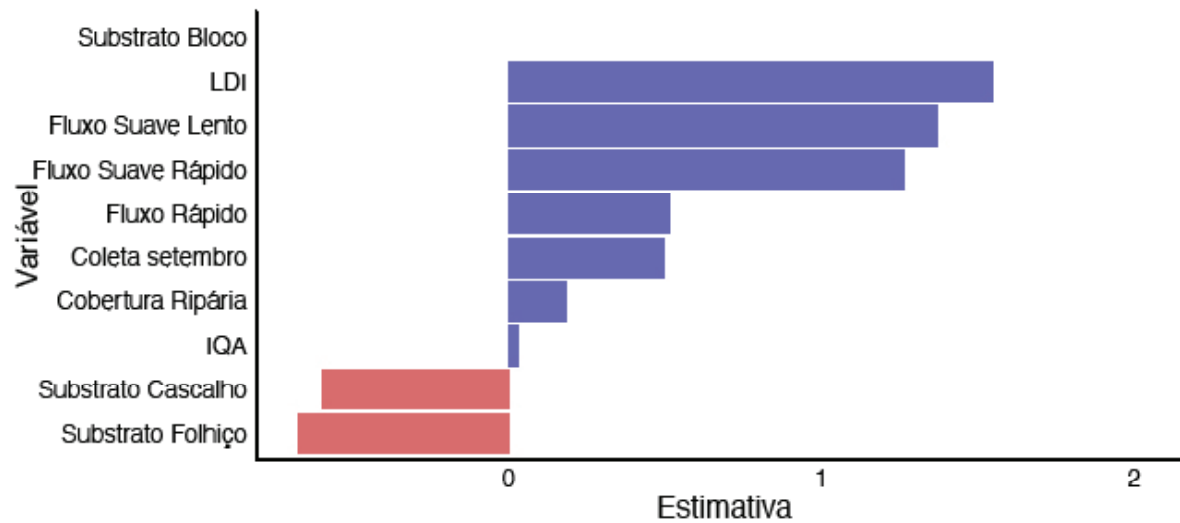


Figura 12: Influência de variáveis ambientais sobre o tamanho corporal médio de Megaloptera em riachos.

A ausência de padrão para CDI, IQA e a porcentagem de cobertura vegetal pode estar relacionado às variações nos padrões de distribuição dos organismos dentro do grupo, ocorrendo famílias com diferentes padrões de tolerância e preferência por habitats (Folsom & Collins 1984; Silva et al. 2021). Também observamos um efeito negativo para Odonata tolerantes, o que pode ter relação com pressões seletivas dos processos de alteração do ambiente. Por outro lado, o período de coleta foi significativo apenas para Odonata. Este efeito pode estar relacionado ao ciclo de vida dos organismos. As coletas realizadas em setembro encontraram organismos em fases de desenvolvimento mais tardias, visto que este grupo apresenta maiores taxas de emergência ao longo da estação chuvosa (Norling 2021).

Para Plecoptera o ajuste do modelo mostrou problemas de convergência associado a níveis pouco representados na variável tipo de fluxo, o que exigiu a exclusão da categoria fluxo rápido, que teve apenas uma ocorrência. Mesmo com essa correção a singularidade persistiu, o que sugere instabilidade na estimação dos parâmetros. Utilizando seleção de modelos por AICc obtemos o modelo nulo (apenas intercepto) como o mais parcimonioso, sendo o único com  $AICc < 10$ . Os modelos com variáveis ambientais apresentaram AICc superiores, com pouca evidência de melhor ajuste em relação ao modelo nulo. Assim, nenhum efeito significativo das variáveis ambientais foi detectado sobre o tamanho médio dos Plecoptera predadores no conjunto de dados analisado. Para Megaloptera, a seleção de modelos por AICc resultou em apenas um modelo atendendo os critérios de seleção. Em ambos os casos, a dificuldade de se obter modelos bem ajustados pode estar relacionada ao tamanho amostral ou à distribuição dos dados entre categorias das

variáveis, comprometendo o poder estatístico do modelo. Estes organismos apresentaram baixa frequência de amostragem, ao contrário de Odonata, onde não encontramos dificuldade de ajuste para os modelos.

Nossos resultados indicam que o tamanho corporal é uma métrica funcional promissora mas que de forma isolada, não constitui um indicador robusto da qualidade ambiental em sistemas lóticos tropicais. O contraste dos resultados para diferentes grupos de organismos reforça que diferentes grupos taxonômicos podem responder de maneira distinta às condições ambientais, refletindo suas especificidades ecológicas, como hábitos alimentares, estratégias de forrageamento e preferências por micro-habitats. Reforça-se, portanto, a importância de abordagens multifatoriais e integrativas no biomonitoramento de ecossistemas aquáticos (Bonada et al. 2006).

# 9

## Biodiversidade de moluscos

Os moluscos representam um dos grupos mais diversificados do reino animal, abrangendo mais de 85 mil espécies descritas e ocupando uma ampla variedade de habitats, desde ambientes marinhos profundos até ecossistemas de água doce e terrestres. Esse filo inclui organismos como caracóis, lesmas, mexilhões, ostras, polvos e lulas, que apresentam uma notável diversidade morfológica e funcional. Os bivalves e gastrópodes são dois dos grupos mais representativos do filo Mollusca, abrangendo elevada diversidade de espécies adaptadas a ambientes marinhos, dulcícolas, salobros e terrestres. Os bivalves, como mexilhões, possuem uma concha formada por duas valvas articuladas por uma dobradiça e são predominantemente filtradores, desempenhando um papel essencial na qualidade da água e na ciclagem de nutrientes. Por outro lado, os gastrópodes, grupo que inclui os caramujos, apresentam ampla variedade de formas e hábitos, podendo ser herbívoros, detritívoros ou até predadores. Enquanto muitos desses organismos desempenham funções ecológicas importantes, algumas espécies invadiram ecossistemas de água doce e marinhos, causando impactos negativos nas espécies nativas, na pesca e até mesmo em infraestruturas, como sistemas de abastecimento de água e usinas hidrelétricas. Além disso, tanto bivalves quanto gastrópodes possuem relevância econômica, sendo explorados na aquicultura, na alimentação humana e em outras indústrias, como a produção de pérolas e corantes naturais.

No reservatório da UHE Furnas foram realizadas duas campanhas de campo que resultaram na identificação de moluscos. Na primeira delas, em abril de 2023 em 40 pontos na região litorânea do reservatório, foram coletados 603 indivíduos do Filo Mollusca, especialmente distribuídos. Destes, 34 indivíduos pertencem à classe Bivalvia, sendo da família Mytilidae, todos da espécie *Limnoperna fortunei*, conhecida como mexilhão dourado. Os outros 569 indivíduos coletados, pertencem à classe Gastropoda, das famílias Ampularidae (4 indivíduos), Anciliidae (8 indivíduos), Lymnaeidae (3 indivíduos), Planorbidae (551 indivíduos) e Thiaridae (3 indivíduos da espécie *Melanoides tuberculata*). Na segunda coleta, realizada

em abril de 2024 em outros 14 pontos monitorados na região litorânea do reservatório, foram coletados 34 indivíduos do Filo Mollusca, especialmente distribuídos. Destes, 10 pertencem à Classe Bivalvia, sendo das famílias Mytilidae (6 indivíduos todos da espécie *Limnoperna fortunei*) e da família Sphaeriidae (4 indivíduos). Os outros 24 indivíduos coletados pertencem à Classe Gastropoda, das famílias Ampularidae (1 indivíduo), Hydrobiidae (1 indivíduo), Planorbidae (16 indivíduos) e Thiaridae (7 indivíduos da espécie *Melanoides tuberculata*).

Nos riachos que drenam para o reservatório da UHE Furnas foi realizada apenas uma campanha, em 40 riachos, que resultou na identificação de 836 indivíduos do Filo Mollusca (Tabela 3). Destes, 634 indivíduos pertencentes à Classe Bivalvia, todos da família Sphaeriidae. Os demais 202 indivíduos pertencem à classe Gastropoda, das famílias Ampularidae (2 indivíduos), Anciliidae (9 indivíduos), Hydrobiidae (1 indivíduo), Lymnaeidae (2 indivíduos), Physidae (136 indivíduos da espécie *Physella acuta*), Planorbidae (51 indivíduos) e Thiaridae (1 indivíduo). No Anexo 1 são apresentados os principais moluscos coletados no reservatório da UHE Furnas.

Tabela 3 - Síntese das famílias de Moluscos e suas abundâncias no reservatório e nos riachos na bacia de drenagem da UHE Furnas.

Local	Filo	Classe	Família	Abundância
Reservatório	Mollusca	Bivalvia	Mytilidae	40
			Sphaeriidae	3
		Gastropoda	Ampularidae	4
			Anciliidae	8
			Lymnaeidae	3
			Planorbidae	551
			Thiaridae	3
Riachos	Mollusca	Bivalvia	Sphaeriidae	643
			Gastropoda	Ampularidae
		Anciliidae	9	
		Hydrobiidae	1	
		Lymnaeidae	2	
		Physidae	136	
		Planorbidae	51	
		Thiaridae	1	

# 10

## Biodiversidade de crustáceos

Os crustáceos formam um grupo extremamente diverso dentro do filo Arthropoda, abrangendo diversas espécies descritas, distribuídas em ambientes marinhos, salobros, de água doce e terrestres. Os crustáceos de água doce representam um grupo diversificado, incluindo camarões, caranguejos, lagostins e outros organismos adaptados a rios, lagos, lagoas e reservatórios. Caracterizam-se principalmente por um exoesqueleto quitinoso, crescimento por meio de mudas (ecdise) e apêndices articulados adaptados para locomoção, alimentação e defesa. Ecologicamente, os crustáceos desempenham papéis essenciais nos ecossistemas, atuando como decompositores, filtradores, presas e predadores em diferentes níveis tróficos. Além de sua importância ambiental, muitas espécies possuem relevância econômica, sendo amplamente exploradas na pesca e aquicultura para consumo humano. No entanto, algumas espécies não nativas podem se tornar invasoras, causando impactos negativos na biodiversidade nativa e em atividades econômicas, como a pesca. Seu sucesso adaptativo se deve à ampla tolerância ambiental, estratégias reprodutivas variadas e comportamento oportunista, permitindo sua dispersão global.

Ao todo, foram amostrados 57 pontos do reservatório em 3 campanhas de coleta (abril de 2023, abril de 2024 e junho de 2024). Foram coletados identificados e sexados 6.001 crustáceos decápodes, sendo duas espécies de camarões de água doce da família Palaemonidae (*Macrobrachium amazonicum* e *Macrobrachium pantanalense*) e uma espécie de caranguejo da família Trichodactylidae (*Dilocarcinus pagei*). Destes, a espécie mais abundante foi *M. pantanalense* com 3.696 indivíduos, seguido de *M. amazonicum* com 2.303 indivíduos e *D. pagei* com 2 indivíduos. Cabe ressaltar que todas as espécies de crustáceos são não nativos para a região. Em anexo, são apresentadas imagens dos crustáceos coletados no reservatório da UHE Furnas.



Foto: Marcos Callisto.

10

## Avaliação preliminar de macrófitas aquáticas

Ao longo do desenvolvimento do projeto tivemos a oportunidade de registrar algumas espécies de macrófitas aquáticas presentes na UHE Furnas. Encontramos 17 espécies (Tabela 5), incluindo uma espécie exótica invasora muito agressiva: *Urochloa arrecta* Hack. ex T.Durand & Schinz) Morrone & Zuloaga.

Conhecer e identificar essas plantas é essencial para compreender e manejar reservatórios, pois elas contribuem para a ciclagem de nutrientes, oxigenação da água e estabilização de sedimentos, além de servirem como habitat para diversos organismos aquáticos, mantendo a biodiversidade local. A identificação correta também permite monitorar mudanças que podem indicar degradação ambiental, incluindo a eutrofização, ou efeitos de alterações climáticas e do uso do solo. Esse conhecimento é importante para prevenir a entrada e/ou controlar a proliferação de espécies invasoras (bem como nativas), que podem obstruir turbinas, prejudicar a pesca, dificultar navegação e recreação.

Tabela 4- Espécies e gêneros de macrófitas aquáticas na bacia de drenagem da UHE Furnas.

Gênero/Espécies	Nativa – Não nativa
<i>Aeschynomene</i> sp.	Nativa
<i>Commelina diffusa</i>	Nativa
<i>Commelina</i> sp.	Nativa
<i>Cyperus haspan</i>	Nativa
<i>Eclipta alba</i>	Nativa
<i>Eichhornia azurea</i>	Nativa
<i>Eichhornia crassipes</i>	Nativa
<i>Hymenachne amplexicaulis</i>	Nativa
<i>Ludwigia erecta</i>	Nativa
<i>Ludwigia helmintorriza</i>	Nativa
<i>Ludwigia leptocarpa</i>	Nativa
<i>Ludwigia octocarpa</i>	Nativa
<i>Pistia stratiotes</i>	Nativa
<i>Polygonum ferrugineum</i>	Nativa
<i>Salvinia auriculata</i>	Nativa
<i>Typha domingensis</i>	Nativa
<i>Urochloa arrecta</i>	Não nativa

A espécie *Urochloa arrecta* tem se expandido rapidamente em ecossistemas semi-lênticos como reservatórios hidrelétricos, favorecida por condições ambientais e pela ausência de predadores naturais (Thomaz et al. 2009; Michelan et al. 2010). Esses bancos densos de biomassa modificam a estrutura das comunidades aquáticas, comprometem a biodiversidade nativa, afetam os fluxos de nutrientes e reduzem o oxigênio na água, podendo causar mortandade de peixes e outros organismos (Bini et al. 1999; Michelan et al. 2010; Michelan et al. 2018). Além dos impactos ambientais, essas invasões dificultam atividades como pesca, geração de energia, navegação, ecoturismo e abastecimento, gerando custos significativos de manejo (Havel et al. 2005, 2015).

Observamos também que, junto a *U. arrecta*, coexistem outras espécies invasoras como cnidário, camarão, tucunaré e mexilhão dourado, sugerindo uma possível sinergia entre elas. Esse processo, conhecido como *invasional meltdown*, ocorre quando o estabelecimento de espécies exóticas favorece a invasão de outras, provocando impactos ecológicos cumulativos e sinérgicos (Simberloff & Von Holle 1999). Reservatórios, por serem ecossistemas artificiais, apresentam hidrologia alterada, enriquecimento de nutrientes e habitats perturbados, fatores que reduzem a biodiversidade nativa e criam oportunidades para invasores oportunistas (Havel et al. 2005). Além disso, sofrem alta pressão de propágulos oriundos de atividades humanas, como aquicultura, navegação recreativa e transposições de água, acelerando ainda mais o processo de invasão.

Nesse sentido, o acompanhamento das espécies de macrófitas aquáticas não nativas pode representar uma linha complementar de investigação em estudos futuros. Desta forma, contribuindo para a compreensão de seus padrões de distribuição e de suas interações ecológicas no reservatório da UHE Furnas. O monitoramento desse grupo de plantas pode ampliar a base de informações sobre processos ecológicos associados às invasões biológicas em ambientes lênticos. Assim, contribuindo de forma estratégica para conservação da biodiversidade local e manutenção dos serviços ecossistêmicos.

### Agradecimentos

Os autores são gratos às bolsas de pesquisa dos estudantes de graduação e de pós-graduação e produtividade em pesquisa CNPq (MC –304060/2020-08, RS- 308350/2022-7, PSP - 302328/2022-0, DM - 308350/2022-7 e 304060/2020-8, TSM 311835/2023-6), Fapemig (GNS - APQ-00401-19).

Agradecemos todo o apoio logístico oferecido pelo biólogo da Axia Energia, Sr. Mario Sacramento, nas atividades de campo.

## Referências

- Agra, J., Cornelissen, T., Viana Junior, A.B., Callisto, M. 2024. A global synthesis and meta analysis of the environmental heterogeneity effects on the freshwater biodiversity. *Oikos* 1: e10186. <https://doi.org/10.1111/oik.10186>.
- Allan, J.D. 2004. Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, 257–284. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>.
- Amaral, P.H.M., Silveira, L.S., Rosa, B.J.V., Oliveira, V.C., Alves, R.G., 2015. Influence of Habitat and Land Use on the Assemblages of Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera in Neotropical Streams. *J. Insect Sci.* 15. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iev042>.
- Amaral, P.H.M., Silveira, L.S., Rosa, B.J.V., Oliveira, V.C., Alves, R.G. 2025. Influence of Habitat and Land Use on the Assemblages of Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera in Neotropical Streams. *J. Insect Sci.* 15. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iev042>.
- Arias, M.E., Cochrane, T.A., Lawrence, K.S., Killeen, T.J., Farrell, T.A. 2011. Paying the forest for electricity: a modelling framework to market forest conservation as payment for ecosystem services benefiting hydropower generation. *Environ. Conserv.* 38:473–484. <https://doi.org/10.1017/S0376892911000464>.
- Bini, L.M., Thomaz, S.M., Murphy, K.J., Camargo, A.F.M. 1999. Aquatic macrophyte assemblages in relation to water and sediment conditions in the Itaipu Reservoir, Brazil. *Hydrobiologia*, 415, 147–154.
- Bispo, P.C., Oliveira, L.G. 2007. Diversity and structure of Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera (Insecta) assemblages from riffles in mountain streams of Central Brazil. *Rev. Bras. Zool.* 24: 283–293. <https://doi.org/10.1590/S0101-81752007000200004>.
- Bonada, N., Prat, N., Resh, V. H., Statzner, B. 2006. Developments In Aquatic Insect Biomonitoring: A Comparative Analysis of Recent Approaches. *Annual Review of Entomology*, 51(1), 495–523. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151124>.
- Brasil, Conselho Nacional Do Meio Ambiente - CONAMA, 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento (Resolução CONAMA N° 357, 18/ março/2005). Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, Poder Executivo, Brasília, DF. Acessado em 10/abril/2025, em [https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res\\_conama\\_357\\_2005\\_classificacao\\_corpos\\_agua\\_rtfcd\\_a\\_ltrd\\_res\\_393\\_2007\\_397\\_2008\\_410\\_2009\\_430\\_2011.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_ltrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf).
- Braun, B.M., Pires, M.M., Kotzian, C.B., Spies, M.R. 2014. Diversity and ecological aspects of aquatic insect communities from montane streams in southern Brazil. *Acta Limnol Brasil* 26: 186-198 Braun BM, Bertaso TRN, Pires MM, et al (2018a) Responses of riffle beetle assemblages to deforestation in a semi-deciduous Atlantic Forest remnant. *An Acad Bras Ciênc* 90:2189–2201. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820160853>.
- Braun, B.M., Pires, M.M., Stenert, C., Maltchik, L., Kotzian, C.B. 2018b. Effects of riparian vegetation width and substrate type on riffle beetle community structure. *Entomol Sci* 21:66–75. <https://doi.org/10.1111/ens.12283>.
- Caetano, D.L., Oliveira, E.F., Zawadzki, C.H. 2016. Fish species indicators of environmental quality of Neotropical streams in Southern Brazil, upper Paraná River basin. *Acta Ichthyol. Piscat.* 2:87–96. <https://doi.org/10.3750/AIP2016.46.2.04>.
- Callisto, M., Moretti, M., Goulart, M. 2001. Macroinvertebrados bentônicos como ferramenta para avaliar a saúde de riachos. *Rev. Bras. Recur. Híd.* 6:71–82. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v6n1.p71-82>.
- Castro, D.M.P., Dolédec, S. Callisto, M. 2017. Landscape variables influence taxonomic and trait composition of insect assemblages in Neotropical savanna streams. *Freshwater Biology*, 62(7), 1472–1486. <https://doi.org/10.1111/fwb.12961>.
- CETESB. 2024. Qualidade das águas interiores do estado de São Paulo. 2023. Série Relatórios. 315p. ISSN 0103-4103. Acessado em 29/maio/2025, em <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2024/11/RAI-2023-Relatorio-de-Qualidade-de-Aguas-Interiores-2023.pdf>.
- Chao, A., Chun-Huo, C., Hsieh, T.C. 2012. Proposing a resolution to debates on diversity partitioning. *Ecology* 93(9): 2037-2051. <https://doi.org/10.1890/11-1817.1>
- Cordeiro, P.F., Feio, M.J., Callisto, M., Hughes, R.M., Macedo, D.R. 2025. A new predictive model (MINASPACS) for spatially extensive biological assessments in southeastern Brazilian streams. *Water Biol. Secur.* 2025:100386. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100386>.
- Cruz, L.C., Pompeu, P.S. 2020. Drivers of fish assemblage structures in a Neotropical urban watershed. *Urban Ecosyst.* 4:819–829. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-00968-6>.
- Cuthbert, R.N., Pattison, Z., Taylor, N.G., Verbrugge, L., Diagne, C., Ahmed, D.A., Leroy, B., Angulo, E., Briski, E., Capinha, C., Catford, J.A., Dalu, T., Essl, F., Gozlan, R.E., Haubrock, P.J., Kourantidou, M., Kramer, A.M., Renault, D., Wasserman, R.J., Courchamp, F. 2021. Global economic costs of aquatic invasive alien species. *Sci. Total Environ.* 775:145238. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145238>.
- de Paula, R.S., Cunha, A.F., de Paula Reis, M. 2024. Evidence of cryptic speciation in the invasive hydroid *Cordylophora caspia* (Pallas, 1771) (Cnidaria, Hydrozoa) supported by new records. *Organisms Diversity & Evolution* 24: 35–50. <https://doi.org/10.1007/s13127-023-00632-9>.
- Darrigran, G., Belz, C., Carranza, A., Collado, G.A., Correoso, M., Fabres, A.A., Grogoric, D.E.G., Lodeiros, C., Pastorino, G., Penchaszadeh, P.E., Salvador, R.B., Santos, S., Thiengo, S., Damborenea, C. 2025. What Do We Know About Non-Native, Invasive, and Transplanted Aquatic Mollusks in South America? *Biology* 14(2):151. <https://doi.org/10.3390/biology14020151>.
- Dudgeon, D., Arthington, A.H., Gessner, M.O., Kawabata, Z.-I., Knowler, D.J., Lévêque, C., Naiman, R.J., Prieur-Richard, A.-H., Soto, D., Stiassny, L.J., Sullivan, C.A. 2006. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biol. Rev.* 81:163-182. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>.
- Er s, T., Czeglédi, I., Tóth, R., Schmera, D. 2020. Multiple stressor effects on alpha, beta and zeta diversity of riverine fish. *Sci. Total Environ.* 748:141407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141407>.
- Ferreira, M.E., Nogueira, S.H.M., Latrubesse, E.M., Macedo, M.N., Callisto, M., Bezerra Neto, J.F., Fernandes, G.W. 2022. Dams Pose a Critical Threat to Rivers in Brazil's Cerrado Hotspot. *Water* 14:3762. <https://doi.org/10.3390/w14223762>.
- Flood, P.J., Duran, A., Barton, M., Mercado-Molina, A.E., Trexler, J.C. 2020. Invasion impacts on functions and services of aquatic ecosystems. *Hydrobiologia* 847:1571–1586. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04211-3>.
- Folsom, T.C., Collins, N.C. 1984. The Diet and Foraging Behavior of the Larval Dragonfly *Anax Junius* (Aeshnidae), with an Assessment of the Role of Refuges and Prey Activity. *Oikos*, 42(1), 105. <https://doi.org/10.2307/3544615>.

- Gallardo, B., Clavero, M., Sánchez, M.I., Vilà, M. 2016. Global ecological impacts of invasive species in aquatic ecosystems. *Global Change Biology* 22(1):151–163. <https://doi.org/10.1111/gcb.13004>.
- Geist, J. 2011. Integrative freshwater ecology and biodiversity conservation. *Ecol. Indic.* 11:1507–1516. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.002>.
- Córdoba, G.M., Chará, J., Zúñiga, M.D.C., Giraldo, L.P., Ramirez, Y.P. 2020. Sensibilidad de Elmidae (Insecta: Coleoptera) a la perturbación del hábitat y la calidad fisicoquímica del agua en ambientes lóticos de los Andes colombianos. *RBT* 68(2): 601-622. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i2.36702>.
- Hamada, N., Nessimian, J.L., Querino, R.B. 2014. Insetos aquáticos na Amazônia brasileira: taxonomia, biologia e ecologia. Editora do INPA, Manaus, Brasil. 728pp.
- Hamada, N., Thorp, J.H., Rogers, D.C. 2018. Keys to Neotropical Hexapoda (4o ed, Vol. 3). Academic Press. 50pp.
- Havel, J.E., Lee, C.E., Vander, M.J. 2005. Do reservoirs facilitate invasions into landscapes? *BioScience* 55(6), 518–525.
- Havel, J.E., Kovalenko, K.E., Thomaz, S.M., Amalfitano, S., Kats, L.B. 2015. Aquatic invasive species: challenges for the future. *Hydrobiologia* 750(1): 147–170.
- Heino, J. 2013. Environmental heterogeneity, dispersal mode, and co occurrence in stream macroinvertebrates. *Ecology and Evolution*, 3(2), 344-355. <https://doi.org/10.1002/ece3.470>.
- Hill, R.A., Fox, E.W., Leibowitz, S.G., Olsen, A.R., Thornbrugh, D.J., Weber, M.H. 2017. Predictive mapping of the biotic condition of conterminous U.S. rivers and streams. *Ecol. Appl.* 27:2397–2415. <https://doi.org/10.1002/eap.1617>.
- Hui, C., McGeoch, M.A. 2014. Zeta Diversity as a Concept and Metric That Unifies Incidence-Based Biodiversity Patterns. *Am. Nat.* 184:684–694. <https://doi.org/10.1086/678125>.
- Kaufmann, P.R., Hughes, R.M., Paulsen, S.G., Peck, D.V., Seeliger, C.W., Kincaid, T., Mitchell, R.M. 2022. Physical habitat in conterminous US streams and Rivers, part 2: A quantitative assessment of habitat condition. *Ecol. Indic.* Aug 1(141):109047. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109047.
- Laliberté, E., Legendre, P. 2010. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. *Ecology* 91:299–305. <https://doi.org/10.1890/08-2244.1>.
- Latombe, G., Hui, C., McGeoch, M.A. 2017. Multi site generalized dissimilarity modelling: using zeta diversity to differentiate drivers of turnover in rare and widespread species. *Methods Ecol. Evol.* 8:431–442. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12756>.
- Latombe, G., Roura Pascual, N., Hui, C. 2019. Similar compositional turnover but distinct insular environmental and geographical drivers of native and exotic ants in two oceans. *J. Biogeogr.* 46:2299–2310. <https://doi.org/10.1111/jbi.13671>.
- Leitão, R.P., Zuanon, J., Mouillot, D., Leal, C.G., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Villéger, S., Pompeu, P.S., Kasper, D., de Paula, F.R., Ferraz, S.F.B., Gardner, T.A. 2018. Disentangling the pathways of land use impacts on the functional structure of fish assemblages in Amazon streams. *Ecography (Cop.)* 41:219–232. <https://doi.org/10.1111/ecog.02845>.
- Lenat, D.R., Crawford, J.K. 1994. Effects of land use on water quality and aquatic biota of three North Carolina Piedmont streams. *Hydrobiologia* 294:185–199. <https://doi.org/10.1007/BF00021291>.
- Ligeiro, R., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Macedo, D.R., Firmiano, K.R., Ferreira, W.R., Oliveira, D., Melo, A.S., Callisto, M. 2013. Defining quantitative stream disturbance gradients and the additive role of habitat variation to explain macroinvertebrate taxa richness. *Ecol. Indic.* 25:45–57. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.004>.
- Linares, M.S., Macedo, D.R., Marques, J.C., Hughes, R.M., Callisto, M. 2025. Biodiversity spatial distribution of benthic macroinvertebrate assemblages is influenced by anthropogenic disturbances at multiple spatial extents. *Sci. Total Environ.* 960:178365. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178365>.
- Macedo, D.R., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Callisto, M. 2018. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. *Sci. Total Environ.* 635:1267–1279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.216>.
- Madureira, K.H., Linares, M., Callisto, M. 2025. Influence of local environmental factors on the distribution of the invasive species *Macrobrachium pantanalense* Dos Santos, Hayd and Anger, 2013 in a large hydropower reservoir. *Biological Invasions* (accepted).
- Martins, I., Macedo, D.R., Hughes, R.M., Callisto, M. 2021. Major risks to aquatic biotic condition in a Neotropical Savanna River basin. *River Res. Appl.* 37:858–868. <https://doi.org/10.1002/rra.3801>.
- Mathers, K.L., Doretto, A., Fenoglio, S., Hill, M.J., Wood, P.J. 2022. Temporal effects of fine sediment deposition on benthic macroinvertebrate community structure, function and biodiversity likely reflects landscape setting. *Sci Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154612>.
- McKenzie, M., Brooks, A., Callisto, M., Collins, A., Durkota, J.M., Death, R.G., Jones, J.I., Linares, M.S., Matthaei, C.D., Monk, W.A., Murphy, J.F., Wagenhoff, A., Wilkes, M., Wood, P.J., Mathers, K.L. 2023. Freshwater invertebrate responses to fine sediment stress: a multicontinent perspective. *Glob. Change Biol.* 30:e17084. <https://doi.org/10.1111/gcb.17084>.
- Michelan, T.S., Thomaz, S.M., Mormul, R.P., Carvalho, P. 2010. Effects of an exotic invasive macrophyte (tropical signalgrass) on native plant community composition, species richness and functional diversity. *Freshwater Biology* 55:1315-1326.
- Michelan, T.S., Thomaz, S.M., Bando, F.M., Bini, L.M. 2018. Competitive Effects Hinder the Recolonization of Native Species in Environments Densely Occupied by One Invasive Exotic Species. *Frontiers in Plant Science* 9:1261.
- Minas Gerais, Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM, 2022. Resolução Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG No 008, 21/novembro/2022. Diário Executivo, Minas Gerais. Acessado 10/abril/2025, em <https://www.jornalminasgerais.mg.gov.br/?dataJornal=2022-12-02>.
- Moreteau, J.C., Khalanski, M. 1994. Settling and growth of *D. polymorpha* in the raw water circuits of the Cattenom nuclear power plant (Moselle, France) (No. EDF--95-NV-00003). Electricite de France (EDF). <https://inis.iaea.org/records/w172e-c5231>.
- Mugnai, R., Nessimian, J.L., Baptista, D.F. 2010. Manual de Identificação de Macroinvertebrados Aquáticos do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Technical Books. 81pp.
- Norling, U. 2021. Growth, winter preparations and timing of emergence in temperate zone Odonata: Control by a succession of larval response patterns. *International Journal of Odonatology*, 24, 1–36. [https://doi.org/10.23797/2159-6719\\_24\\_1](https://doi.org/10.23797/2159-6719_24_1).

- Oliveira, A.L.H.D., Nessimian, J.L. 2010. Spatial distribution and functional feeding groups of aquatic insect communities in Serra da Bocaina streams, southeastern Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 22(4): 424–441. <https://doi.org/10.4322/actalb.2011.007>.
- Oviedo-Machado, N., Reinoso-Flórez, G. 2018. Aspectos ecológicos de larvas de Chironomidae (Diptera) del río Opía (Tolima, Colombia). *Revista Colombiana de Entomología*, 44(1):101-109. <https://doi.org/10.25100/socolen.v44i1.6546>.
- Pinto, R., de Jonge, V.N., Marques, J.C. 2014. Linking biodiversity indicators, ecosystem functioning, provision of services and human well-being in estuarine systems: Application of a conceptual framework. *Ecol. Indic.* 36:644–655. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.015>.
- Portella, K.F., Joukoski, A., Silva, A.S., Brassac, N.M., Belz, C.E. 2009. Biofouling e biodeterioração química de argamassa de cimento portland em reservatório de usina hidroelétrica. *Química Nova*, 32(4): 1047–1051. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000400037>.
- Rossaro, B., Marziali, L., Montagna, M., Magoga, G., Zaupa, S., Boggero, A. 2022. Factors Controlling Morphotaxa Distributions of Diptera Chironomidae in Freshwaters. *Water*, 14(7): 1014. <https://doi.org/10.3390/w14071014>.
- Salvador, G.N., Benone, N.L., Pompeu, P.S., Formagio, P.S., Sulzbacher, R., Alves, C.B.M. 2025a. How local variables can affect fishes in the Upper Paraná river basin (Brazil)? (em preparação).
- Salvador, G.N., Alves, C.B.M., de Carvalho, D.R., Pompeu, P.S., Formagio, P.S., Hughes, R.M., Sulzbacher, R., Leitão, R.P. 2025b. How does fragmentation by small dams affect stream ichthyofauna in the Upper Paraná River basin? *Neotropical Ichthyology*. In press
- Silva, L.F.R., Castro, D.M.P., Juen, L., Callisto, M., Hughes, R.M., Hermes, M.G. 2021. Functional responses of Odonata larvae to human disturbances in neotropical savanna headwater streams. *Ecological Indicators*, 133:108367. [10.1016/j.ecolind.2021.108367](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108367).
- Silva, M.S.G.M., Figueiredo, R.O., Pazianotto, R.A.A., Zuccari, M.L. 2025. Influence of land use on benthic macroinvertebrate assemblages in headwater streams of the Jaguari River Basin, Brazil. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 20: 1-17. <https://doi.org/10.4136/ambiente-agua.3044>.
- Simberloff, D., Von Holle, B. 1999. Positive interactions of nonindigenous species: invasional meltdown? *Biological Invasions* 1(1): 21–32.
- Schindler, S., Staska, B., Adam, M., Rabitsch, W., Essl, F. 2015. Alien species and public health impacts in Europe: a literature review. *NeoBiota* 27:1-23. <https://doi.org/10.3897/neobiota.27.5007>.
- Sulzbacher, R., Alves, C.B.M., Formagio, P.S., Salvador, G.N, Pompeu, P.S. 2025b. Local impacted streams share more species with a big tropical reservoir. (unsubmitted)
- Sulzbacher, R., Salvador, G.N., Alves, C.B.M., Formagio, P.S., Hughes, R.M., Pompeu, P.S. 2025a. The longitudinal gradient prevails over local characteristics in shaping fish species distributions in a large neotropical reservoir. *Water Biology and Security*. (under review)
- Thomaz, S.M., Carvalho, P., Mormul, R.P., Ferreira, F.A., Silveira, M.J., Michelan, T.S. 2009. Temporal trends and effects of diversity on occurrence of exotic macrophytes in a large reservoir. *Acta Oecologica* 35: 614-620.

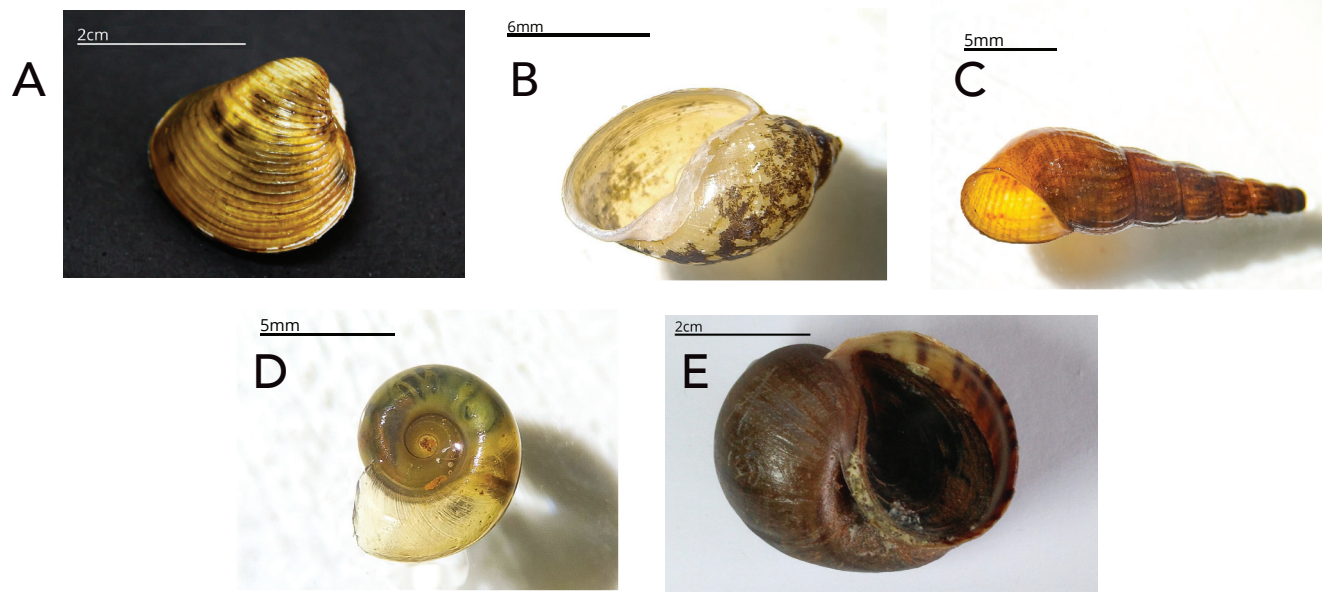
- Tuomisto, H. 2010. A diversity of beta diversities: straightening up a concept gone awry. Part 2. Quantifying beta diversity and related phenomena. *Ecography* 33 (1):23-45. [10.1111/j.1600-0587.2009.06148.x](https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.06148.x).
- Turbelin, A.J., Diagne, C., Hudgins, E.J., Moodley, D., Kourantidou, M., Novoa, A., Haubrock, P.J., Bernery, C., Gozlan, R.E., Francis, R.A., Courchamp, F. 2022. Introduction pathways of economically costly invasive alien species. *Biological Invasions* 24(7):2061–2079. <https://doi.org/10.1007/s10530-022-02796-5>.
- Whittaker, R.H. 1960. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecological Monographs* 30(3): 279-338. <https://doi.org/10.2307/1943563>.
- Villéger, S., Mason, N.W.H., Mouillot, D. 2008. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology* 89:2290–2301. <https://doi.org/10.1890/07-1206.1>.
- White, D.S. 2009. Coleoptera (Beetles) in Aquatic Ecosystems. In: Likens, G.E. (ed) *Encyclopedia of Inland Waters*. Elsevier, 144–156.
- Woodward, G., Ebenman, B., Emmerson, M. ... Olesen, J., Valido, A., Warren, P.H. ... 2005. Body size in ecological networks. *Trends Ecol. Evol.* 20:402–409. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.005>.
- Yee, D.A., Kehl, S. 2015. Order Coleoptera. In: Thorp, J.H., Rogers, D.C. (eds) *Thorp and Covich's Freshwater Invertebrates*. Elsevier, pp 1003–1042
- Zelnik, I., Muc, T. 2020. Relationship between Environmental Conditions and Structure of Macroinvertebrate Community in a Hydromorphologically Altered Pre-Alpine River. *Water*, 12(11): 2987. <https://doi.org/10.3390/w12112987>

### Crustáceos na bacia da UHE Furnas



Ilustrações de crustáceos coletados no reservatório da UHE Furnas. (a) *Macrobrachium amazonicum* (Decapoda, Palaemonidae); (b) *Macrobrachium pantanalense* (Decapoda, Palaemonidae). Créditos das fotos: Giovanna Lima

### Moluscos na bacia da UHE Furnas



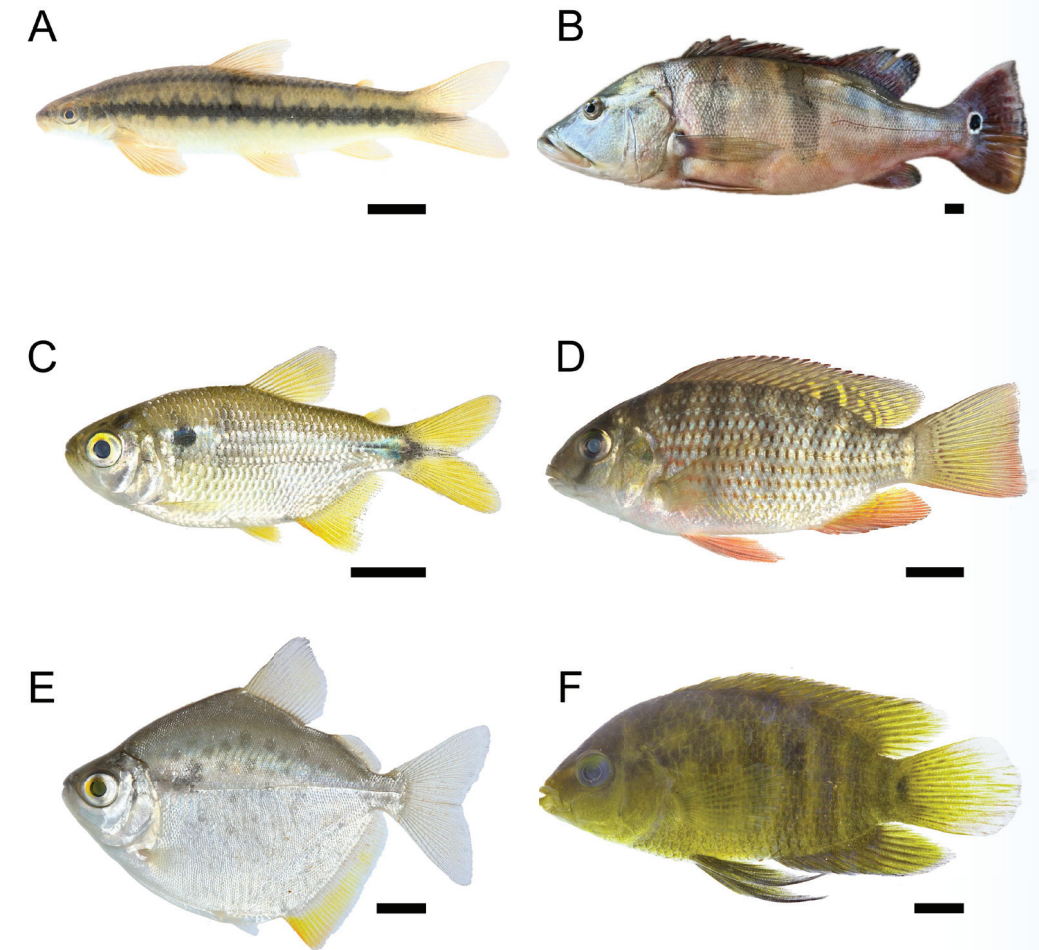
Moluscos coletados no reservatório da UHE Furnas: (a) *Corbicula fluminea* (Venerida, Cyrenidae); (b) *Melanoides tuberculata* (Cerithioida, Thiaridae); (c) *Lymnaeidae* (HYPERLINK "<https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=489336>" Lymnaeioidea); (d) *Planorbidae* (HYPERLINK "<https://marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=489336>" Lymnaeioidea); (e) *Pomacea* (Ampullariidae). Créditos das fotos: Giovanna Lima.

### Insetos aquáticos na bacia da UHE Furnas



Insetos aquáticos coletados em riachos que drenam para o reservatório da UHE Furnas. (a) *Caenis* (Ephemeroptera, Caenidae); (b) *Smicridea* (Trichoptera, Hydropsychidae); (c) *Phylloicus* (Trichoptera, Calamoceratidae); (d) *Macrothemis* (Odonata, Libellulidae). Créditos das fotos: Beatriz Pego.

### Peixes na bacia da UHE Furnas



Espécies de peixes coletadas em riachos que drenam para o reservatório da UHE Furnas. (a) *Apareiodon piracicabae* (Characiformes, Parodontidae); (b) *Cichla piquiti* (Cichliformes, Cichlidae); (c) *Astyanax lacustris* (Characiformes, Characidae); (d) *Coptodon rendalli* (Cichliformes, Cichlidae); (e) *Metynnis* (Characiformes, Serrasalminidae). (f) *Australoheros oblongus* (Cichliformes, Cichlidae) Créditos das fotos: (a, c, d, e, f - Gilberto Salvador, b: Carlos B. M. Alves).



CAPÍTULO

6

## A CIÊNCIA CIDADÃ COMO ELO ENTRE A PESQUISA ECOLÓGICA, SETOR ELÉTRICO E SOCIEDADE

Juliana S. França,  
Bruna S. Vieira,  
Bruno B.D. Guimarães,  
André Golgher  
& Marcos Callisto

### **Palavras-chave:**

*Conservação ambiental,  
Educação ambiental,  
Monitoramento ambiental participativo,  
Parcerias interinstitucionais,  
Transformação socioambiental.*

Como citar este capítulo:

França, J.S., Vieira, B.S., Guimarães, B.B.D., Golgher, A. & Callisto, M. (2026). A Ciência Cidadã como elo entre a Pesquisa Ecológica, Setor Elétrico e Sociedade. In: Callisto, M. & Alves, C.B.M. (eds.) Ecologia e Pesquisa Transdisciplinar no Setor Elétrico: Resultados e Aprendizados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, pp. 169-198

## Resumo

Neste capítulo discutimos a ciência cidadã como elo entre a pesquisa ecológica, o setor elétrico e a participação social na bacia da UHE Furnas. Abordamos os serviços ecossistêmicos (SE) alinhados aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) e discutimos Soluções baseadas na Natureza (SbN), incluindo o manejo integrado e a restauração ecológica, que fortalecem a resiliência socioecológica de bacias hidrográficas. Apresentamos a ciência cidadã como abordagem transformadora, estruturada em cinco dimensões: científica, educacional, participativa, informacional e política. Aplicamos essas dimensões em ações de monitoramento ambiental participativo da qualidade da água, educação ambiental e conservação da biodiversidade, fortalecendo o protagonismo comunitário. Durante o Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, envolvemos escolas públicas em treinamentos, na coleta e análise de dados sobre habitats físicos do entorno, qualidade física e química da água, invertebrados aquáticos como bioindicadores e avaliação dos serviços ecossistêmicos das matas ciliares. Os dados indicaram elevada degradação de condições ecológicas, especialmente próximas a áreas urbanas densamente povoadas. Assim, discutimos o potencial da ciência cidadã para produzir conhecimento legítimo, transformar percepções socioambientais e subsidiar políticas públicas. Destacamos a importância de parcerias interinstitucionais e a urgência de esforços transdisciplinares para conservar ecossistemas aquáticos e promover modelos sustentáveis que integrem ciência, educação e sociedade em bacias de empreendimentos hidrelétricos no Brasil. 💧

1

## Natureza e Sustentabilidade: Conexões entre Serviços Ecossistêmicos, Objetivos do Desenvolvimento Sustentável e Soluções baseadas na Natureza

Serviços ecossistêmicos (SE) são as funções ecológicas oferecidas pelos ecossistemas que possuem valor para as populações humanas, incluindo bens de consumo e outros benefícios essenciais ao bem-estar, à saúde física e mental e à qualidade de vida. Os diferentes valores atribuídos à natureza podem ser usufruídos de diversas maneiras, variando conforme a biodiversidade, a cultura local e as características ecológicas de ecossistemas terrestres e aquáticos. Tradicionalmente, os SE são classificados em quatro categorias inter-relacionadas de acordo com os benefícios que proporcionam: (1) serviços de provisão, (2) serviços reguladores, (3) serviços de suporte e (4) serviços culturais (Haines-Young & Potschin 2018), Figura 1.

Essas categorias podem ser organizadas em três grandes grupos: os que fornecem materiais e energia para as necessidades humanas (serviços de provisão); os que regulam e mantêm o meio ambiente (serviços reguladores e de suporte); e os que representam aspectos imateriais dos ecossistemas e que potencialmente influenciam o bem-estar físico e mental das pessoas (serviços culturais). Os serviços ecossistêmicos de provisão incluem o fornecimento de alimentos (como frutas, hortaliças e peixes), água potável para consumo humano e para outros usos, como recreação, dessedentação animal e uso industrial, além de madeira, fibras, recursos genéticos e biomassa para geração de energia. Os serviços ecossistêmicos de regulação e suporte incluem regulação do clima, polinização, armazenamento de carbono - que contribui para o controle de gases causadores de efeito estufa, além de armazenamento e regulação de quantidade e qualidade da água. Além disso, favorecem o aumento da fertilidade do solo como, por exemplo, pelo crescimento de raízes de plantas entre rochas, pela liberação de nutrientes, pela decomposição de matéria orgânica e pela reciclagem de nutrientes. Outros serviços importantes são a proteção costeira, a manutenção da qualidade do solo, da água e do ar - como a absorção de resíduos orgânicos e poluentes - e o controle natural de pragas. Por fim, inclui-se ainda a proteção contra a erosão do solo, o controle de inundações e a manutenção de habitats para espécies de animais e plantas. Os serviços culturais abrangem a recreação em ambientes naturais, a contemplação de paisagens, valores simbólicos e religiosos, além de oportunidades científicas e educacionais como educação ambiental e aulas práticas de campo com estudantes de graduação e pós-graduação.



Figura 1 - Representação dos quatro principais tipos de serviços fornecidos pelos ecossistemas: provisão (alimentos, água, recursos naturais), regulação (clima, qualidade do solo e do ar), suporte (processos ecológicos como polinização e ciclagem de nutrientes) e culturais (lazer, turismo e valores simbólicos).

Neste contexto, um desafio emergente nas discussões empresariais e estratégicas é a aplicação da abordagem de avaliação de riscos naturais chamada Planejamento Local de Ações Precoces (do inglês *Local Early Action Planning*, LEAP). Esta abordagem propõe a identificação de ativos ambientais relevantes e serviços ecossistêmicos em localidades prioritárias. Ela é promovida pela *Taskforce on Nature-related Financial Disclosures* (TNFD), uma força-tarefa internacional formada por diversos setores – incluindo governos, empresas, investidores e especialistas – que busca desenvolver diretrizes para avaliar as dependências e impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente (Quadro 1).

**Quadro 1: Relações entre meios, biomas, ativos ambientais e serviços ecossistêmicos.**

Meios	Biomas	Ativos Ambientais	Serviços Ecossistêmicos
Terra	Florestas tropicais, subtropicais, temperadas e boreais, savanas e campos, campo de arbustos, sistemas agrícolas intensivos, áreas urbanas	Ecossistemas terrestres naturais e seminaturais, solo, biodiversidade terrestre, recursos genéticos	Abastecimento de alimentos e fibras, sequestro de carbono, polinização, regulação do clima, valores culturais e espirituais
Água doce	Rios, nascentes, córregos, lagos, áreas úmidas, pântanos, brejos, sistemas de água doce artificiais	Recursos hídricos continentais, ecossistemas aquáticos interiores, biodiversidade aquática	Abastecimento de água, purificação de água, regulação de inundações, recreação, educação ambiental, conservação de biodiversidade
Oceano	Plataforma continental, recifes, zonas costeiras e estuarinas, oceanos abertos, sistemas marinhos artificiais	Ecossistemas marinhos e costeiros, estoques pesqueiros, minerais marinhos	Produção pesqueira, turismo costeiro, regulação do clima, formação de nuvens, ciclo de nutrientes, proteção contra tempestades
Atmosfera	Sistema atmosférico (interage com os demais biomas)	Circulação atmosférica, processos climáticos e meteorológicos	Regulação climática global, regulação de chuvas, dispersão de sementes e poluentes, serviços estéticos e culturais
Subterrâneo	Sistemas subterrâneos terrestres e aquáticos, cavernas, aquíferos	Aquíferos, habitats cavernícolas, recursos minerais	Armazenamento e purificação de água, manutenção de ciclos geoquímicos e suporte à biodiversidade cavernícola

Fonte: Adaptado de IPBES (2022) e MEA (2003).

A valorização de serviços ecossistêmicos está intrinsecamente relacionada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente àqueles que tratam da saúde e bem-estar (ODS 3), segurança hídrica (ODS 6), consumo e produção responsáveis (ODS 12), combate às mudanças climáticas (ODS 13) e conservação de biodiversidade (ODS 15). A Ciência Cidadã surge como um importante elo entre os ODS e a sociedade ao mobilizar comunidades na coleta, monitoramento e interpretação de dados sobre serviços ecossistêmicos, tornando o conceito operacional e fortalecendo o engajamento local (Queiroz-Souza et al. 2023). A integração entre serviços ecossistêmicos e ODS orienta políticas públicas e práticas de manejo sustentável, incentivando ações que impulsionam a resiliência socioecológica, sobretudo em regiões onde a biodiversidade é crucial para a subsistência e cultura de comunidades locais. Iniciativas de avaliação e monitoramento participativos caracterizam-se, portanto, como ferramentas estratégicas para o alcance das metas globais da Agenda 2030 (Quadro 2).

**Quadro 2 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) apresentados com resumos e ícones temáticos. As cores destacam os ODS mais relevantes para o contexto do projeto IBI UHE Furnas & UFMG.**

ODS	Resumo
<b>nº 1</b> - Erradicação da Pobreza	Acabar com a pobreza em todas as suas formas.
<b>nº 2</b> - Fome Zero e Agricultura Sustentável	Acabar com a fome e promover agricultura sustentável.
<b>nº 3</b> - Saúde e Bem-estar	Garantir vida saudável e promover bem-estar para todos.
<b>nº 4</b> - Educação de Qualidade	Garantir educação inclusiva, equitativa e de qualidade.
<b>nº 5</b> - Igualdade de Gênero	Alcançar a igualdade de gênero e empoderar mulheres e meninas.
<b>nº 6</b> - Água Potável e Saneamento	Garantir disponibilidade e gestão sustentável da água.
<b>nº 7</b> - Energia Acessível e Limpa	Assegurar acesso à energia confiável, sustentável e moderna.
<b>nº 8</b> - Trabalho Decente e Crescimento Econômico	Promover crescimento econômico inclusivo e trabalho decente para todos.
<b>nº 9</b> - Indústria, Inovação e Infraestrutura	Construir infraestrutura resiliente e fomentar inovação.
<b>nº 10</b> - Redução das Desigualdades	Reduzir as desigualdades dentro e entre países.
<b>nº 11</b> - Cidades e Comunidades Sustentáveis	Tornar cidades inclusivas, seguras e sustentáveis.
<b>nº 12</b> - Consumo e Produção Responsáveis	Garantir padrões sustentáveis de consumo e produção.
<b>nº 13</b> - Ação Contra a Mudança Global do Clima	Tomar medidas urgentes para combater as mudanças do clima.
<b>nº 14</b> - Vida na Água	Conservar e utilizar de forma sustentável os oceanos, mares e recursos marinhos.
<b>nº 15</b> - Vida Terrestre	Proteger, recuperar e promover o uso sustentável de ecossistemas terrestres.
<b>nº 16</b> - Paz, Justiça e Instituições Eficazes	Promover sociedades pacíficas e inclusivas e acesso à justiça.
<b>nº 17</b> - Parcerias e Meios de Implementação	Fortalecer parcerias globais para o desenvolvimento sustentável.



Adicionalmente, as Soluções baseadas na Natureza (SbN) — ações inspiradas e sustentadas pela natureza que fomentam simultaneamente a conservação da biodiversidade e o bem-estar humano — emergem como iniciativas que concretizam esses princípios em práticas como restauração de ecossistemas, manejo integrado de bacias hidrográficas e proteção de áreas naturais. A implantação de SbN no território da bacia do reservatório da UHE Furnas apresenta oportunidades significativas para conciliar conservação ambiental e desenvolvimento sustentável e para ampliar a participação comunitária em programas de ciência cidadã e educação ambiental. Além disso, iniciativas locais como esta possuem grande potencial de replicação em outros empreendimentos hidrelétricos, contribuindo para amplificar os benefícios ambientais, sociais e econômicos em diferentes contextos territoriais e bacias hidrográficas no país. Assim, projetos como o IBI UHE Furnas & UFMG podem servir de referência para estratégias nacionais e internacionais de adaptação e mitigação baseadas na natureza.

## 2 As cinco dimensões da Ciência Cidadã: caminhos para a transformação socioambiental

A ciência cidadã tem ganhado crescente reconhecimento como uma abordagem metodológica e estratégica essencial para a pesquisa socioambiental contemporânea. Ao integrar cidadãos em processos de produção e disseminação de conhecimento científico, essa prática rompe com modelos tradicionais de pesquisa e amplia significativamente o alcance da ciência, tanto em termos de escala quanto de impacto. Longe de se limitar à coleta de dados por voluntários, a ciência cidadã incorpora múltiplas formas de engajamento social, promovendo inovação, inclusão e transformação territorial. A capacidade de avaliar territórios amplos é potencializada pela capilaridade proporcionada pelos moradores locais, que habitam e atuam em cada bacia e sub-bacia hidrográfica. Nesse contexto, destacam-se cinco dimensões fundamentais que estruturam e qualificam as iniciativas de ciência cidadã: científica, educacional, participativa, informacional e política. Juntas, essas dimensões expressam o potencial dessa abordagem para fortalecer a legitimidade da ciência, fomentar o pensamento crítico, democratizar o acesso à informação e influenciar políticas públicas em prol da sustentabilidade.

A **dimensão científica** constitui a base de legitimidade da ciência cidadã. Ela diz respeito à qualidade, ao rigor e à validade dos dados e resultados obtidos por meio da participação pública. Para que essa abordagem seja reconhecida como fonte confiável de conhecimento, é essencial que os projetos sejam cuidadosamente planejados, com protocolos metodológicos bem definidos, estratégias de treinamento dos participantes e mecanismos de validação científica. Além desses aspectos, a dimensão ética também é fundamental. É necessário assegurar o uso responsável dos dados e imagens coletados, com consentimento dos participantes, respeito à privacidade e à não exposição de nomes e informações pessoais. O uso dos

resultados deve ser previamente autorizado e comunicado com transparência, garantindo a integridade e a confiança entre cientistas e comunidades. Adicionalmente, é crucial reconhecer e incorporar os saberes tradicionais das populações locais — como pescadores, raizeiros, mateiros, caçadores e outros grupos que detêm conhecimentos profundos sobre a biodiversidade e o território. Essas populações, em função de seu conhecimento aprofundado do território, atuam como sentinelas ambientais, capazes de perceber alterações sutis no ambiente — muitas vezes imperceptíveis aos olhos de pesquisadores externos. Esses saberes, muitas vezes mais detalhados do que os registros científicos formais, enriquecem a produção de conhecimento e fortalecem a relevância e a aplicabilidade dos dados gerados (Pandya 2012). Ao mesmo tempo, a ciência cidadã pode atuar como ponte para o diálogo com essas comunidades, contribuindo para desmistificar práticas baseadas em crenças sem fundamento científico, que por vezes colocam em risco a saúde humana, a fauna e a flora locais. Quando critérios científicos, éticos e culturais são integrados de forma cuidadosa, a ciência cidadã torna-se uma ferramenta poderosa para a produção de conhecimento robusto, inclusivo e transformador. Ainda assim, é importante reconhecer que a ciência cidadã apresenta limitações inerentes à variabilidade do engajamento e da capacitação técnica dos participantes. A qualidade dos dados pode ser afetada por fatores como o nível de instrução, a familiaridade com os instrumentos de coleta e a consistência metodológica na aplicação dos protocolos. Por isso, é fundamental que os projetos adotem estratégias contínuas de formação, supervisão e validação cruzada com dados obtidos por pesquisadores ou técnicos especializados.

A **dimensão educacional**, por sua vez, revela o papel formativo da ciência cidadã. Ao envolver cidadãos em atividades científicas, abre-se espaço para processos de alfabetização científica e ambiental, promovendo a compreensão dos métodos de investigação, o desenvolvimento do pensamento crítico e o fortalecimento de valores associados à sustentabilidade. Essa dimensão se expressa tanto em contextos formais, como escolas e universidades, quanto em espaços de educação não formal, estimulando a participação de jovens, professores e comunidades na construção coletiva do saber. Assim, a ciência cidadã também se configura como uma ferramenta pedagógica poderosa, capaz de ampliar o repertório socioambiental da população e consolidar vínculos com o território.

A **dimensão participativa** destaca o grau de envolvimento dos cidadãos nos diferentes estágios dos projetos de ciência cidadã. Mais do que simples colaboradores, os participantes podem ser protagonistas na definição de perguntas de pesquisa, na coleta e interpretação de dados e na disseminação dos resultados. Quanto mais elevado for o nível de cocriação e corresponsabilidade, mais profundas tendem a ser as transformações sociais desencadeadas pelas iniciativas. Essa dimensão se conecta diretamente com o reconhecimento dos saberes locais e com práticas de pesquisa colaborativa, nas quais comunidades atuam não apenas como fontes de informação, mas também como agentes ativos na produção e disseminação de conhecimento relevante e aplicável.

A **dimensão informacional** diz respeito à gestão, circulação e aplicação dos dados gerados por projetos de ciência cidadã. A abertura, transparência e acessibilidade das informações são aspectos-chave

para que os resultados dessas iniciativas possam ser integrados a sistemas de monitoramento, bases de dados públicas e plataformas de tomada de decisão. Em articulação com a dimensão ética abordada anteriormente na esfera científica, é fundamental que a disseminação desses dados observe princípios de responsabilidade, incluindo o respeito ao consentimento dos participantes, à confidencialidade de informações sensíveis e à autorização para uso dos resultados. A integridade e o cuidado no tratamento de dados ganham ainda mais relevância quando envolvem comunidades locais e conhecimentos tradicionais. Essa dimensão reforça o papel da ciência cidadã como instrumento de democratização da informação ambiental. Ao gerar dados acessíveis e socialmente legitimados, a ciência cidadã contribui para subsidiar a proposição de políticas públicas – como a criação de unidades de conservação, portarias regulatórias, leis ambientais e estratégias de gestão participativa –, sobretudo quando articulada com dimensões complementares, como a formação científica, a educação ambiental, a participação social, a disseminação de informações e o fortalecimento de capacidades institucionais. Além disso, os dados produzidos por essas iniciativas podem ser integrados ao acompanhamento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente em temas como água, clima, biodiversidade e governança territorial.

Por fim, a **dimensão política** evidencia a capacidade da ciência cidadã de influenciar processos decisórios e ampliar a participação social em instâncias de governança. Ao criar espaços de diálogo e articulação entre diferentes atores (p.ex. comunidades, gestores públicos, cientistas, empresas e organizações da sociedade civil), essa abordagem promove o empoderamento de grupos historicamente marginalizados, amplia o acesso à informação qualificada e fomenta práticas de gestão mais justas, colaborativas e baseadas em evidências. A participação do setor empresarial é especialmente relevante na construção de soluções compartilhadas, na adoção de práticas mais responsáveis e na integração da ciência cidadã a estratégias de sustentabilidade corporativa e inovação socioambiental. Em cenários marcados por conflitos socioambientais, desigualdades territoriais e vulnerabilidades climáticas, a dimensão política da ciência cidadã assume papel estratégico na promoção da justiça ambiental e na implementação de Soluções baseadas na Natureza.

Assim, ao integrar essas cinco dimensões (científica, educacional, participativa, informacional e política) a ciência cidadã revela-se como uma abordagem poderosa e multifacetada. Mais do que uma metodologia de pesquisa, ela se configura como uma prática social transformadora, capaz de gerar conhecimento legítimo, fomentar o protagonismo das comunidades e fortalecer caminhos colaborativos para a sustentabilidade. Reconhecer e valorizar essas dimensões é essencial para ampliar o impacto da ciência cidadã e consolidá-la como uma aliada fundamental na construção de futuros mais justos e resilientes.

Nesse sentido, a aplicação integrada dessas cinco dimensões da ciência cidadã na bacia do reservatório da UHE Furnas representa oportunidade concreta de fortalecer a gestão participativa de recursos hídricos, promover o engajamento comunitário na conservação ambiental e gerar dados estratégicos para enfrentar os desafios socioambientais da bacia com base no conhecimento colaborativo e justiça territorial (Quadro 3).

**Quadro 3 - As cinco dimensões da Ciência Cidadã e seus desdobramentos no território da bacia do reservatório da UHE Furnas.**

Dimensão	Descrição	Perspectiva na bacia da UHE Furnas
<b>1. Científica</b>	Refere-se à produção de conhecimentos com rigor metodológico, coleta de dados confiável e validação científica de resultados obtidos com apoio da comunidade.	Capacitação comunitária para coleta de dados sobre habitats físicos do entorno, qualidade de água, diversidade biológica e serviços ecossistêmicos fornecidos por matas ciliares. Utilização de protocolos padronizados e validação de dados com bases técnicas.
<b>2. Educacional</b>	Promove alfabetização científica e ambiental, desenvolve o pensamento crítico e incentiva o envolvimento com temas socioambientais.	Realização de capacitações, monitoramentos participativos e divulgação científica sobre serviços ecossistêmicos, sustentabilidade e ODS voltados a jovens e educadores locais.
<b>3. Participativa</b>	Envolve a comunidade em diferentes etapas da pesquisa, promovendo corresponsabilidade e valorização de saberes locais.	Enfoque na participação ativa da comunidade nos debates sobre os resultados e na proposição de ações locais de mitigação de impactos e restauração ecológica.
<b>4. Informacional</b>	Refere-se à sistematização, transparência e disseminação de dados e conhecimentos gerados, acessíveis a diferentes públicos.	Compartilhamento comunitário de resultados, em plataformas digitais e reuniões com órgãos públicos; contribuição aos indicadores ambientais locais e regionais.
<b>5. Política</b>	Está relacionada ao impacto da ciência cidadã na formulação de políticas públicas, fortalecimento de governança ambiental e empoderamento social.	Subsídio a propostas de proteção de matas ciliares e gestão participativa da água em conselhos e audiências públicas municipais, com base nos dados e nas percepções locais.

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em Bonney et al. (2009), Pandya (2012), Ceccaroni et al. (2017) e dados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG.

### 3 Olhares que contam: o “poder” do Monitoramento Ambiental Participativo

A gestão corporativa eficaz frente aos impactos sobre a biodiversidade tem sido reconhecida como elemento central para a mitigação de crises ambientais globais. Do ponto de vista empresarial, impactos positivos bem gerenciados e transparentemente relatados podem gerar vantagens competitivas e reputacionais. Nesse contexto, ganha força o conceito de “nature positive”, com ações orientadas à conservação, restauração e manejo sustentável dos ecossistemas, considerando ganhos líquidos para a natureza em escalas espaciais e temporais apropriadas.

Com base nessa abordagem, diversas empresas têm buscado alinhar suas metas ambientais à estrutura Ambiental, Social e Governança (do inglês Environmental, Social and Governance, ESG), que visa integrar a geração de valor econômico à responsabilidade socioambiental. Um dos pilares dessa estrutura é a compensação dos impactos negativos (por exemplo, invasões de espécies não nativas), especialmente no que diz respeito à redução da perda de biodiversidade em comparação com um cenário de não intervenção. No entanto, essas compensações frequentemente envolvem práticas tradicionais de subsistência, o que requer mudanças de comportamento e maior engajamento por parte das comunidades diretamente afetadas.

Nesse cenário, a ciência cidadã surge como ferramenta estratégica para ampliar a participação social em processos de pesquisa, formulação de políticas públicas e promoção da diplomacia científica. Definida como o envolvimento ativo do público em projetos científicos, essa prática tem crescido por permitir a colaboração entre cientistas e cidadãos na produção de conhecimento relevante para a sociedade. Diversas iniciativas de monitoramento participativo e governança ambiental demonstram o potencial da ciência cidadã para promover engajamento público e fortalecer a implementação de políticas voltadas à sustentabilidade. As iniciativas de ciência cidadã na bacia do reservatório da UHE Furnas tiveram como objetivo promover a formação e capacitação de comunidades locais por meio de metodologias científicas validadas, articulando temas como os serviços ecossistêmicos, Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, inserção da sociedade em processos de monitoramento ambiental participativo e subsídio à formulação de políticas públicas. Essas ações reforçam a conexão entre práticas científicas e metas ESG, especialmente no que se refere ao engajamento social nas estratégias de sustentabilidade (França et al. 2025). Fundamentadas em princípios de transversalidade, diálogo de saberes e protagonismo comunitário, as atividades envolveram a implantação de um programa de monitoramento ambiental participativo, com foco nos habitats físicos do entorno, na qualidade da água, na diversidade biológica e nos serviços ecossistêmicos fornecidos por matas ciliares. O programa contou com a participação de estudantes e professores da educação básica de escolas públicas situadas nos municípios limítrofes ao reservatório da UHE Furnas.

A inclusão dessas ações reforça a vertente democrática da ciência cidadã ao permitir que a sociedade

participe não apenas da coleta de dados, mas também da concepção das investigações e da apropriação dos resultados. Essa abordagem busca promover a conscientização socioambiental, fortalecer o papel das comunidades na gestão do território da bacia do reservatório da UHE Furnas e, futuramente, contribuir para políticas públicas mais eficazes na região. Ao conectar ciência cidadã, ESG e ODS, o Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, consolidou um modelo participativo de conservação ambiental, no qual a produção compartilhada de conhecimento impulsiona uma governança mais integrada, responsável e sustentável (Figura 2).



Figura 2: Representação das ações de ciência cidadã na bacia da UHE Furnas, promovendo o engajamento comunitário na conservação de ecossistemas aquáticos e terrestres.

# 4

## Do planejamento à ação: nossa trajetória metodológica

A proposta metodológica do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, foi fundamentada na promoção da ciência cidadã como ferramenta de formação e empoderamento das comunidades locais. Desde o início, foi estimulada a produção compartilhada de conhecimentos, com foco no engajamento da população em diferentes etapas do processo científico, na promoção da educação científica e tecnológica e na construção coletiva de políticas públicas ambientais relevantes para a região. Inicialmente, priorizou-se o envolvimento de escolas públicas de municípios limieiros como ponto de partida para o desenvolvimento das ações, em reconhecimento ao seu papel na democratização do conhecimento e na mobilização social de crianças, jovens e educadores.

A implementação das ações seguiu um processo cuidadosamente planejado, iniciado com a definição de diretrizes metodológicas e estratégias operacionais. Essa etapa envolveu visitas técnicas e reuniões com representantes da AXIA Energia responsáveis pelo acompanhamento das questões socioambientais na bacia do reservatório da UHE Furnas, com o objetivo de alinhar expectativas, consolidar parcerias e integrar ações previamente realizadas por ambas as instituições. As ações foram articuladas de forma a preservar a linha de atuação da AXIA Energia junto às comunidades influenciadas pela UHE Furnas, seu reservatório e área de entorno.

Em seguida, foram realizados contatos com prefeituras, secretarias municipais de Meio Ambiente e Educação, além de escolas situadas em municípios previamente identificados como prioritários para o desenvolvimento das ações de educação ambiental do projeto. Essa priorização considerou critérios como a representatividade territorial na bacia do reservatório da UHE Furnas, a atuação prévia da AXIA Energia em projetos socioambientais nessas localidades e o potencial de articulação com as redes de ensino locais. A proposta metodológica garantiu às instituições de educação básica autonomia na definição dos locais de estudo e das turmas envolvidas, respeitando suas realidades específicas. Essa abordagem reforçou o protagonismo de docentes e estudantes, promovendo maior engajamento e adaptabilidade às condições locais.

A seleção das escolas participantes considerou critérios como o interesse demonstrado nos contatos iniciais, a localização geográfica, a infraestrutura disponível e a articulação institucional. Esse processo culminou com a elaboração e envio de cartas-convite às instituições pré-selecionadas, acompanhados por articulações com gestores públicos e lideranças locais, o que reforçou o caráter colaborativo e interinstitucional da iniciativa. Assim, foi consolidada uma metodologia dinâmica, participativa e territorialmente sensível, voltada à transformação do envolvimento comunitário em ação concreta para o monitoramento e a conservação de recursos hídricos na bacia do reservatório da UHE Furnas.

# 5

## Conhecendo o território: um olhar socioambiental sobre as escolas na região da UHE Furnas

A crescente demanda por ações sustentáveis e estratégias de engajamento social na conservação ambiental tem impulsionado a implementação de projetos que integram ciência, educação e participação cidadã. Nesse cenário, foram desenvolvidas iniciativas de ciência cidadã voltadas ao envolvimento da comunidade escolar nos municípios limieiros ao reservatório da UHE Furnas, com foco na realização de uma avaliação ecológica participativa de ecossistemas aquáticos. A proposta baseou-se na adaptação de protocolos científicos à realidade da educação básica (França et al. 2019a, França et al. 2019b), com o objetivo de promover, como desdobramentos futuros, a sensibilização ambiental, a formação de jovens protagonistas e a produção de dados relevantes para a gestão dos recursos hídricos.

Para alcançar esse propósito, nossas ações foram organizadas em torno de três objetivos específicos: (i) produção de materiais didático-pedagógicos voltados à ciência cidadã, alinhados às diretrizes de sustentabilidade e aos princípios ESG; (ii) capacitação de professores e estudantes em práticas de monitoramento ambiental participativo e conservação de biodiversidade; e (iii) avaliação de qualidade da água na bacia hidrográfica da UHE Furnas, com base em parâmetros abióticos e bioindicadores bentônicos coletados por cientistas cidadãos, promovendo, assim, o fortalecimento da educação ambiental e a formação de recursos humanos qualificados.

As ações desenvolvidas no âmbito do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, foram conduzidas de forma articulada, envolvendo diferentes estratégias que se complementaram ao longo do processo. Uma das frentes foi a definição das estratégias de atuação, que incluíram a seleção dos conceitos ecológicos a serem abordados e a elaboração de materiais lúdico-didáticos para facilitar a compreensão dos conteúdos. Paralelamente, foram enviadas cartas-convite às 489 escolas públicas de educação básica nos municípios limieiros ao reservatório da UHE Furnas, com o propósito de estimular o engajamento institucional. As instituições participantes foram georreferenciadas e inseridas em um mapa interativo que também contemplava os pontos de coleta do monitoramento convencional (científico), visando aproximar as escolas das estações de amostragem e ampliar a disseminação e apropriação dos resultados do projeto (Figura 3).

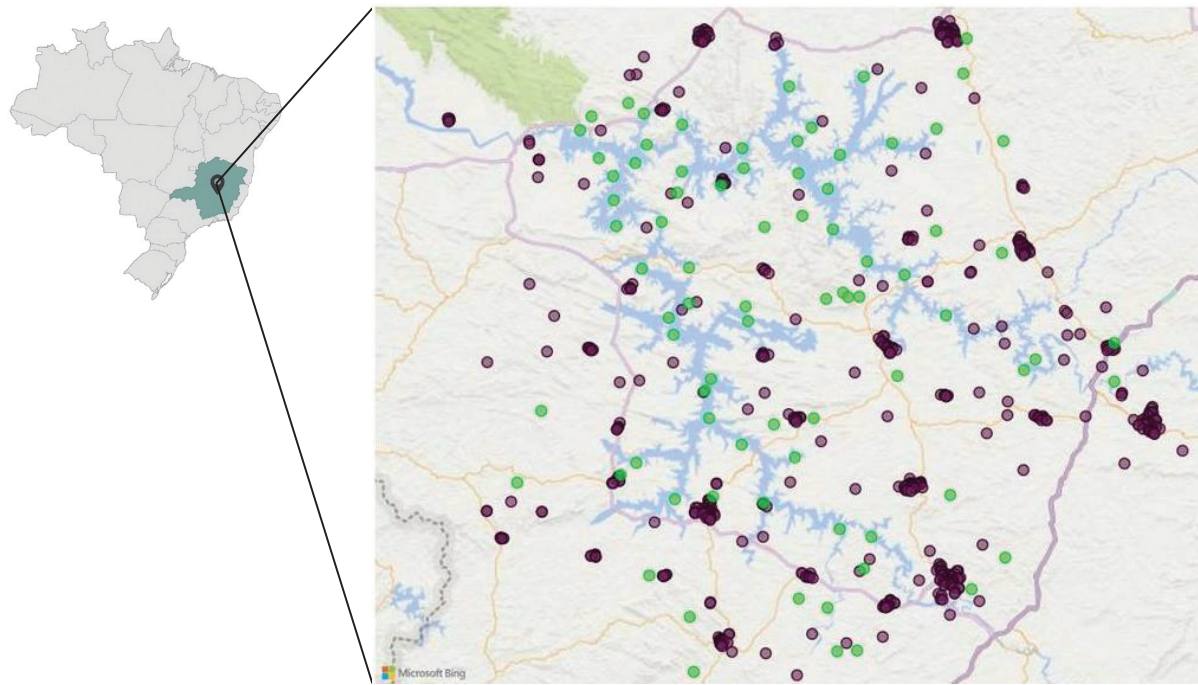


Figura 3 - Instituições públicas municipais e estaduais de ensino básico (pontos arroxeados) e estações amostrais (pontos verdes) inseridas na bacia hidrográfica da UHE Furnas.

O contato com as escolas interessadas ocorreu por meio de reuniões presenciais com representantes de 11 instituições de ensino que atendem aos anos finais do ensino fundamental I (a partir do 5º ano), ensino fundamental II e ensino médio. Nessas reuniões, foram detalhados os objetivos, as atividades propostas e o cronograma previsto, além de serem definidos os professores e as turmas participantes. Cada escola, considerando as particularidades do território onde está inserida, escolheu o ecossistema aquático a ser monitorado, fortalecendo o vínculo entre o projeto e a realidade local, e ampliando as possibilidades de engajamento da comunidade no cuidado com seus recursos hídricos.



Foto: Bruna Vieira

## 6

### Mãos na água, olhos na ciência: a aplicação de protocolos de monitoramento ambiental participativo

No desenvolvimento do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, foram promovidos treinamentos teóricos e práticos com professores e estudantes de sete escolas participantes. A formação teórica abordou temas como os usos múltiplos da água, os bens e serviços ecossistêmicos, a importância de matas ciliares, a gestão de bacias hidrográficas, as pressões antrópicas sobre os ecossistemas aquáticos e a utilização de bioindicadores bentônicos como ferramentas de avaliação de qualidade da água. Desde esse momento, os resultados obtidos pelo projeto na área de influência da UHE Furnas começaram a ser compartilhados com a comunidade escolar.

As atividades práticas incluíram visitas a campo para a aplicação de protocolos de avaliação ecológica rápida de habitats físicos, coleta de água e bioindicadores bentônicos (França & Callisto 2019), cuja análise foi posteriormente conduzida em sala de aula. Também foram realizadas atividades de identificação dos serviços ecossistêmicos oferecidos pelas matas ciliares. A classificação dos ecossistemas monitorados considerou os níveis de perturbação (mínimo, moderado ou alto), com base na qualidade dos habitats, qualidade de água e na presença de bioindicadores.

O monitoramento ambiental participativo foi desenvolvido de forma contínua, com a aplicação mensal das metodologias pelos estudantes e professores. Ao longo desse processo, foram produzidos materiais de divulgação científica, como banners, maquete sobre proteção de matas ciliares, cartilha, jogos de cartas, e apresentações orais, que permitiram aos cientistas cidadãos compartilhar os resultados com outras turmas, professores, funcionários, familiares e membros da comunidade local. Essa integração entre teoria, prática e comunicação científica fortaleceu a compreensão ambiental dos participantes e incentivou a proposição de soluções para os principais problemas ambientais identificados.

## 7

### Desenvolvimento de ferramentas em ciência cidadã

#### 7.1 - Monitoramento Ambiental Participativo de rios urbanos por estudantes cientistas

As ações de ciência cidadã trazem um potencial benefício mútuo quando aumentam nossa estimativa de dados sobre biodiversidade com o apoio da sociedade e concomitantemente, potencializam a capacidade da sociedade em lidar racionalmente com os complexos problemas ambientais. Nós atuamos na perspectiva de ciência cidadã com o monitoramento de ecossistemas aquáticos realizado pelo público escolar (professores

e estudantes da educação básica). Por meio de metodologias adaptadas das pesquisas científicas, nosso público-alvo avaliou influências humanas sobre: (i) área ripária, (iii) qualidade da coluna d'água e (iv) organismos aquáticos (Figura 4).



Figura 4 - Estudantes da educação básica somam esforços com a comunidade científica universitária na avaliação da qualidade ecológica de águas, baseada em metodologia acadêmica adaptada. Fonte: Elaborado por ChatGPT (2025).

As ações de ciência cidadã implementadas nas escolas de educação básica em sete municípios da bacia do reservatório da UHE Furnas foram realizadas em sete ecossistemas aquáticos distintos, com a participação de instituições que atendem aos níveis de ensino Fundamental I, Fundamental II e Médio. A primeira barreira enfrentada foi a resistência inicial ao engajamento por parte das comunidades escolares. Embora tenham sido contatadas 489 instituições de ensino, distribuídas nos municípios limieiros, apenas uma pequena parcela

aceitou participar da proposta, e o trabalho foi efetivamente implementado em sete escolas. Tal resistência socioambiental é comum em projetos de engajamento social e, muitas vezes, está relacionada a experiências anteriores marcadas pela descontinuidade das ações. Além disso, a inserção de novas atividades em um calendário escolar pré-definido apresenta desafios significativos, especialmente quando o planejamento não é realizado com antecedência suficiente. Para experiências futuras, será necessário estabelecer o contato com as escolas antes da definição do calendário letivo, o que pode favorecer a incorporação das atividades propostas. Assim, a implementação de programas de ciência cidadã deve priorizar a construção gradual de vínculos de confiança e o fortalecimento de parcerias duradouras, de modo que os próprios resultados gerem novas oportunidades de adesão e ampliem os efeitos positivos sobre a cidadania e a sustentabilidade ambiental.

Durante os anos de 2023 e 2024, foram capacitados 13 professores e 203 estudantes como cientistas cidadãos, por meio de ações realizadas nas sete instituições engajadas. As atividades de monitoramento conduzidas pelas escolas foram acompanhadas e validadas por especialistas e evidenciaram padrões consistentes de qualidade ecológica, demonstrando o potencial das práticas de ciência cidadã como ferramentas aplicáveis à sustentabilidade e aos princípios de ESG na bacia da UHE Furnas.

A avaliação ecológica foi conduzida com base em parâmetros físicos de habitat, contemplando métricas como estabilidade das margens, composição e diversidade estrutural do leito e presença de impactos antrópicos. Os resultados revelaram que seis dos sete trechos monitorados apresentaram níveis de perturbação entre moderados e altos, enquanto apenas um foi classificado como em boas condições ecológicas. O ecossistema mais degradado encontrava-se em área urbana com alta densidade populacional, cenário frequentemente associado à perda de qualidade ambiental em rios e lagos. Os ecossistemas classificados como moderadamente perturbados estavam localizados em áreas de menor densidade demográfica, com pressão urbana reduzida. Por outro lado, o trecho avaliado como minimamente perturbado situava-se em área de captação de água para abastecimento público, com manutenção frequente realizada por serviços municipais de saneamento.

A análise da qualidade da água, realizada com a utilização de kits colorimétricos e com base nos critérios da Resolução CONAMA nº 357/2005, evidenciou a influência da ocupação urbana em determinados pontos da bacia do reservatório da UHE Furnas. Em um dos ecossistemas aquáticos avaliados, os teores de fósforo (0,75 mg/L) e nitrogênio total (>3,0 mg/L) ultrapassaram os limites estabelecidos para águas de Classe 2, que permitem o contato direto com a água. Em outro ponto, os níveis de oxigênio dissolvido foram inferiores ao mínimo exigido (3,0 mg/L), possivelmente em razão do período seco e da intensificação do processo de eutrofização, associado à proliferação de macrófitas aquáticas e ao acúmulo de matéria orgânica.

A aplicação de um índice biológico com base em macroinvertebrados bentônicos permitiu a classificação dos ecossistemas em três categorias: minimamente perturbados, moderadamente perturbados e altamente

perturbados. O grupo mais sensível à poluição representou apenas 0,86% dos 583 organismos registrados, enquanto os grupos tolerantes e resistentes somaram 19,38% e 79,76%, respectivamente, refletindo uma baixa diversidade biológica e predominância de espécies adaptadas a ambientes degradados. A avaliação integrada, combinando indicadores físicos, químicos e biológicos, resultou na seguinte classificação geral dos ecossistemas monitorados: um trecho em condição de referência (minimamente perturbado), quatro trechos moderadamente perturbados e dois trechos altamente perturbados.

A parceria entre Universidades e empresas do setor elétrico em projetos de ciência cidadã permitiu o engajamento efetivo de professores e estudantes da educação básica no monitoramento ambiental participativo de ecossistemas aquáticos na bacia do reservatório da UHE Furnas. Essa experiência fortaleceu a educação ambiental local e formou agentes multiplicadores capazes de ampliar a consciência crítica sobre a conservação da biodiversidade e a gestão sustentável de recursos hídricos.

### 7.2- Protocolo de Avaliação de Serviços Ecosistêmicos de Matas Ciliares – PARSEMA

As matas ciliares desempenham papel fundamental na proteção e manutenção de ecossistemas aquáticos, especialmente em regiões com a presença de empreendimentos hidrelétricos. Esses ecossistemas atuam como filtros naturais, contribuindo para a qualidade da água ao reduzir a entrada de sedimentos, nutrientes e poluentes nos reservatórios. Além disso, ajudam a regular o fluxo hídrico, controlando a erosão das margens, estabilizando o solo e favorecendo a recarga de aquíferos. Em áreas sob influência de usinas hidrelétricas, como no entorno do reservatório da UHE Furnas, a preservação de matas ciliares é estratégica para garantir a saúde de sistemas aquáticos, a vida útil do reservatório e a eficiência dos serviços prestados por esses empreendimentos, como a geração de energia e o abastecimento de água. Sua conservação é, portanto, essencial para equilibrar os usos múltiplos da água e minimizar os impactos socioambientais.

Para contribuir com a conservação de ecossistemas e ampliar o engajamento social por meio da ciência cidadã, foi desenvolvido um Protocolo de Avaliação de Serviços Ecosistêmicos de Matas Ciliares (PARSEMA), adaptado para estudantes de diferentes faixas etárias. A proposta buscou aproximar a comunidade escolar dos processos ecológicos locais, promovendo a percepção crítica sobre os benefícios que esses ecossistemas oferecem e incentivando ações de cuidado com o ambiente. Projetos de ciência cidadã que envolvem estudantes na coleta de dados ambientais fortalecem a conservação de biodiversidade e dialogam com os pilares de Ambiente, Sociedade e Governança (ESG), fundamentais para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis. De acordo com a Avaliação Ecosistêmica do Milênio (2005), que classifica os serviços ecosistêmicos em quatro categorias interdependentes, o PARSEMA avalia especialmente os serviços de suporte e regulação prestados pelas matas ciliares, essenciais à conservação dos ecossistemas aquáticos. As matas ciliares oferecem serviços de suporte por meio da manutenção da biodiversidade, ciclagem de nutrientes, formação e conservação do solo e por servirem de habitat para diversas espécies. No âmbito dos serviços de regulação, contribuem de forma significativa para o controle da erosão, a estabilização das margens dos corpos d'água, a filtragem de poluentes e sedimentos, a regulação do microclima e a manutenção do regime hídrico, assegurando a qualidade e a disponibilidade da água (Figura 5).

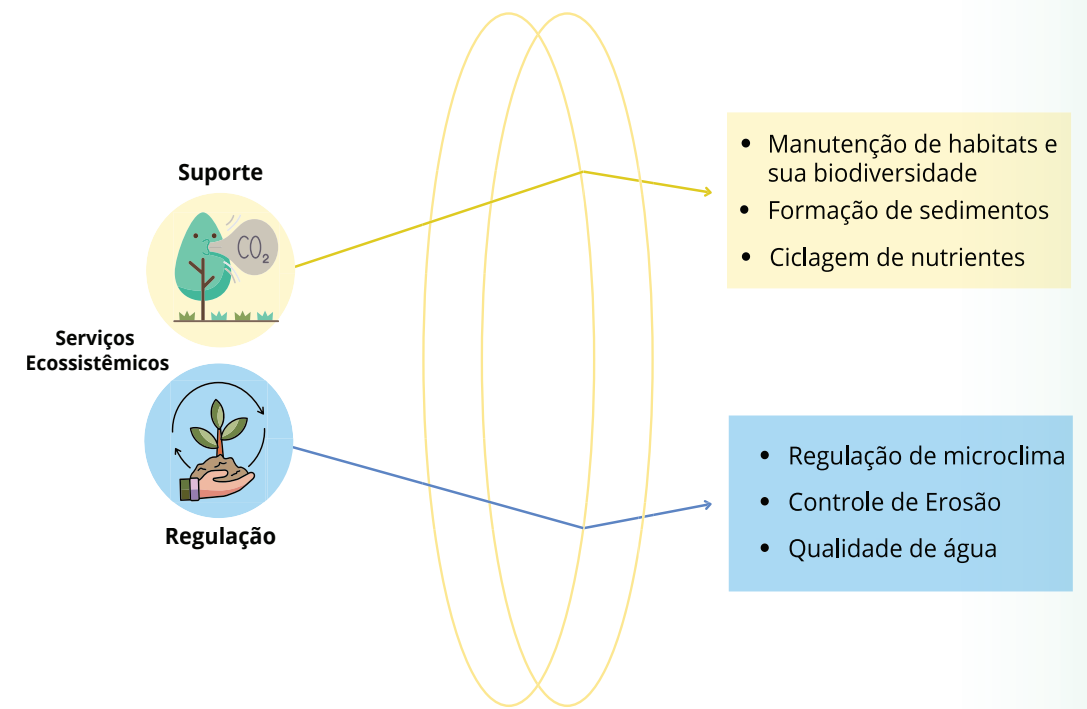


Figura 5: Exemplos de serviços ecosistêmicos de suporte e regulação fornecidos por matas ciliares.

Ao avaliar os serviços ecosistêmicos prestados pelas matas ciliares de ecossistemas aquáticos próximos às escolas, os alunos exploraram temas como a qualidade e escassez de água, erosão e assoreamento, desmatamento e poluição de rios – questões diretamente relacionadas aos desafios de mudanças globais. Essas ações educativas, ao abordarem dimensões ecológicas e sociais da conservação, podem ser associadas às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas, especialmente o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e o ODS 15 (Vida terrestre), reforçando o papel da educação ambiental na construção da saúde planetária (saúde única).

O protocolo PARSEMA tem como objetivo disponibilizar ferramenta de avaliação ecológica rápida e participativa de metaecossistemas ripários, permitindo que estudantes identifiquem o estado de conservação de matas ciliares e reconheçam os bens e serviços ecosistêmicos que estão sendo mantidos ou comprometidos em sua região. O PARSEMA é composto por 10 questões que abordam diferentes aspectos das matas ciliares e seus riachos associados. Cada pergunta está relacionada a um serviço ecosistêmico das categorias de suporte ou regulação (Figura 6). Ao final da aplicação, a pontuação obtida permite classificar o ecossistema avaliado em um dos três níveis do gradiente ambiental: Referência, Alterado ou Degradado (Figura 7).

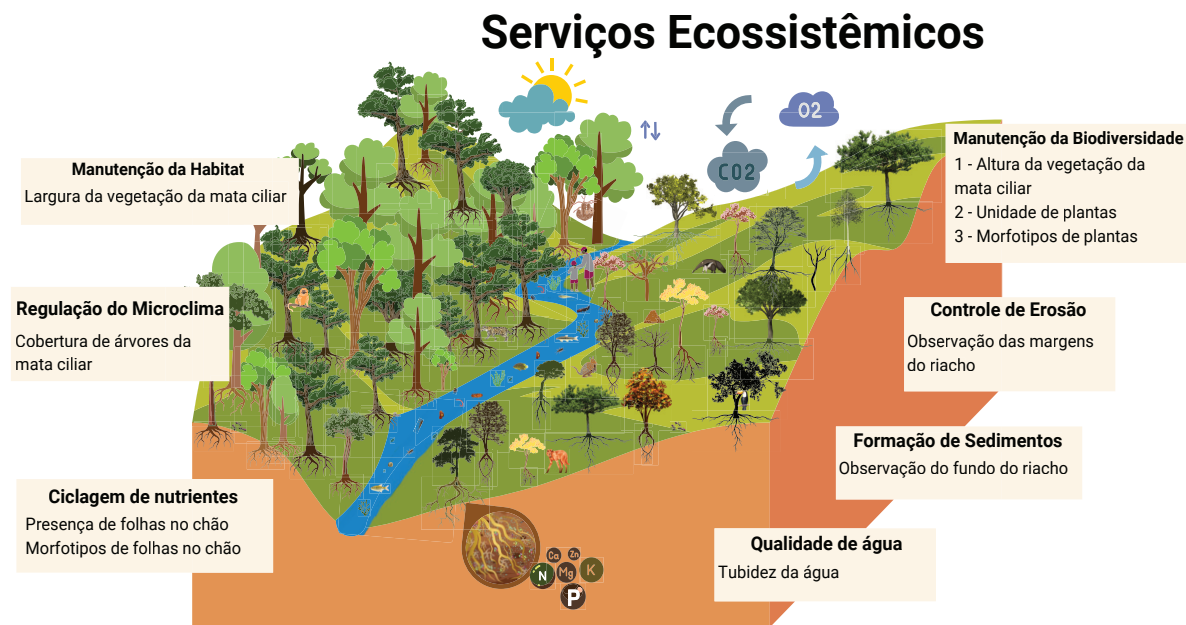


Figura 6 - Serviços ecossistêmicos de suporte e de regulação avaliados no protocolo PARSEMA. (Adaptado de Ferreira et al. 2023 - doi: 10.1007/s10750-022-05095-1)

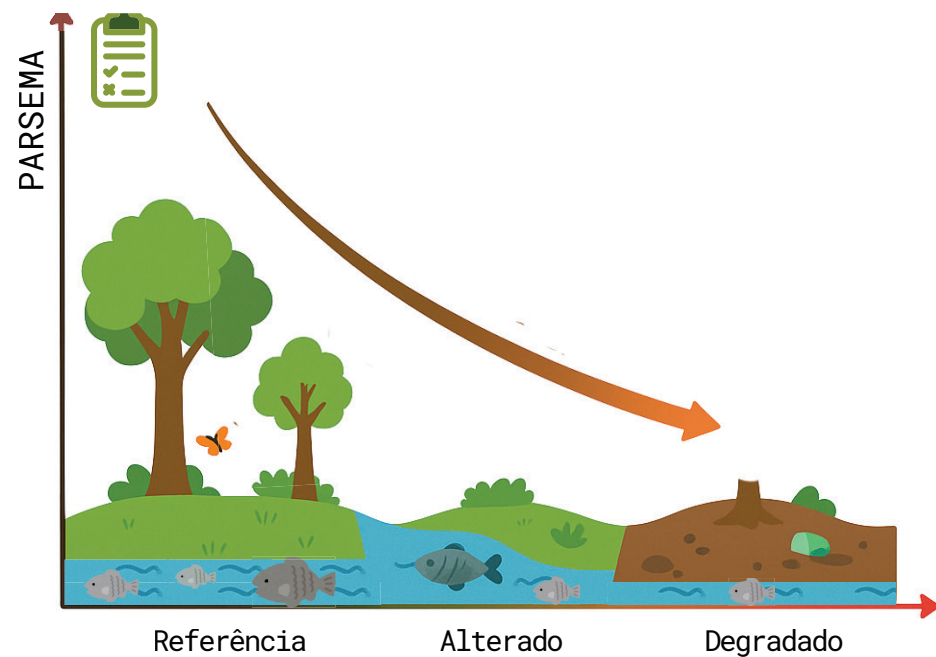


Figura 7: Relação entre a qualidade ambiental e os valores do protocolo PARSEMA ao longo de um gradiente de condições ambientais.

As atividades de aplicação do PARSEMA foram realizadas em diferentes contextos ambientais, envolvendo quatro instituições de ensino nos municípios de Formiga, Alfenas e Alterosa. Em 100% das unidades escolares participantes, os ecossistemas avaliados foram diagnosticados como degradados, de acordo com os critérios do protocolo. As análises consideraram diferentes tipos de ecossistemas aquáticos, incluindo lagoas, córregos e reservatórios, todos com evidências de impactos ambientais significativos na bacia de drenagem. Esses diagnósticos revelam um cenário preocupante quanto à conservação das áreas ribeirinhas e reforçam a importância de ações educativas voltadas à recuperação e valorização de ecossistemas aquáticos e sua vegetação ciliar (Figura 8).

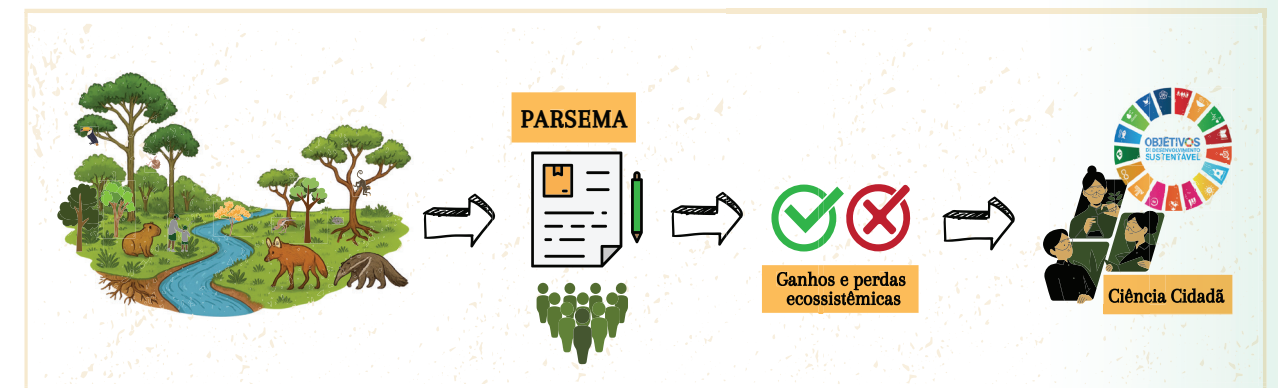


Figura 8: Representação gráfica do uso do Protocolo PARSEMA no contexto de ciência cidadã. A partir da observação de áreas com vegetação ciliar, a comunidade escolar aplica o protocolo para identificar ganhos e perdas relacionados aos serviços ecossistêmicos.

## 8

### Percepções de estudantes sobre insetos aquáticos a partir do Monitoramento Ambiental Participativo de qualidade da água

A ciência cidadã, quando articulada com práticas de educação ambiental, tem o potencial de transformar a forma como os participantes se relacionam com o meio ambiente. Nesse contexto, o Monitoramento Ambiental Participativo (MAP) de qualidade da água configura-se como uma abordagem de ciência cidadã capaz de sensibilizar estudantes sobre os ecossistemas aquáticos e sua biodiversidade (Figura 9). Ao envolver os alunos em atividades práticas, o MAP estimula o pensamento crítico, promove o conhecimento científico-ambiental e fortalece a valorização dos recursos hídricos, da biodiversidade e do engajamento em ações de conservação. A ciência cidadã promove o envolvimento público na produção de conhecimento científico,

enquanto a educação ambiental estimula a aprendizagem crítica sobre o meio ambiente. O monitoramento ambiental participativo articula ambas as dimensões ao engajar a sociedade em práticas investigativas e educativas voltadas à conservação ambiental.

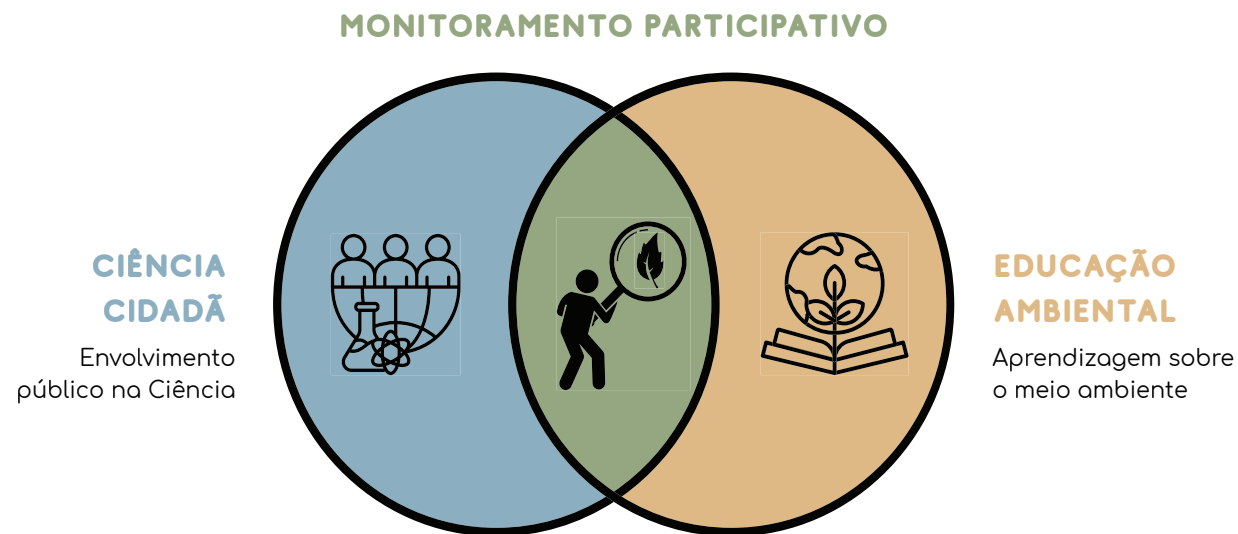


Figura 9 - Representação do monitoramento ambiental participativo como interseção entre ciência cidadã e educação ambiental.

Entre as estratégias metodológicas adotadas no projeto IBI UHE Furnas & UFMG, destaca-se a utilização de métodos mistos, qualitativos e quantitativos, com o objetivo de investigar os impactos do Monitoramento Ambiental Participativo (MAP) sobre a percepção, o comportamento e o conhecimento de estudantes da educação básica sobre os macroinvertebrados bentônicos. Esses organismos, amplamente reconhecidos como bioindicadores, representam uma parcela importante da biodiversidade aquática e atuam como indicadores de qualidade ambiental.

O MAP foi conduzido em escolas localizadas na bacia do reservatório da UHE Furnas, incluindo turmas dos ensinos fundamental e médio. Nesta etapa da pesquisa, os instrumentos metodológicos foram aplicados exclusivamente a estudantes do Ensino Fundamental II por meio de três estratégias complementares: nuvem de palavras, desenho livre e questionários (Figura 10). Esses instrumentos foram utilizados em duas etapas distintas – antes e depois das atividades práticas – permitindo uma análise comparativa dos efeitos do projeto sobre o engajamento dos estudantes com os temas ambientais abordados.

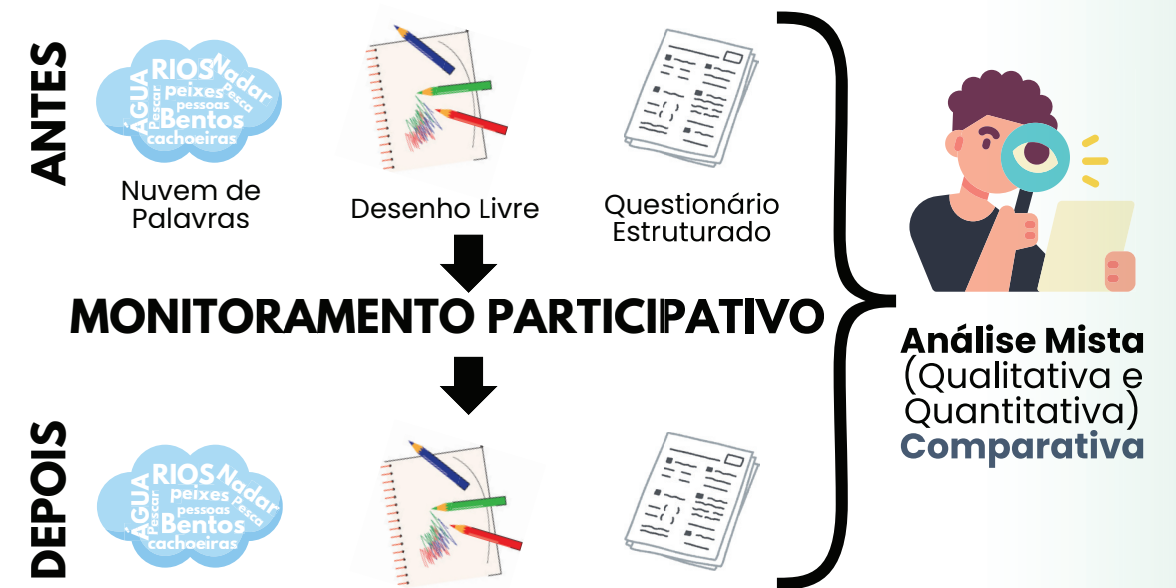


Figura 10 - Esquema dos instrumentos metodológicos aplicados para avaliação das mudanças de percepção, comportamento e conhecimento dos estudantes: nuvem de palavras, desenho livre e questionário estruturado.

As análises qualitativas e quantitativas possibilitaram comparar a visualização, avaliação e reflexão dos estudantes sobre o conhecimento e as percepções ambientais antes e após as atividades participativas de monitoramento. A integração dessas abordagens oferece uma compreensão mais ampla e aprofundada sobre os efeitos do Monitoramento Ambiental Participativo (MAP).

Os dados obtidos apontaram mudanças significativas na forma como os estudantes passaram a perceber os organismos aquáticos, com destaque para os insetos, reconhecidos como bioindicadores de qualidade da água. Antes da participação nas atividades do MAP, muitos estudantes nunca haviam observado diretamente a biodiversidade no ecossistema monitorado. Após o MAP, observou-se um aumento expressivo na capacidade dos estudantes de identificar diferentes tipos de organismos, especialmente insetos aquáticos, tanto em atividades conjuntas quanto em observações individuais. Esse resultado evidencia que o contato direto com os organismos, promovido pelas atividades práticas de coleta e triagem, contribuiu de maneira significativa para o reconhecimento, valorização e incorporação dos insetos aquáticos como indicadores ecológicos.

As evidências visuais, como os desenhos produzidos pelos estudantes e as nuvens de palavras geradas a partir de suas respostas, reforçam essa ampliação do conhecimento ecológico. Após o MAP, os desenhos passaram a incluir representações específicas de insetos aquáticos, como baratas d'água e quironomídeos, além de elementos associados à vegetação ribeirinha, como plantas e mata ciliar (Figura 11). Da mesma forma,

a análise de nuvens de palavras revelou o surgimento de termos diretamente relacionados à biodiversidade aquática, como “animais aquáticos”, “larvas” e “mosquito”, bem como o destaque crescente de palavras previamente mencionadas, como “animais”, “insetos” e “bichos” (Figura 12).

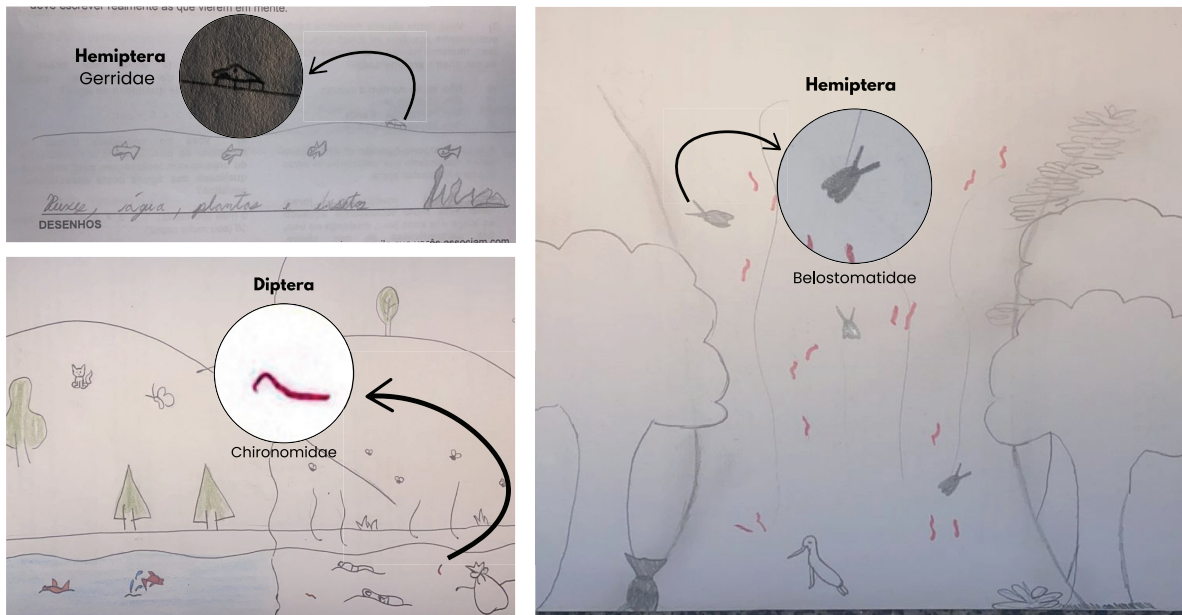


Figura 11 - Desenhos elaborados pelos estudantes após o monitoramento ambiental participativo, evidenciando a presença de insetos aquáticos.

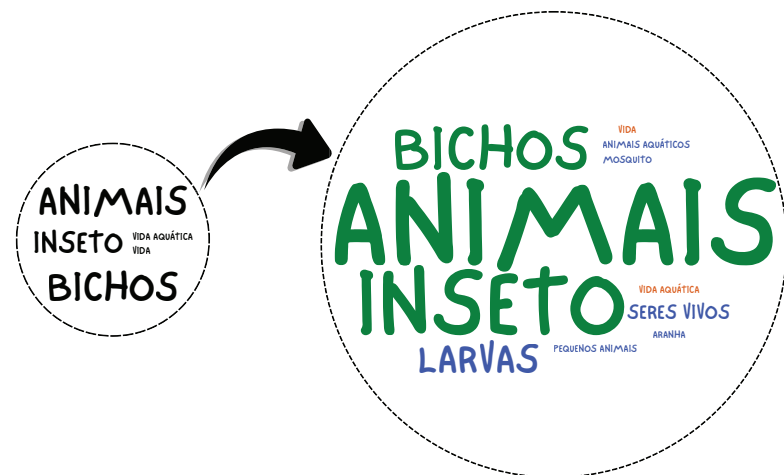


Figura 12- Nuvens de palavras geradas a partir das respostas dos estudantes antes e depois da intervenção educativa do MAP, com foco em insetos aquáticos. À esquerda, as respostas antes do MAP; à direita, as respostas após a intervenção.

Esses resultados evidenciam que o monitoramento da qualidade da água foi ferramenta eficaz de educação ambiental e divulgação científica na bacia da UHE Furnas. Ao promover o contato direto com os ecossistemas e seus organismos, o MAP contribuiu não apenas para o aprendizado, mas também para a transformação da percepção dos estudantes sobre os ecossistemas aquáticos. Esses resultados reforçam o potencial da ciência cidadã como estratégia para democratizar o conhecimento e fomentar o engajamento das comunidades na conservação de biodiversidade e recursos hídricos, de forma mensurável.

## 9

### Entre quadras, laboratórios e distâncias: o panorama das escolas participantes

A caracterização das escolas participantes nas atividades de ciência cidadã do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, incluiu a análise de diferentes dimensões relacionadas à infraestrutura física e ao corpo docente e discente, bem como aspectos socioeducacionais relevantes. As escolas selecionadas apresentavam, em sua maioria, prédio próprio e infraestrutura urbana básica adequada, com acesso à água, energia, esgoto e coleta de lixo. Nenhuma escola compartilhava o prédio com outras instituições, o que favorece maior autonomia nas atividades escolares. Contudo, em estudos futuros, seria interessante incluir escolas com condições mais precárias de infraestrutura como forma de promover comparações entre diferentes realidades. Essas comparações permitirão avaliar como diferentes contextos estruturais influenciam a efetividade das ações de ciência cidadã.

Em relação à infraestrutura de apoio ao aprendizado, observou-se que todas as escolas contavam com internet e laboratório de informática, porém a presença de laboratório de ciências e salas de aulas especializadas foi mais restrita. Apenas uma escola dispunha de laboratório de ciências, e nenhuma possuía salas específicas para artes, música ou dança. Para atividades de lazer, a maioria das escolas contava com quadra esportiva, mas poucas dispunham de áreas verdes ou pátios adequados. A oferta de alimentação escolar estava presente em todas as instituições, sendo este um quesito de fundamental importância para todos os estudantes na região.

As escolas apresentavam diferentes níveis de ensino, desde a educação infantil até o ensino médio, incluindo a Educação de Jovens e Adultos (EJA). Essa diversidade refletiu na composição do corpo discente, que variou em tamanho, faixa etária e distribuição por sexo e cor/raça. A maioria dos estudantes se autodeclarou negra ou branca, sendo que, em algumas escolas, os negros eram maioria e, em outras, os brancos eram maioria. Observou-se uma presença muito baixa ou nula de estudantes indígenas ou quilombolas nas diferentes escolas, sendo que, no geral, esses grupos correspondiam a menos de 0,1% do total. Entretanto, a autodeclaração de cor/raça ainda apresenta lacunas em algumas escolas, dificultando análises mais precisas.

Embora todas as escolas estivessem localizadas em áreas urbanas, uma parte significativa dos estudantes residia em zonas rurais ou até mesmo em outros municípios, o que indicava um deslocamento diário considerável. Além disso, destaca-se a presença de elevadas taxas de distorção idade-série em diferentes escolas, especialmente nos anos finais dos ensinos fundamental e no ensino médio, principalmente de estudantes do sexo masculino, indicando atrasos no percurso escolar.

O perfil dos professores revelou maioria feminina (70,8%), especialmente nas escolas com educação infantil. A idade média variou conforme o nível de ensino ofertado, sendo professores mais jovens frequentes nas escolas com educação infantil e anos iniciais do ensino fundamental. O grau de escolaridade dos docentes foi, em geral, elevado: a maioria possuía curso superior com licenciatura (94,0%) e uma parcela expressiva contava com especialização (45,7%). A formação dos professores refletiu o foco de atuação das instituições: nas escolas com Educação Infantil e anos iniciais do Ensino Fundamental, predominavam profissionais com formação em Pedagogia, enquanto nos demais níveis de ensino foram comuns licenciaturas nas áreas de Ciências Humanas, Ciências da Natureza ou Letras. A maioria dos professores residia e havia nascido no próprio município onde lecionava, indicando forte ligação com a comunidade local. A contratação era majoritariamente por concurso público, mas algumas escolas apresentavam maior proporção de contratos temporários.

Essa caracterização detalhada permite compreender o contexto socioeducacional no qual nossas ações foram desenvolvidas, fornecendo subsídios tanto para a análise dos resultados quanto para a elaboração de estratégias de engajamento mais eficazes. Além disso, possibilita avaliações espaciais, incluindo comparações entre municípios limieiros e não limieiros, bem como entre diferentes regiões influenciadas por afluentes distintos, como o Rio Grande e o Rio Sapucaí, no contexto da bacia da UHE Furnas. Também favorece avaliações temporais, permitindo verificar possíveis melhorias das condições ao longo do tempo.

10

## Cartilha ABCDEcologia: produto eco-tecnológico em educação ambiental e ciência cidadã

No âmbito das ações de educação ambiental e ciência cidadã desenvolvidas pelo Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, foi elaborada a Cartilha ABCDEcologia como proposta de inovação eco-tecnológica transdisciplinar na educação ambiental.

O desenvolvimento desta cartilha foi motivado pelas experiências acumuladas em atividades de educação ambiental realizadas nos 35 municípios limieiros à UHE Furnas e pelas pós-reflexões sobre como os

resultados de pesquisa e inovação poderiam subsidiar o trabalho de professores de Ciências e de Biologia em escolas. A partir de reuniões sistemáticas da equipe, foram definidos conceitos centrais em ecologia e elaborados materiais didáticos, como banners, infográficos e roteiros de jogos educativos, que foram incorporados à cartilha como ferramentas de apoio ao ensino e à aprendizagem.

A construção da Cartilha ABCDEcologia ocorreu em um processo transdisciplinar top-down, envolvendo desde estudantes do ensino médio e da graduação até pós-graduandos, pesquisadores e docentes de diferentes áreas, incluindo Ciências Biológicas, Engenharia Ambiental, Geografia, Ciência da Computação, Ecologia Aplicada e Educação Ambiental, vinculados à UFMG e à UFLA. Essa diversidade de formações contribuiu para a integração entre rigor científico, linguagem acessível e metodologias participativas.

O conteúdo da cartilha aborda temas relacionados à qualidade da água, à biodiversidade aquática, aos processos ecológicos e às pressões ambientais, estudados no âmbito do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG, e oferece subsídios para atividades de educação ambiental e de ciência cidadã. O material busca apoiar professores e estudantes no conhecimento das condições ecológicas da bacia da UHE Furnas, na compreensão das mudanças ambientais associadas às atividades humanas e na discussão de possíveis medidas mitigadoras em nível local. A cartilha está disponível gratuitamente em formato digital, com registro doi (Callisto et al. 2024). Associados ao conteúdo da cartilha, dois jogos didáticos também foram produzidos e estão disponíveis (Callisto et al. 2025a e 2025b).

11

## Compromisso com o futuro dos ecossistemas aquáticos

Deixamos como mensagem final a necessidade urgente de esforços transdisciplinares em pesquisa, formulação e verificação da inserção de políticas públicas, bem como em práticas voltadas ao desenvolvimento de alternativas para a conservação dos ecossistemas aquáticos - ambientes de enorme importância ecológica, social e econômica. Esses ecossistemas sustentam a biodiversidade de animais e plantas, regulam processos naturais e oferecem múltiplos benefícios para todas as espécies, incluindo os seres humanos. A gestão de recursos hídricos e os desafios associados ao seu manejo exigem a interconexão entre saberes e setores, com foco na implementação e no acompanhamento de soluções viáveis para a conservação dos ecossistemas aquáticos continentais, como os reservatórios hidrelétricos e suas bacias de drenagem (Figura 13).

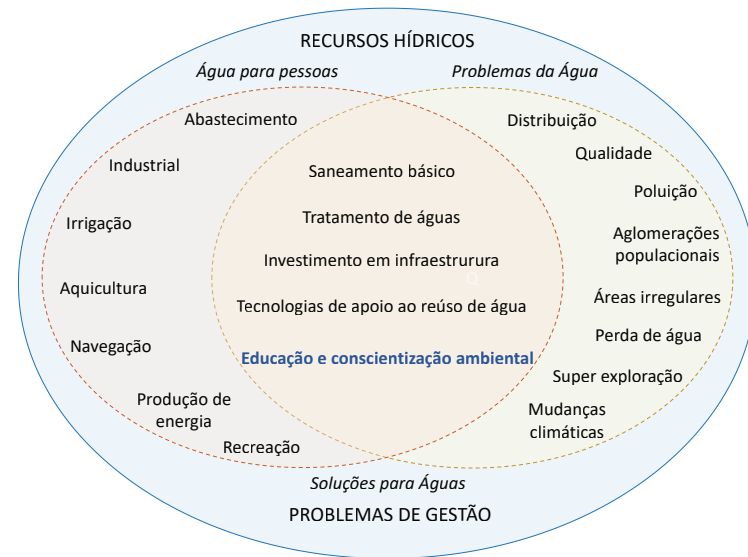


Figura 13 - Recursos hídricos e problemas de gerenciamento, interconexão necessária em busca de se incorporar soluções viáveis para ecossistemas aquáticos continentais (reservatórios e sua bacia de drenagem).

Nesse contexto, destaca-se a relevância da parceria entre a UFMG e a AXIA Energia, que viabilizou a integração entre ciência, educação e participação social, contribuindo de forma significativa para a construção de soluções mais justas, sustentáveis e baseadas na natureza. A incorporação de componentes sociais e educacionais em iniciativas de pesquisa ambiental pode ampliar o alcance e a efetividade das ações voltadas à conservação, ao favorecer a compreensão dos processos ecológicos e das interações entre biodiversidade, uso do território e sociedade. A experiência na área da UHE Furnas demonstra o potencial transformador dessas iniciativas e evidencia o potencial das parcerias entre universidades e empresas para viabilizar estudos integrados e ampliar a base de conhecimento sobre a biodiversidade aquática e os serviços ecossistêmicos associados, consolidando uma atuação institucional mais integrada, inovadora e comprometida com a transição para um futuro sustentável.

## Agradecimentos

Agradecemos às instituições de educação básica por acolherem o projeto e disponibilizarem tempo de suas aulas para a realização das atividades, com especial reconhecimento aos professores e estudantes que atuaram como cientistas cidadãos. Os autores também agradecem às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio por meio de bolsas de iniciação científica, mestrado, doutorado e produtividade em pesquisa (JSF e BBDG – FAPEMIG, Processo BPD-00071-22; BSV – CAPES, Processo 88887.900238/2023-00; MC – CNPq, Processo 304060/2020-8).

## Referências

- Bonney, R., Cooper, C.B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K.V., Shirk, J. 2009. Citizen science: a developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, 59 (11):977-984.
- Callisto, M., Döhler, B.B., Delayte, F.H., Silva, L.M., Milani, M.G., Silva, M.V.C.M., Pinho, M., Fróes, M., Alves, P.H.S., Lucena, P., Vieira, B.S., Madureira, K.H., Alonso, M.B., Sulzbacher, R., Rocha, A.S., Salvador, G.N., Santos, G.M., França, J.S., Amaral, P.H.M., Bueno, A.A.P., Domingues, G.F. 2024. Cartilha ABCDEcologia: inovação eco-tecnológica transdisciplinar em Educação Ambiental. Projeto IBI UHE Furnas, Financiamento AXIA Energia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 72pp. Doi:10.5281/zenodo.14013756.
- Callisto, M., Döhler, B.B., Delayte, F.H., Silva, L.M., Milani, M.G., Silva, M.V.C.M., Pinho, M., Fróes, M., Alves, P.H.S., Lucena, P., Vieira, B.S., Madureira, K.H., Alonso, M.B., Sulzbacher, R., Rocha, A.S., Salvador, G.N., Santos, G.M., França, J.S., Amaral, P.H.M., Bueno, A.A.P., Domingues, G.F. 2025. Isso é ESG? Jogo didático-educacional ODS e Sustentabilidade. Projeto IBI UHE Furnas, AXIA Energia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 78 cartas. Doi: 10.5281/zenodo.15284780.
- Callisto, M., Döhler, B.B., Delayte, F.H., Silva, L.M., Milani, M.G., Silva, M.V.C.M., Pinho, M., Fróes, M., Alves, P.H.S., Lucena, P., Vieira, B.S., Madureira, K.H., Alonso, M.B., Sulzbacher, R., Rocha, A.S., Salvador, G.N., Santos, G.M., França, J.S., Amaral, P.H.M., Bueno, A.A.P., Domingues, G.F., Alves, C.B.M 2025. É de casa? Jogo didático-educacional Invasões biológicas no reservatório da UHE Furnas, Projeto IBI UHE Furnas, Financiamento AXIA Energia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 41 cartas. Doi: 10.5281/zenodo.152842
- Ceccaroni, L., Bowser, A., Brenton, P. 2017. Civic education and citizen science: Definitions, categories, knowledge representation. In *Analyzing the role of citizen science in modern research*. IGI Global. 1-23.
- França, J.S., Solar, R., Hughes, R.M., Callisto, M. 2019a. Student monitoring of the ecological quality of neotropical urban streams. *Ambio*, 48: 867-878.
- França, J. S., Callisto, M. 2019. Monitoramento participativo de rios urbanos: por estudantes-cientistas. Belo Horizonte, MG: UFMG, 284pp.
- França, J., Montebrune, F., Callisto, M. 2019b. A ciência em ação: cidadania ecológica e sustentabilidade. *Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis*, 1330-1338
- França, J.S., Vieira, B.S., Döhler, B.B., Manzano, F.V., Tourinho, T.C.O., Callisto, M. 2025. Educação científica por meio de práticas ambientais e sociais. *Revista EletroEvolução*, 119: 46-54.
- Haines-Young, R., Potschin, M. 2018. *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) Guidance on the Application of the Revised Structure*, 5: 31pp.
- IPBES. 2022. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn: IPBES Secretariat.
- Queiroz-Souza, C., Viana, B., Ghilardi-Lopes, N., Kawabe, L., Alexandrino, E., França, J., Koffler, S., Saraiva, A., Loula, A. 2023. Opportunities and barriers for Citizen Science growth in Brazil: reflections from the first workshop of the Brazilian Citizen Science Network. *Citizen Science: Theory and Practice*, 8 (1):1-13.
- MEA – Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Washington, DC: Island Press. 155pp.
- Pandya, R.E. 2012. A framework for engaging diverse communities in citizen science in the US. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10 (6): 314–317.

CAPÍTULO

7

## DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE TRANSDISCIPLINAR DE INTEGRIDADE DO RESERVATÓRIO DA UHE-FURNAS (ITI-FURNAS)

Marcos Callisto, Marden S. Linares, Getulio Fonseca Domingues, Diego R. Macedo, Paulo S. Pompeu, Ricardo R. C. Solar, Karoline H. Madureira, André Golgher, Pedro H.M. Amaral, Carlos B.M. Alves, Luana Caiafa, Tiago C.O. Tourinho, Felipe V. Manzano & Paulo S. Formagio

**Palavras-chave:**  
*integridade ecológica,  
qualidade ambiental,  
sustentabilidade,  
IQA, IDI, IFA*

Como citar este capítulo:  
Callisto, M., Linares, M.S., Fonseca, G.F., Macedo, D.R., Pompeu, P.S., Solar, R.R.C., Madureira, K.H., Golgher, A., Amaral, P.H.M., Alves, C.B.M., Caiafa, L., Tourinho, T.C.O. Manzano, F.V. & Formagio, P.S. (2026). Desenvolvimento do Índice Transdisciplinar de Integridade do Reservatório da UHEFurnas (ITI-Furnas). In: Callisto, M. & Alves, C.B.M. (eds.) Ecologia e Pesquisa Transdisciplinar no Setor Elétrico: Resultados e Aprendizados do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG. Belo Horizonte, pp. 201-217.

## Resumo

Neste capítulo, apresentamos o desenvolvimento do Índice Transdisciplinar de Integridade, aplicado ao reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas (ITI-Furnas). O índice resultou de uma abordagem inovadora e transdisciplinar, gerado a partir do uso de indicadores ecológicos, geográficos e socioeconômicos. O índice foi construído utilizando uma combinação de dados primários, obtidos pelas equipes em campo, e de bases de dados secundários abertas e oficiais e na literatura técnica. Após a definição da rede amostral, obtenção de dados em campo, processamento de amostras em laboratório e levantamento de dados geográficos e socioeconômicos oficiais, foram calculadas 360 métricas e índices ecológicos, geográficos e socioeconômicos. Para gerar o ITI-Furnas, após uma criteriosa etapa de seleção e filtragem, foram selecionadas 9 métricas para compor o índice, divididas em três categorias: (i) qualidade do ambiente físico (Índice de Distúrbio Integrado, Índice de Qualidade de Água, Índice de Fragilidade Ambiental); (ii) condição ecológica (Índice Multimétrico de macroinvertebrados bentônicos e peixes, Abundância de espécies não nativas de crustáceos, Abundância de espécies não nativas de peixes); e (iii) indicadores socioeconômicos (Produto Interno Bruto Primário, Valor Adicionado Bruto da Piscicultura, Valor Adicionado Bruto do Turismo). Após a padronização matemática destas 9 métricas, segundo as previsões ao longo de gradientes de condições ambientais, sem alterar a variabilidade individual, calculamos o ITI-Furnas como o seu somatório, atribuindo pesos iguais para cada variável na composição do índice. Em seguida, o índice foi espacializado no reservatório da UHE Furnas, o que nos permitiu identificar (i) áreas vulneráveis e que merecem atenção imediata de restauração ambiental (*coldspots*), (ii) áreas prioritárias para investimentos visando melhorar a qualidade do ambiente físico, condição ecológica, bens e serviços ecossistêmicos; (iii) *hotspots* de conservação com alto valor ambiental, social e econômico; (iv) áreas com Máximo Potencial Ecológico, regiões de referência de qualidade ambiental a serem monitoradas a longo prazo para conservação do estado atual. O índice nos permite apontar que futuros investimentos em sustentabilidade devem buscar conservar a qualidade e quantidade de água na bacia do reservatório da UHE Furnas. Os elementos de conservação de biodiversidade e serviços ecossistêmicos devem ser priorizados e deve-se manter o monitoramento em longo prazo, no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. O ITI pretende ser uma ferramenta a ser utilizada de maneira constante e rotineira pela empresa para essa busca na prática de ações na direção da sustentabilidade. 💧

# 1 Diagnóstico transdisciplinar

Após a mobilização da equipe transdisciplinar, composta por professores, pesquisadores, pós-graduandos, técnicos, estudantes do ensino médio e superior, foi realizada uma reunião de integração (*kick-off*) em Passos e uma visita técnica ao reservatório da UHE Furnas, em janeiro de 2023 (Figura 1). Também foram oferecidos cursos de capacitação para treinamento teórico-conceitual e metodológico (planejamento, campo e laboratório), abordando as bases conceituais de estudos transdisciplinares sobre qualidade ambiental em bacias de empreendimentos hidrelétricos. As expectativas dos parceiros envolvidos, a rede de Universidades e a AXIA Energia, também foram alinhadas, com o estabelecimento dos objetivos e da pergunta central do projeto. A definição da rede amostral (Figura 5, capítulo 1), aleatorizada e espacialmente balanceada, representativa do gradiente de condições ambientais na bacia do reservatório da UHE Furnas, constituiu uma etapa fundamental, seguida por uma viagem de reconhecimento e validação dos pontos amostrais.



Figura 1: Foto da equipe transdisciplinar reunida na visita técnica ao reservatório da UHE Furnas, para reconhecimento e reunião de *kick-off* em janeiro de 2023. Crédito: Marcos Callisto.

No primeiro ano do projeto IBI UHE Furnas & UFMG, realizamos grandes expedições científicas de amostragem na região litorânea do reservatório da UHE Furnas (abril) e em riachos (julho e setembro). Durante 30 dias, as equipes de campo deslocavam-se até os pontos amostrais, seguindo pontos com coordenadas geográficas previamente definidas pela equipe do Departamento de Geografia da UFMG. Foi estruturado um laboratório avançado para o recebimento, lavagem e acondicionamento das amostras, que seriam posteriormente transportadas aos laboratórios da UFMG e da UFLA. Nos laboratórios de campo realizou-se o registro fotográfico das espécies. As amostras de água também foram processadas para a determinação de parâmetros físicos e químicos, utilizados no cálculo de métricas e do Índice de Qualidade da Água (IQA; IGAM 2019).

Em campo, foram coletados dados primários sobre uso da terra, integridade de zonas ripárias, diversidade de habitats físicos, parâmetros físicos e químicos da água, além de coleta ativa de dados da biodiversidade aquática, incluindo peixes, crustáceos, moluscos e insetos. Os demais dados foram obtidos de forma secundária, a partir de bases oficiais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), abrangendo métricas sociais, econômicas, agropecuárias e de saúde dos 35 municípios limítrofes e 132 não limítrofes à bacia da UHE Furnas. Utilizando dados de sensoriamento remoto, foi realizado um levantamento minucioso de uso e ocupação da terra, com o objetivo de identificar remanescentes de cobertura vegetal nativa e quantificar mudanças relacionadas a atividades agropecuárias, cidades, estradas e outras intervenções humanas. Nos laboratórios de campo, também foi feito o registro fotográfico das espécies de peixes.

# 2 Definição e padronização de categorias e métricas ITI-Furnas

Após o cálculo das 360 métricas e índices acima mencionados, a equipe de pesquisa avaliou quanto à sua variabilidade, representatividade e potencial de incorporação para o cálculo do ITI-Furnas, considerando: replicabilidade, arcabouço conceitual existente, literatura científica de suporte, capacidade de sintetizar a variabilidade natural existente e as discernir de perturbações por atividades antrópicas (Figura 2). Após sucessivas reuniões dos pesquisadores da equipe científica do projeto para validação dessas características, foram definidas 9 métricas em três categorias:

### • Condição Ecológica

- MMI (detalhes abaixo no texto)
- Abundância de peixes não nativos (N<sup>o</sup>??)
- Abundância de crustáceos não nativos (N<sup>o</sup>??)

### • Qualidade do Ambiente Físico

- Índice de Qualidade de Água (IQA) (varia de 0 a 100)
- Índice de Distúrbio Integrado (IDI) (varia de 0 a 1)
- Índice de Fragilidade Ambiental (IFA) (varia de 0 a 5)

### • Indicadores Socioeconômicos

- Produto Interno Bruto Primário (em R\$)
- Valor Adicionado Bruto da piscicultura (em R\$)
- Valor Adicionado Bruto do turismo (em R\$)

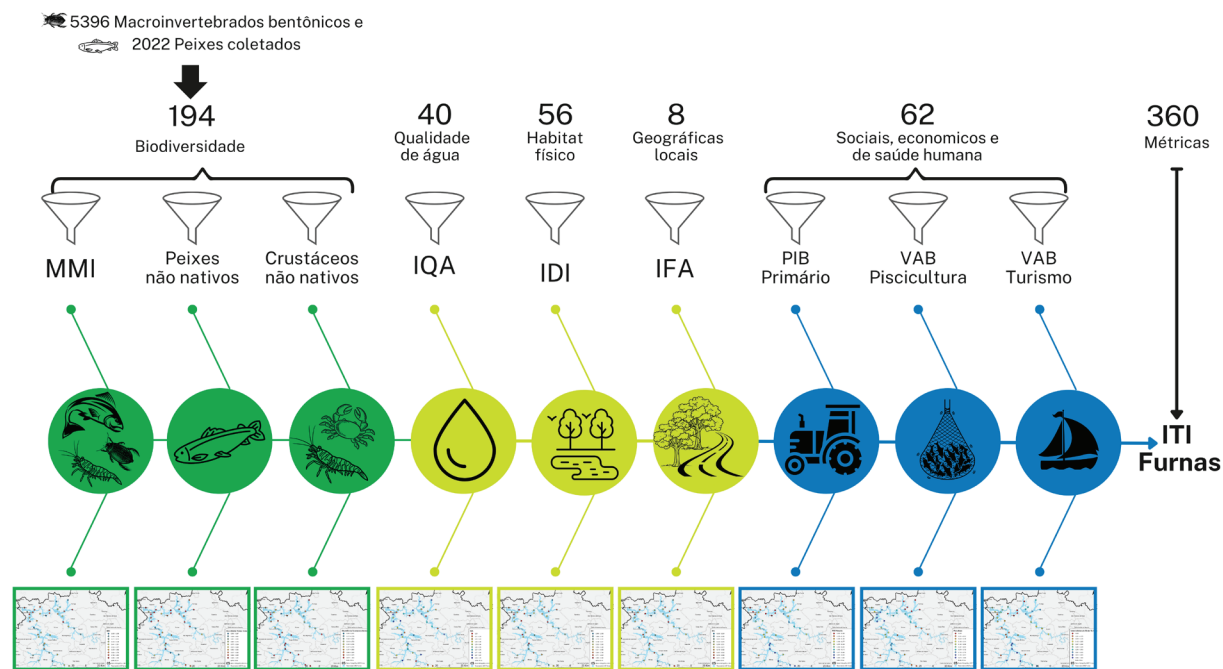


Figura 2: Etapas metodológicas para concepção do Índice Transdisciplinar de Integridade do Reservatório da UHE Furnas (ITI-Furnas). O detalhamento dos mapas apresentados na parte inferior desta figura pode ser visualizado nas figuras 3 a 12.

Na determinação da Condição Ecológica foram selecionadas métricas que representam os principais distúrbios identificados na área do reservatório de Furnas, e que podem ser aplicadas nas bacias hidrográficas de outros empreendimentos hidrelétricos. Primeiramente, a presença de espécies invasoras foi identificada como um dos principais distúrbios para assembleias de macroinvertebrados bentônicos (Madureira et al. 2025) e peixes (Sulzbacher et al. 2025). Para tanto, foram selecionadas as métricas Abundância de Crustáceos Invasores (o principal grupo de macroinvertebrados bentônicos invasores) e Abundância de Peixes Invasores. Complementando esta categoria, foi desenvolvido um índice multimétrico (MMI) integrado (Karoline Madureira et al. em preparação), que utiliza dados provenientes das assembleias de macroinvertebrados bentônicos: riqueza de táxons ( $N_0$  total de táxons identificados no ponto); pontuação BMWB (valor final calculado do índice BMWP de Junqueira et al. 2018, que varia entre 2 e 10 para cada táxon, entre resistentes, tolerantes e sensíveis a poluição da água); abundância de indivíduos resistentes ( $N_0$  total de indivíduos de táxons com pontuação de sensibilidade igual ou menor a 3); riqueza de táxons não nativos ( $n_0$  de táxons não nativos identificados no sítio amostral); e de peixes: riqueza de espécies ( $N_0$  total de espécies identificadas no sítio amostral); abundância de indivíduos ( $N_0$  total de indivíduos coletados no sítio amostral); diversidade Hill2 (índice de diversidade com maior peso às espécies dominantes em contraste às espécies raras); proporção de espécies com cuidado parental ( $N_0$  de espécies com cuidado parental / no total de espécies coletadas no sítio amostral); e riqueza de espécies não nativas ( $N_0$  de espécies não nativas identificadas no sítio amostral), de modo a oferecer um panorama geral da condição ecológica. O desenvolvimento deste MMI permite avaliar a qualidade ecológica com base em organismos bioindicadores em intervalo de valores, ou faixas de

variação, comparáveis. Estas métricas foram calculadas a partir dos dados biológicos coletados durante o Projeto IBI UHE Furnas & UFMG.

Para métricas de Qualidade de Ambiente Físico foram selecionados três indicadores amplamente utilizados tanto em estudos ambientais, quanto pelo governo do estado de Minas Gerais na gestão de suas águas. Foram utilizados, portanto, i) O IQA (Índice da Qualidade da Água) que mede a qualidade da água a partir de parâmetros físico-químicos, como oxigênio dissolvido, pH e Turbidez; ii) O IDI (Índice de Distúrbio Integrado; Ligeiro et al. 2013) que é baseado na combinação de índices que quantificam o distúrbio antrópico em duas escalas, local (LDI) e regional (CDI). A partir da combinação destes dois índices é possível quantificar o grau de distúrbio ao qual um determinado ponto de coleta está sujeito; e iii) O IFA (Índice de Fragilidade Ambiental; Macedo et al. 2018) que quantifica a propensão ao risco de uma determinada área geográfica fornecer excesso de sedimentos finos para um ecossistema aquático a partir de dados como cobertura vegetal, densidade de estradas, geologia, pluviosidade e relevo. Todas estas métricas foram calculadas a partir de dados primários coletados em campo, combinados com o uso de imagens de satélite obtidas na mesma época das coletas.

Para as métricas socioeconômicas foram selecionados indicadores que a equipe definiu que retratavam a realidade da região sendo estudada e cujos dados são de domínio público (IBGE). Além disso, buscou-se utilizar aquelas métricas que podem ser relacionadas aos potenciais impactos positivos do reservatório da UHE Furnas na economia e que estão conectadas à situação social das populações de moradores nos municípios limítrofes. Foram selecionadas as métricas Produto Interno Bruto (PIB) primário, Valor Adicionado Bruto (VAB) da piscicultura e Valor Adicionado Bruto (VAB) do turismo. Todas essas métricas foram espacializadas para permitir sua associação aos pontos de coleta do projeto. Os dados foram obtidos a partir do repositório oficial do IBGE ([www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)).

Como as 9 métricas selecionadas apresentam valores em diferentes escalas, uma padronização matemática foi necessária. Estas métricas foram padronizadas entre zero e um, mantendo assim uma escala comum de comparação. Em seguida, foi definida a direção do efeito esperado (impacto positivo ou negativo), sendo que consideramos sempre 0 como a pior condição e 1 como a melhor condição (Figura 3). Para padronizar as métricas utilizadas na composição do índice, adotamos as seguintes abordagens conforme as características de cada variável: (i) Quando a métrica não possuía um valor máximo teórico (como o IDI e variáveis socioeconômicas), utilizamos o maior valor observado na amostragem como referência, dividindo os demais valores por esse máximo para gerar proporções entre 0 e 1; (ii) quando havia um valor máximo teórico conhecido (p. ex. para o IFA), a padronização foi feita diretamente em relação a esse limite; e (iii) quando as métricas já estavam na escala de 0 a 1 (IQA e MMI), nenhuma transformação adicional foi necessária. Para garantir consistência na direção dos valores, isto é, que valores mais altos sempre indicassem melhor condição ambiental, métricas com relação inversa ao gradiente (em que valores altos indicam pior condição, como abundância de espécies invasoras) foram invertidas por meio da operação “1 menos o valor padronizado”.

Neste modelo conceitual, nossa equipe previu que ao longo de um gradiente de qualidade ambiental; que vai desde áreas frias (*coldspots* - condições de severa degradação de habitat físico e qualidade de água e com invasões biológicas) até áreas quentes (*hotspots* - alto valor ambiental com habitats diversos e elevada biodiversidade, além de aspectos sociais e econômicos positivos), seria esperado o aumento gradativo da qualidade, representados por maiores valores nas métricas IQA, MMI, PIB primário, VAB Piscicultura e VAB Turismo e a diminuição gradual dos valores das métricas IDI, IFA, Abundância de espécies não nativas de crustáceos e peixes.

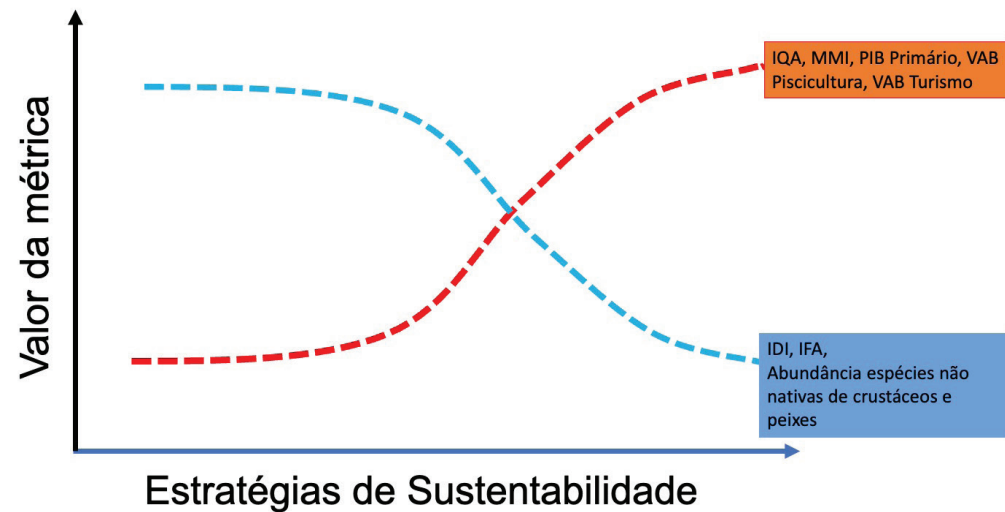


Figura 3: Modelo conceitual de variabilidade esperada de métricas socioeconômicas, qualidade do ambiente físico e condição ecológica na bacia do reservatório da UHE Furnas.

### 3 Cálculo do índice ITI-Furnas

Uma vez obtidas as 9 métricas, com seus valores padronizados entre 0 e 1 e direção ajustada para representar um aumento gradual da qualidade ambiental, o índice foi calculado como o somatório simples das 9 métricas selecionadas, sem atribuição diferenciada de peso entre categorias ou métricas. Vale ressaltar que, durante o desenvolvimento metodológico do índice, nossa equipe considerou diferentes abordagens para ponderação. Foram conduzidas simulações matemáticas utilizando metodologias consagradas na literatura para priorização, como Análise de Componentes Principais (ACP), Análise Hierárquica de Processos (AHP), análises multicritério e normalização por z-score, além de testes de sensibilidade para verificar o impacto de diferentes abordagens de ponderação (OECD & JRC 2008). No entanto, as análises indicaram que a atribuição de pesos neste momento inicial de desenvolvimento do índice poderia introduzir vieses artificiais, desbalanceando a representação integrada que o ITI-Furnas busca alcançar. A atribuição de pesos em índices compostos, embora comum em estudos ambientais e socioeconômicos, é uma etapa metodológica que envolve alto grau de arbitrariedade. Os pesos atribuídos às variáveis podem variar significativamente

conforme a ótica da instituição responsável, os objetivos do estudo ou os interesses das partes envolvidas (*stakeholders*), como comunidades locais, órgãos reguladores ou empresas. Essa subjetividade pode comprometer a neutralidade e a representatividade do índice, especialmente em contextos transdisciplinares que buscam integrar múltiplas dimensões de forma equilibrada. Por esse motivo, optou-se por não aplicar ponderações diferenciadas no ITI-Furnas nesta fase inicial, garantindo que todas as métricas selecionadas contribuam igualmente para a composição do índice. A equipe entendeu que, dessa forma, o índice é capaz de sintetizar, de forma equilibrada, a complexidade da situação ambiental e socioeconômica no entorno do reservatório da UHE Furnas. Essa decisão metodológica também está alinhada com experiências anteriores da equipe de pesquisadores do projeto e com a literatura sobre indicadores integrados em contextos hidroambientais. Nas figuras 4 a 12 são apresentadas as figuras relativas às 9 métricas mapeadas individualmente. Os índices foram espacializados em ambiente SIG por meio da interpolação Spline with Barriers. Esse método gera superfícies contínuas com transições gradativas, baseadas em funções matemáticas que minimizam a curvatura entre os pontos amostrais, restringindo a propagação da influência dos dados pelas barreiras definidas. Como barreiras, utilizou-se o contorno do espelho d'água do reservatório. Cada índice foi interpolado individualmente, resultando em superfícies contínuas posteriormente classificadas em quatro classes por quartis (25%, 50%, 75%), exceto o índice de qualidade da água, que seguiu a classificação oficial do estado de Minas Gerais.

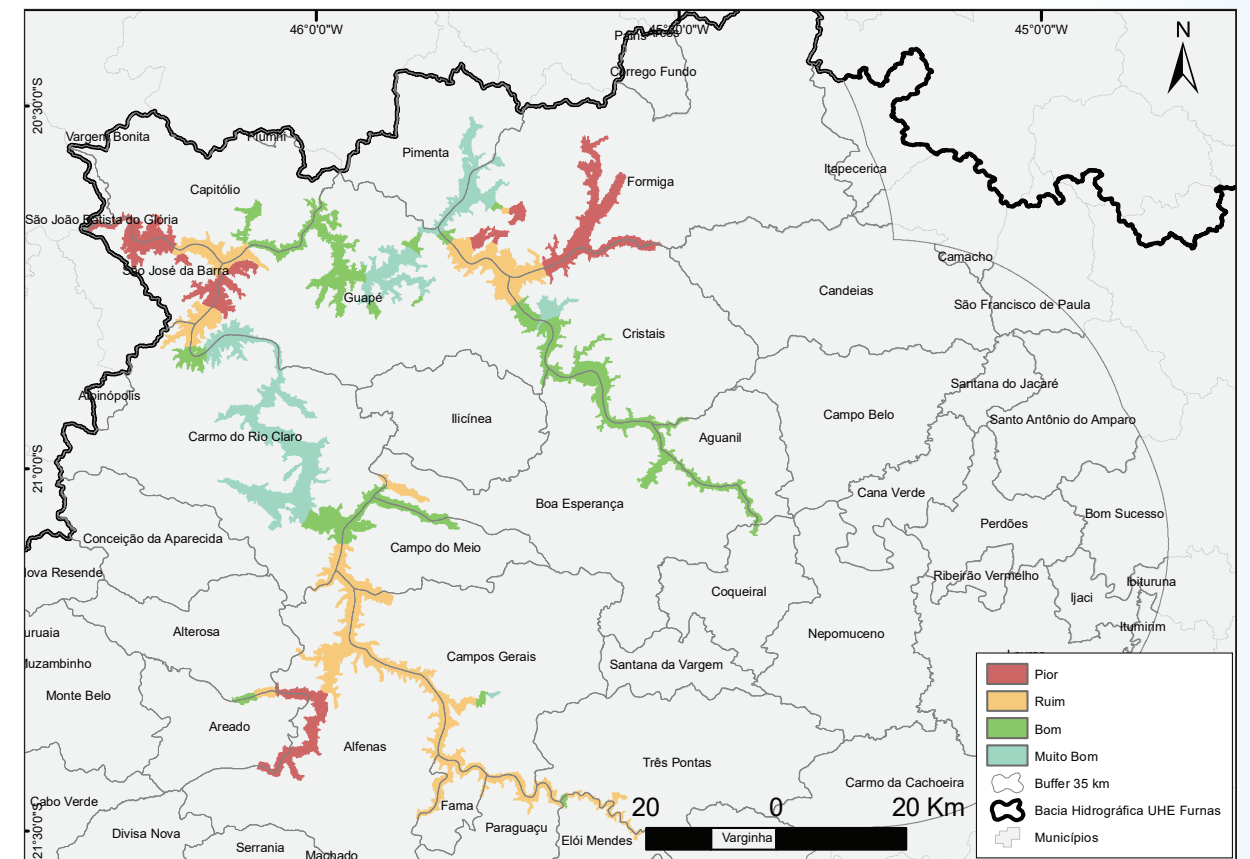


Figura 4: Plotagem geoespacial do PIB primário no reservatório da UHE Furnas. Fonte de dados: IBGE.

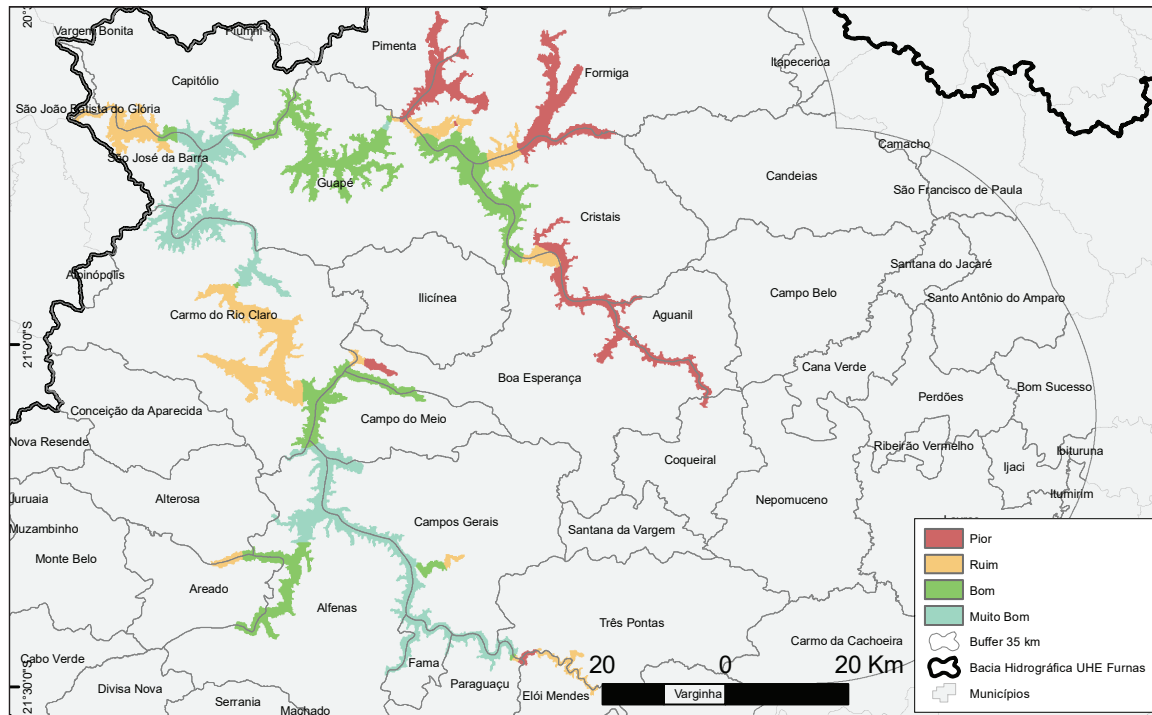


Figura 5: Plotagem geoespacial do PIB de piscicultura em tanques-rede no reservatório da UHE Furnas. Fonte de dados: IBGE.

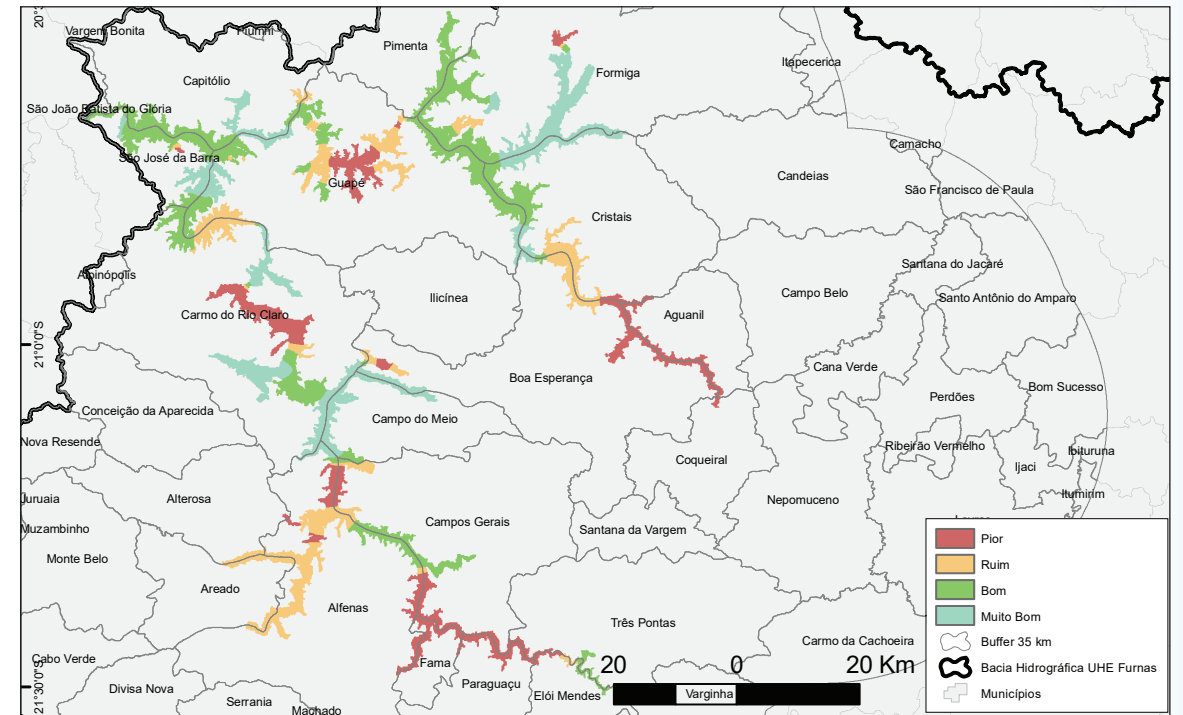


Figura 7: Plotagem geoespacial dos valores do Índice de Distúrbio Integrado (IDI) no reservatório da UHE Furnas.

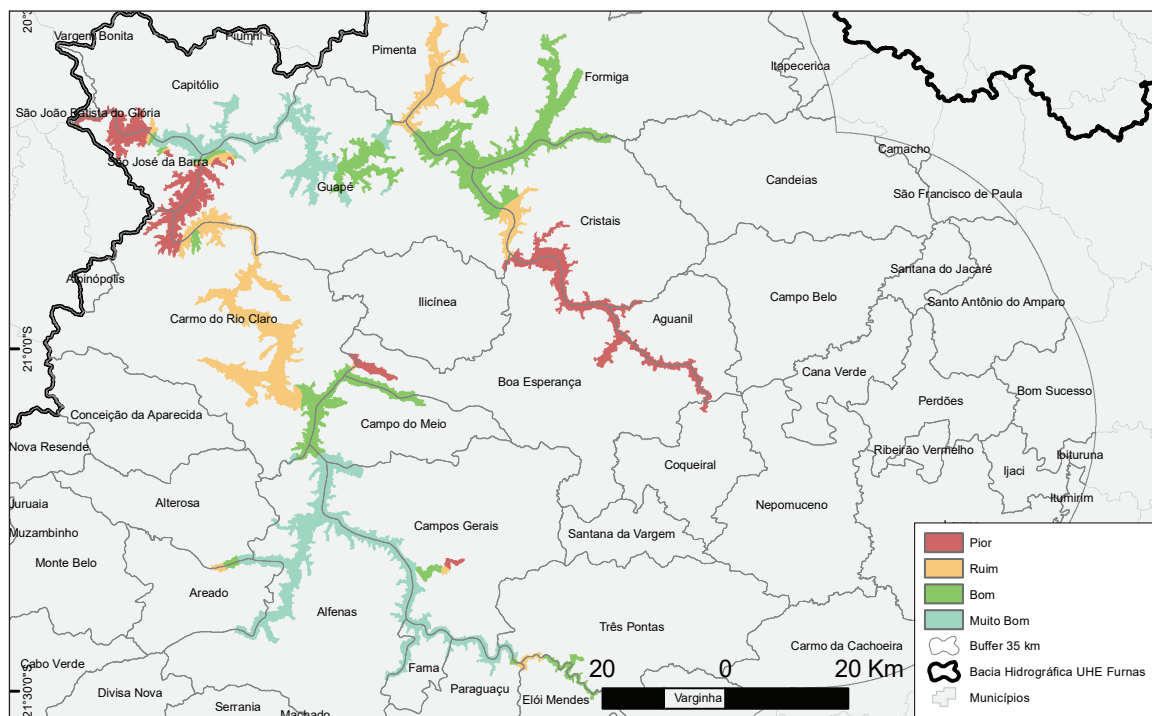


Figura 6: Plotagem geoespacial do Valor Agregado Bruto de turismo no reservatório da UHE Furnas. Fonte de dados: IBGE.

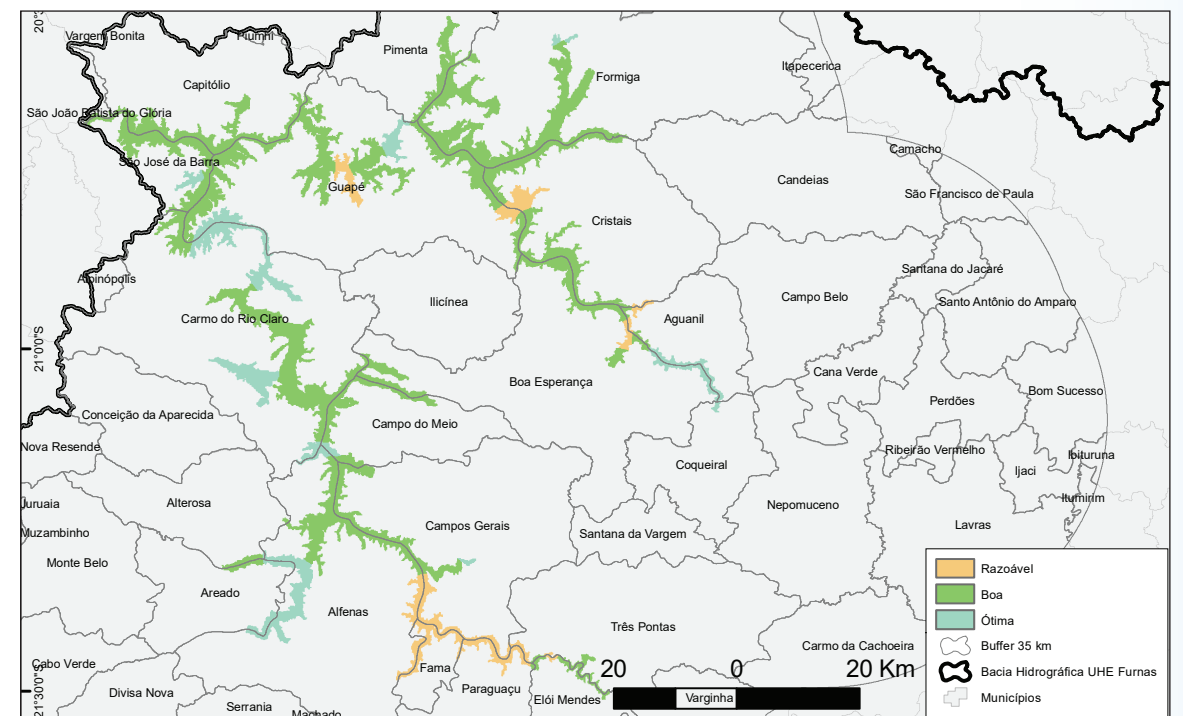


Figura 8: Plotagem geoespacial dos valores do Índice de Qualidade de Água (IQA) no reservatório da UHE Furnas.

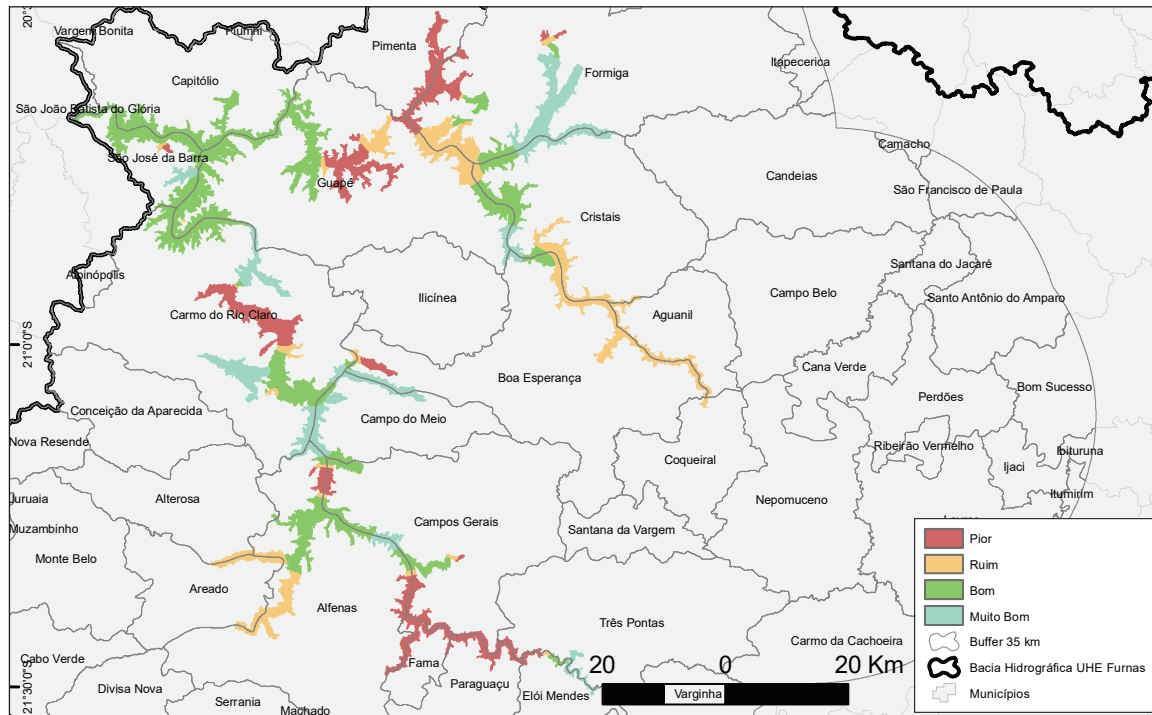


Figura 9: Plotagem geoespacial dos valores do Índice de Fragilidade Ambiental (IFA) no reservatório da UHE Furnas.

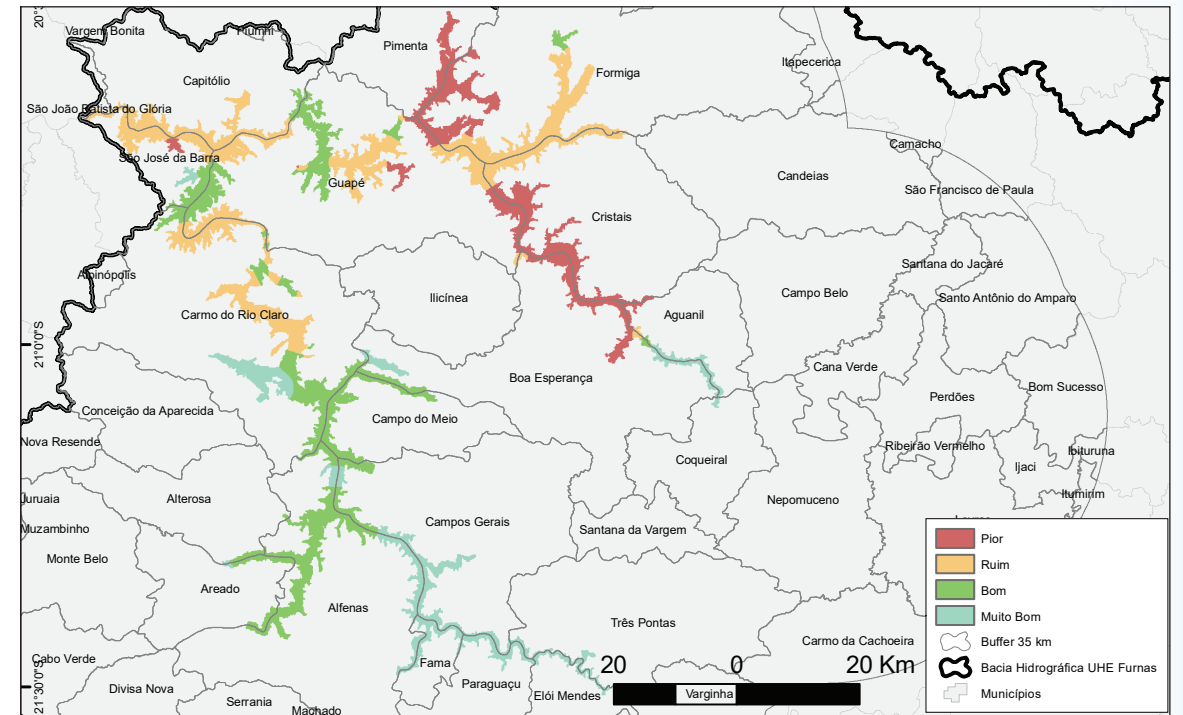


Figura 11: Plotagem geoespacial dos valores de Abundância de espécies não nativas de crustáceos no reservatório da UHE Furnas (Madureira et al. 2025).

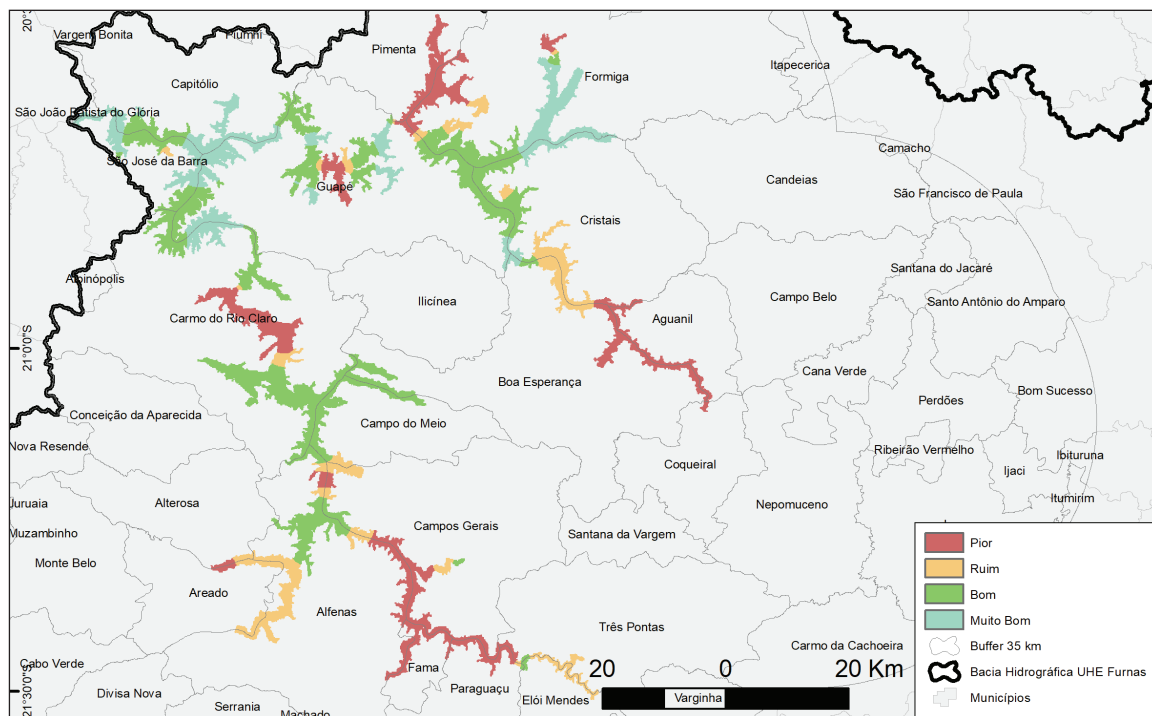


Figura 10: Plotagem geoespacial dos valores do Índice Multimétrico de bentos e peixes no reservatório da UHE Furnas.

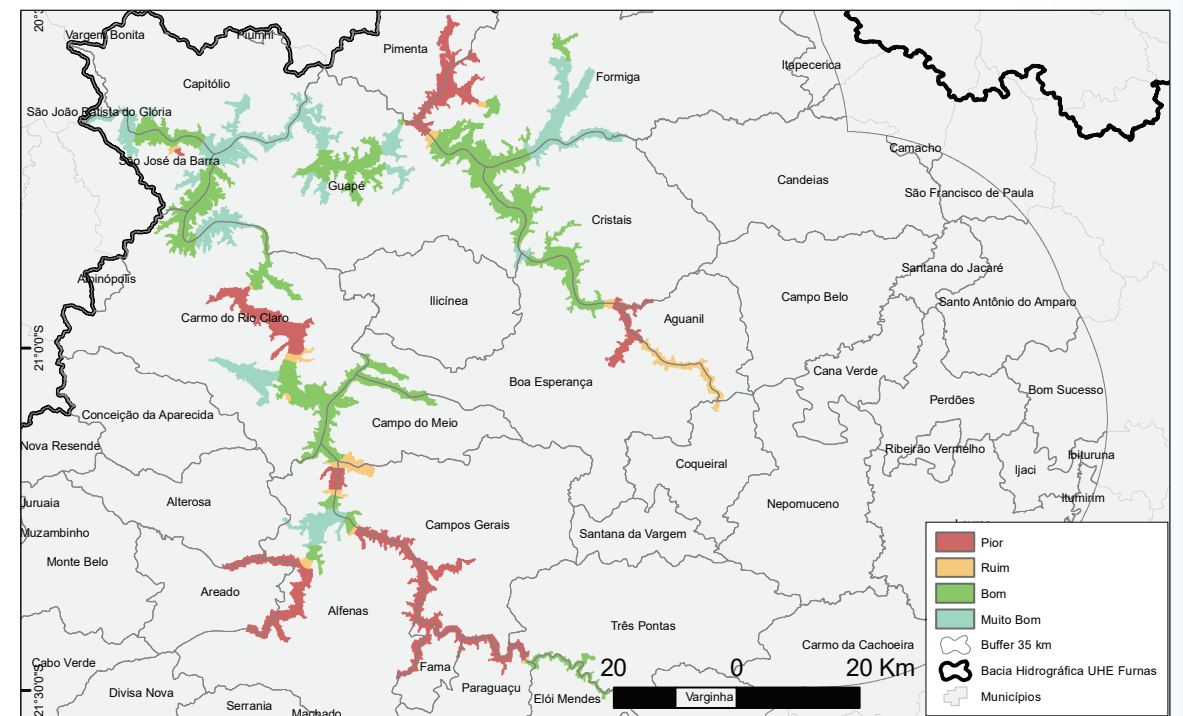


Figura 12: Plotagem geoespacial dos valores de Abundância de espécies não nativas de peixes no reservatório da UHE Furnas (Sulzbacher et al. 2025).

# 4

## Espacialização do ITI-Furnas

Após o cálculo do ITI-Furnas, a equipe do Departamento de Cartografia do Instituto de Geociências da UFMG realizou a plotagem no mapa do reservatório da bacia da UHE Furnas (Figura 13). Foram definidas quatro regiões de integridade, baseadas em quartis dos valores do ITI-Furnas:

- (i)  **muito bom**: quartil acima 75%, valores > 5,6470);
- (ii)  **bom**: valores entre os quartis 50% e 75% (valores entre 4,9155 e 5,6470);
- (iii)  **ruim**: valores entre os quartis 25% e 50% (valores entre 4,4536 e 4,9155);
- (iv)  **pior**: quartil abaixo de 25%, valores menores que 4,4536.

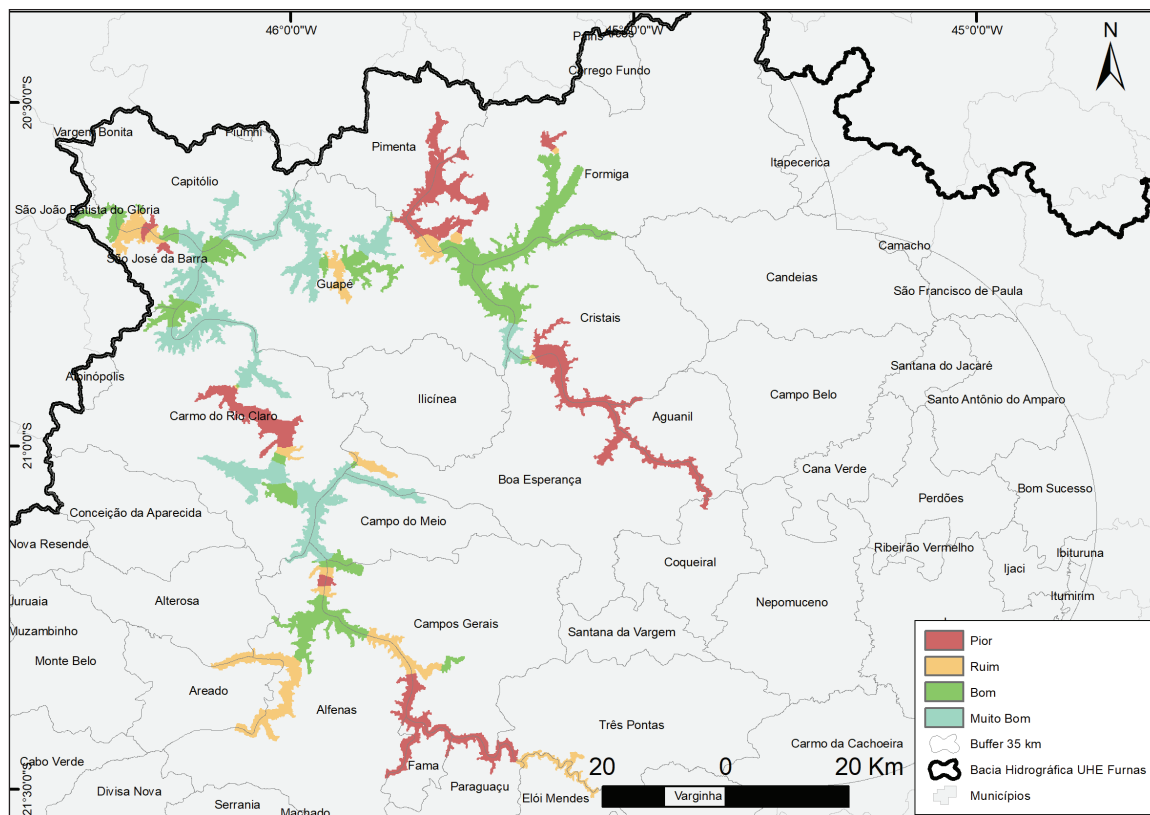


Figura 13: Mapa integrativo mostrando a distribuição dos valores do Índice Transdisciplinar de Integridade no reservatório da UHE Furnas.

# 5

## Recomendações

A partir do desenvolvimento do ITI-Furnas no reservatório da UHE Furnas e da espacialização dos seus valores, é possível identificar: (i) áreas vulneráveis e que merecem atenção de restauração ambiental, social e econômica imediatas (em vermelho); (ii) áreas prioritárias para investimentos de restauração visando melhoria da qualidade do ambiente físico, condição ecológica, bens e serviços ecossistêmicos às populações de moradores (em vermelho e alaranjado); (iii) áreas bem conservadas e com Máximo Potencial Ecológico (em verde e azul). Uma vez que o índice agrega métricas variáveis no tempo, essas áreas de máximo potencial ecológico, *benchmarks* de qualidade ambiental, demandam acompanhamento sistemático ao longo do tempo, visando conservar seu elevado status de qualidade e quantidade de água, biodiversidade aquática, bens e serviços ecossistêmicos. Esse acompanhamento é particularmente relevante no contexto da bacia do rio Grande e dos 35 municípios limítrofes à UHE Furnas, onde processos ambientais e antrópicos atuam de forma integrada.

Nas áreas vulneráveis, identificadas como ITI “Pior” ou “Ruim”, recomendamos ações voltadas à melhoria das condições ambientais e sociais, tais como:

- Projetos de saneamento básico (coleta e tratamento de esgotos domésticos, controle de efluentes de atividades econômicas);
- Controle da erosão e recomposição de Áreas de Preservação Permanente (APPs);
- Implantação de sistemas de agroecologia e agricultura de baixo impacto;
- Ações de inclusão social e fortalecimento de políticas públicas de saúde e assistência social;
- Programas de geração de renda associados à recuperação ambiental (ex.: pagamento por serviços ambientais e turismo sustentável).

Nas áreas com melhor qualidade ambiental e Máximo Potencial Ecológico, identificadas como ITI “Bom” ou “Muito bom”, recomendamos ações voltadas à melhoria das condições ambientais e sociais, tais como:

- Monitoramento continuado de qualidade e quantidade de água, biodiversidade aquática, bens e serviços ecossistêmicos, geração de renda e turismo;
- Desenvolvimento de programas permanentes de educação ambiental e capacitação de moradores locais em Monitoramento Participativo e Ciência Cidadã;

- Fortalecimento de unidades de conservação e corredores ecológicos (p. ex. Parque Estadual da Serra da Boa Esperança);
- Implantação de políticas de incentivo à pesquisa e inovação em conservação ambiental;
- Estímulo ao ecoturismo responsável e ao uso sustentável dos recursos naturais, com foco na manutenção dos serviços ecossistêmicos.

Por outro lado, as áreas prioritárias para a restauração são melhor entendidas quando os índices econômicos e de qualidade ambiental são considerados em separado. Sob essa perspectiva, áreas caracterizadas por alto bem-estar econômico e baixa integridade ambiental (viabilidade econômica para viabilizar a restauração) apresentam maior viabilidade para a implementação de:

- Projetos de restauração ecológica ativa e passiva, com reflorestamento de espécies nativas e controle de espécies invasoras;
- Manejo integrado de bacias hidrográficas, com foco na recarga hídrica e controle de sedimentos;
- Incentivo à adoção de práticas agrícolas conservacionistas e agroecologia;
- Fortalecimento de consórcios intermunicipais para gestão integrada dos recursos hídricos;
- Apoio técnico e financeiro a iniciativas comunitárias de recuperação ambiental;
- Incentivo à criação de Unidades de Conservação, incluindo RPPNs, por empresas de maior porte ou setor agrícola (p.ex. café e soja).

O ITI-Furnas representa uma ferramenta analítica para a organização, interpretação e comunicação de informações ambientais, ecológicas e socioeconômicas em escala de bacia hidrográfica.

Ao sintetizar múltiplos indicadores em uma base espacializada, o índice oferece subsídios técnicos valiosos para o apoio a processos de planejamento, monitoramento e priorização de ações em diferentes contextos institucionais.

Seu caráter flexível e passível de atualização contínua permite acompanhar mudanças ao longo do tempo, contribuindo para uma gestão ambiental mais informada, adaptativa e baseada em evidências científicas, sem substituir os instrumentos regulatórios formais ou os arranjos de governança existentes.

## Agradecimentos

Agradecemos a todos os colegas professores, pesquisadores, pós-graduandos, graduandos e técnicos da equipe técnico-científica do Projeto IBI UHE Furnas & UFMG que trabalharam intensivamente na obtenção de dados primários na bacia da UHE Furnas.

Os autores agradecem às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG as bolsas de pesquisa de iniciação científica, mestrado, doutorado e produtividade em pesquisa (MC 304060/2020-8; DRM 311002/2023-4; PSP 302328/2022-0; RS 308350/2022-7; AG 302586/2021-0).

## Referências

- Ligeiro, R., Hughes, R.M., Kaufmann, P.R., Macedo, D.R., Firmiano, K.R., Ferreira, W.R., Oliveira, D., Melo, A.S., Callisto, M., 2013. Defining quantitative stream disturbance gradients and the additive role of habitat variation to explain macroinvertebrate taxa richness. *Ecol. Indic.* 25, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.004>.
- Macedo, D.R., Kaufmann, P.R., Hughes, R.M., Callisto, M., 2018. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. *Science of the Total Environment* 635: 1267-1279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.216>.
- Madureira, K.H., Linares, M., Callisto, M., 2025. Influence of local environmental factors on the distribution of the invasive species *Macrobrachium pantanalense* dos Santos, Hayd and Anger, 2013 in a large hydropower reservoir. *Biol Invasions* 27, 124. <https://doi.org/10.1007/s10530-025-03582-9>
- OECD. 2008 – Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. OECD Statistics Working Papers, No. 2005/03. [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2005/08/handbook-on-constructing-composite-indicators\\_g17a16e3/533411815016.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2005/08/handbook-on-constructing-composite-indicators_g17a16e3/533411815016.pdf)
- Sulzbacher, R., Salvador, G.N., Alves, C.B.M., Formagio, P.S., Hughes, R.M., Pompeu, P.S., 2025. The longitudinal gradient prevails over local characteristics in shaping fish species distributions in a large neotropical reservoir. *Water Biology and Security*, 5(1): 100425. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100425>.

## Créditos

**Editores:** Marcos Callisto e Carlos Bernardo M. Alves

**Projeto Gráfico e Editoração:** CZK Comunicação

**Capa:** Cezar Costa - CELUCO

