



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Instituto de Ciências Biológicas**



**Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre**

Irla Paula Stopa Rodrigues

**DO IMPACTO À REPARAÇÃO: Avaliação e proposição de estratégias para a  
Restauração Florestal da Bacia do Rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.**

Belo Horizonte

2024

Irla Paula Stopa Rodrigues

DO IMPACTO À REPARAÇÃO: Avaliação e proposição de estratégias para a Restauração  
Florestal da Bacia do Rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.

Tese apresentada ao programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre da Universidade Federal de Minas gerais como requisito parcial à obtenção do título doutor.

Orientadora: Dra. Maria Auxiliadora Drumond

Belo Horizonte

2024

- 043      Rodrigues, Irla Paula Stopa.  
Do impacto à reparação: avaliação e proposição de estratégias para a restauração florestal da Bacia do Rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil [manuscrito] / Irla Paula Stopa Rodrigues. – 2024.  
144 f. : il. ; 29,5 cm.
- Orientadora: Dra. Maria Auxiliadora Drumond.  
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Ecologia Conservação e Manejo da Vida Silvestre.
1. Ecologia. 2. Colapso Estrutural. 3. Impacto ambiental. 4. Recursos hídricos. 5. Recuperação e Remediação Ambiental. I. Drumond, Maria Auxiliadora. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. III. Título.

CDU: 502.7



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA, CONSERVAÇÃO E MANEJO DA VIDA SILVESTRE



**Ata da Defesa de Tese**

Nº 230  
Entrada: 2020/1

**Irla Paula Stopa Rodrigues**

No dia 30 de agosto de 2024, às 09:00 horas, por vídeo conferência, teve lugar a defesa de tese de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, de autoria do(a) doutorando(a) Irla Paula Stopa Rodrigues, orientando(a) do(a) Professor(a) Maria Auxiliadora Drumond, intitulada: **"Do Impacto à reparação: avaliação e proposição de estratégias para a restauração florestal da Bacia do Rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil"**. Abrindo a sessão, o(a) Presidente(a) da Comissão, Doutor(a) Maria Auxiliadora Drumond, após dar a conhecer aos presentes o teor das normas regulamentares do trabalho final, passou a palavra para o(a) candidato(a) para apresentação de seu trabalho. Estiveram presentes a Banca Examinadora composta pelos Doutores: Flávio Henrique Guimarães Rodrigues (UFMG), Karlla Vanessa de Camargo Barbosa (UNESP), Rodrigo Silva Lemos (UNESP), Bernardo Machado Gontijo (UFMG) e demais convidados. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do(a) candidato(a). Após a arguição, apenas os senhores examinadores permaneceram no recinto para avaliação e deliberação acerca do resultado final, sendo a decisão da banca pela:

☒ (X) Aprovação da tese, com eventuais correções mínimas e entrega de versão final pelo orientador diretamente à Secretaria do Programa, no prazo máximo de 30 dias;

☐ ( ) Reprovação da tese - (marcar se é a primeira ou segunda reprovação): ☐ ( ) \*primeira reprovação ☐ ( ) segunda reprovação

\*Conforme o disposto no Artigo 80 da Resolução Complementar do CEPE/UFMG Nº 02/2017, de 04 de julho de 2017, caso seja a primeira reprovação, poderá ser concedido, a critério do Colegiado de Curso, um prazo para a realização de nova defesa de tese.

A banca indica esta tese aos Prêmios CAPES e UFMG de teses? ☐ ( ) SIM ☒ (X) NÃO

Nada mais havendo a tratar, o Presidente da Comissão encerrou a reunião e lavrou a presente ata, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 30 de agosto de 2024.

Assinaturas dos Membros da Banca Examinadora



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Silva Lemos, Usuário Externo**, em 18/09/2024, às 10:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Auxiliadora Drumond, Professora do Magistério Superior**, em 18/09/2024, às 10:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Karla Vanessa de Camargo Barbosa, Usuário Externo**, em 18/09/2024, às 17:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bernardo Machado Gontijo, Professor do Magistério Superior**, em 18/09/2024, às 19:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flavio Henrique Guimaraes Rodrigues, Membro**, em 26/09/2024, às 16:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3561887** e o código CRC **0C531BE3**.

## **AGRADECIMENTOS**

A Assessoria Técnica Independente da R3, cujo projeto me permitiu contato com o processo de reparação das pessoas atingidas pelo rompimento da barragem Mina Córrego do Feijão e despertou meu interesse no estudo do tema.

Aos tantos amigos que fiz nas comunidades atingidas, que me dão forças e me incentivam a continuar no caminho da luta.

A Dayane e Marcelo que tive a oportunidade de conhecer durante essa trajetória e que fizeram da minha vida profissional, acadêmica e pessoal muito mais completa.

A CAPES/CNPQ pelo apoio financeiro.

Ao Laboratório de Sistemas Socioecológicos do Departamento de Ecologia e Genética (ICB/UFMG) e, em especial, à professora Maria Auxiliadora Drumond pela oportunidade, dedicação, orientação, ética e amizade, sempre buscando nosso crescimento.

A todos os amigos, especialmente Raquel, Andreza, Cecília, Pedro e Lucas pelo companheirismo, pelas horas de desabafo e por me manterem em condições mentais de seguir em frente.

Ao Ramon, por toda cumplicidade, compromisso e dedicação. Você me fez acreditar que era possível.

Aos colegas Jeff, Matheus e Hugo, que me salvaram em momentos de sufoco.

Ao Sávio, pelo carinho, cuidado e compreensão em tantas dimensões da minha vida. Sem seu apoio dificilmente eu chegaria até aqui.

À família por ser meu alicerce. Especialmente meus pais pela paciência, conversas, conselhos e o apoio incondicional. E meu filho, Santiago, que só de existir me faz acreditar e querer seguir em frente.

Agradeço muito ao olhar e sorriso lindo de meu filho que me mostra a cada dia um pouco mais o que é o verdadeiro amor e o porquê eu quero ser uma pessoa melhor.

A Deus e à vida, que permitem minha existência nesse mundo.

## RESUMO

Neste estudo, utilizamos informações dos impactos decorrentes do rompimento da barragem de minério de ferro em Brumadinho, Minas Gerais, para construir modelos que auxiliem na tomada de decisão quanto às ações de reparação e mitigação desses impactos. O primeiro capítulo expõe a aplicação da metodologia Pressão-Estado-Impacto-Resposta (PEIR) no Plano de Reparação Socioambiental da bacia do Paraopeba (PRSABP) e suas limitações ao lidar com a complexidade do desastre. Além disso, apresentamos uma análise em rede dos impactos, útil para identificar interconexões e revelar impactos estratégicos, permitindo investimentos na mitigação de impactos que beneficiem outros impactos interligados. Concluimos que a restauração florestal é uma ação central na reparação e compensação socioambiental da bacia, por contribuir para a gestão sustentável dos recursos hídricos e a resiliência dos ecossistemas e comunidades dependentes. No segundo capítulo, propomos a identificação de áreas prioritárias para restauração florestal na bacia, visando recuperar a qualidade e disponibilidade hídrica. Para isso, empregamos um modelo de análise multicritério, com pesos das variáveis definidos com a participação de lideranças locais. Os resultados destacam a importância estratégica da restauração de áreas próximas a cursos d'água e nascentes, melhorando a qualidade de vida das comunidades locais. A predominância de pastagens e áreas de produção agropecuária nas áreas prioritárias indica baixo custo de oportunidade para implementar ações de restauração. Concluimos que o modelo proposto é eficaz para orientar a restauração e pode embasar o planejamento e implementação de políticas públicas voltadas à recuperação de bacias hidrográficas impactadas por atividades antrópicas. No terceiro capítulo, quantificamos a conectividade funcional das áreas de preservação permanente da bacia do rio Paraopeba e avaliamos sua resposta a diferentes cenários de incremento de vegetação. Concluimos que a restauração de corredores ripários é eficaz para aumentar a conectividade funcional da paisagem, beneficiando espécies com distintas capacidades de dispersão.

Palavras-chave: matriz de impactos, análise em rede, fragmentos florestais, recursos hídricos, ecologia da paisagem, conectividade funcional

## **ABSTRACT**

In this study, we used information on the impacts resulting from the collapse of the iron ore tailings dam in Brumadinho, Minas Gerais, to develop models that assist in decision-making regarding the actions for reparations and mitigation of these impacts. The first chapter presents the application of the Pressure-State-Impact-Response (PSIR) methodology in the Socioenvironmental Repair Plan for the Paraopeba Basin (PRSABP) and its limitations in addressing the complexity of the disaster. Additionally, we present a network analysis of the impacts, which is useful for identifying interconnections and revealing strategic impacts, allowing investments in the mitigation of impacts that can benefit other interconnected ones. We conclude that forest restoration is a central action in the socioenvironmental repair and compensation of the basin, as it contributes to the sustainable management of water resources and the resilience of ecosystems and dependent communities. In the second chapter, we propose the identification of priority areas for forest restoration in the basin, aiming to recover water quality and availability. For this, we employed a multi-criteria analysis model, with variable weights defined with the participation of local leaders. The results highlight the strategic importance of restoring areas near watercourses and springs to improve the quality of life for local communities. The predominance of pastures and agricultural production areas in the priority regions indicates a low opportunity cost for implementing restoration actions. We conclude that the proposed model is effective in guiding restoration efforts and can support the planning and implementation of public policies aimed at recovering watersheds impacted by human activities. In the third chapter, we quantified the functional connectivity of the permanent preservation areas of the Paraopeba river basin and evaluated its response to different scenarios of vegetation increase. We conclude that the restoration of riparian corridors is effective in increasing the functional connectivity of the landscape, benefiting species with varying dispersal capacities.

**Keywords:** impact matrix, network analysis, forest fragments, water resources, landscape ecology, functional connectivity



## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>APRESENTAÇÃO .....</b>                                                                                                                                                                                                           | <b>11</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1 - Diagnóstico dos impactos do rompimento da barragem de rejeitos B1 da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, estabelecidos no Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba, Minas Gerais. ....</b> | <b>12</b>  |
| <b>1.1 Rompimento de barragens de rejeitos de mineração .....</b>                                                                                                                                                                   | <b>12</b>  |
| <b>1.2 A reparação dos danos socioambientais no rompimento da barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, Minas Gerais.....</b>                                                                                        | <b>13</b>  |
| <b>1.3 Premissas metodológicas do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba.....</b>                                                                                                                              | <b>14</b>  |
| <b>1.4 Análise descritiva da matriz de impactos.....</b>                                                                                                                                                                            | <b>18</b>  |
| <b>1.5 Análise de rede dos impactos do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba.....</b>                                                                                                                         | <b>23</b>  |
| <b>1.6 Conclusão .....</b>                                                                                                                                                                                                          | <b>29</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                                                                                            | <b>30</b>  |
| <b>MATERIAL SUPLEMENTAR .....</b>                                                                                                                                                                                                   | <b>33</b>  |
| Material Suplementar S1 .....                                                                                                                                                                                                       | 33         |
| Material Suplementar 2 .....                                                                                                                                                                                                        | 43         |
| Material Suplementar S3.....                                                                                                                                                                                                        | 55         |
| Material Suplementar S4.....                                                                                                                                                                                                        | 61         |
| <b>CAPÍTULO 2 – Abordagem multicritério para priorização socioambiental de áreas para restauração florestal na bacia do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.....</b>                                                                | <b>68</b>  |
| <b>2.1 Introdução .....</b>                                                                                                                                                                                                         | <b>70</b>  |
| <b>2.2 Métodos .....</b>                                                                                                                                                                                                            | <b>73</b>  |
| <b>2.3 Resultados .....</b>                                                                                                                                                                                                         | <b>82</b>  |
| <b>2.4 Discussão .....</b>                                                                                                                                                                                                          | <b>88</b>  |
| <b>2.5 Conclusão .....</b>                                                                                                                                                                                                          | <b>91</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                                                                                            | <b>92</b>  |
| <b>MATERIAL SUPLEMENTAR .....</b>                                                                                                                                                                                                   | <b>105</b> |
| Material Suplementar - S1.....                                                                                                                                                                                                      | 105        |
| Material Suplementar – S2 .....                                                                                                                                                                                                     | 107        |
| Material Suplementar – S3.....                                                                                                                                                                                                      | 108        |
| <b>CAPÍTULO 3 – Restoration of Riparian Corridors for Functional Connectivity in the Landscape of the Paraopeba River Basin, Brazil.....</b>                                                                                        | <b>110</b> |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| <b>3.1 Introduction .....</b>       | <b>111</b> |
| <b>3.2 Methods .....</b>            | <b>114</b> |
| <b>3.3 Results.....</b>             | <b>119</b> |
| <b>3.4 Discussion .....</b>         | <b>127</b> |
| <b>3.5 Conclusion.....</b>          | <b>132</b> |
| <b>REFERENCES .....</b>             | <b>133</b> |
| <b>SUPPLEMENTARY MATERIAL .....</b> | <b>141</b> |
| <b>4. CONCLUSÃO .....</b>           | <b>144</b> |

## APRESENTAÇÃO

Neste estudo utilizamos informações dos impactos oriundos do rompimento da barragem de minério de ferro em Brumadinho, Minas Gerais, para construir modelos que ajudem na tomada de decisão referente a ações de reparação para mitigação desses impactos. O primeiro capítulo apresenta um panorama dos impactos do rompimento da barragem Córrego do Feijão, apresentados no Plano de Recuperação da Bacia do Rio Paraopeba, elaborado por consultoria terceirizada pela Vale S.A. Objetivamos, aqui apresentar os impactos mapeados e as categorias utilizadas para sua organização e leitura, subsidiando uma reflexão sobre a complexidade desses impactos, de seu mapeamento e de suas relações, no intuito de promover alertas para a elaboração de futuros diagnósticos.

O primeiro capítulo não foi elaborado em formato de artigo, uma vez que não objetivamos comparar os impactos ou ações de reparação com outros rompimentos, mas sim, apresentar o Plano de reparação Socioambiental e identificar impactos estratégicos de serem reparados resultando em maiores e melhores resultados, tanto para a biodiversidade quanto para as populações humanas.

Após a identificação de impactos centrais para a reparação e da restauração florestal como medida de reparação estratégica, desenvolvemos os capítulos 2 e 3. No capítulo 2 propomos a identificação de áreas prioritárias para restauração florestal na bacia do rio Paraopeba, com o objetivo de recuperar os serviços ecossistêmicos hídricos. Já no capítulo 3 quantificamos a conectividade funcional das áreas de preservação permanente da bacia do rio Paraopeba e avaliamos como ela reage a diferentes cenários de incremento de vegetação florestal.

O capítulo 2 e 3 foram elaborados em formato de artigo. O segundo capítulo está apresentado em português, e será traduzido para submissão. O terceiro capítulo já se encontra em inglês e em condições de ser submetido.

## **CAPÍTULO 1 - Diagnóstico dos impactos do rompimento da barragem de rejeitos B1 da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, estabelecidos no Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba, Minas Gerais.**

### **RESUMO**

O rompimento da barragem de rejeitos de minério da Vale em Brumadinho, um dos maiores desastres socioambientais da história do Brasil, deixou marcas profundas na região e na vida de milhares de pessoas. O Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba (PRSABP) foi elaborado a partir das diretrizes metodológicas do modelo Pressão-Estado-Impacto-Resposta que compartilha grandes similaridades com Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA). O presente estudo sistematiza os impactos e as propostas de reparação apresentadas no PRSABP a fim de discutir a importância de iniciativas de recuperação no ambiente complexo de impactos socioambientais decorrentes do rompimento. Oitenta e dois impactos foram mapeados pela empresa de consultoria Arcadis e categorizados de acordo com seu tipo, ocorrência, escala entre outros aspectos. Uma análise em rede identificou o baixo número de relações entre os impactos apresentados pela consultora. Porém a realidade é muito mais complexa, exigindo uma visão integrada e adaptativa. O estudo indica que impactos relacionados à disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos e perda/redução da cobertura vegetal são centrais, logo, investir em ações de restauração florestal pode ser uma estratégia importante na reparação dos danos socioambientais.

### **1.1 Rompimento de barragens de rejeitos de mineração**

No mundo existem mais de 56.000 barragens de rejeitos de mineração, das quais 740 estão no Brasil (Scarpelin et al., 2020). Nos últimos nove anos, o estado de Minas Gerais (MG), localizado no sudeste do Brasil, foi palco do rompimento de duas barragens de rejeitos de minério de ferro. Os desastres ocorridos em 2015 no município de Mariana e em 2019 em Brumadinho, produziram centenas de vítimas fatais e impactaram diretamente milhares de pessoas. Esses rompimentos correspondem, respectivamente, ao maior em extensão e em perdas de vidas humanas no Brasil. Outras rupturas de barragens de minério foram identificadas em países como México, Bulgária, Itália, Filipinas, China e Canadá, totalizando quase 3000 perdas humanas nos últimos 100 anos (Santamarina et al., 2019).

Em 5 de novembro de 2015, o rompimento da barragem de Fundão (Samarco – Vale – BHP Billiton) em Mariana lançou mais de 40 milhões de metros cúbicos de rejeitos nos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, e posteriormente no rio Doce, configurando um dos maiores desastres do Brasil (Zhourri et al., 2016). A pluma formada por água e rejeitos continuou fluindo pelo rio Doce, atingindo o Oceano Atlântico no município de Linhares, no estado do Espírito

Santo (ES), dezesseis dias após o rompimento da barragem. Estudos ao longo do rio Doce revelaram um aumento significativo nas concentrações de metais após a passagem da lama de rejeitos (Fernandes et al., 2016; Hatje et al., 2017, Mulholland et. al., 2022).

O rompimento da barragem de rejeitos B1 da mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, em 25 de janeiro de 2019 (Vale S.A.), lançou mais de 12 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos no ribeirão Ferro Carvão que, rapidamente, alcançaram o rio Paraopeba. A força da onda de lama varreu trens, veículos, máquinas e o centro administrativo da Vale (Council, 2019). Uma área equivalente a 450 campos de futebol foi coberta pelos rejeitos e causou impactos sobre a biodiversidade, serviços ecossistêmicos (Rotta et al., 2020), além da morte de 272 pessoas, incluindo dois nascituros.

Os desastres-crimes ocorridos alertaram para a necessidade de determinar critérios e ações para reparar as comunidades afetadas por este tipo de desastre.

## **1.2 A reparação dos danos socioambientais no rompimento da barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, Minas Gerais**

Imediatamente após o rompimento foi aberta uma Ação Civil Pública (Ministério Público Federal, 2019) que confere responsabilidade à empresa VALE S.A. por realizar ações de reparação e medidas emergenciais para reduzir a magnitude dos danos relacionados ao rompimento da barragem B1 da Mina Córrego do Feijão.

Em fevereiro de 2021, a mineradora Vale S.A., o Estado de Minas Gerais e as instituições de justiça firmaram um Acordo Judicial para a Reparação Integral (AJRI) relativa ao rompimento da barragem B1 e soterramento das barragens B-IV e B-IVA/Córrego do Feijão (Minas Gerais, 2021). O objeto do acordo é a definição das obrigações de fazer e de pagar da Vale, visando a reparação integral dos danos causados às regiões atingidas e à sociedade mineira.

A partir desse acordo, ficou estabelecido que a reparação socioambiental teria como referência o retorno à situação anterior ao rompimento. A reparação Socioambiental está organizada no anexo II e suas subdivisões, sendo o anexo II.1 Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba (PRSABP), o anexo II.2 Compensação dos danos Socioambientais e o anexo II.3 Projetos de Segurança Hídrica. Este capítulo se limita a análise do PRSABP, definido como o instrumento para realizar a reparação dos impactos

socioambientais. A empresa ré deverá pagar e executar as medidas de reparação socioambiental, enquanto o monitoramento e fiscalização dos Programas e Projetos deste plano são de responsabilidade do comitê de compromitentes, formado pelo Ministério Público de Minas Gerais (MPMG), Defensoria Pública de Minas Gerais (DPMG), Ministério Público Federal (MPF) e governo do estado de MG, com apoio de Auditoria Ambiental. A empresa de consultoria Arcadis foi contratada pela Vale para elaborar o PRSABP.

A primeira versão do PRSABP foi divulgada em maio de 2021 e duas novas versões foram disponibilizadas de forma preliminar, sendo a última em outubro de 2023 (Minas Gerais, 2024). O Plano é composto por quatro capítulos: 1) Diagnóstico Pretérito, 2) Avaliação dos Impactos Ambientais (AIA) decorrentes do rompimento, 3) Plano de ação para remediação, reparação e restauração dos impactos, contendo indicadores e metas e Avaliação de Impactos Cumulativos (AIC), e 4) Gestão Adaptativa de dados. Estes são submetidos à apreciação dos órgãos de Estado e à auditoria socioambiental.

Neste capítulo abordamos as premissas metodológicas e sistematizamos os impactos diagnosticados e as medidas de reparação propostas no PRSABP. O objetivo é trazer alertas em torno do mapeamento de danos oriundos de desastres crimes, mas também avaliar a importância de iniciativas de recuperação de áreas degradadas e/ou restauração florestal na bacia do rio Paraopeba.

### **1.3 Premissas metodológicas do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba**

O PRSABP foi desenvolvido a partir das diretrizes metodológicas do modelo Pressão-Estado-Impacto-Resposta proposto por Sanches et al. (2018). Este modelo metodológico compartilha grandes similaridades e é embasado em diversos aspectos adotados em Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA)<sup>[1]</sup>, uma vez que suas

---

<sup>1</sup> As etapas do Licenciamento Ambiental estabelecidas na Política Nacional de Meio Ambiente, Lei Nº 6938/81, são a Licença Prévia, que consiste na etapa de aprovação da localização e concepção do empreendimento, em fase de planejamento preliminar, atestando sua viabilidade ambiental, além de estabelecer os requisitos basilares e condicionantes que deverão ser atendidos nas próximas fases de sua implantação. Nesta etapa define-se, ainda, ao requerente os parâmetros para lançamento de efluentes líquidos e gasosos, resíduos sólidos, emissões sonoras, bem como a exigência de apresentação de propostas de medidas de controle ambiental provenientes dos possíveis impactos a serem gerados. Na etapa da Licença de Instalação, define-se e autoriza-se a instalação do empreendimento, atividade ou obra, conforme as especificações que constam nos planos, programas e projetos aprovados, fixando o cronograma de execução das medidas mitigadoras, bem como a implantação dos sistemas de controle ambiental. Ver mais em: <http://pnla.mma.gov.br/etapas-do->

bases teóricas e conceituais são amplamente empregadas em avaliações de impacto ambiental, conforme discutido por Sanchez (2013). A proposta do modelo é facilitar a compreensão das relações de causa e efeito, empregando uma abordagem metodológica conhecida como avaliação *ex-post* de impactos. Segundo Arcadis (2022, p.49), essa abordagem é aplicada “*quando o objeto analisado é uma intervenção ocorrida e por isso o foco da avaliação está em olhar para intervenções passadas, tendo uma data de corte para análise de dados bem definida*”.

Essas diretrizes adotadas no PRSABP visam avaliar os efeitos imediatos, intermediários e de longo prazo decorrentes do rompimento da barragem, utilizando dados secundários para caracterizar a condição da bacia antes do rompimento (diagnóstico pretérito) e dados primários gerados pela Vale S.A. e suas terceirizadas, principalmente pela Arcadis, para a caracterização após o rompimento (Arcadis, 2022, p.51). Alguns questionamentos a essa metodologia se fazem necessários, uma vez que a identificação e mensuração de diversos impactos é feita através de uma relação mecânica de causa-e-efeito, sobretudo, a partir de dados secundários defasados, incompletos, com séries históricas com falhas e lacunas. Além disso, a construção da Área Indiretamente Afetada (AIA) foi feita baseada, principalmente, nesses dados, sem incursões a campo, caracterizando superficialmente o contexto socioambiental da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

O uso de uma metodologia focada em licenciamentos ambientais para grandes empreendimentos como meio para a reparação socioambiental de um desastre-crime dessa magnitude traz implicações, uma vez que esse modelo comprime a realidade ecossistêmica, complexa e concreta da bacia, desconsiderando a teia de relações não só dos aspectos ecológicos, físicos, químicos e bióticos, mas também as territorialidades, os processos participativos das pessoas atingidas, bem como a percepção socioambiental do desastre-crime que lhes é própria. Isso fere premissas do próprio acordo, que traz em suas disposições finais a centralidade das pessoas atingidas e a transparência e participação social informada (Minas Gerais, 2021).

A categoria de impacto ambiental, a partir da Resolução CONAMA 001/86, passou a ser um fundamento essencial do arcabouço jurídico que estabelece alguns dos principais instrumentos da política ambiental brasileira. É a partir dessa resolução que ficaram definidos os critérios de avaliação para empreendimentos públicos e privados, e seus respectivos impactos,

instituídos como política pública EIA e o RIMA. A legislação considera os aspectos dos meios físico, biótico e socioeconômico de forma apartada, em eixos que não se integram. Espera-se ainda, de forma bastante ambiciosa, que o EIA seja capaz de possibilitar a identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos potenciais impactos positivos e negativos (benéficos e adversos), diretos e indiretos, de curto, médio e longo prazos, temporários e permanentes; sua reversibilidade; características cumulativas e sinérgicas; bem como a distribuição dos ônus e benefícios sociais (Torres, 2006). Não obstante, o EIA deveria não só propor medidas de mitigação para os impactos negativos, como também propor programas de monitoramento dos impactos positivos e negativos (Torres, 2006).

Existem três grandes implicações do licenciamento ambiental brasileiro que merecem ser discutidas traçando uma reflexão a respeito da metodologia adotada no PRSABP. Conforme observado por Torres (2006) a categoria "impacto ambiental" é intrinsecamente associada à empreendimento específico, considerando fontes primárias de degradação ambiental. No entanto, este enfoque apresenta limitações significativas não só para os EIA/RIMA, mas principalmente no espelhamento metodológico para a reparação socioambiental do rompimento, uma vez que não abrange os processos de transformação espacial que resultam da ação simultânea de diversos agentes.

No contexto do rompimento de barragens, onde múltiplas variáveis interagem de maneira complexa, o modelo pode falhar em fornecer uma visão abrangente e integrada dos impactos socioambientais, sobretudo, como no caso dos EIA, que consideram apenas a fonte primária, cuja abordagem pontual dificulta a identificação e caracterização de impactos cumulativos e sinérgicos que emergem de atividades diversas, comprometendo uma visão integrada e sistêmica do meio ambiente.

A segunda implicação do licenciamento ambiental refere-se à delimitação das áreas de influência, que é essencial para a produção de diagnósticos, prognósticos e proposições de medidas mitigadoras. No EIA, as áreas geográficas consideradas "direta" ou "indiretamente afetadas" (ADA, AID) são geralmente determinadas com base na bacia hidrográfica na qual localiza-se o projeto. Contudo, essa delimitação é frequentemente ajustada de forma arbitrária e *ad hoc*, o que pode resultar muito mais em questões políticas ou de mercado, do que propriamente em parâmetros técnicos e científicos. As delimitações arbitrárias podem comprometer a integridade dos diagnósticos e das medidas mitigadoras propostas. Uma delimitação inadequada pode subestimar os impactos, levando a uma insuficiência nas ações de



mitigação. Além disso, as delimitações ajustadas de forma *ad hoc* frequentemente refletem pressões políticas e interesses de mercado, de modo que governos podem ser influenciados por grupos de interesse que têm como objetivo facilitar a aprovação de projetos, mesmo que isso venha a custo de impactos ambientais não devidamente avaliados, pressionando por ajustes que favoreçam a viabilidade econômica de seus projetos, evitando custos adicionais com medidas mitigadoras mais rigorosas (Torres, 2006; Grossi, 2020).

No caso do desastre, os rejeitos se espalharam por uma área muito maior do que a delimitada inicialmente, afetando várias bacias hidrográficas e atingindo regiões distantes do ponto de origem do rompimento. A abordagem metodológica *ex-post*, utilizada para avaliar intervenções passadas, também apresenta desafios quando aplicada a desastres de grande magnitude. A complexidade e a imprevisibilidade dos impactos ambientais de longo prazo, como os observados na bacia do rio Paraopeba, exigem uma metodologia que vá além da análise retrospectiva e que seja capaz de antecipar e integrar múltiplas dimensões dos impactos. Isso nos leva a terceira implicação do licenciamento, que são os limites da capacidade de isolar e prever os efeitos adversos de um desastre tão devastador.

A matriz de impactos proposta pela Arcadis para o PRSABP define exclusivamente a bacia do ribeirão Ferro-Carvão enquanto escala local e todos os municípios atingidos à jusante como escala regional. Essa definição induz à não identificação de processos e impactos em diversos ecossistemas, localidades, comunidades atingidas, que estão à jusante do rompimento. Essa definição arbitrária desconsidera um aspecto indutor central que é o comportamento sistêmico de espalhamento da pluma de rejeitos frente ao comportamento fluvial e hidrodinâmico da bacia, sua geomorfologia, planícies de inundação etc. Esse ponto é extremamente preocupante, uma vez que o PRSABP se baseia a partir da Nota Técnica nº2/FEAM/DOCUMENTACAOB1/2019, cujas áreas de influência são definidas da seguinte forma: “*ADI como toda aquela em que houve passagem de rejeitos e; a AII toda aquela cujos atributos físicos, bióticos e socioeconômicos, incluindo água, solo, sedimento, ar, fauna, flora, processos ecológicos, serviços ecossistêmicos foram alterados em consequência do desastre*” (Arcadis, 2022, p.43).

É justamente essa arbitrariedade utilizada para definição das áreas impactadas que acaba mascarando a complexidade dos impactos e riscos colocados pelo rompimento, nas suas mais diversas magnitudes, incorrendo em um grave erro, uma vez que a escala não define o nível de

análise, muito menos com ele deve ser confundida, a escala irá conferir visibilidade ao fenômeno, pois são noções independentes conceitual e empiricamente (Castro, 1995, p.123).

#### 1.4 Análise descritiva da matriz de impactos

Para realizar a análise descritiva da matriz de impactos construímos um banco de dados com os impactos e seus respectivos atributos (Material Suplementar) apresentados pela Arcadis no plano de reparação socioambiental. A tabela 1 apresenta as variáveis/atributos associados a cada impacto, utilizados para construção desse banco de dados. Fizemos uma análise qualiquantitativa dos impactos e seus respectivos atributos, considerando o número absoluto e percentual de impactos em relação a cada atributo.

Tabela 1: Variáveis utilizadas na construção do banco de dados para análise integrada das informações relacionados aos impactos identificados do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.

| VARIÁVEIS/ATRIBUTOS                                                                                                     | DESCRIÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Identidade numérica dos impactos (ID)</b>                                                                            | Os impactos aparecem com IDs de 1 a 82.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Nome do impacto</b>                                                                                                  | Descrição do impacto.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Agente indutor: é um elemento inerente a uma atividade que pode interagir com o ambiente e resultar em impactos.</b> | Arraste e deposição de rejeitos; Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos; Suspensão de material particulado na atmosfera; Mudança repentina nas condições de vida; Chuvas extremas 2019/2020 e inundações do rio Paraopeba.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Tipo de Impacto: analisado conforme cadeia de causa e efeito</b>                                                     | Direto: impactos que decorrem de um ou mais agentes indutores.<br>Indireto: impactos que decorrem de impactos diretos ou de uma cadeia de causa e efeito.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Reversibilidade: capacidade do ambiente afetado retornar ao seu estado anterior</b>                                  | Reversível: quando cessada a ação ou implantada medida corretiva, o componente retorna às condições originais ou semelhantes.<br>Irreversível: quando cessada a ação ou implantada medida corretiva, o componente não retorna às condições originais ou semelhantes. São impactos não mitigáveis em sua totalidade ou em parte.                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Ocorrência: apresentação dos impactos de acordo com a confirmação de sua ocorrência.</b>                             | Efetivo: quando não existem incertezas sobre sua ocorrência, já ocorreram e/ou ainda estão ocorrendo.<br>Potencial: impactos cuja ocorrência ainda não foi comprovada.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Escala espacial: abrangência espacial do impacto</b>                                                                 | Local: sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão e/ou sub-bacia do ribeirão Casa Branca ou município do Brumadinho. São mapeáveis.<br>Regional: ultrapassa limites dos impactos locais, mas restrito a bacia do rio Paraopeba e reservatório da EHE Três Marias. São mapeáveis.<br>Difusa: ultrapassa limites da escala regional, podem ser mapeáveis ou não.                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Componente afetado: quaisquer elementos do ambiente físico, biótico, social, econômico e cultural.</b>               | Foram 28 componentes foram impactados: Relevo, Solo, Recursos minerais, Água subterrânea, Água superficial, Sedimentos, Ar, Biota aquática, Fauna silvestre, Vegetação nativa, Áreas protegidas e de interesse para conservação, Fauna doméstica, Cadeia produtiva da mineração, Qualidade de vida, Uso da terra, Patrimônio privado, Abastecimento público de água, Administração pública, Comércio e serviços, Patrimônio cultural acautelado, Patrimônio cultural não acautelado, Paisagem natural, Serviços de provisão, Serviços de regulação, Serviços culturais, Indústria, Economia, Demografia. |

|                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Classe: foram apresentadas 8 classes de impactos para relacionar com planos e programas propostos.</b> | Meio abiótico, subdivido em águas superficiais e subterrâneas, ar, recursos minerais e solos; Meio biótico, subdivido em biota aquática e biota terrestre; Patrimônio cultural; Saúde; Social; Economia. |
| <b>Planos e Programas previstos no PRSABH</b>                                                             | Planos ou programa, previsto pelo Anexo II.1, que se relacionam diretamente com os impactos apresentados.                                                                                                |

A Arcadis (2022) apresenta 82 impactos no PRSABP, sendo 38 impactos diretos e 44 indiretos. Vinte e cinco foram considerados irreversíveis e cinquenta e sete reversíveis. Em relação à confirmação de sua ocorrência, 18 foram considerados impactos potenciais e 64 considerados impactos efetivos. A listagem com todos os impactos e seus atributos podem ser observados no material suplementar S1.

A tabela 2 traz uma análise combinada, considerando o tipo de impacto, a reversibilidade e a confirmação de ocorrência. A maior parte (31,7%) foi considerada impactos indiretos, reversíveis e efetivos, a exemplo da alteração do balanço hídrico superficial da bacia do rio Paraopeba, redução da heterogeneidade ambiental, redução da capacidade de autodepuração dos cursos d'água e redução da permeabilidade para a fauna. Dentre os 25 irreversíveis 20 são efetivos, o que significa que sua ocorrência já foi registrada e quantificada. Um exemplo é o aumento da demanda por águas subterrâneas. Esse impacto decorre da proibição de uso da água do rio Paraopeba e da restrição do consumo de água de poços e cisternas da margem até 100 metros do rio Paraopeba, o impacto é considerado difuso, pois ocorre em toda a bacia do rio Paraopeba (Fig. 1).



Figura 1: Placa de não recomendação de uso de água do poço artesiano. Paraopeba, Minas Gerais. Acervo Núcleo de Assessoria a Comunidades Atingidas por Barragens (NACAB).

Apenas um impacto foi considerado direto, irreversível e potencial, ou seja, cuja ocorrência ainda não foi identificada nem quantificada. Refere-se à alteração das características químicas do solo que ainda tem caráter potencial, visto que não foi identificada ou quantificado incremento significativo de determinados elementos químicos do solo sotopostos pelo rejeito, cabendo estudos complementares para definir sua ocorrência (Arcadis, 2022).

Tabela 2: Número e percentual de impactos por tipo, reversibilidade e ocorrência, identificados do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.

| Tipo de impacto   | Reversibilidade | Ocorrência | Número de Impactos | Porcentagem |
|-------------------|-----------------|------------|--------------------|-------------|
| Direto            | Irreversível    | Potencial  | 1                  | 1,22%       |
|                   |                 | Efetivo    | 15                 | 18,29%      |
|                   | Reversível      | Potencial  | 3                  | 3,66%       |
|                   |                 | Efetivo    | 19                 | 23,17%      |
| Indireto          | Irreversível    | Potencial  | 5                  | 6,10%       |
|                   |                 | Efetivo    | 4                  | 4,88%       |
|                   | Reversível      | Potencial  | 9                  | 10,98%      |
|                   |                 | Efetivo    | 26                 | 31,71%      |
| Total de impactos |                 |            | 82                 | 100%        |

Os impactos também são agrupados em dez classes (tabela 3). Dezessete impactos pertencem a mais de uma classe, o aumento da demanda de águas subterrâneas e a alteração do balanço hídrico superficial da bacia do rio Paraopeba, por exemplo, enquadram-se tanto em Meio abiótico (águas superficiais, subterrâneas e sedimentos) quanto na classe Social. A classe Social é a que mais agrupa impactos, com um total de 33, seguida pela Meio biótico - biota terrestre com 22.

Tabela 3: Número de Impactos por classes identificados do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.

| Classes                                                       | Número de Impactos |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|
| Meio Abiótico – Ar                                            | 1                  |
| Meio abiótico – águas superficiais, subterrâneas e sedimentos | 7                  |
| Meio abiótico – recursos minerais                             | 2                  |
| Meio abiótico – solos                                         | 7                  |
| Meio biótico – biota terrestre                                | 22                 |
| Meio biótico – biota aquática                                 | 8                  |
| Saúde                                                         | 5                  |
| Patrimônio Cultural                                           | 4                  |
| Economia                                                      | 10                 |
| Social                                                        | 33                 |

Os 45 impactos reversíveis e efetivos já são reconhecidos e passíveis de medidas de mitigação. Um exemplo é a interferência em áreas de preservação permanente (APP), cuja escala é regional, e abrange as APPs da calha do rio Paraopeba (Figs. 2 e 3). Na região da sub-bacia do ribeirão Ferro Carvão o rejeito suprimiu trechos com vegetação nativa, cobrindo inclusive o dossel. Há também áreas que tiveram o sub-bosque ou substrato ocupado pelo rejeito e áreas com interferência das inundações do rio com as chuvas de 2019/2020. De acordo com estudos realizados pela Universidade Federal de Lavras (UFLA, 2000 *apud* Arcadis, 2022) não existem dados conclusivos sobre a contaminação nas APPs das áreas de interferência das inundações. Nessas áreas, espera-se que os pulsos de cheias naturais sejam suficientes para reverter o impacto nas APPs inundadas pelo rio Paraopeba. Embora esse impacto tenha uma escala regional, a única medida de reparação associada a ele no PRSABP é o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas, que tem uma área de abrangência local.



Figura 2: Rejeito cobrindo solo na comunidade de Taquaras, Esmeraldas, Minas Gerais. Acervo Núcleo de Assessoria a Comunidades Atingidas por Barragens (NACAB).



Figura 3: A área atingida pelos rejeitos, em imagem feita pelo Corpo de Bombeiros de Minas. Rejeito suprimiu trechos de vegetação nativa cobrindo, inclusive, o dossel de árvores. Fonte: <https://www.bbc.com>.

Existe um total de 29 Planos/Programas relacionados aos impactos, sendo o número de impactos abarcado por cada um deles observado na Figura 4.

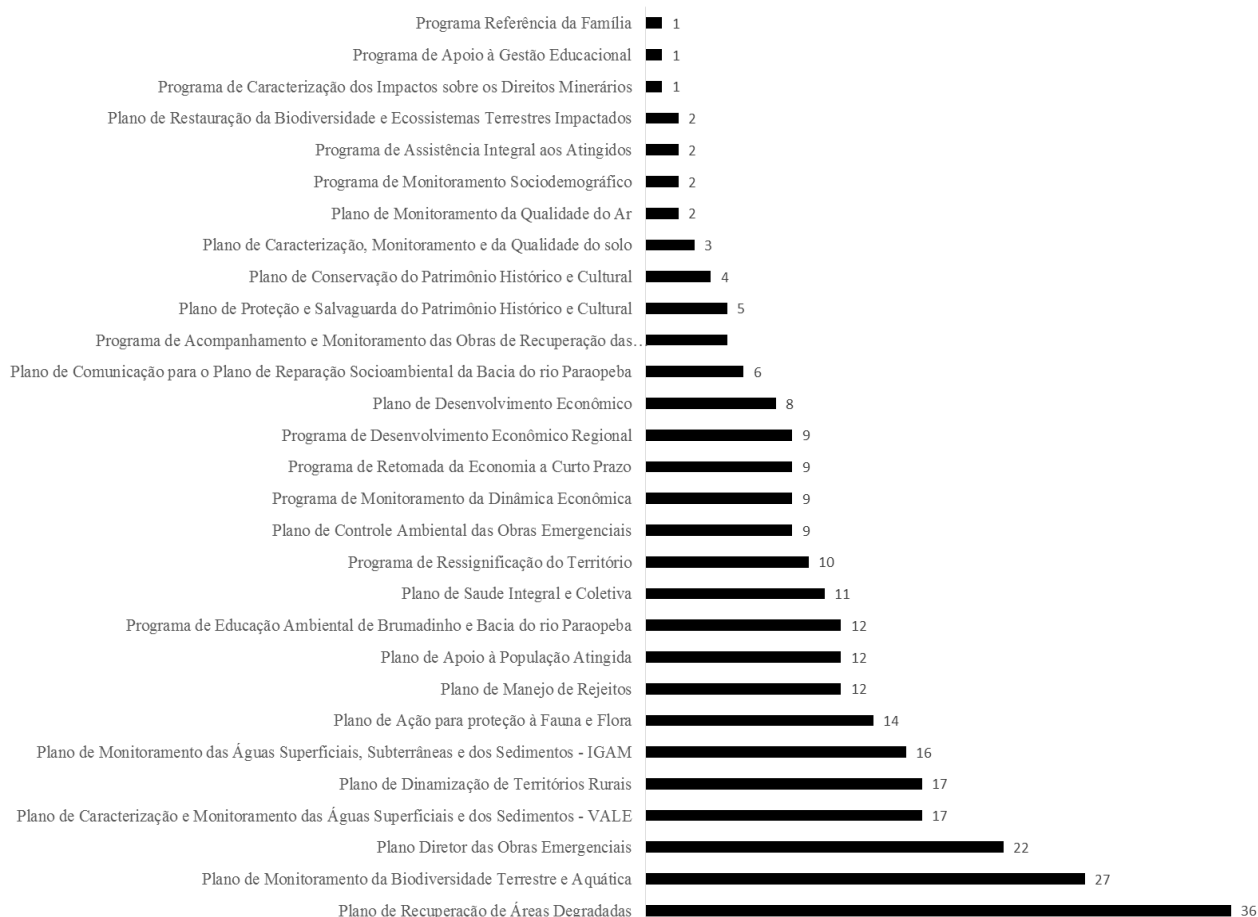


Figura 4: Número de impactos por Planos e Programas do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba, Minas Gerais.

Os Planos de Recuperação de Áreas Degradadas e de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática compreendem o maior número de impactos e devem, portanto, ser tratados com grande relevância. A lista de impactos e seus respectivos planos e programas podem ser observados no material suplementar S2.

### 1.5 Análise de rede dos impactos do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba

O Plano de Reparação Socioambiental apresenta cinco cadeias de causa-efeito para os impactos diretos e indiretos, cada uma elaborada a partir de um agente indutor: (i) Arraste e deposição de rejeitos; (ii) Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos; (iii) Suspensão de material particulado na atmosfera; (iv) Mudanças repentina nas condições de vida; (v) Chuvas extremas 2019/2020 e inundações do rio Paraopeba (Arcadis, 2022).



Construímos uma rede complexa integrando as cinco cadeias de causa-efeito a partir de uma matriz de adjacências (material suplementar S3). A matriz de adjacências é uma das formas de se representar um grafo. Dado um grafo  $G$  com  $n$  vértices, podemos representá-lo em uma matriz  $n \times n$   $A(G) = [a_{ij}]$ .

Nessa matriz definimos os números identificadores dos impactos (ID) como os nós da rede, já as arestas representam a relação de causa-efeito dos impactos diretos e indiretos. Não consideramos pesos para caracterizar a força da relação entre os impactos e mantemos apenas a relação entre os impactos que foi apresentada pela Arcadis em suas cadeias de causa-efeito.

Utilizamos o software Gephi Graph Visualization and Manipulation (v. 010) para construção da rede e cálculo das estatísticas e métricas de análise (Bastian, et al., 2009). O algoritmo de layout de grafos desenvolvido por Yifan Hu, foi utilizado para distribuição dos nós na rede (Hu, 2005). Esse algoritmo usa a ideia de que os vértices do grafo são como objetos físicos que repelem uns aos outros, e as arestas são como elásticos que puxam os vértices que interagem diretamente entre si. Na prática, esse tipo de distribuição indica que nós próximos uns dos outros tendem a ter uma relação mais forte ou mais direta entre si (Hu & Lei, 2014).

Definimos como propriedades de entrada no algoritmo uma distância ótima entre nós igual a 120, a força relativa igual a 0,2, o tamanho inicial do passo iterativo igual a 10% do valor da distância ótima e a relação de passo igual a 0,95. Esses parâmetros são os recomendados e definidos por padrão por Bastian et. al. (2009).

Calculamos as métricas aplicadas para avaliação da integridade da rede: Grau Médio (“Average Degree”), Diâmetro (“Diameter”), Densidade (“Density”) e Número total de comunidades modulares (“Number of Communities”). Também calculamos Grau (“Degree”), Grau de Entrada (“Out-degree”), Grau de Saída (“In-degree”), Centralidade (“Betweenness Centrality”) e Modularidade (“Modularity Class”) para cada um dos impactos, representados por nó, na rede de interações. A tabela 4 apresenta, de maneira simplificada, o que essas métricas de ranqueamento dos impactos significam e sua aplicação prática dentro do contexto deste estudo.



Tabela 4: Métricas utilizadas para análise quantitativa dos impactos e sua aplicação prática para avaliação da rede de interações de causa e efeito do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.

| MÉTRICA                                           | DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Grau</b><br>(Degree)                           | Na teoria dos grafos, o grau de um nó representa o número total de conexões (arestas ou ligações) que esse nó tem com outros nós. No contexto de uma rede de causa e efeito de impactos, um nó com um alto grau está envolvido em muitas relações de causa e efeito. Isso pode indicar que o impacto correspondente a esse nó é uma causa ou efeito comum. Por outro lado, um nó com um baixo grau está envolvido em poucas relações de causa e efeito.                                                                                                                                                                                        |
| <b>Grau de saída</b><br>(“Out-degree”)            | O grau de saída de um nó é o número de arestas ou ligações que saem desse nó. Em uma rede de causa e efeito, isso representa o número de impactos que são causados diretamente por um determinado impacto. Um alto grau de saída indica que o impacto correspondente a esse nó é uma causa comum para muitos outros impactos. Um baixo grau de saída indica que o impacto não é uma causa direta de muitos outros impactos.                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Grau de entrada</b><br>(“In-degree”)           | O grau de entrada de um nó é o número de arestas que entram nesse nó. Em uma rede de causa e efeito, isso representa o número de impactos que causam diretamente um determinado impacto. Um alto grau de entrada indica que o impacto correspondente a esse nó é comumente afetado por muitos outros impactos. Um baixo grau de entrada indica que o impacto não é diretamente afetado por muitos outros impactos.                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Centralidade</b><br>(“Betweenness Centrality”) | A centralidade de um nó é calculada com base em quantas vezes esse nó aparece nos caminhos mais curtos entre os outros nós da rede. Isso significa que um nó com alta centralidade atua como uma espécie de “ponte” entre outras partes da rede. Na prática, isso significa que o impacto correspondente a esse nó é um ponto comum em muitos caminhos de causa e efeito na rede. Em outras palavras, esse impacto específico pode ser o resultado de várias causas diferentes e/ou pode levar a vários outros impactos diferentes.                                                                                                            |
| <b>Modularidade</b><br>(“Modularity Class”)       | Essa métrica é utilizada para medir o quão bem uma rede se decompõe em comunidades modulares. Se os nós representam impactos e as arestas representam uma relação de causa e efeito entre esses impactos, então os nós que estão associados à mesma classe modular podem ser interpretados como impactos que estão inter-relacionados de maneira significativa. Em outras palavras, se dois ou mais nós pertencem à mesma classe modular, isso sugere que eles compartilham um conjunto comum de relações de causa e efeito. Isso pode indicar que esses impactos tendem a ocorrer juntos ou influenciam uns aos outros de maneira semelhante. |

A rede elaborada apresentou 82 nós e 225 arestas, que representam os impactos e o total de relações entre eles, respectivamente. Em média, cada impacto está associado a 2,74 outros impactos. O diâmetro total da rede, ou seja, a maior distância entre dois nós, é igual a 5, indicando que qualquer impacto está a uma distância causal de até cinco outros impactos. A rede possui baixo valor de densidade (0,034), que é a medida de interconexão da rede. Em uma rede com densidade 1 todos os nós estão conectados. Esses resultados se relacionam com a metodologia de construção da cadeia de causa-efeito feita pela Arcadis, onde as relações entre os impactos foram simplificadas. Na construção da cadeia apresentada no PRSABP um ou mais

agentes indutores são capazes de causar os impactos diretos, esses por sua vez causam impactos indiretos, que podem originar outros impactos indiretos e assim sucessivamente, até o limite da quarta ordem dos impactos indiretos ou secundários. Porém, essa estratégia pode ocultar outras relações de interação entre os impactos. Uma análise mais complexa dessas relações pode revelar, por exemplo, que a intensificação dos processos erosivos (impacto indireto) poderia causar ou potencializar o assoreamento de corpos hídricos (impacto direto). Abordagens mais complexas permitem compreensão mais profunda das interações entre impactos e, provavelmente, aumentariam a densidade da rede.

As métricas individuais dos impactos são apresentadas no material suplementar S4 e visualizadas na Figura 5 (A, B, C, D). Os histogramas de frequência para as métricas relacionadas ao grau (número de conexões ligadas aos impactos) podem ser observados na Figura 6.

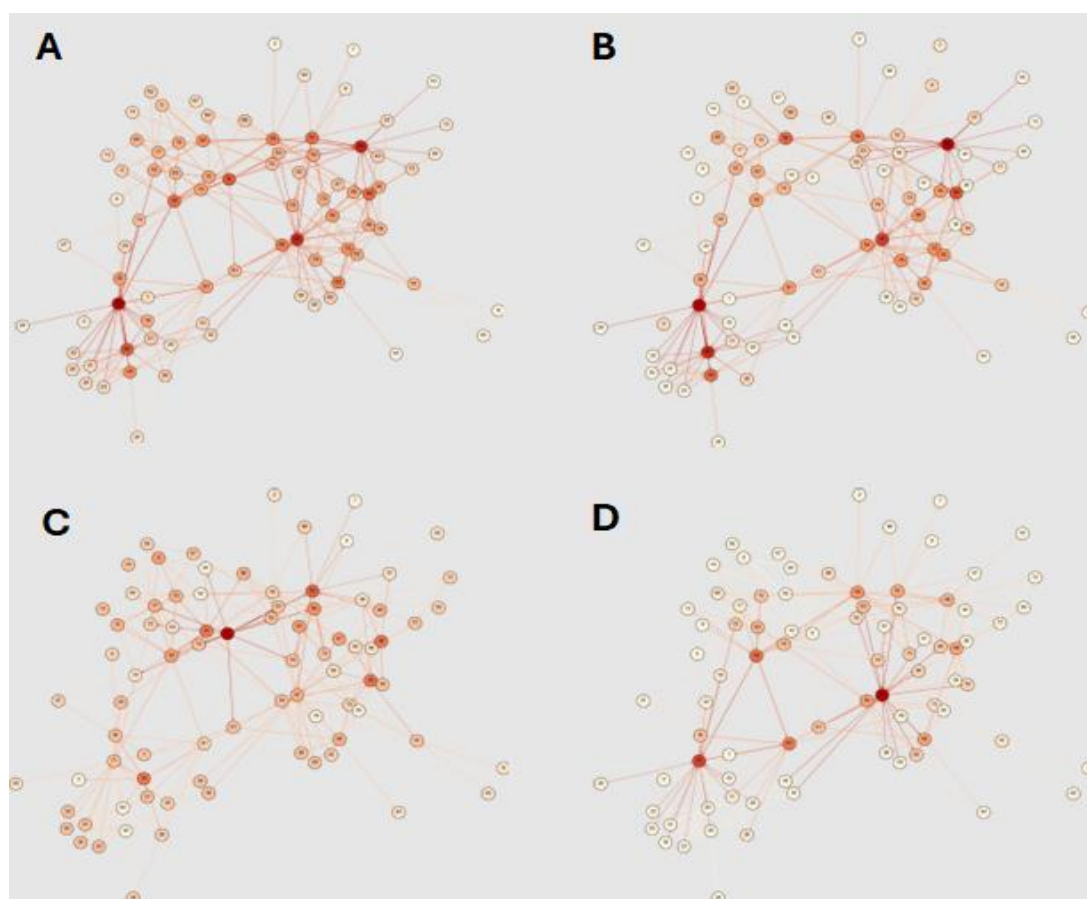


Figura 5: Rede de causa efeito ranqueada por métrica de análise dos impactos. A) Grau; B) Grau de Entrada; C) Grau de Saída; D) Centralidade. Fonte de informações: Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.

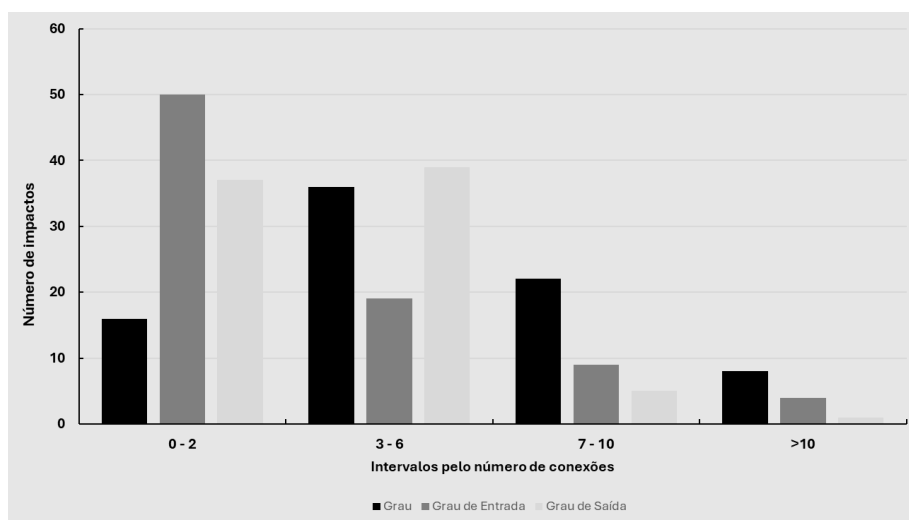


Figura 6: Número de impactos por intervalos de número de conexões totais (grau), conexões de entrada (grau de entrada) e conexões de saída (grau de saída). Fonte de informações: Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.

Oito impactos obtiveram valores superiores a dez conexões<sup>3</sup> A maior parte dos impactos (36) se correlaciona a 3 - 6 impactos, mas o número de conexões foi igual ou superior a 12 em cinco impactos: alteração da composição e estrutura das comunidades terrestres (17); perturbação das atividades rotineiras e aumento do incômodo à população (15); esgarçamento das relações tofófilas (15); redução da qualidade da água superficial (12) e redução da polinização e dispersão de sementes (12). Com exceção da redução da qualidade da água superficial, todos os demais obtiveram grau elevado devido ao alto número de conexões de entrada. Isso significa que são principalmente causados por outros impactos, e não necessariamente causadores. Conforme pode ser observado na Figura 3, a maior parte dos impactos (50), é causada por até dois impactos. Isso reforça a abordagem simplificada de relação entre os impactos apresentada pela Arcadis.

Cabe destacar os impactos de redução da qualidade superficial; restrição do acesso à água; assoreamento de corpos hídricos; e redução da cobertura vegetal, que apresentaram os maiores graus de saída com valores de 12, 8, 7 e 7, respectivamente. Isso significa que esses impactos são pontos críticos na rede, pois são capazes de gerar um maior número de impactos secundários. A princípio, podemos pensar que a realização de medidas mitigatórias para esses impactos, podem minimizar a magnitude ou existência de outros. Ações ou mudanças promovidas em nós com altos valores de grau de saída podem influenciar significativamente o sistema como um todo (Mukhtar, et al. 2023).

A métrica centralidade é calculada com base no número de vezes que o impacto aparece nos caminhos mais curtos entre outros nós da rede. Cinco impactos se destacam com relação a essa métrica: Esgarçamento das relações tofólicas (Centralidade: 87,03); Alteração da composição e estrutura das comunidades terrestres (67,70); Alteração da composição e estrutura das comunidades hidrobiológicas (53,71); Aumento na incidência de doenças relacionadas à fauna sinantrópica (50,80); e Aumento na incidência de doenças de veiculação hídrica (41,12). Na Figura 5D é possível observar como esses impactos funcionam como elo entre os agrupamentos de impactos (comunidades) distribuídos pela rede.

A partir do cálculo das classes modulares, observamos três grandes agrupamentos, ou comunidades, de impactos (Figura 7). Analisando cada comunidade, observamos que os impactos foram agrupados quase exclusivamente por componente afetado. Os impactos dentro da comunidade 1 (azul) são associados ao meio físico. Os impactos dentro da comunidade 2 (verde), são normalmente aqueles associados ao meio biótico e às áreas protegidas. Já os impactos da comunidade 3 (rosa) são associados ao meio socioeconômico.

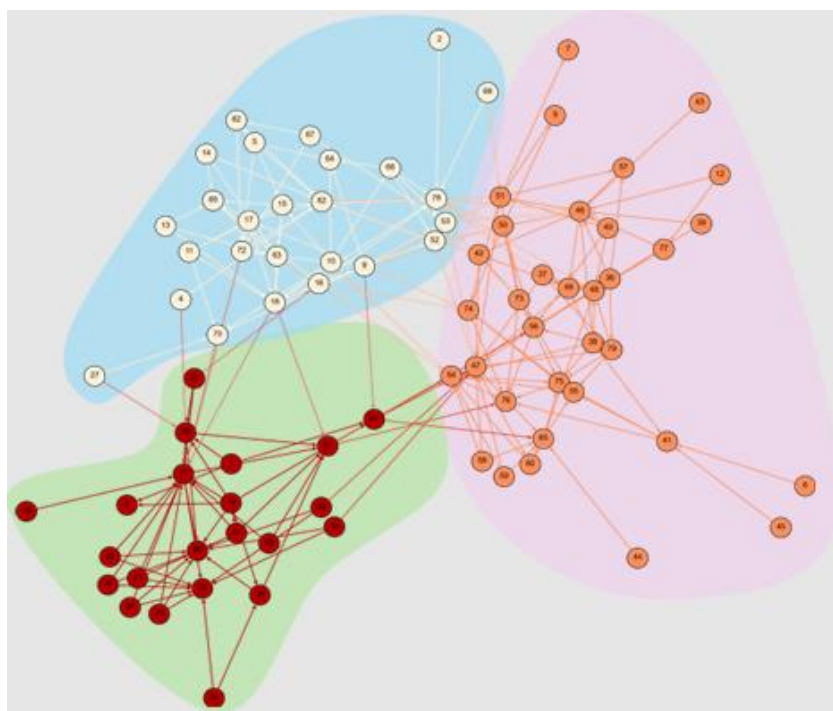


Figura 7: Agrupamentos de impactos por comunidade. Azul: Agrupamento de impactos ao meio físico; Verde: Agrupamento de impactos ao meio biótico e áreas protegidas; Rosa: Agrupamento de impactos do meio socioeconômico. Fonte de informações: Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.

Destaca-se na análise por comunidade a presença do impacto referente à alteração da qualidade do ar e alteração do balanço hídrico na comunidade 3, a mudança das características do relevo e a descaracterização da paisagem na comunidade 2 e a perda de indivíduos da ictiofauna e a desregulação fisiológica dos indivíduos da flora dentro da comunidade 1. Novamente, os dados refletem a estratégia de apresentação das cadeias de causa-efeito feita pela Arcadis. A análise da matriz de adjacências permite identificar, por exemplo, que a alteração da qualidade do ar, meio físico, origina apenas dois impactos indiretos, um da classe social (perturbação de atividades rotineiras) e outro da classe de saúde (aumento na incidência de doenças respiratórias), o que os levou a compor a comunidade ligada ao meio socioeconômico. É preciso realizar uma análise minuciosa para entender qual conjunto comum de relações de causa-efeito os impactos compartilham e que justifique seus comportamentos na rede.

## 1.6 Conclusão

A aplicação da metodologia Pressão-Estado-Impacto-Resposta no PRSABP, embora fundamentada em diretrizes consagradas, revela limitações significativas ao abordar a complexidade do desastre de Brumadinho. A dependência de dados secundários e a definição arbitrária das áreas impactadas comprometem a compreensão integral dos impactos. A abordagem convencional de licenciamento ambiental, ao focar em causas pontuais e delimitações ad hoc, desconsidera as interações sistêmicas e os impactos cumulativos, limitando a eficácia das medidas de reparação. Assim, torna-se essencial adotar uma metodologia mais integrada e participativa, alinhada à complexidade do contexto socioambiental.

Ainda assim, é possível perceber que o rompimento causou danos significativos ao meio ambiente, à sociedade e à economia da região da bacia do rio Paraopeba. Sua reparação é um processo complexo e de longo prazo, que requer a colaboração de diversos atores e a adoção de medidas integradas. A análise integrada em rede dos impactos se mostra útil para entender as interconexões entre os eles e orientar as ações de reparação. Os resultados da análise em rede revelam que o impacto da redução da qualidade superficial da água se mostra como uma prioridade, uma vez que possui alto valor de grau e de grau de saída. O investimento de ações que trabalhem para mitigar ou minimizar esse impacto pode oferecer, consequentemente, benefícios a outros impactos interconectados.

Embora os impactos como a redução da qualidade da água superficial, aumento da demanda de águas subterrâneas e alteração do balanço hídrico não apresentem nenhuma relação nas cadeias construídas pela Arcadis, todos comprometem a disponibilidade de um dos recursos

naturais essenciais para a manutenção da vida, a água potável. Esses impactos combinados podem intensificar, no futuro, os conflitos pela água na bacia do rio Paraopeba.

No entanto, para que a análise de rede funcione como um bom instrumento de planejamento e apoio para tomadas de decisão, é preciso fazer uma reflexão mais profunda sobre as relações dos impactos e criar uma cadeia de causa-efeito que demonstre a complexidade da interação entre eles. Além disso, é possível fazer a análise de cada impacto, considerando também seus atributos, que podem revelar características fundamentais para priorizar ações de reparação.

A demanda por recursos hídricos e a perda/redução da cobertura vegetal são problemas centrais referentes ao rompimento. Logo, investir em ações de restauração florestal na bacia do rio Paraopeba pode ser uma estratégia importante de reparação e compensação socioambiental. A restauração florestal pode melhorar a infiltração da água no solo, reduzindo o escoamento superficial e, consequentemente, a erosão e o transporte de sedimentos para os corpos d'água (Liu et al., 2008; Croke et al., 2017; Novoa et al., 2018). A restauração florestal não só recupera a vegetação, mas também desempenha um papel crucial na recuperação de habitats e dispersão de espécies se destacando como uma estratégia essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, contribuindo para a resiliência dos ecossistemas e das comunidades humanas que dependem desses recursos.

## REFERÊNCIAS

ACP (2019). AÇÃO CIVIL PÚBLICA nº 5044954-73.2019.8.13.0024. Ministério Público Federal. Empresa VALE S.A. Belo Horizonte, 2019.

ARCADIS. Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba. Rompimento das barragens B1, B4 e B4-A do Complexo Paraopeba II – Mina Córrego do Feijão. 1034 p. 2022.

Bastian, M., Heymann, S., Jacomy, M. (2009). Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks. Gephi.org. Gephi : An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks,. Acesso em 20 de julho, 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Publicada no D.O.U. em 17 de fevereiro de 1986. Disponível em: <file:///G:\cnia\conam3\86\001-86.htm (ibama.gov.br)>. Acesso em 14 de junho de 2024.

Castro, I. E. “O problema da escala”. In: Castro, I. E. et al. (Orgs.) Geografia: conceitos e temas. Rio de Janeiro, Bertrand, 1995.

Council. National Council for Human Rights. Conselho Nacional dos Direitos Humanos. In Relatório da Missão Emergencial a Brumadinho/MG Após Rompimento da Barragem da Vale S/A; Conselho Nacional dos Direitos Humanos: Brasília, Brasil, 2019.

Croke, J.; Thompson, C.; Fryirs, K. Prioritizing the placement of riparian vegetation to reduce flood risk and end-of-catchment sediment yields: important considerations in hydrologically variable regions. *Journal of Environmental Management*, v. 190, p. 9-19, 2017. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.12.046.

Fernandes, G. W. et al. (2016) Deep into the mud: ecological and socio - economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Natureza e Conservação*, v. 14, n. 2, p. 35–45, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ncon.2016.10.003>. Acesso em 18 de novembro, 2023.

Grossi B. L. A natureza do homem e a lama do desastre, o desastre do homem e a lama na natureza, a lama do homem e a natureza do desastre. Dissertação de Mestrado. UFMG. 2020. 226 f.

Hatje V, Pedreira RMA, de Rezende CE et al (2017) The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Sci Rep* 7:1–13. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>. Acesso em 04 de dezembro, 2023.

Hu, Yifan; Lei, Shi. A coloring algorithm for disambiguating graph and map drawings. \*arXiv\*, 2014. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1409.0436>. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.0436>. Acesso em 05 de janeiro, 2024.

Hu. Y. [http://www2.research.att.com/~yifanhu/PUB/graph\\_draw\\_small](http://www2.research.att.com/~yifanhu/PUB/graph_draw_small). Pdf Efficient and High Quality Force-Directed Graph Drawing. *Mathematica Journal*, 10:37–71, 2005

Liu, X. Zhang, X.; Zhang, M. Major factors influencing the efficacy of vegetated buffers on sediment trapping: a review and analysis. *Journal of Environmental Quality*, v. 37, p. 1667–1674, 2008.

MINAS GERAIS. Governo do Estado. Reparação Brumadinho | Compensação socioambiental dos danos já conhecidos - Anexo II.2 | MG.GOV.BR - Pró-Brumadinho. Disponível em: <https://www.mg.gov.br>. Acesso em: 01 jul. 2024

MINAS GERAIS (Estado). Poder Judiciário. Tribunal de Justiça de Minas Gerais. Centro Judiciário de Solução de Conflitos e Cidadania - 2º Grau. Acordo judicial para reparação integral relativa ao rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA / Córrego do Feijão. Processo de Mediação SEI nº 0122201-59.2020.8.13.0000. Belo Horizonte: TJMG, 2021

Mukhtar, M. F.; Abas, Z. A.; Baharuddin, A. S.; Norzan, M. N.; Fakhruddin, W. F. W.; Minato, W.; Rasib, A. H. A.; Abidin, Z. Z.; Rahman, A. F. N. A.; Anuar, S. H. Integrating local and global information to identify influential nodes in complex networks. \*Scientific Reports\*, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-37570-7.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2024.

Mulholland, D., Garnier, J., Araújo, D. et al. New insights into metal(loid) dynamics in the Doce River estuary (Brazil) after a massive iron ore-processing tailing dam collapse. *Environ Sci Pollut Res* 29, 43072–43088 (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18101-1>. Acesso em 18 de novembro, 2023

Nota Técnica nº2/FEAM/DOCUMENTACAOB1/2019

Novoa, J. et al. A novel index for assessment of riparian strip efficiency in agricultural landscapes using high spatial resolution satellite imagery. *Science of The Total Environment*, v. 644, p. 1439–1451, 2018. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.069.

Rotta, L.H.S.; Alcântara, E.; Park, E.; Negri, R.G.; Lin, Y.N.; Bernardo, N.; Mendes, T.S.G.; Filho, C.R.S. The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2020, 90, 102119. [CrossRef]

Santamarina, J. C., Torres-Cruz, L. A., Bachus, R. C. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, Vol 364, Issue 6440 pp. 526-528. DOI: 10.1126/science.aax1927

Sánchez, L.E., Alger, K., Alonso, L., Barbosa, F.A.R., Brito, M.C.W., Laureano, F.V., May, P., Roeser, H., Kakabadse, Y., (2018). Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão. O caminho para uma mitigação sustentável e resiliente. Relatório Temático no 1 do Painel do Rio Doce. Gland, Suíça: UICN.

Sanchez, Luis Enrique. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

Scarpelini, J., Herculano, L. M. L., Dias, L. C. P., & Chume, V. F. (2020). Dam collapse and right to adequate housing: insights from the biggest socio-environmental disaster involving Brazilian mining sector. *Research, Society and Development*, 9(4), e80942517. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i4.2517>

Souza, M. L. de. *Os conceitos fundamentais da pesquisa socioespacial*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015.

Torres, H. (2006). A demografia do risco ambiental. In: TORRES, H.; COSTA, H. (orgs.). *População e meio ambiente: debates e desafios*. 2ª ed. São Paulo: SENAC, 2006. p. 53-73.

Zhou, A. et al. (2016). O desastre da Samarco e a política das afetações: classificações e ações que produzem o sofrimento social. *Cienc. Cult.*, São Paulo, v.68, n.3, pp.36-40, setembro, 2016.



## MATERIAL SUPLEMENTAR

### Material Suplementar S1

Tabela 1: Matriz de impactos mapeados pela Arcadis e presentes no Plano de Reparação Socioambiental da bacia do rio Paraopeba. Impactos e seus atributos.

| ID | IMPACTOS                                                                      | Tipo de dano | Reversibilidade | Ocorrência | Escala Espacial | Componente afetado | Agente indutor 1                | Agente indutor2                                                      | Agente indutor3 | Classificação         | Classificação2 |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|------------|-----------------|--------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|----------------|
| 1  | Mudança das características do relevo                                         | Direto       | Reversível      | Efetivo    | Local           | Relevo             | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | não se aplica   | Meio abiótico - solos |                |
| 2  | Alteração das características morfodinâmicas dos cursos d'água                | Direto       | Irreversível    | Efetivo    | Local           | Relevo             | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | não se aplica   | Meio abiótico - solos |                |
| 3  | Intensificação dos processos erosivos                                         | Indireto     | Reversível      | Efetivo    | Local           | Relevo             | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica   | Meio abiótico - solos |                |
| 4  | Perda de camadas superficiais e alteração das características físicas do solo | Direto       | Irreversível    | Efetivo    | Local           | Solo               | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica                                                        | não se aplica   | Meio abiótico - solos |                |
| 5  | Alteração das características do solo nas áreas inundadas                     | Direto       | Reversível      | Potencial  | Regional        | Solo               | Arraste e deposição de rejeitos | Chuvas extremas 2019/2020 e inundações do rio Paraopeba              | não se aplica   | Meio abiótico - solos |                |

|    |                                                                           |          |              |         |          |                   |                                 |                                                                      |                                                         |                                                               |        |
|----|---------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|---------|----------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------|
| 6  | <b>Interrupção das Atividades Minerárias</b>                              | Direto   | Reversível   | Efetivo | Regional | Recursos minerais | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | não se aplica                                           | Meio abiótico - Recursos Minerais                             |        |
| 7  | <b>Aumento da demanda de águas subterrâneas</b>                           | Indireto | Irreversível | Efetivo | Difuso   | Água subterrânea  | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica                                           | Meio abiótico - águas superficiais, subterrâneas e sedimentos | Social |
| 8  | <b>Redução da Qualidade da Água Superficial</b>                           | Direto   | Reversível   | Efetivo | Regional | Água superficial  | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | Chuvas extremas 2019/2020 e inundações do rio Paraopeba | Meio abiótico - águas superficiais, subterrâneas e sedimentos |        |
| 9  | <b>Alteração do balanço hídrico superficial da bacia do rio Paraopeba</b> | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Água superficial  | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica                                           | Meio abiótico - águas superficiais, subterrâneas e sedimentos | Social |
| 10 | <b>Assoreamento de Corpos Hídricos</b>                                    | Direto   | Reversível   | Efetivo | Regional | Sedimentos        | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | Chuvas extremas 2019/2020 e inundações do rio Paraopeba | Meio abiótico - águas superficiais, subterrâneas e sedimentos |        |
| 11 | <b>Alteração na Qualidade dos Sedimentos</b>                              | Direto   | Irreversível | Efetivo | Regional | Sedimentos        | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | não se aplica                                           | Meio abiótico - águas superficiais, subterrâneas e sedimentos |        |

|    |                                                                            |          |              |           |          |                  |                                   |                                                                      |               |                                |
|----|----------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|-----------|----------|------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------|
| 12 | <b>Alterações na Qualidade do Ar</b>                                       | Direto   | Reversível   | Potencial | Local    | Ar               | Suspensão de material particulado | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio abiótico - Ar             |
| 13 | <b>Perda de Habitat Aquáticos</b>                                          | Direto   | Reversível   | Efetivo   | Local    | Biota aquática   | Arraste e deposição de rejeitos   | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio biótico - Biota Aquática  |
| 14 | <b>Perda de Indivíduos da Ictiofauna</b>                                   | Direto   | Irreversível | Efetivo   | Regional | Biota aquática   | Arraste e deposição de rejeitos   | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | não se aplica | Meio biótico - Biota Aquática  |
| 15 | <b>Redução da Heterogeneidade Ambiental</b>                                | Indireto | Reversível   | Efetivo   | Regional | Biota aquática   | não se aplica                     | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio biótico - Biota Aquática  |
| 16 | <b>Redução da Capacidade de Autodepuração dos cursos d'água</b>            | Indireto | Reversível   | Efetivo   | Regional | Biota aquática   | não se aplica                     | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio biótico - Biota Aquática  |
| 17 | <b>Aumento de Efeitos de Toxicidade e Bioacumulação na Biota Aquática</b>  | Indireto | Irreversível | Efetivo   | Regional | Biota aquática   | não se aplica                     | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio biótico - Biota Aquática  |
| 18 | <b>Alteração da Composição e Estrutura das Comunidades Hidrobiológicas</b> | Indireto | Reversível   | Efetivo   | Regional | Biota aquática   | não se aplica                     | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio biótico - Biota Aquática  |
| 19 | <b>Redução da cobertura vegetal</b>                                        | Direto   | Reversível   | Efetivo   | Local    | Vegetação nativa | Arraste e deposição de rejeitos   | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |

|    |                                                                                |          |              |         |          |                  |                                 |               |               |                                |
|----|--------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|---------|----------|------------------|---------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------|
| 20 | <b>Perda de áreas úmidas</b>                                                   | Direto   | Reversível   | Efetivo | Local    | Vegetação nativa | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |
| 21 | <b>Perda de indivíduos da flora</b>                                            | Direto   | Irreversível | Efetivo | Local    | Vegetação nativa | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |
| 22 | <b>Perda de indivíduos da flora de espécies ameaçadas e protegidas por lei</b> | Direto   | Irreversível | Efetivo | Local    | Vegetação nativa | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |
| 23 | <b>Perda de banco de sementes</b>                                              | Direto   | Irreversível | Efetivo | Local    | Vegetação nativa | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |
| 24 | <b>Fragmentação da cobertura vegetal</b>                                       | Direto   | Reversível   | Efetivo | Regional | Vegetação nativa | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |
| 25 | <b>Redução do fluxo gênico em espécies vegetais</b>                            | Indireto | Reversível   | Efetivo | Local    | Vegetação nativa | não se aplica                   | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |
| 26 | <b>Aumento do efeito de borda</b>                                              | Indireto | Reversível   | Efetivo | Local    | Vegetação nativa | não se aplica                   | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |
| 27 | <b>Desregulação fisiológica de indivíduos da flora</b>                         | Direto   | Reversível   | Efetivo | Local    | Vegetação nativa | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |
| 28 | <b>Perda em indivíduos da fauna silvestre</b>                                  | Direto   | Irreversível | Efetivo | Regional | Fauna silvestre  | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |
| 29 | <b>Injúria de indivíduos da fauna silvestre</b>                                | Direto   | Irreversível | Efetivo | Regional | Fauna silvestre  | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |
| 30 | <b>Perda de Habitat Terrestre</b>                                              | Indireto | Reversível   | Efetivo | Local    | Fauna silvestre  | não se aplica                   | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |

|    |                                                                                            |          |              |         |          |                                                  |                                         |                                                                      |                                                         |                                   |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|---------|----------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 31 | <b>Redução da permeabilidade para a fauna</b>                                              | Indireto | Reversível   | Efetivo | Local    | Fauna silvestre                                  | não se aplica                           | não se aplica                                                        | não se aplica                                           | Meio Biótico -<br>Biota Terrestre |
| 32 | <b>Interferência em Áreas de Preservação Permanente (APP)</b>                              | Direto   | Reversível   | Efetivo | Regional | Áreas protegidas e de interesse para conservação | Arraste e deposição de rejeitos         | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | Chuvas extremas 2019/2020 e inundações do rio Paraopeba | Meio Biótico -<br>Biota Terrestre |
| 33 | <b>Interferência em Unidade de Conservação (UC)</b>                                        | Direto   | Reversível   | Efetivo | Regional | Áreas protegidas e de interesse para conservação | Arraste e deposição de rejeitos         | Chuvas extremas 2019/2020 e inundações do rio Paraopeba              | não se aplica                                           | Meio Biótico -<br>Biota Terrestre |
| 34 | <b>Interferência em áreas de Reserva Legal</b>                                             | Direto   | Reversível   | Efetivo | Regional | Áreas protegidas e de interesse para conservação | Arraste e deposição de rejeitos         | Chuvas extremas 2019/2020 e inundações do rio Paraopeba              | não se aplica                                           | Meio Biótico -<br>Biota Terrestre |
| 35 | <b>Interferência em áreas de interesse para a conservação</b>                              | Direto   | Reversível   | Efetivo | Regional | Áreas protegidas e de interesse para conservação | Arraste e deposição de rejeitos         | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | Chuvas extremas 2019/2020 e inundações do rio Paraopeba | Meio Biótico -<br>Biota Terrestre |
| 36 | <b>Perda de moradia, desalojamento e desabrigo da população</b>                            | Direto   | Irreversível | Efetivo | Local    | Qualidade de vida                                | Arraste e deposição de rejeitos         | não se aplica                                                        | não se aplica                                           | Social                            |
| 37 | <b>Ocorrência de sofrimento social e aumento de problemas psicológicos e psicossociais</b> | Direto   | Reversível   | Efetivo | Difuso   | Qualidade de vida                                | Mudança repentina das condições de vida | não se aplica                                                        | não se aplica                                           | Social<br>Saúde                   |

|    |                                                                                                           |          |              |         |          |                               |                                 |                                         |               |                                   |          |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|---------|----------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|---------------|-----------------------------------|----------|
| 38 | <b>Interrupção de acessos e aumento no fluxo de veículos e do tempo de trajeto nas vias remanescentes</b> | Direto   | Reversível   | Efetivo | Regional | Qualidade de vida             | Arraste e deposição de rejeitos | Mudança repentina das condições de vida | não se aplica | Social                            |          |
| 39 | <b>Interferência no serviço de transmissão de energia elétrica</b>                                        | Direto   | Reversível   | Efetivo | Local    | Qualidade de vida             | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica                           | não se aplica | Social                            |          |
| 40 | <b>Destruição de dois poços profundos no Parque da Cachoeira</b>                                          | Direto   | Reversível   | Efetivo | Local    | Abastecimento público de água | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica                           | não se aplica | Social                            |          |
| 41 | <b>Prejuízos ao setor industrial mineral</b>                                                              | Indireto | Reversível   | Efetivo | Difuso   | Cadeia produtiva da mineração | não se aplica                   | não se aplica                           | não se aplica | Meio abiótico - Recursos Minerais | Economia |
| 42 | <b>Perda de áreas produtivas e de animais de produção</b>                                                 | Direto   | Irreversível | Efetivo | Local    | Uso da terra                  | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica                           | não se aplica | Social                            | Economia |
| 43 | <b>Perda de indivíduos da fauna doméstica</b>                                                             | Direto   | Irreversível | Efetivo | Regional | Fauna doméstica               | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica                           | não se aplica | Social                            |          |
| 44 | <b>Perda de patrimônio particular</b>                                                                     | Direto   | Reversível   | Efetivo | Local    | Patrimônio ativo              | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica                           | não se aplica | Social                            | Economia |
| 45 | <b>Interrupção da captação de água da empresa Mineral do Brasil no córrego Ferro-Carvão</b>               | Direto   | Reversível   | Efetivo | Local    | Cadeia produtiva da mineração | Arraste e deposição de rejeitos | não se aplica                           | não se aplica | Social                            |          |
| 46 | <b>Perturbação das atividades rotineiras e aumento do incômodo à população</b>                            | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Qualidade de vida             | não se aplica                   | não se aplica                           | não se aplica | Social                            |          |

|    |                                                                                    |          |              |         |          |                               |               |               |               |          |          |
|----|------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|---------|----------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|
| 47 | <b>Esgarçamento das relações topofílicas</b>                                       | Indireto | Irreversível | Efetivo | Regional | Qualidade de vida             | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social   |          |
| 48 | <b>Pressão sobre serviços públicos</b>                                             | Indireto | Reversível   | Efetivo | Difuso   | Administração pública         | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social   | Saude    |
| 49 | <b>Comprometimento da qualidade e da garantia do direito à educação</b>            | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Qualidade de vida             | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social   |          |
| 50 | <b>Paralisação da captação de água no rio Paraopeba para abastecimento público</b> | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Abastecimento público de água | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social   |          |
| 51 | <b>Restrição do acesso à água</b>                                                  | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Qualidade de vida             | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social   |          |
| 52 | <b>Indisponibilidade de uso da terra nas áreas lindeiras ao rio Paraopeba</b>      | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Uso da terra                  | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social   |          |
| 53 | <b>Restrição do uso de áreas produtivas</b>                                        | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Uso da terra                  | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social   |          |
| 54 | <b>Prejuízos à cadeia produtiva do turismo</b>                                     | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Comércio e serviços           | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social   | Economia |
| 55 | <b>Alteração nos níveis de arrecadação fiscal</b>                                  | Indireto | Reversível   | Efetivo | Difuso   | Administração pública         | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Economia |          |
| 56 | <b>Alteração nas despesas públicas</b>                                             | Indireto | Reversível   | Efetivo | Difuso   | Administração pública         | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Economia |          |

|    |                                                                                   |          |              |         |          |                                     |                                 |                                                                      |                                         |                               |                     |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|---------|----------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 57 | <b>Desabrigo e injúria de animais domésticos</b>                                  | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Fauna doméstica                     | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica                           | Social                        |                     |
| 58 | <b>Perda de Patrimônio Arqueológico</b>                                           | Direto   | Irreversível | Efetivo | Local    | Patrimônio cultural acautelado      | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | não se aplica                           | Patrimônio Cultural           |                     |
| 59 | <b>Perda de patrimônio cultural material (histórico, arquitetônico e pessoal)</b> | Direto   | Irreversível | Efetivo | Regional | Patrimônio cultural não acautelado  | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | não se aplica                           | Patrimônio Cultural           |                     |
| 60 | <b>Interferência/interrupção do patrimônio cultural imaterial</b>                 | Direto   | Irreversível | Efetivo | Regional | Patrimônio cultural acautelado      | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | Mudança repentina das condições de vida | Social                        | Patrimônio Cultural |
| 61 | <b>Descaracterização da paisagem</b>                                              | Indireto | Irreversível | Efetivo | Regional | Paisagem natural                    | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica                           | Social                        | Patrimônio Cultural |
| 62 | <b>Redução da segurança alimentar</b>                                             | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Serviços ecossistêmicos de provisão | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica                           | Social                        |                     |
| 63 | <b>Redução dos estoques pesqueiros</b>                                            | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Serviços ecossistêmicos de provisão | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica                           | Meio biótico - Biota Aquática | Social              |
| 64 | <b>Insegurança relacionada às inundações</b>                                      | Indireto | Reversível   | Efetivo | Regional | Serviços ecossistêmicos de provisão | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica                           | Meio abiótico - solos         | Social              |
| 65 | <b>Alteração da Identidade cultural</b>                                           | Indireto | Reversível   | Efetivo | Difuso   | Serviços ecossistêmicos culturais   | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica                           | Social                        |                     |



|    |                                                                               |          |              |           |          |                  |                                 |                                                                      |               |                                                               |        |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|-----------|----------|------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------|--------|
| 66 | <b>Aumento das áreas inundáveis</b>                                           | Indireto | Reversível   | Potencial | Regional | Relevo           | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio abiótico - águas superficiais, subterrâneas e sedimentos |        |
| 67 | <b>Alteração das características químicas do solo</b>                         | Direto   | Irreversível | Potencial | Local    | Solo             | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | não se aplica | Meio abiótico - solos                                         |        |
| 68 | <b>Alteração da qualidade das águas subterrâneas</b>                          | Direto   | Reversível   | Potencial | Regional | Água subterrânea | Arraste e deposição de rejeitos | Carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos | não se aplica | Meio abiótico - águas superficiais, subterrâneas e sedimentos | Social |
| 69 | <b>Alteração da Composição e Estrutura da Ictiofauna</b>                      | Indireto | Reversível   | Potencial | Regional | Biota aquática   | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio biótico - Biota Aquática                                 |        |
| 70 | <b>Redução da qualidade do habitat de espécies terrestres e semiaquáticas</b> | Indireto | Reversível   | Potencial | Regional | Fauna silvestre  | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre                                |        |
| 71 | <b>Alteração da composição e estrutura das comunidades terrestres</b>         | Indireto | Reversível   | Potencial | Local    | Fauna silvestre  | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre                                |        |
| 72 | <b>Efeitos de toxicidade e bioacumulação em indivíduos de Fauna Silvestre</b> | Indireto | Irreversível | Potencial | Difuso   | Fauna silvestre  | não se aplica                   | não se aplica                                                        | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre                                |        |

|    |                                                                              |          |              |           |          |                                      |               |               |               |                                |          |
|----|------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------|-----------|----------|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|----------|
| 73 | <b>Prejuízos ao setor agrosilvopastoril e aquicultura</b>                    | Indireto | Reversível   | Potencial | Regional | Uso da terra                         | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social                         | Economia |
| 74 | <b>Prejuízos ao setor industrial de uso intensivo de água</b>                | Indireto | Reversível   | Potencial | Regional | Indústria                            | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Economia                       |          |
| 75 | <b>Alterações no setor de comércio e serviços</b>                            | Indireto | Reversível   | Potencial | Regional | Comércio e serviços                  | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Economia                       |          |
| 76 | <b>Arrefecimento da economia e alterações nos níveis de emprego e renda</b>  | Indireto | Reversível   | Potencial | Difuso   | Economia                             | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Economia                       |          |
| 77 | <b>Aumento na incidência de doenças respiratórias</b>                        | Indireto | Reversível   | Potencial | Regional | Qualidade de vida                    | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Saúde                          |          |
| 78 | <b>Aumento na incidência de doenças de veiculação hídrica</b>                | Indireto | Irreversível | Potencial | Regional | Qualidade de vida                    | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social                         | Saúde    |
| 79 | <b>Alteração da Dinâmica Demográfica</b>                                     | Indireto | Irreversível | Potencial | Regional | Demografia                           | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social                         |          |
| 80 | <b>Redução da polinização e dispersão de sementes</b>                        | Indireto | Reversível   | Efetivo   | Local    | Serviços ecossistêmicos de regulação | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre | Social   |
| 81 | <b>Aumento na incidência de doenças relacionadas à fauna sinantrópica</b>    | Indireto | Irreversível | Potencial | Difuso   | Serviços ecossistêmicos de regulação | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Social                         | Saude    |
| 82 | <b>Efeito de toxicidade e bioacumulação em indivíduos da flora silvestre</b> | Indireto | Irreversível | Potencial | Regional | Vegetação nativa                     | não se aplica | não se aplica | não se aplica | Meio Biótico - Biota Terrestre |          |

## Material Suplementar 2

Tabela 1: Matriz de impactos mapeados pela Arcadis e presentes no Plano de Reparação Socioambiental da bacia do rio Paraopeba. Impactos e Planos e Programas relacionados.

| ID | IMPACTOS                                                                      | PLANOS E PROGRAMAS DE REPARAÇÃO                                      |                                          |                                                               |   |   |   |   |   |   |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|
|    |                                                                               | 1                                                                    | 2                                        | 3                                                             | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1  | Mudança das características do relevo                                         | Plano Diretor das Obras Emergenciais                                 | Plano de Manejo de Rejeitos              | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                      |   |   |   |   |   |   |
| 2  | Alteração das características morfodinâmicas dos cursos d'água                | Plano Diretor das Obras Emergenciais                                 | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas |                                                               |   |   |   |   |   |   |
| 3  | Intensificação dos processos erosivos                                         | Plano Diretor das Obras Emergenciais                                 | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas | Plano de Controle Ambiental das Obras Emergenciais            |   |   |   |   |   |   |
| 4  | Perda de camadas superficiais e alteração das características físicas do solo | Plano Diretor das Obras Emergenciais                                 | Plano de Manejo de Rejeitos              | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                      |   |   |   |   |   |   |
| 5  | Alteração das características do solo nas áreas inundadas                     | Plano Diretor das Obras Emergenciais                                 | Plano de Manejo de Rejeitos              | Plano de Caracterização, Monitoramento e da Qualidade do solo |   |   |   |   |   |   |
| 6  | Interrupção das Atividades Minerárias                                         | Programa de Caracterização dos Impactos sobre os Direitos Minerários |                                          |                                                               |   |   |   |   |   |   |

|    |                                                                           |                                          |                                                                                     |                                                                                        |                                                                                        |                                                                                        |                                                    |                                                               |                                            |
|----|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 7  | <b>Aumento da demanda de águas subterrâneas</b>                           | Plano Diretor das Obras Emergenciais     | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                                             |                                                                                        |                                                    |                                                               |                                            |
| 8  | <b>Redução da Qualidade da Água Superficial</b>                           | Plano Diretor das Obras Emergenciais     | Plano de Manejo de Rejeitos                                                         | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                               | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM    | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Controle Ambiental das Obras Emergenciais | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática |                                            |
| 9  | <b>Alteração do balanço hídrico superficial da bacia do rio Paraopeba</b> | Plano Diretor das Obras Emergenciais     | Plano de Manejo de Rejeitos                                                         | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                               | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM    | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Controle Ambiental das Obras Emergenciais | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática | Plano de Dinamização de Territórios Rurais |
| 10 | <b>Assoreamento de Corpos Hídricos</b>                                    | Plano Diretor das Obras Emergenciais     | Plano de Manejo de Rejeitos                                                         | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM    | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Controle Ambiental das Obras Emergenciais                                     |                                                    |                                                               |                                            |
| 11 | <b>Alteração na Qualidade dos Sedimentos</b>                              | Plano de Manejo de Rejeitos              | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Controle Ambiental das Obras Emergenciais                                     |                                                                                        |                                                    |                                                               |                                            |
| 12 | <b>Alterações na Qualidade do Ar</b>                                      | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas | Plano de Monitoramento da Qualidade do Ar                                           |                                                                                        |                                                                                        |                                                                                        |                                                    |                                                               |                                            |

|    |                                                                            |                                          |                                                                                     |                                                                                        |                                                                                        |                                                                                                              |
|----|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13 | <b>Perda de Habitat Aquáticos</b>                                          | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas | Plano de Controle Ambiental das Obras Emergenciais                                  |                                                                                        |                                                                                        |                                                                                                              |
| 14 | <b>Perda de Indivíduos da Ictiofauna</b>                                   | Plano Diretor das Obras Emergenciais     | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática                          | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora                                                                  |
| 15 | <b>Redução da Heterogeneidade Ambiental</b>                                | Plano Diretor das Obras Emergenciais     | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                            | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM    | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática                                                |
| 16 | <b>Redução da Capacidade de Autodepuração dos cursos d'água</b>            | Plano Diretor das Obras Emergenciais     | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                            | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM    | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE |                                                                                                              |
| 17 | <b>Aumento de Efeitos de Toxicidade e Bioacumulação na Biota Aquática</b>  | Plano Diretor das Obras Emergenciais     | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática                          |                                                                                                              |
| 18 | <b>Alteração da Composição e Estrutura das Comunidades Hidrobiológicas</b> | Plano Diretor das Obras Emergenciais     | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                            | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM    | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática<br>Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora |

|    |                                                                                |                                          |                                                               |                                             |
|----|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 19 | <b>Redução da cobertura vegetal</b>                                            | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática |                                             |
| 20 | <b>Perda de áreas úmidas</b>                                                   | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas |                                                               |                                             |
| 21 | <b>Perda de indivíduos da flora</b>                                            | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora |
| 22 | <b>Perda de indivíduos da flora de espécies ameaçadas e protegidas por lei</b> | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora |
| 23 | <b>Perda de banco de sementes</b>                                              | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora |
| 24 | <b>Fragmentação da cobertura vegetal</b>                                       | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática |                                             |
| 25 | <b>Redução do fluxo gênico em espécies vegetais</b>                            | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática |                                             |

|    |                                                               |                                                    |                                                               |                                             |
|----|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 26 | <b>Aumento do efeito de borda</b>                             | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas           | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática |                                             |
| 27 | <b>Desregulação fisiológica de indivíduos da flora</b>        | Plano de Manejo de Rejeitos                        | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                      |                                             |
| 28 | <b>Perda em indivíduos da fauna silvestre</b>                 | Plano de Controle Ambiental das Obras Emergenciais | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora |
| 29 | <b>Injúria de indivíduos da fauna silvestre</b>               | Plano de Controle Ambiental das Obras Emergenciais | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora |
| 30 | <b>Perda de Habitat Terrestre</b>                             | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas           | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática |                                             |
| 31 | <b>Redução da permeabilidade para a fauna</b>                 | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas           | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática |                                             |
| 32 | <b>Interferência em Áreas de Preservação Permanente (APP)</b> | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas           |                                                               |                                             |

|    |                                                                                                           |                                                                                                             |                                                               |                                     |                                                                       |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 33 | <b>Interferência em Unidade de Conservação (UC)</b>                                                       | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                                                    |                                                               |                                     |                                                                       |
| 34 | <b>Interferência em áreas de Reserva Legal</b>                                                            | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                                                    |                                                               |                                     |                                                                       |
| 35 | <b>Interferência em áreas de interesse para a conservação</b>                                             | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                                                    | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática |                                     |                                                                       |
| 36 | <b>Perda de moradia, desalojamento e desabrigo da população</b>                                           | Programa de Ressignificação do Território                                                                   | Plano de Apoio à População Atingida                           | Plano de Desenvolvimento Econômico  |                                                                       |
| 37 | <b>Ocorrência de sofrimento social e aumento de problemas psicológicos e psicossociais</b>                | Programa de Ressignificação do Território                                                                   | Plano de Saúde Integral e Coletiva                            | Plano de Apoio à População Atingida | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba |
| 38 | <b>Interrupção de acessos e aumento no fluxo de veículos e do tempo de trajeto nas vias remanescentes</b> | Programa de Acompanhamento e Monitoramento das Obras de Recuperação das Infraestruturas Públicas Impactadas |                                                               |                                     |                                                                       |



|    |                                                                    |                                                                                                             |                                             |                                                 |                                                 |                                                |                                                |                                                |                                                                  |
|----|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 39 | <b>Interferência no serviço de transmissão de energia elétrica</b> | Programa de Acompanhamento e Monitoramento das Obras de Recuperação das Infraestruturas Públicas Impactadas |                                             |                                                 |                                                 |                                                |                                                |                                                |                                                                  |
| 40 | <b>Destruição de dois poços profundos no Parque da Cachoeira</b>   | Programa de Acompanhamento e Monitoramento das Obras de Recuperação das Infraestruturas Públicas Impactadas |                                             |                                                 |                                                 |                                                |                                                |                                                |                                                                  |
| 41 | <b>Prejuízos ao setor industrial mineral</b>                       | Programa de Caracterização dos Impactos sobre os Direitos Minerários                                        |                                             | Programa de Monitoramento da Dinâmica Econômica |                                                 |                                                |                                                |                                                |                                                                  |
| 42 | <b>Perda de áreas produtivas e de animais de produção</b>          | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                                                                  | Plano de Apoio à População Atingida         | Plano de Desenvolvimento Econômico              | Programa de Monitoramento da Dinâmica Econômica | Programa de Retomada da Economia a Curto Prazo | Programa de Desenvolvimento Econômico Regional | Programa de Assistência Integral aos Atingidos | Programa Apoio Técnico para Reestruturação das Atividades Rurais |
| 43 | <b>Perda de indivíduos da fauna doméstica</b>                      | Plano Diretor das Obras Emergenciais                                                                        | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora |                                                 |                                                 |                                                |                                                |                                                |                                                                  |
| 44 | <b>Perda de patrimônio particular</b>                              | Plano de Apoio à População Atingida                                                                         | Plano de Desenvolvimento Econômico          | Programa de Retomada da Economia a Curto Prazo  | Programa de Desenvolvimento Econômico Regional  | Programa de Assistência Integral aos Atingidos | Programa Referência da Família                 |                                                |                                                                  |

|    |                                                                                             |                                                                                                             |                                            |                                                                                    |                                     |                                     |                                            |                                                                       |  |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--|
| 45 | <b>Interrupção da captação de água da empresa Mineral do Brasil no córrego Ferro-Carvão</b> | Programa de Acompanhamento e Monitoramento das Obras de Recuperação das Infraestruturas Públicas Impactadas |                                            |                                                                                    |                                     |                                     |                                            |                                                                       |  |
| 46 | <b>Perturbação das atividades rotineiras e aumento do incômodo à população</b>              | Programa de Ressignificação do Território                                                                   | Plano de Saúde Integral e Coletiva         | Plano de Apoio à População Atingida                                                |                                     |                                     |                                            |                                                                       |  |
| 47 | <b>Esgarçamento das relações topofílicas</b>                                                | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                                                    | Plano de Dinamização de Territórios Rurais | Programa de Ressignificação do Território                                          | Plano de Saúde Integral e Coletiva  | Plano de Apoio à População Atingida | Plano de Desenvolvimento Econômico         | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba |  |
| 48 | <b>Pressão sobre serviços públicos</b>                                                      | Programa de Ressignificação do Território                                                                   | Plano de Saúde Integral e Coletiva         | Plano de Comunicação para o Plano de Reparação Ambiental da Bacia do rio Paraopeba | Plano de Apoio à População Atingida | Plano de Desenvolvimento Econômico  | Programa de Monitoramento Sociodemográfico |                                                                       |  |
| 49 | <b>Comprometimento da qualidade e da garantia do direito à educação</b>                     | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba                                       | Programa de Apoio à Gestão Educacional     |                                                                                    |                                     |                                     |                                            |                                                                       |  |
| 50 | <b>Paralisação da captação de água no rio Paraopeba para abastecimento público</b>          | Programa de Acompanhamento e Monitoramento das Obras de Recuperação das Infraestruturas Públicas Impactadas |                                            |                                                                                    |                                     |                                     |                                            |                                                                       |  |

|    |                                                                               |                                                                                     |                                                                                        |                                                         |                                                 |                                                |                                                                                    |                                                                    |                                    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 51 | <b>Restrição do acesso à água</b>                                             | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Dinamização de Territórios Rurais              | Programa de Ressignificação do Território       | Plano de Saúde Integral e Coletiva             | Plano de Comunicação para o Plano de Reparação Ambiental da Bacia do rio Paraopeba | Plano de Apoio à População Atingida                                | Plano de Desenvolvimento Econômico |
| 52 | <b>Indisponibilidade de uso da terra nas áreas lindeiras ao rio Paraopeba</b> | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                                          |                                                                                        |                                                         |                                                 |                                                |                                                                                    |                                                                    |                                    |
| 53 | <b>Restrição do uso de áreas produtivas</b>                                   | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                                          |                                                                                        |                                                         |                                                 |                                                |                                                                                    |                                                                    |                                    |
| 54 | <b>Prejuízos à cadeia produtiva do turismo</b>                                | Plano de Desenvolvimento Econômico                                                  | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba                  | Plano de Conservação do Patrimônio Histórico e Cultural | Programa de Monitoramento da Dinâmica Econômica | Programa de Retomada da Economia a Curto Prazo | Programa de Desenvolvimento Econômico Regional                                     | Plano de Proteção e Salvaguarda do Patrimônio Histórico e Cultural |                                    |
| 55 | <b>Alteração nos níveis de arrecadação fiscal</b>                             | Programa de Monitoramento da Dinâmica Econômica                                     | Programa de Retomada da Economia a Curto Prazo                                         | Programa de Desenvolvimento Econômico Regional          |                                                 |                                                |                                                                                    |                                                                    |                                    |
| 56 | <b>Alteração nas despesas públicas</b>                                        | Programa de Monitoramento da Dinâmica Econômica                                     | Programa de Retomada da Economia a Curto Prazo                                         | Programa de Desenvolvimento Econômico Regional          |                                                 |                                                |                                                                                    |                                                                    |                                    |
| 57 | <b>Desabrigo e injúria de animais domésticos</b>                              | Plano Diretor das Obras Emergenciais                                                | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                                             | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora             |                                                 |                                                |                                                                                    |                                                                    |                                    |
| 58 | <b>Perda de Patrimônio Arqueológico</b>                                       | Plano de Proteção e Salvaguarda do Patrimônio Histórico e Cultural                  |                                                                                        |                                                         |                                                 |                                                |                                                                                    |                                                                    |                                    |

|    |                                                                            |                                                                                     |                                                                                        |                                                                                    |                                                                       |                                                                    |                                                                                    |                                                                                    |                                                                    |                                                                             |
|----|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 59 | Perda de patrimônio cultural material (histórico, arquitetônico e pessoal) | Plano de Proteção e Salvaguarda do Patrimônio Histórico e Cultural                  |                                                                                        |                                                                                    |                                                                       |                                                                    |                                                                                    |                                                                                    |                                                                    |                                                                             |
| 60 | Interferência/interrupção do patrimônio cultural imaterial                 | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                                         | Programa de Ressignificação do Território                             | Plano de Apoio à População Atingida                                | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba              | Plano de Conservação do Patrimônio Histórico e Cultural                            | Plano de Proteção e Salvaguarda do Patrimônio Histórico e Cultural | Plano de Restauração da Biodiversidade e Ecossistemas Terrestres Impactados |
| 61 | Descaracterização da paisagem                                              | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                            | Programa de Ressignificação do Território                                              | Plano de Apoio à População Atingida                                                | Plano de Conservação do Patrimônio Histórico e Cultural               | Plano de Proteção e Salvaguarda do Patrimônio Histórico e Cultural | Plano de Restauração da Biodiversidade e Ecossistemas Terrestres Impactados        |                                                                                    |                                                                    |                                                                             |
| 62 | Redução da segurança alimentar                                             | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                                          | Plano de Saude Integral e Coletiva                                                     | Plano de Comunicação para o Plano de Reparação Ambiental da Bacia do rio Paraopeba | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba |                                                                    |                                                                                    |                                                                                    |                                                                    |                                                                             |
| 63 | Redução dos estoques pesqueiros                                            | Plano Diretor das Obras Emergenciais                                                | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                               | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática                      | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                            | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora                        | Plano de Comunicação para o Plano de Reparação Ambiental da Bacia do rio Paraopeba | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba              |                                                                    |                                                                             |
| 64 | Insegurança relacionada às inundações                                      | Plano Diretor das Obras Emergenciais                                                | Plano de Manejo de Rejeitos                                                            | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                           | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                            | Plano de Caracterização, Monitoramento e da Qualidade do solo      | Plano de Saude Integral e Coletiva                                                 | Plano de Comunicação para o Plano de Reparação Ambiental da Bacia do rio Paraopeba |                                                                    |                                                                             |

|    |                                                                               |                                            |                                                                                     |                                                                                        |                                                                                        |                                                                                                              |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 65 | <b>Alteração da Identidade cultural</b>                                       | Plano de Dinamização de Territórios Rurais | Programa de Ressignificação do Território                                           | Plano de Apoio à População Atingida                                                    | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba                  | Plano de Conservação do Patrimônio Histórico e Cultural                                                      |
| 66 | <b>Aumento das áreas inundáveis</b>                                           | Plano Diretor das Obras Emergenciais       | Plano de Manejo de Rejeitos                                                         | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE |                                                                                        |                                                                                                              |
| 67 | <b>Alteração das características químicas do solo</b>                         | Plano de Manejo de Rejeitos                | Plano de Caracterização, Monitoramento e da Qualidade do solo                       |                                                                                        |                                                                                        |                                                                                                              |
| 68 | <b>Alteração da qualidade das águas subterrâneas</b>                          | Plano de Manejo de Rejeitos                | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Controle Ambiental das Obras Emergenciais                                     | Plano de Dinamização de Territórios Rurais<br>Plano de Saúde Integral e Coletiva                             |
| 69 | <b>Alteração da Composição e Estrutura da Ictiofauna</b>                      | Plano Diretor das Obras Emergenciais       | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                            | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM    | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática<br>Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora |
| 70 | <b>Redução da qualidade do habitat de espécies terrestres e semiaquáticas</b> | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas   | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática                       |                                                                                        |                                                                                        |                                                                                                              |

|    |                                                                               |                                                                                     |                                                                                        |                                                                       |                                                |                                                |                                                                  |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 71 | <b>Alteração da composição e estrutura das comunidades terrestres</b>         | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                            | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática                          |                                                                       |                                                |                                                |                                                                  |
| 72 | <b>Efeitos de toxicidade e bioacumulação em indivíduos de Fauna Silvestre</b> | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática                       |                                                                                        |                                                                       |                                                |                                                |                                                                  |
| 73 | <b>Prejuízos ao setor agrosilvopastoril e aquicultura</b>                     | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                                          | Plano de Desenvolvimento Econômico                                                     | Programa de Monitoramento da Dinâmica Econômica                       | Programa de Retomada da Economia a Curto Prazo | Programa de Desenvolvimento Econômico Regional | Programa Apoio Técnico para Reestruturação das Atividades Rurais |
| 74 | <b>Prejuízos ao setor industrial de uso intensivo de água</b>                 | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Programa de Monitoramento da Dinâmica Econômica                       | Programa de Retomada da Economia a Curto Prazo | Programa de Desenvolvimento Econômico Regional |                                                                  |
| 75 | <b>Alterações no setor de comércio e serviços</b>                             | Programa de Monitoramento da Dinâmica Econômica                                     | Programa de Retomada da Economia a Curto Prazo                                         | Programa de Desenvolvimento Econômico Regional                        |                                                |                                                |                                                                  |
| 76 | <b>Arrefecimento da economia e alterações nos níveis de emprego e renda</b>   | Programa de Monitoramento da Dinâmica Econômica                                     | Programa de Retomada da Economia a Curto Prazo                                         | Programa de Desenvolvimento Econômico Regional                        |                                                |                                                |                                                                  |
| 77 | <b>Aumento na incidência de doenças respiratórias</b>                         | Plano de Monitoramento da Qualidade do Ar                                           | Plano de Saúde Integral e Coletiva                                                     | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba |                                                |                                                |                                                                  |

|    |                                                                              |                                                               |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                        |                                                               |                                            |                                                                       |                                    |                                                                       |
|----|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 78 | <b>Aumento na incidência de doenças de veiculação hídrica</b>                | Plano Diretor das Obras Emergenciais                          | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                           | Plano de Monitoramento das Águas Superficiais, subterrâneas e dos Sedimentos - IGAM | Plano de Caracterização e Monitoramento das Águas Superficiais e dos Sedimentos - VALE | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática | Plano de Dinamização de Territórios Rurais | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora                           | Plano de Saúde Integral e Coletiva | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba |
| 79 | <b>Alteração da Dinâmica Demográfica</b>                                     | Programa de Ressignificação do Território                     | Plano de Comunicação para o Plano de Reparação Ambiental da Bacia do rio Paraopeba | Plano de Apoio à População Atingida                                                 | Programa de Monitoramento Sociodemográfico                                             |                                                               |                                            |                                                                       |                                    |                                                                       |
| 80 | <b>Redução da polinização e dispersão de sementes</b>                        | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                      | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática                      | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora                                         | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba                  |                                                               |                                            |                                                                       |                                    |                                                                       |
| 81 | <b>Aumento na incidência de doenças relacionadas à fauna sinantrópica</b>    | Plano Diretor das Obras Emergenciais                          | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas                                           | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática                       | Plano de Dinamização de Territórios Rurais                                             | Plano de Ação para proteção à Fauna e Flora                   | Plano de Saúde Integral e Coletiva         | Programa de Educação Ambiental de Brumadinho e Bacia do rio Paraopeba |                                    |                                                                       |
| 82 | <b>Efeito de toxicidade e bioacumulação em indivíduos da flora silvestre</b> | Plano de Monitoramento da Biodiversidade Terrestre e Aquática |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                        |                                                               |                                            |                                                                       |                                    |                                                                       |

Tabela 3: Matriz de impactos mapeados pela Arcadis e presentes no Plano de Reparação Socioambiental da bacia do rio Paraopeba. Relação entre impactos diretos e indiretos, matriz de adjacência utilizada para construção da rede.

[illegible]



|    |                                                                         |    |    |    |    |    |    |    |
|----|-------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| 13 | Perda de Habitat Aquáticos                                              | 18 | 63 | 69 |    |    |    |    |
| 14 | Perda de Indivíduos da Ictiofauna                                       | 62 | 63 | 69 |    |    |    |    |
| 15 | Redução da Heterogeneidade Ambiental                                    | 18 | 63 | 69 | 78 |    |    |    |
| 16 | Redução da Capacidade de Autodepuração dos cursos d'água                | 69 | 74 | 78 |    |    |    |    |
| 17 | Aumento de Efeitos de Toxicidade e Bioacumulação na Biota Aquática      | 18 | 62 | 69 | 72 |    |    |    |
| 18 | Alteração da Composição e Estrutura das Comunidades Hidrobiológicas     | 16 | 63 | 71 | 78 | 81 |    |    |
| 19 | Redução da cobertura vegetal                                            | 3  | 26 | 30 | 31 | 61 | 71 | 80 |
| 20 | Perda de áreas úmidas                                                   | 16 | 30 | 71 |    |    |    |    |
| 21 | Perda de indivíduos da flora                                            | 25 | 71 | 80 |    |    |    |    |
| 22 | Perda de indivíduos da flora de espécies ameaçadas e protegidas por lei | 25 | 71 | 80 |    |    |    |    |
| 23 | Perda de banco de sementes                                              | 25 | 71 | 80 |    |    |    |    |
| 24 | Fragmentação da cobertura vegetal                                       | 25 | 26 |    |    |    |    |    |
| 25 | Redução do fluxo gênico em espécies vegetais                            |    |    |    |    |    |    |    |
| 26 | Aumento do efeito de borda                                              | 80 | 81 |    |    |    |    |    |
| 27 | Desregulação fisiológica de indivíduos da flora                         | 30 | 70 |    |    |    |    |    |
| 28 | Perda em indivíduos da fauna silvestre                                  | 71 | 81 |    |    |    |    |    |
| 29 | Injúria de indivíduos da fauna silvestre                                | 71 |    |    |    |    |    |    |

|    |                                                                                                    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| 30 | Perda de Habitat Terrestre                                                                         | 71 | 80 | 81 |    |    |    |    |
| 31 | Redução da permeabilidade para a fauna                                                             | 71 | 80 | 81 |    |    |    |    |
| 32 | Interferência em Áreas de Preservação Permanente (APP)                                             | 25 | 47 | 80 |    |    |    |    |
| 33 | Interferência em Unidade de Conservação (UC)                                                       | 25 | 47 | 80 |    |    |    |    |
| 34 | Interferência em áreas de Reserva Legal                                                            | 25 | 71 | 80 |    |    |    |    |
| 35 | Interferência em áreas de interesse para a conservação                                             | 25 | 71 | 80 |    |    |    |    |
| 36 | Perda de moradia, desalojamento e desabrigo da população                                           | 46 | 47 | 48 | 49 | 56 | 57 | 79 |
| 37 | Ocorrência de sofrimento social e aumento de problemas psicológicos e psicossociais                | 47 | 48 | 49 | 78 | 79 |    |    |
| 38 | Interrupção de acessos e aumento no fluxo de veículos e do tempo de trajeto nas vias remanescentes | 41 | 46 | 48 | 49 | 54 | 56 | 75 |
| 39 | Interferência no serviço de transmissão de energia elétrica                                        | 46 | 48 |    |    |    |    |    |
| 40 | Destruição de dois poços profundos no Parque da Cachoeira                                          | 46 | 48 | 51 | 56 |    |    |    |
| 41 | Prejuízos ao setor industrial mineral                                                              | 55 | 75 | 76 |    |    |    |    |
| 42 | Perda de áreas produtivas e de animais de produção                                                 | 46 | 47 | 49 | 62 | 73 |    |    |
| 43 | Perda de indivíduos da fauna doméstica                                                             | 46 |    |    |    |    |    |    |
| 44 | Perda de patrimônio particular                                                                     | 65 |    |    |    |    |    |    |

|    |                                                                                             |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 45 | <b>Interrupção da captação de água da empresa Mineral do Brasil no córrego Ferro-Carvão</b> | 41 |    |    |    |    |    |    |    |
| 46 | <b>Perturbação das atividades rotineiras e aumento do incômodo à população</b>              | 49 |    |    |    |    |    |    |    |
| 47 | <b>Esgarçamento das relações toponímicas</b>                                                | 49 | 65 | 79 | 60 |    |    |    |    |
| 48 | <b>Pressão sobre serviços públicos</b>                                                      | 56 |    |    |    |    |    |    |    |
| 49 | <b>Comprometimento da qualidade e da garantia do direito à educação</b>                     | 48 |    |    |    |    |    |    |    |
| 50 | <b>Paralisação da captação de água no rio Paraopeba para abastecimento público</b>          | 9  | 46 | 56 | 73 | 74 | 78 |    |    |
| 51 | <b>Restrição do acesso à água</b>                                                           | 7  | 9  | 46 | 47 | 57 | 62 | 73 | 74 |
| 52 | <b>Indisponibilidade de uso da terra nas áreas lindeiras ao rio Paraopeba</b>               | 46 | 47 | 62 |    |    |    |    |    |
| 53 | <b>Restrição do uso de áreas produtivas</b>                                                 | 46 | 47 | 73 |    |    |    |    |    |
| 54 | <b>Prejuízos à cadeia produtiva do turismo</b>                                              | 55 | 75 | 76 |    |    |    |    |    |
| 55 | <b>Alteração nos níveis de arrecadação fiscal</b>                                           |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 56 | <b>Alteração nas despesas públicas</b>                                                      | 76 |    |    |    |    |    |    |    |
| 57 | <b>Desabrigo e injúria de animais domésticos</b>                                            | 46 |    |    |    |    |    |    |    |
| 58 | <b>Perda de Patrimônio Arqueológico</b>                                                     | 47 | 54 | 65 |    |    |    |    |    |
| 59 | <b>Perda de patrimônio cultural material (histórico, arquitetônico e pessoal)</b>           | 47 | 54 | 65 |    |    |    |    |    |
| 60 | <b>Interferência/interrupção do patrimônio cultural imaterial</b>                           | 54 | 65 |    |    |    |    |    |    |
| 61 | <b>Descaracterização da paisagem</b>                                                        | 47 | 54 | 65 |    |    |    |    |    |

|    |                                                                               |    |    |    |    |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|
| 62 | <b>Redução da segurança alimentar</b>                                         |    |    |    |    |
| 63 | <b>Redução dos estoques pesqueiros</b>                                        | 54 |    |    |    |
| 64 | <b>Insegurança relacionada às inundações</b>                                  |    |    |    |    |
| 65 | <b>Alteração da Identidade cultural</b>                                       | 48 | 55 | 60 | 75 |
| 66 | <b>Aumento das áreas inundáveis</b>                                           | 52 | 53 | 64 | 78 |
| 67 | <b>Alteração das características químicas do solo</b>                         | 53 | 72 | 82 |    |
| 68 | <b>Alteração da qualidade das águas subterrâneas</b>                          | 51 | 78 |    |    |
| 69 | <b>Alteração da Composição e Estrutura da Ictiofauna</b>                      | 63 |    |    |    |
| 70 | <b>Redução da qualidade do habitat de espécies terrestres e semiaquáticas</b> | 71 |    |    |    |
| 71 | <b>Alteração da composição e estrutura das comunidades terrestres</b>         | 25 | 80 | 81 |    |
| 72 | <b>Efeitos de toxicidade e bioacumulação em indivíduos de Fauna Silvestre</b> | 62 | 71 |    |    |
| 73 | <b>Prejuízos ao setor agrosilvopastoril e aquicultura</b>                     | 55 | 75 | 76 |    |
| 74 | <b>Prejuízos ao setor industrial de uso intensivo de água</b>                 | 55 | 75 | 76 |    |
| 75 | <b>Alterações no setor de comércio e serviços</b>                             | 55 | 76 |    |    |
| 76 | <b>Arrefecimento da economia e alterações nos níveis de emprego e renda</b>   |    |    |    |    |
| 77 | <b>Aumento na incidência de doenças respiratórias</b>                         | 46 | 48 | 56 |    |
| 78 | <b>Aumento na incidência de doenças de veiculação hídrica</b>                 | 46 | 48 |    |    |

|    |                                                                       |    |    |    |
|----|-----------------------------------------------------------------------|----|----|----|
| 79 | Alteração da Dinâmica Demográfica                                     | 48 | 55 | 75 |
| 80 | Redução da polinização e dispersão de sementes                        |    |    |    |
| 81 | Aumento na incidência de doenças relacionadas à fauna sinantrópica    | 56 | 76 |    |
| 82 | Efeito de toxicidade e bioacumulação em indivíduos da flora silvestre | 62 | 72 |    |

#### Material Suplementar S4

Tabela 4: Matriz de impactos mapeados pela Arcadis e presentes no Plano de Reparação Socioambiental da bacia do rio Paraopeba. Métricas individuais dos impactos calculados na análise de rede.

| ID | IMPACTOS                                                                      | Grau | Grau de Entrada | Grau de Saída | Centralidade | Número de Componentes Fortemente Conectados | Classe modular (Comunidade) |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------|---------------|--------------|---------------------------------------------|-----------------------------|
| 1  | Mudança das características do relevo                                         | 3    | 0               | 3             | 0            | 17                                          | 3                           |
| 2  | Alteração das características morfodinâmicas dos cursos d'água                | 1    | 0               | 1             | 0            | 20                                          | 1                           |
| 3  | Intensificação dos processos erosivos                                         | 2    | 2               | 0             | 0            | 16                                          | 3                           |
| 4  | Perda de camadas superficiais e alteração das características físicas do solo | 2    | 0               | 2             | 0            | 22                                          | 1                           |

|    |                                                                     |    |   |    |       |    |   |
|----|---------------------------------------------------------------------|----|---|----|-------|----|---|
| 5  | Alteração das características do solo nas áreas inundadas           | 5  | 0 | 5  | 0     | 32 | 1 |
| 6  | Interrupção das Atividades Minerárias                               | 1  | 0 | 1  | 0     | 34 | 2 |
| 7  | Aumento da demanda de águas subterrâneas                            | 1  | 1 | 0  | 0     | 41 | 2 |
| 8  | Redução da Qualidade da Água Superficial                            | 12 | 0 | 12 | 0     | 45 | 1 |
| 9  | Alteração do balanço hídrico superficial da bacia do rio Paraopeba  | 2  | 2 | 0  | 0     | 40 | 2 |
| 10 | Assoreamento de Corpos Hídricos                                     | 7  | 0 | 7  | 0     | 47 | 1 |
| 11 | Alteração na Qualidade dos Sedimentos                               | 4  | 0 | 4  | 0     | 48 | 1 |
| 12 | Alterações na Qualidade do Ar                                       | 2  | 0 | 2  | 0     | 50 | 2 |
| 13 | Perda de Habitat Aquáticos                                          | 3  | 0 | 3  | 0     | 51 | 1 |
| 14 | Perda de Indivíduos da Ictiofauna                                   | 3  | 0 | 3  | 0     | 52 | 1 |
| 15 | Redução da Heterogeneidade Ambiental                                | 7  | 3 | 4  | 19,79 | 31 | 1 |
| 16 | Redução da Capacidade de Autodepuração dos cursos d'água            | 7  | 4 | 3  | 23,04 | 29 | 1 |
| 17 | Aumento de Efeitos de Toxicidade e Bioacumulação na Biota Aquática  | 6  | 2 | 4  | 3,25  | 44 | 1 |
| 18 | Alteração da Composição e Estrutura das Comunidades Hidrobiológicas | 11 | 6 | 5  | 53,71 | 30 | 1 |
| 19 | Redução da cobertura vegetal                                        | 7  | 0 | 7  | 0     | 55 | 3 |

|    |                                                                         |   |   |   |       |    |   |
|----|-------------------------------------------------------------------------|---|---|---|-------|----|---|
| 20 | Perda de áreas úmidas                                                   | 3 | 0 | 3 | 0     | 56 | 3 |
| 21 | Perda de indivíduos da flora                                            | 3 | 0 | 3 | 0     | 57 | 3 |
| 22 | Perda de indivíduos da flora de espécies ameaçadas e protegidas por lei | 3 | 0 | 3 | 0     | 58 | 3 |
| 23 | Perda de banco de sementes                                              | 3 | 0 | 3 | 0     | 59 | 3 |
| 24 | Fragmentação da cobertura vegetal                                       | 2 | 0 | 2 | 0     | 60 | 3 |
| 25 | Redução do fluxo gênico em espécies vegetais                            | 9 | 9 | 0 | 0     | 13 | 3 |
| 26 | Aumento do efeito de borda                                              | 4 | 2 | 2 | 4,7   | 54 | 3 |
| 27 | Desregulação fisiológica de indivíduos da flora                         | 2 | 0 | 2 | 0     | 61 | 1 |
| 28 | Perda em indivíduos da fauna silvestre                                  | 2 | 0 | 2 | 0     | 62 | 3 |
| 29 | Injúria de indivíduos da fauna silvestre                                | 1 | 0 | 1 | 0     | 63 | 3 |
| 30 | Perda de Habitat Terrestre                                              | 8 | 5 | 3 | 19,03 | 15 | 3 |
| 31 | Redução da permeabilidade para a fauna                                  | 4 | 1 | 3 | 0,7   | 53 | 3 |
| 32 | Interferência em Áreas de Preservação Permanente (APP)                  | 3 | 0 | 3 | 0     | 64 | 3 |
| 33 | Interferência em Unidade de Conservação (UC)                            | 3 | 0 | 3 | 0     | 65 | 3 |
| 34 | Interferência em áreas de Reserva Legal                                 | 3 | 0 | 3 | 0     | 66 | 3 |

|    |                                                                                                    |    |    |   |       |    |   |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|---|-------|----|---|
| 35 | Interferência em áreas de interesse para a conservação                                             | 3  | 0  | 3 | 0     | 67 | 3 |
| 36 | Perda de moradia, desalojamento e desabrigo da população                                           | 7  | 0  | 7 | 0     | 68 | 2 |
| 37 | Ocorrência de sofrimento social e aumento de problemas psicológicos e psicossociais                | 5  | 0  | 5 | 0     | 69 | 2 |
| 38 | Interrupção de acessos e aumento no fluxo de veículos e do tempo de trajeto nas vias remanescentes | 7  | 0  | 7 | 0     | 70 | 2 |
| 39 | Interferência no serviço de transmissão de energia elétrica                                        | 2  | 0  | 2 | 0     | 71 | 2 |
| 40 | Destruição de dois poços profundos no Parque da Cachoeira                                          | 4  | 0  | 4 | 0     | 72 | 2 |
| 41 | Prejuízos ao setor industrial mineral                                                              | 6  | 3  | 3 | 6,58  | 33 | 2 |
| 42 | Perda de áreas produtivas e de animais de produção                                                 | 5  | 0  | 5 | 0     | 73 | 2 |
| 43 | Perda de indivíduos da fauna doméstica                                                             | 1  | 0  | 1 | 0     | 74 | 2 |
| 44 | Perda de patrimônio particular                                                                     | 1  | 0  | 1 | 0     | 75 | 2 |
| 45 | Interrupção da captação de água da empresa Mineral do Brasil no córrego Ferro-Carvão               | 1  | 0  | 1 | 0     | 76 | 2 |
| 46 | Perturbação das atividades rotineiras e aumento do incômodo à população                            | 15 | 14 | 1 | 29,27 | 18 | 2 |
| 47 | Esgarçamento das relações topofílicas                                                              | 15 | 11 | 4 | 87,03 | 9  | 2 |
| 48 | Pressão sobre serviços públicos                                                                    | 11 | 10 | 1 | 33,33 | 5  | 2 |
| 49 | Comprometimento da qualidade e da garantia do direito à educação                                   | 7  | 6  | 1 | 16,5  | 8  | 2 |



|    |                                                                             |    |   |   |       |    |   |
|----|-----------------------------------------------------------------------------|----|---|---|-------|----|---|
| 50 | Paralisação da captação de água no rio Paraopeba para abastecimento público | 7  | 1 | 6 | 2,79  | 43 | 2 |
| 51 | Restrição do acesso à água                                                  | 11 | 3 | 8 | 32,45 | 42 | 2 |
| 52 | Indisponibilidade de uso da terra nas áreas lindeiras ao rio Paraopeba      | 5  | 2 | 3 | 9,1   | 38 | 1 |
| 53 | Restrição do uso de áreas produtivas                                        | 6  | 3 | 3 | 24,18 | 37 | 1 |
| 54 | Prejuízos à cadeia produtiva do turismo                                     | 10 | 7 | 3 | 35,62 | 3  | 2 |
| 55 | Alteração nos níveis de arrecadação fiscal                                  | 7  | 7 | 0 | 0     | 1  | 2 |
| 56 | Alteração nas despesas públicas                                             | 8  | 7 | 1 | 13,08 | 4  | 2 |
| 57 | Desabrigo e injúria de animais domésticos                                   | 3  | 2 | 1 | 0     | 39 | 2 |
| 58 | Perda de Patrimônio Arqueológico                                            | 3  | 0 | 3 | 0     | 77 | 2 |
| 59 | Perda de patrimônio cultural material (histórico, arquitetônico e pessoal)  | 3  | 0 | 3 | 0     | 78 | 2 |
| 60 | Interferência/interrupção do patrimônio cultural imaterial                  | 4  | 2 | 2 | 16,33 | 6  | 2 |
| 61 | Descaracterização da paisagem                                               | 6  | 3 | 3 | 21,98 | 10 | 3 |
| 62 | Redução da segurança alimentar                                              | 9  | 9 | 0 | 0     | 21 | 1 |
| 63 | Redução dos estoques pesqueiros                                             | 6  | 5 | 1 | 27    | 26 | 1 |
| 64 | Insegurança relacionada às inundações                                       | 4  | 4 | 0 | 0     | 25 | 1 |

|    |                                                                        |    |    |   |       |    |   |
|----|------------------------------------------------------------------------|----|----|---|-------|----|---|
| 65 | Alteração da Identidade cultural                                       | 10 | 6  | 4 | 35,03 | 6  | 2 |
| 66 | Aumento das áreas inundáveis                                           | 5  | 1  | 4 | 9,63  | 46 | 1 |
| 67 | Alteração das características químicas do solo                         | 3  | 0  | 3 | 0     | 79 | 1 |
| 68 | Alteração da qualidade das águas subterrâneas                          | 2  | 0  | 2 | 0     | 80 | 1 |
| 69 | Alteração da Composição e Estrutura da Ictiofauna                      | 6  | 5  | 1 | 5,67  | 27 | 1 |
| 70 | Redução da qualidade do habitat de espécies terrestres e semiaquáticas | 5  | 4  | 1 | 5     | 35 | 1 |
| 71 | Alteração da composição e estrutura das comunidades terrestres         | 17 | 14 | 3 | 67,7  | 14 | 3 |
| 72 | Efeitos de toxicidade e bioacumulação em indivíduos de Fauna Silvestre | 7  | 5  | 2 | 18,42 | 23 | 1 |
| 73 | Prejuízos ao setor agrosilvopastoril e aquicultura                     | 7  | 4  | 3 | 17,33 | 36 | 2 |
| 74 | Prejuízos ao setor industrial de uso intensivo de água                 | 7  | 4  | 3 | 16    | 28 | 2 |
| 75 | Alterações no setor de comércio e serviços                             | 9  | 7  | 2 | 6,75  | 2  | 2 |
| 76 | Arrefecimento da economia e alterações nos níveis de emprego e renda   | 7  | 7  | 0 | 0     | 0  | 2 |
| 77 | Aumento na incidência de doenças respiratórias                         | 4  | 1  | 3 | 3     | 49 | 2 |
| 78 | Aumento na incidência de doenças de veiculação hídrica                 | 10 | 8  | 2 | 41,12 | 19 | 1 |
| 79 | Alteração da Dinâmica Demográfica                                      | 6  | 3  | 3 | 13,58 | 7  | 2 |

|    |                                                                       |    |    |   |      |    |   |
|----|-----------------------------------------------------------------------|----|----|---|------|----|---|
| 80 | Redução da polinização e dispersão de sementes                        | 12 | 12 | 0 | 0    | 12 | 3 |
| 81 | Aumento na incidência de doenças relacionadas à fauna sinantrópica    | 8  | 6  | 2 | 50,8 | 11 | 3 |
| 82 | Efeito de toxicidade e bioacumulação em indivíduos da flora silvestre | 4  | 2  | 2 | 0,5  | 24 | 1 |

---

## **CAPÍTULO 2<sup>2</sup> – Abordagem multicritério para priorização socioambiental de áreas para restauração florestal na bacia do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil**

### **RESUMO**

A degradação ambiental, especialmente o desmatamento e a fragmentação florestal, compromete intensamente a qualidade da água e os serviços ecossistêmicos associados. A mineração, por sua vez, agrava essa situação, sendo uma das principais causas de contaminação dos recursos hídricos. Diante desse cenário, este estudo propõe a identificação de áreas prioritárias para restauração florestal em uma bacia hidrográfica afetada pelo rompimento de uma barragem de rejeitos, com o objetivo de recuperar a qualidade e a disponibilidade hídrica. Para tanto, foi empregado um modelo de análise multicritério (AMC), no qual os pesos das variáveis foram definidos com a participação de lideranças locais, utilizando o método AHP. O mapa de áreas prioritárias foi gerado por meio do método WLC e as áreas foram classificadas em cinco classes de prioridade. Os resultados indicam a importância estratégica da restauração de áreas próximas a cursos d'água e nascentes para a melhoria da qualidade de vida das comunidades locais. A maior parte da bacia foi classificada como área de média prioridade para restauração. No entanto, as áreas de alta e muito alta prioridade, localizadas principalmente em Áreas de Preservação Permanente (APPs) hídricas, demonstram a necessidade urgente de intervenção nesses locais. A predominância de pastagens e áreas de produção agropecuária nessas áreas de alta prioridade indica um baixo custo de oportunidade para a implementação de ações de restauração. Conclui-se que a abordagem integrada de análise multicritério utilizada neste estudo se mostrou eficaz para guiar ações de restauração florestal e pode servir como base para o planejamento e a implementação de políticas públicas voltadas à recuperação ambiental de bacias hidrográficas impactadas por atividades antrópicas.

Palavras-chave: Áreas prioritárias, serviços ecossistêmicos hídricos, fragmentos florestais, recursos hídricos, ecologia da paisagem.

---

<sup>2</sup> O presente trabalho foi desenvolvido com a colaboração de Ramon Neto Rodrigues, Dayane Lopes Pinto, Daniel Fernandes de Figueiredo Silva e Maria Auxiliadora Drumond, que serão coautores do artigo na publicação.

## ABSTRACT

Environmental degradation, especially deforestation and forest fragmentation, severely compromises water quality and associated ecosystem services. Mining, in turn, aggravates this situation, being one of the main causes of contamination of water resources. Given this scenario, this study proposes the identification of priority areas for forest restoration in a river basin affected by the rupture of a tailings dam, with the objective of recovering water quality and availability. To this end, a multicriteria analysis (MCA) model was used, in which the weights of the variables were defined with the participation of local leaders, using the AHP method. The map of priority areas was generated using the WLC method and the areas were classified into five priority classes. The results indicate the strategic importance of restoring areas close to watercourses and springs to improve the quality of life of local communities. Most of the basin was classified as a medium priority area for restoration. However, high and very high priority areas, located mainly in Permanent Preservation Areas (APPs) of water resources, demonstrate the urgent need for intervention in these locations. The predominance of pastures and agricultural production areas in these high priority areas indicates a low opportunity cost for the implementation of restoration actions. It is concluded that the integrated multicriteria analysis approach used in this study proved to be effective in guiding forest restoration actions and can serve as a basis for the planning and implementation of public policies aimed at the environmental recovery of watersheds impacted by human activities.

**Keywords:** Priority areas, water ecosystem services, forest fragments, water resources, landscape ecology.

## 2.1 Introdução

Os serviços ecossistêmicos hídricos, essenciais para o bem-estar humano, estão vinculados ao ciclo hidrológico e abrangem desde a provisão de água potável, a regulação de eventos de inundação e até a recreação (Martin-Ortega et al., 2015; (Grizzetti et al., 2016). A Avaliação dos Ecossistemas do Milênio destacou uma queda desses serviços no mundo (MEA, 2005), gerando uma ameaça iminente à sociedade. A escassez hídrica, agravada pelas alterações destes serviços, é um problema mundial que gera impactos à quantidade e qualidade da água (Randhir, 2012) e, consequentemente à saúde e ao bem-estar de milhões de pessoas.

As mudanças no uso e cobertura da terra estão entre os principais fatores que provocam o agravamento global dos serviços ecossistêmicos hídricos e os conflitos por esses recursos. O desmatamento e a fragmentação florestal no Brasil, desencadeiam, entre outros fatores, o aumento dos processos erosivos, o incremento no transporte de sedimentos e o consequente assoreamento de corpos d'água (Ngetich et al., 2014; Randhir et al., 2001). Todos estes fatores colaboram diretamente para a degradação da qualidade da água e redução disponibilidade hídrica (Gao et al., 2017; Paula et al., 2018; IPBES, 2019). As coberturas florestais exercem importante papel neste contexto, pois atuam na proteção do solo, ajudando a reduzir os efeitos da erosão e o carreamento de sedimentos e poluentes, além de atuar no controle biogeoquímico (Mingoti & Vettorazzi, 2011.; Schilling & Jacobson, 2014; Tanaka et al., 2016; Taniwaki et al., 2017). O bioma Mata Atlântica, que teve sua cobertura vegetal reduzida a cerca de apenas 28% da sua formação original (Rezende et al., 2018), possui apenas 6,9% dos seus principais rios com boa qualidade de água, evidenciando as condições críticas as quais estão submetidos os ecossistemas aquáticos brasileiros (Mello et al., 2020; SOS Mata Atlântica, 2023).

A mineração é uma das maiores responsáveis pela degradação de recursos naturais, sendo a contaminação de rios por metais pesados, no longo prazo, especialmente danosa (Macklin et al, 2006, Macklin et al., 2023). Essa atividade gera mudanças na paisagem, provoca impactos na biodiversidade e ecossistemas, causando perda de habitat, degradação do solo e desmatamento em escala regional e global (Boldy et al., 2021). Cabe ressaltar que os impactos da mineração abarcam principalmente países do Sul Global (Macklin et al., 2023). Além desses impactos, o processo minerário de extração de minério de ferro, exige, em alguns casos a construção de grandes estruturas para contenção de seus rejeitos, oferecendo riscos ambientais sem precedentes, associados a possíveis rompimentos.

O estado de Minas Gerais (MG), no Brasil, em 2015 e 2019, passou por dois desses desastres-crimes, que afetaram diferentes bacias hidrográficas. A liberação abrupta de cargas elevadas de rejeitos gerou uma série de transformações no sistema fluvial de dois rios principais, o Rio Doce e Rio Paraopeba, pelo aumento de sedimentos em suspensão e concentrações de elementos químicos, produzindo uma série de mudanças físicas, químicas e biológicas nas estruturas afetadas (Hatje et al., 2017; Vergilio et al., 2020, Duarte et al., 2021, Mendes et al, 2022, Pacheco et al., 2022).

O rompimento da barragem BI e soterramento das barragens B-IV e B-IVA da Mina Córrego do Feijão, de posse da empresa Vale S.A., despejou aproximadamente 13 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro no ribeirão Ferro Carvão. Desse total, aproximadamente 2,8 milhões de metros cúbicos de rejeitos misturados com solos e outros materiais arrancadas da paisagem chegaram ao rio Paraopeba, atingido diretamente 26 municípios pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (MPMG, 2019; SOS Mata Atlântica, 2020). O cenário de riscos levou à proibição da captação e de qualquer tipo de uso da água do rio Paraopeba como medida de proteção à saúde humana em fevereiro de 2019, se estendendo até os dias atuais (IGAM, 2019b). Além disso, vários proprietários tiveram suas fontes de abastecimento para consumo humano (poços, cisternas), irrigação e dessedentação animal (captação direta no rio) comprometidas – condenadas ou colocadas sob suspeita. Visando mitigar esses problemas emergenciais, a empresa Vale S.A. implementou medidas como aumento da captação de água em outros rios da bacia, fornecimento de água mineral para consumo humano e de água potável para diversos fins, bem como perfuração de poços artesianos (VALE S.A, 2019b).

Uma Ação Judicial movida contra a empresa VALE S.A., no intuito de responsabilizá-la e obrigá-la a efetivar medidas para reparação dos danos coletivos gerados pelo desastre-crime, se desdobrou na realização de um Acordo Judicial de Reparação Integral - AJRI, firmado entre a empresa VALE, governo e Instituições de Justiça do estado de Minas Gerais. No que se refere a reparação dos danos socioambientais, ficou estabelecido que as ações mitigatórias precisam ter como referencial a situação anterior ao rompimento, de modo que a quitação do dever de fazer só será validada a partir da verificação de uma série de indicadores ambientais que atestem a volta às condições pré-rompimento (Minas Gerais, 2021). Para isso, estabeleceu-se o Programa de Reparação Socioambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (PRSBHRP) como instrumento oficial da reparação dos impactos socioambientais ocasionados em função do rompimento. Entre as ações previstas no PRSBHRP, estão a

restauração florestal de áreas da bacia, visando a recuperação e conservação de nascentes, cursos d'água e áreas de recarga hídrica, bem como a restauração de fragmentos de vegetação nativa remanescente (Arcadis, 2022).

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP) apresenta uma paisagem altamente antropizada, com predomínio de pastagens e culturas agrícolas (Arcadis, 2022). Diante deste contexto, torna-se estratégico que a execução dos planos e programas de reparação socioambiental previstos no PRSBHRP levem em consideração a melhora da qualidade ambiental da bacia como um todo, realizando ações de restauração que colaborem na recuperação e retorno dos serviços ecossistêmicos.

Para a implementação das ações de restauração florestal previstas no plano é importante a compreensão das dinâmicas da paisagem, fundamentais para um manejo adaptado às necessidades locais, pois permite identificar recursos, ameaças e limitações. O estudo e definição de áreas prioritárias para restauração surge, portanto, como um campo que suscita a colaboração entre diversas disciplinas (Perring et al. 2018 Mansourian, 2021). A análise ecológica da estrutura da paisagem está entre as principais disciplinas necessárias ao planejamento e direcionamento das iniciativas de restauração, pois possibilita entender a distribuição dos diversos usos do solo, bem como identificar e analisar os padrões espaciais das manchas florestais e a variabilidade da paisagem (Reif and Theel, 2017, Rudge et al., 2022). Outras disciplinas, mais relacionadas às condições ambientais das áreas foco das ações de restauração, também são importantes de ser consideradas, como relevo, solo, proximidade de cursos d'água ou nascentes, entre outras (Cassiano et al., 2013; Durbecq et al., 2020). O delineamento de áreas prioritárias para restauração e o sucesso de projetos que promovam de fato o retorno e conservação dos serviços ecossistêmicos hídricos e o aumento da qualidade e disponibilidade hídrica, dependem do sucesso atrelado a estes estudos e planejamento (Aronson & Alexander, 2013). Importante destacar que os anos de 2021 até 2030 são denominados pelas Nações Unidas como a Década de Restauração de Ecossistemas, que visa focar esforços na restauração de ecossistemas degradados (Ferrier, 2020).

A restauração florestal, sob uma perspectiva de paisagem, requer a aplicação de múltiplos critérios e métodos, integrando diversos fatores relacionados ao objetivo da restauração. Nesse contexto, os métodos de Avaliação Multicritério (AMC) surgem como ferramentas eficazes para definir áreas prioritárias, considerando características da paisagem e sua importância para os objetivos de priorização (Geneletti, 2004; Orsi & Geneletti, 2010; Phua



& Minowa, 2005; Valente & Vettorazzi, 2008). Aplicações do AMC em todo o mundo destacam sua utilidade na identificação de áreas prioritárias para conservação e restauração (Langemeyer et al., 2016; Tobón et al., 2017; Valente et al., 2017; Vettorazzi & Valente, 2016). Diversos estudos têm sido produzidos para a priorização de áreas para conservação ou restauração com foco na manutenção dos recursos hídricos, incluindo qualidade da água (Duarte et al., 2016) e disponibilidade hídrica (Vettorazzi and Valente, 2016). Macedo et al., (2018) utilizaram uma abordagem multicriterial para avaliar a erodibilidade potencial em bacias hidrográficas no bioma do Cerrado (Brasil) e, Lopes et al., (2020) para definição de áreas prioritárias para restauração florestal em uma região de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia visando a manutenção e ampliação de serviços ecossistêmicos hídricos.

Este estudo propõe-se a identificar áreas prioritárias para restauração florestal na bacia do rio Paraopeba, com foco em melhorar a qualidade e quantidade dos recursos hídricos. O uso de métodos AMC permite desenvolver um modelo que envolva a comunidade e apoie os tomadores de decisão. Esse método pode ser fundamental para bacias hidrográficas com desafios no abastecimento de água, bem como ajudar a direcionar esforços e otimizar os recursos que serão aplicados pelo PRSBHRP na restauração, recuperação e conservação da biodiversidade da BHRP. Esta abordagem integra a importância crítica dos serviços ecossistêmicos hídricos nas decisões relacionadas à restauração da vegetação nativa.

## **2.2 Métodos**

### **2.2.1. Área de estudo**

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP) está situada na região central do estado de Minas Gerais, Brasil, (Figura 1) e possui uma área total de 13.643 km<sup>2</sup>, o que equivale a 2,5% da área total do estado (COBRAPE, 2020). A área abrangida por esse estudo corresponde à Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos – UPGRH SF3: Rio Paraopeba (COBRAPE, 2020), que ocupa 12.022 km<sup>2</sup> da área total da bacia, indo desde as nascentes do rio Paraopeba até seu desague na represa de Três Marias. A área abrange 48 municípios, e abriga 20 dos 26 municípios impactados pelo rompimento.

O relevo é caracterizado pela presença de rochas proterozóicas e solos cambissolos, nas regiões de alto relevo, caracterizados por elevada vulnerabilidade à contaminação de aquíferos (COBRAPE, 2020). O Médio Paraopeba, situado entre 750 e 850 metros de altitude, destaca-se como área propícia à mineração e é onde estão localizados os grandes centros urbanos

pertencentes aos municípios da região metropolitana de Belo Horizonte. Já as áreas de baixa declividade, conhecidas como Depressão do Alto São Francisco, são ideais para atividades agropecuárias (COBRAPE, 2020). A região do Alto Paraopeba integra o bioma Mata Atlântica, caracterizado por maior pluviosidade, enquanto o Médio e Baixo Paraopeba situam-se na transição entre Mata Atlântica e Cerrado, ambos reconhecidos como hotspots de biodiversidade (ICMBio, 2018; Myers et al., 2000; Mittermeier R. A. et al., 2002).

O rio Paraopeba é o principal curso d'água da bacia, e é formado pelo encontro de dois afluentes, o rio Camapuã e rio Maranhão, no município de Jeceaba. Outros afluentes importantes são os rios Betim e Manso e o ribeirão Serra Azul, os quais são represados para formação de três reservatórios que compõem o Sistema Paraopeba: Sistema Vargem das Flores, Sistema Rio Manso e Sistema Serra Azul, respectivamente (SUPRAM, 2010). O rio Paraopeba possui extensão de 426,13 km, dos quais 300,64 km foram afetados pelo rompimento das barragens BI, B-IV e B-IVA da Mina Córrego do Feijão, localizada no município de Brumadinho.

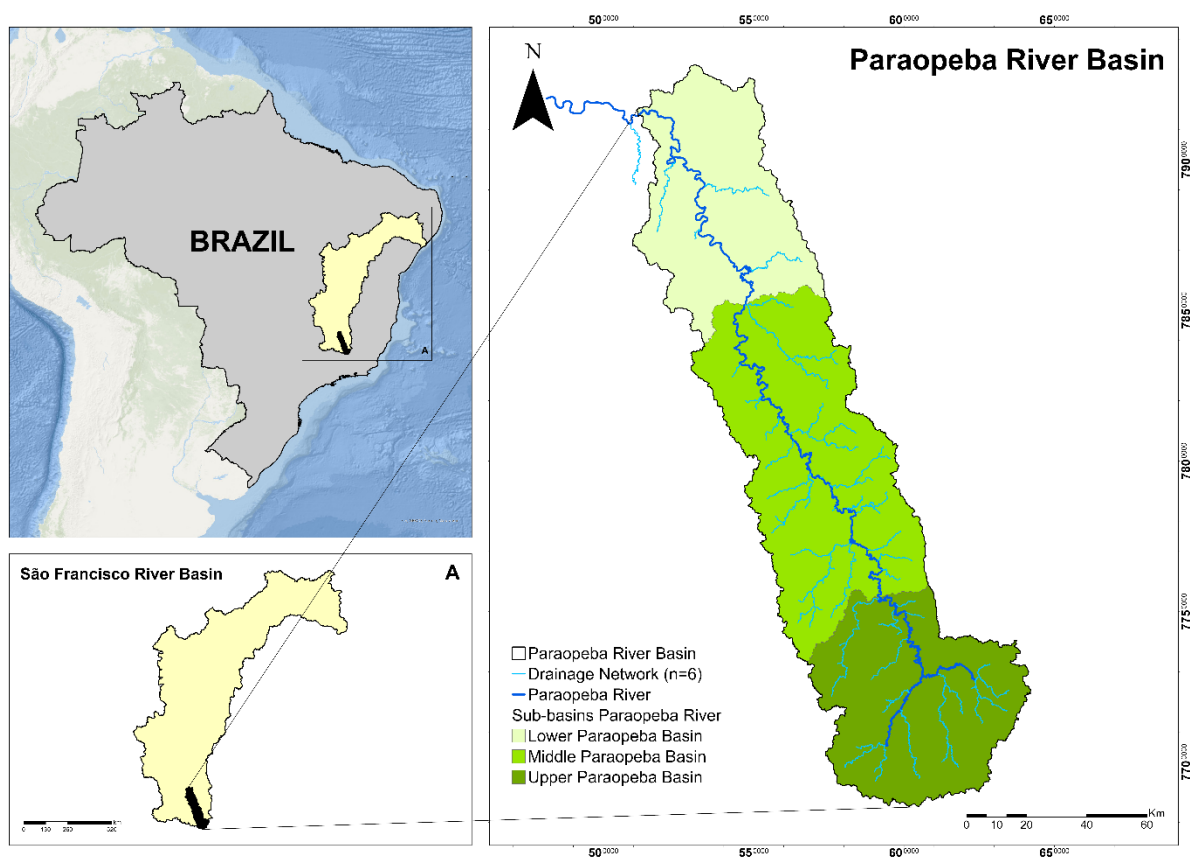


Figura 1: Área de estudo, na Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil. Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000.

### 2.2.2. Análise multicritério: critérios, pesos e restrições

Optamos pelo método Combinação Linear Ponderada (WLC) da Análise Multicritério (AMC) para a definição das áreas prioritárias para restauração florestal da bacia hidrográfica do rio Paraopeba (BHRP). A Figura 2 ilustra o passo a passo para determinação destas áreas. Nesse método, os fatores são normalizados para uma escala numérica comum e pesos são atribuídos a cada critério (Saaty, 2000). Em seguida, os mapas e pesos são combinados por média ponderada para obter uma pontuação global (Yalcin, 2008). No processo de definição de áreas prioritárias AMC, os critérios são divididos em fatores e restrições (Lopes et al., 2020). Os fatores são as características da paisagem ou de processos que devem ser considerados para definição das melhores áreas para restauração e as restrições são as características que limitam espacialmente as ações (Silva et al., 2017).

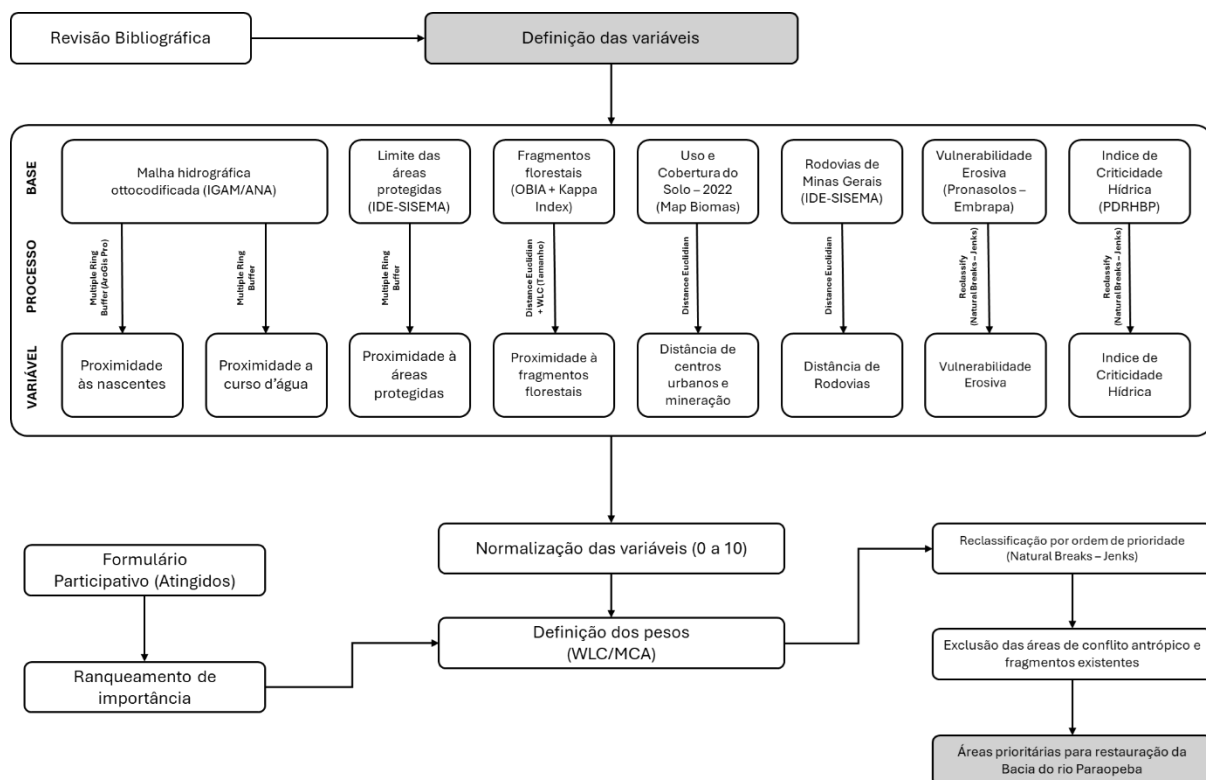


Figura 2: Detalhamento metodológico utilizado para priorização de áreas para restauração florestal, baseado na manutenção e melhoria da disponibilidade e qualidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.

### 2.2.3. Definição dos critérios e mapas de fatores

Definimos os fatores para determinação das áreas prioritárias para restauração florestal com base na literatura e consulta a especialistas, conforme indicado por Rodrigues & Rodrigues (2019). Selecionamos fatores usualmente utilizados nesse tipo de modelo, com foco em

variáveis capazes de mitigar os danos causados pelo rompimento da barragem em Brumadinho. Oito fatores foram considerados relevantes para priorização de áreas para restauração florestal da bacia do rio Paraopeba (Tabela 1).

Tabela 1: Fatores selecionados para priorização de áreas para restauração florestal da Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil, com breve justificativa para sua seleção.

| <b>Critérios (Fatores)</b>          | <b>Breve justificativa</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Proximidade às nascentes            | Ações de restauração florestal de nascentes geram impactos positivos relacionadas à qualidade e disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica. A relação entre o uso e cobertura do solo e qualidade da água é pronunciada nas nascentes, cumprindo papel importante na proteção dos corpos d'água (Rodrigues-Filho et al., 2015; Marmontel et al., 2015; Taniwaki et al., 2017; Marmontel et al., 2018).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Proximidade a cursos d'água         | A vegetação ribeirinha é essencial para a proteção das margens dos rios e para a qualidade da água, devido à sua atuação na redução da velocidade do escoamento superficial, aumento da infiltração e percolação da água no solo e diminuição do aporte de sedimentos nos corpos d'água (Liu et al., 2008; Croke et al., 2017; Novoa et al., 2018). Além disso, áreas próximas a recursos importantes, como água, tendem a abrigar uma maior riqueza de espécies terrestres e aquáticas, influenciando na diversidade (Kuglerová et al., 2014). Estudos recentes também apontam a importância das áreas ripárias para conectividade da paisagem (Zimbres et al., 2017; Paolino et al., 2018).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Proximidade a áreas Protegidas      | Áreas Protegidas são utilizadas como importantes salva-guardas da biodiversidade no Brasil e no mundo (Vellak et al., 2009, UNEP-WCMC & IUCN, 2018). Nestas áreas estão concentrados recursos ambientais considerados ecologicamente importantes, a exemplo de mananciais e expressivas áreas de vegetação natural, protegidas dos avanços do desmatamento (Nolte et al., 2013; Carranza et al., 2014). Estas áreas também costumam abrigar ecossistemas e espécies endêmicas ameaçadas e exercem importante papel de conectividade na paisagem Vellak et al., 2009. Proteger e recuperar recursos hídricos e edáficos, e recuperar ou restaurar ecossistemas degradados, estão entre os objetivos estabelecidos pela lei que institui a criação e promove a conservação dessas áreas no Brasil (Brasil, 2000). A legislação atribui enquanto Áreas Protegidas, as áreas reconhecidas como “unidades de conservação”, que se dividem entre as que são de proteção restrita e as que pode ser feito o uso sustentável dos recursos naturais. |
| Proximidade a fragmentos florestais | A presença de cobertura vegetal nativa pode trazer benefícios como controlar a erosão do solo e auxiliar na infiltração da água, através de sua copa, raízes e componentes da serapilheira (Vaezi et al., 2017; Patin et al., 2018). Sua ausência, por outro lado, pode levar à impermeabilização do solo, aumentando o escoamento superficial, o processo erosivo (Ogden et al., 2013; Yang et al., 2016; Mello et al., 2018) e a sedimentação de cursos d'água, afetando-os em termos de qualidade e quantidades (Mello et al., 2020). Fragmentos florestais tem um papel crucial no sequestro de carbono, evapotranspiração e aumento de água atmosférica, na escala regional, e estão relacionados à índices de precipitação elevados (Ellison et al., 2012).                                                                                                                                                                                                                                                                           |

|                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Distância de centros urbanos e mineração | Fragmentos florestais próximos a centros urbanos e áreas de intensa atividade antrópica sofrem mais pressões e ameaças que fragmentos florestais distantes. Entre essas pressões destaca-se o desmatamento causado pela especulação imobiliária (Gutzwiller & Barrow, 2003), riscos de incêndios (Chen et al., 2001) e presença de espécies exóticas (Pysek et al., 2010; Paschoal et al., 2016), dificultando sua conservação. Além disso, o alto valor econômico dessas áreas, dificulta sua conversão em áreas de floresta nativa (Valente & Vettorazzi, 2008). Portanto, para a manutenção da biodiversidade e o sucesso das ações conservacionistas a longo prazo, é interessante priorizar áreas mais distantes dos centros urbanos. |
| Distância de rodovias                    | Embora as ameaças aos fragmentos florestais próximos de rodovias e centros urbanos sejam semelhantes, há destaques que merecem ser feitos. A rodovia pode contribuir constantemente para processos erosivos caso seu traçado não considere os atributos da bacia hidrográfica (Lima, 2008). As rodovias ampliam o processo de fragmentação, o que resulta na perda de conectividade, afetando diretamente a dispersão de espécies. (Rezzadori et al., 2016; Geneletti, 2003). Além disso, os custos para compras de áreas próximas as rodovias também são maiores, o que diminui o interesse pela restauração e conservação.                                                                                                               |
| Susceptibilidade erosiva                 | Áreas com altos valores de erodibilidade correspondem a regiões mais sensíveis das bacias hidrográficas, uma vez que a erosão do solo transporta sedimentos, assoreando rios e resultando em desequilíbrio do ecossistema (Vettorazzi e Valente, 2016). Assim, restaurar vegetação nativa em áreas com alto potencial erosivo apoia a manutenção da qualidade do solo e da água.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Índice de criticidade hídrica            | O índice de criticidade hídrica de uma bacia hidrográfica indica o nível de criticidade com base nos dados de disponibilidade hídrica, demanda hídrica e qualidade da água (COBRAPE, 2020). Desta forma áreas com maior criticidade hídrica têm maior dificuldade em suprir as demandas por esse recurso, o que leva a problemas na saúde, economia e conflitos entre comunidades (Ningrum et al., 2017). Ningrum et al. (2017), encontraram correlação entre o índice de criticidade hídrica de uma bacia hidrográfica, sua densidade populacional, a porcentagem de áreas agrárias e de cobertura florestal.                                                                                                                             |

Na construção do mapa de fator associado à proximidade às nascentes atribuímos notas de 1 a 10, distribuídas conforme a distância entre o entorno e o ponto central da nascente. Consideramos que o ponto final da malha hídrica ottocodificada para a bacia do rio São Francisco era o ponto central da nascente. Com o ponto central estabelecido, geramos buffers de 50m, 65m, 80m, 105m, 120m, 135m, 150m, 165m, 180m e 200 metros de distância das nascentes, nos quais distribuímos as notas de 1 a 10, respectivamente. Dessa forma, as áreas mais próximas às nascentes existentes na bacia do rio Paraopeba receberam as maiores notas, o que indica maior prioridade de restauração florestal.

Para a construção do mapa associado à proximidade a cursos d'água geramos buffers de 30, 100 e 200 metros de distância para os cursos d'água de 1ª, 2ª, 3ª e 4ª ordens; de 50, 100 e 200 metros de distância para os cursos d'água de 5ª e 6ª ordens e de 100 e 200 metros de distância para cursos d'água de 7ª ordem. Independentemente da ordem do curso d'água, todas as áreas dentro do buffer de menor distância receberam nota máxima de priorização (10). Para

que as áreas próximas aos cursos d'água de ordens menores fossem priorizadas sobre as de ordens maiores, as áreas dentro dos buffers foram recebendo notas gradativamente mais baixas ao aumentar as ordens dos rios. A ordem dos cursos d'água, os buffers de distâncias e as notas finais podem ser observados no material suplementar S1.

Para os dois fatores acima utilizamos a base cartográfica Hidrografia Ottocodificada da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco produzida pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM e a Agência Nacional de Águas - ANA, disponível na Infraestrutura de Dados Espaciais - IDESISEMA.

Para a construção do mapa de proximidade às áreas protegidas, utilizamos como base todas as áreas protegidas localizadas dentro ou nas proximidades da bacia do rio Paraopeba (IDESISEMA, 2020). Consideramos os grupos de Uso Sustentável e Proteção Integral (BRASIL, 2000). A atribuição das notas foi realizada considerando três zonas de proximidade: áreas dentro dos limites das áreas protegidas foram classificadas como núcleos e receberam nota 10. Áreas no entorno foram divididas em dois níveis: áreas de amortecimento, até 3 km, receberam nota 6, e áreas de transição, entre 3 e 10 km, receberam nota 3. No total, foram consideradas 53 unidades de conservação para a construção do mapa. É importante destacar que unidades de conservação situadas até 10 km do entorno da bacia do rio Paraopeba também foram incluídas.

Para construir o mapa de fator de proximidade aos fragmentos florestais na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, iniciamos com o mapeamento de todas as áreas ocupadas por vegetação nativa. Utilizamos imagens do satélite óptico Sentinel 2A dos dias 22/06/2022 e 25/06/2022, obtidas gratuitamente no site Earth Explorer. Estas imagens, no formato level 2A, passaram por correções atmosféricas. Realizamos a composição das bandas (2, 3, 4 e 8) para melhor discriminação da vegetação, e um mosaico das imagens foi produzido e recortado para a área de estudo.

A delimitação dos fragmentos florestais foi feita utilizando a classificação orientada por objeto (OBIA), com o algoritmo Support Vector Machine (SVM) devido à sua eficiência e precisão. A segmentação das imagens agrupou pixels com respostas espectrais semelhantes, e a classificação foi apoiada por índices de sensoriamento remoto como NDVI, SAVI e NDWI. Coletamos 3522 amostras de treinamento, com um mínimo de 180 amostras por classe, totalizando seis classes de uso e cobertura da terra. Avaliamos a acurácia da classificação por

meio de uma matriz de confusão, utilizando 1200 amostras de áreas de vegetação nativa para validação, obtidas por amostragem aleatória estratificada.

Fragmentos florestais com áreas inferiores a 1 hectare foram excluídos devido à sua limitada representatividade na bacia do rio Paraopeba e à sua baixa eficácia na manutenção de ecossistemas saudáveis (Haddad et al., 2015; Hatfield et al., 2020). Em seguida, os fragmentos foram subdivididos em quatro classes, com base em suas áreas: muito pequenos (1 a 5 hectares), pequenos (5 a 10 hectares), médios (10 a 100 hectares) e grandes (superiores a 100 hectares). Em seguida, calculamos a distância euclidiana entre a borda de cada fragmento e qualquer outro ponto dentro da bacia do rio Paraopeba. Os mapas de distância foram normalizados para uma escala de 1 a 10 para todas as classes. Para ponderar áreas próximas a grandes fragmentos florestais com maior importância, os mapas de distância das quatro classes foram sobrepostos, estabelecendo-se pesos. Áreas próximas a grandes fragmentos receberam peso igual a 0.8, áreas próximas a fragmentos médios receberam peso igual a 0.1, e áreas próximas a fragmentos pequenos e muito pequenos receberam peso igual a 0.05.

As informações sobre centros urbanos e áreas de mineração foram extraídas a partir da base de dados de uso e cobertura do solo disponibilizada pela plataforma MapBiomas, com resolução de 30 metros (MAPBIOMAS, 2022). Para atribuir as notas, calculamos distâncias euclidianas e normalizamos a escala para variação de 0 a 10. É importante ressaltar que, ao contrário dos outros fatores, maior distância resulta em notas mais altas, refletindo maior prioridade para restauração florestal. O mesmo procedimento foi adotado para desenvolver o mapa de fatores relacionados à proximidade de rodovias, utilizando dados das rodovias estaduais e federais disponíveis na plataforma IDESISEMA do governo de Minas Gerais.

Para avaliar a suscetibilidade erosiva das áreas da bacia do rio Paraopeba como outro fator determinante, utilizamos informações do mapa de vulnerabilidade erosiva produzido pela Embrapa PronaSolos, com resolução de 30 metros (EMBRAPA, 2018). As classes foram mantidas e reclassificadas para notas de 0 a 10, onde áreas com maior erodibilidade receberam notas mais altas, indicando maior prioridade para restauração.

Por fim, para construção do mapa de criticidade hídrica utilizamos os dados referentes ao Índice de Criticidade Hídrica (ISQ) para cada uma das sub-bacias da bacia do rio Paraopeba, disponibilizados no plano diretor da bacia do rio Paraopeba (COBRAPE, 2020). Esse índice se refere à combinação dos Índices de Criticidade Quantitativa e do Índice de Criticidade

Qualitativa. Para seu cálculo são considerados dados da vazão acumulada de demandas e da vazão de déficit na ottobacia somada a vazão necessária a ser adicionada ao trecho de rio para diluição da carga de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) até o limite de enquadramento do trecho (COBRAPE, 2020). Os dados foram espacializados por sub-bacia e categorizados em 10 classes geométricas, cada uma recebendo uma nota de 0 a 10. Sub-bacias com maior criticidade hídrica receberam notas mais altas.

Estabelecemos como restrições as fronteiras da bacia, as áreas com fragmentos florestais já existentes e classes de uso do solo como água, centros urbanos e mineração, que não são passíveis de restauração florestal. Todos os mapas foram construídos utilizando o software GIS ArcGIS Pro 2.8 (ESRI), em projeção UTM (zona 23 S) e Datum SIRGAS 2000.

#### 2.2.4. Definição dos pesos entre os fatores

Os pesos representam a importância relativa de cada fator avaliado para a restauração florestal (Eastman, 2011; Malczewski, 2004). A definição dos pesos na AMC foi conduzida utilizando o método Analytic Hierarchy Process (AHP), desenvolvido por Tomas L. Saaty, no início dos anos 1970 (Saaty, 1980). Esse método emprega uma matriz de comparação pareada, na qual cada critério é avaliado em uma escala de nove pontos, refletindo sua importância relativa em relação aos demais (Eastman, 2001).

Determinamos os pesos para cada fator na análise multicritério por meio de consulta às lideranças das comunidades afetadas pelo rompimento da barragem na bacia do rio Paraopeba, utilizando um formulário eletrônico simplificado. Cada liderança realizou a análise pareada de dois fatores, por vez, indicando qual era o mais importante entre eles. Por fim, contabilizamos o número de respostas gerais e a ordem de prioridade estabelecida. Com a ordem de prioridade e nível de importâncias estabelecidos pelas pessoas atingidas, enviamos os dados para matriz de comparação pareada e os pesos definidos pela normalização dos autovalores máximos da matriz final (material suplementar S2).

Esse modelo de abordagem é muito utilizado no meio científico quando se deseja incorporar as perspectivas locais e as percepções sobre os impactos ambientais, sociais e econômicos do desastre vivenciadas pelas pessoas atingidas, bem como suas visões sobre as possíveis medidas de reparação e seus desejos para o futuro (Eastman, 2011; Valente et al., 2021).



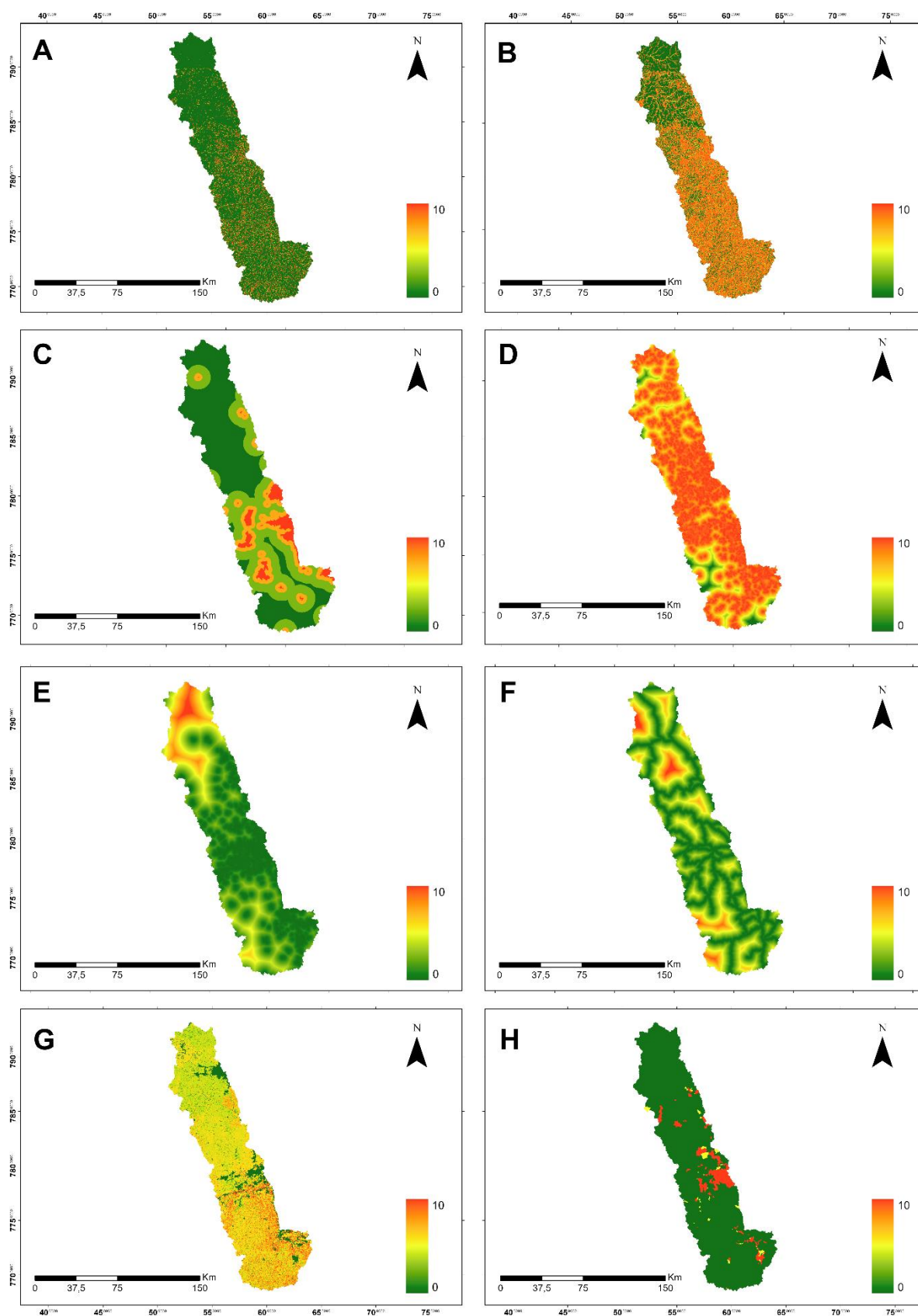


Figura 3: Fatores para determinação das áreas prioritárias para restauração florestal da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, MG, Brasil, normalizados por uma escala de 0 a 10. A. Proximidade às nascentes. B. Proximidade aos cursos d'água. C. Proximidade a áreas protegidas. D. Proximidade aos fragmentos florestais existentes. E.

Distância de Centros Urbanos e Mineração. F. Distância de Rodovias. G. Susceptibilidade à erosão. H. Índice de Criticidade Hídrica.

### 2.2.5. Classificação das áreas prioritárias

O mapa de áreas prioritárias foi gerado usando o método WLC, que considera o peso de cada fator e as restrições apontadas. As áreas prioritárias foram reclassificadas em cinco classes de prioridade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, considerando o método Natural Breaks (Jenks). Para analisar as proporções de Uso e Cobertura do Solo (LULC) existentes nas diferentes classes de áreas prioritárias para restauração florestal, foi usada a base da Coleção Beta da Plataforma MapBiomas do ano de 2022. Esse tipo de análise permite avaliar o custo de oportunidade, caso haja a substituição do uso presente por vegetação nativa devido ao processo de restauração.

Essas análises e o mapa final foram desenvolvidos em ambiente GIS (ArcGIS Pro 2.8, ESRI), em projeção UTM (zona 23 S) e Datum SIRGAS 2000.

## 2.3 Resultados

### 2.3.1. Classificação dos pesos

As áreas próximas a cursos d'água ( $P = 0,19$ ) e próximas às nascentes ( $P = 0,19$ ) receberam as maiores notas e, conseqüentemente, os maiores pesos. O segundo maior peso foi o Índice de criticidade hídrica ( $P = 0,14$ ), seguido por áreas com maiores chances de erosão ( $P = 0,12$ ), áreas próximas a fragmentos florestais ( $P = 0,10$ ), áreas mais distantes de rodovias ( $P = 0,09$ ) e as áreas mais distantes de centros urbanos ( $P = 0,09$ ) e, por último, a proximidade a áreas protegidas ( $0,08$ ).

Os pesos mais altos atribuídos a áreas próximas a cursos d'água e às nascentes apontam a importância desse recurso para as pessoas atingidas pelo rompimento da barragem. Após o rompimento, o uso da água do rio Paraopeba foi interrompido, seja ele vinculado a atividades econômicas como irrigação e dessedentação animal, atividades de subsistência como cultivo de hortaliças, pomares ou até mesmo atividades de pesca e lazer (IGAM, 2019). Além disso, também foi interrompido o uso de poços e cisternas que estavam localizadas a 100 metros de distância do rio Paraopeba.

Essas medidas trouxeram consequências como necessidade de perfuração de poços ao longo da bacia para atendimento das demandas cotidianas e econômicas das pessoas (VALE,

2019) a construção de novos sistemas de abastecimento de água para os municípios de Pará de Minas e Belo Horizonte (VALE, 2021), além de outros projetos de segurança hídrica, com objetivo de aumentar a produção de água de qualidade na região metropolitana da capital do estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2021). O segundo maior peso ter sido atribuído à prioridade de restauração florestal em áreas críticas para o balanço hídrico, reforça a compreensão de que a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos são os que mais influenciaram na hierarquização feita pelos atingidos, refletindo assim suas necessidades mais básicas.

### 2.3.2. Priorização de Áreas para Restauração Florestal

O mapa de áreas prioritárias obtido após agregar os mapas de critérios pode ser visualizado na Figura 4. A distribuição percentual da área para cada classe de prioridade para toda área de estudo, pela porção da área da bacia hidrográfica do rio Paraopeba e por município, é apresentada na Figura 5.

As áreas de restrição correspondem a 86,12% da área total da bacia. Desses, 74,12% são coberturas vegetais e 25,8% restantes foram classificadas como água ou matrizes antrópicas como centros urbanos, rodovias, estradas e mineração.

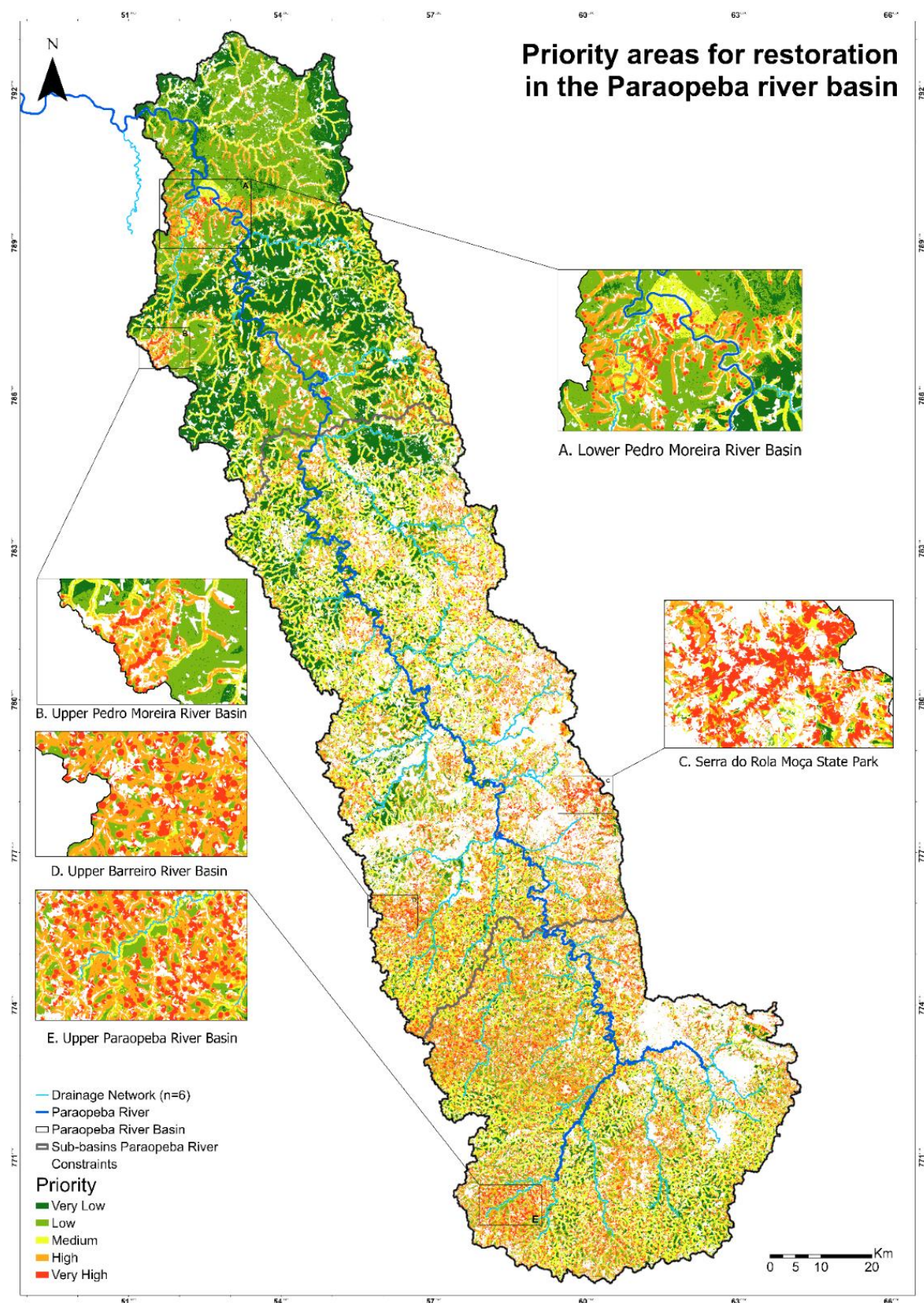


Figura 4: Áreas prioritárias para restauração florestal na Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil. A) Lower Pedro Moreira River Basin, B) Upper Pedro Moreira River Basin, C) Serra do Rola Moça State Park, D) Upper Barreiro River Basin, E) Upper Paraopeba River Basin. Sistema de Coordenada Geográfica: UTM SIRGAS 2000/23S.

Dos aproximadamente 980 mil hectares avaliados quanto à prioridade para restauração florestal dentro da bacia do rio Paraopeba, 8,3% (82.003,05 ha), 22% (217.936,1 ha), 29% (287.123,8 ha), 20,8% (205.368,2 ha) e 19,9% (197.281,97 ha) foram classificados com prioridade para restauração Muito Alta, Alta, Média, Baixa e Muito Baixa, respectivamente (Figura 5A).

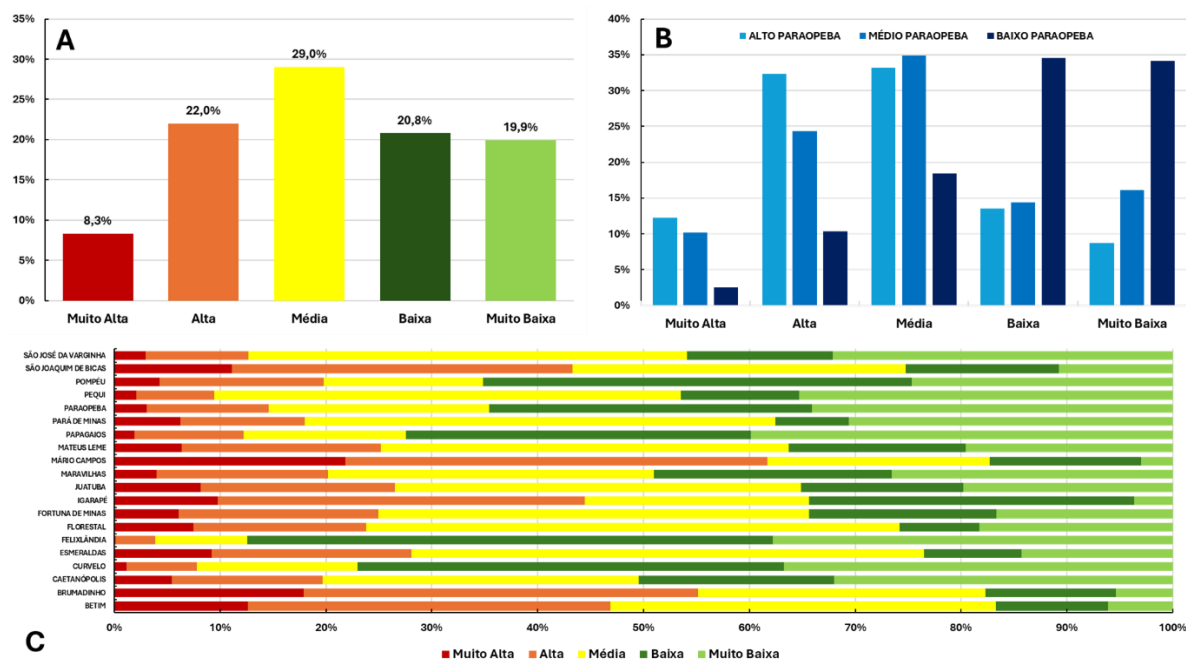


Figura 5: Classes de áreas prioritárias para restauração florestal na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil. a) Distribuição das porcentagens de áreas por toda a bacia, b) Distribuição das porcentagens pelas regiões do Baixo, Médio e Alto Paraopeba, c) Distribuição das porcentagens nos municípios atingidos pelo rompimento da barragem BI da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, Minas Gerais, Brasil.

A distribuição de pequenos círculos vermelhos ao longo do mapa de áreas prioritárias (Figura 4) revela que, de uma forma geral, as áreas de Muito Alta prioridade de restauração florestal para a bacia do rio Paraopeba propostas nesse modelo, estão localizadas, principalmente, nas áreas próximas às nascentes e cursos d'água de ordens menores (Figura 4), e em áreas de relevo mais acentuado.

A maior parte das áreas que compõem o Baixo Paraopeba foram classificadas como Muito Baixa e Baixa prioridades, com 110.573,02 ha (34,15%) e 111.856,21 ha (34,55%), respectivamente (Figura 5B). Cabe destacar nessa região os municípios de Felixlândia, Papagaios, Pompéu, Curvelo e Paraopeba, com grandes áreas classificadas como de baixa ou muito baixa prioridade (Figura 5C). Esse resultado reflete a baixa presença de nascentes e de cursos d'água de ordem menores, associada ao relevo mais plano, que também influencia de



maneira significativa à baixa susceptibilidade erosiva dessa região. Outros fatores como baixa criticidade hídrica também ampliou a presença de áreas de baixa prioridade para restauração florestal nesses municípios.

Nessa porção da bacia, apenas 2,56% das áreas passíveis de restauração foram consideradas de muito alta prioridade (8283,68 ha). As áreas de Muito Alta prioridade na região do Baixo Paraopeba estão concentradas nas áreas de relevo mais acentuado, próximo ao limite oeste da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, no município de Pompéu (Figura 4). Já as áreas de Alta prioridade se concentraram nas áreas próximas aos cursos d'água de menores ordem, como pode ser observado nos destaques dados em A) Lower Pedro Moreira River Basin e B) Upper Pedro Moreira River Basin da Figura 4.

A região do Médio Paraopeba tem aproximadamente 35% de suas áreas distribuídas dentro da classe de Média prioridade. As classes de Muito Alta e Alta prioridades correspondem a 10,21% e 24,36%, respectivamente (Figura 5B). A figura 4C destaca a área onde está localizado o Parque Estadual da Serra do Rola Moça, que possui grandes áreas classificadas como de Muita Alta prioridade para restauração florestal. Essa região, além da vasta presença de nascentes e cursos d'água de menor ordem, também abriga áreas de alta criticidade/déficit hídrico e áreas com alta susceptibilidade erosiva devido à declividade pronunciada (Figura 3). Já a área destacada na figura 4D Upper Barreiro River Basin, com influência da APA Municipal Rio Manso, tem como influência principal nas áreas de Muito Alta prioridade as áreas de entorno de nascentes. A diferença no padrão de apresentação dessas áreas de Muito Alta prioridade nas áreas 4C e 4D (Fig. 4) provavelmente está relacionada ao critério de criticidade hídrica.

O Alto Paraopeba possui a maior porcentagem de áreas classificadas nas prioridades Alta e Muito Alta, 90.107,86 ha (32,31%) e 34.200,62 ha (12,26%), respectivamente (Fig. 5B). A densa malha hídrica dessa região, associada à presença de fragmentos e à susceptibilidade erosiva (Fig. 3) contribuíram para esse resultado. Nessa região, o destaque na área E) Upper Paraopeba River Basin (Fig. 4) revela que, mesmo com a presença de notas altas para os critérios de proximidade com nascentes, proximidade com cursos d'água e proximidade com fragmentos florestais (na área central), ainda assim há áreas importantes, próximas de cursos d'água de ordem 6, que foram classificadas como média ou Baixa prioridades. Essa área recebeu notas muito baixas de áreas protegidas e criticidade hídrica, e nota mediana de distância a centros urbanos e mineração.

Considerando às áreas de restrição, observou-se maior presença dessas áreas nas porções alta e média da bacia do rio Paraopeba, que na porção sul. Esse resultado está relacionado à presença de grandes áreas urbanizadas e de exploração minerária da região metropolitana de Belo Horizonte, em consonância, a uma menor presença de áreas com vegetação nativa nas áreas mais baixas da bacia do rio Paraopeba, associada principalmente à grande presença de áreas de produção agropecuária extensiva, estimulada pelo relevo mais plano dessa região (COBRAPE, 2020).

A distribuição das áreas dentro de cada uma das classes de prioridade dos municípios da bacia hidrográfica do rio Paraopeba pode ser observada no material suplementar S3. A Figura 5C traz a distribuição das classes de áreas prioritárias dentro dos 20 municípios atingidos pelo rompimento (Minas Gerais, 2021, p. 41) que estão dentro da área de estudo. Apenas quatro destes municípios tiveram mais de 10% de suas áreas classificadas como Muito Alta prioridade, como foi o caso de Mário Campos (21,84%), Brumadinho (17,9%), Betim (12,64%) e São Joaquim de Bicas (11,11%). Se somarmos as áreas classificadas como Muito Alta e Alta prioridades, apenas Mário Campos e Brumadinho apresentam mais de 50% de seu território nessas classes, com os valores de 61,68% e 55,12%, respectivamente. O município de Felixlândia, mesmo tendo essas classes somadas, apresenta apenas 3,86% de áreas abarcadas por essas classes, tendo como predominância as áreas dentro das classes Baixa (49,62%) e Muito Baixa (37,79%). Cabe destacar também o município de Igarapé, com mais de 1/3 de sua área classificada como Alta prioridade para restauração florestal. Com relação às áreas de Média prioridade, temos predominância dos municípios de Esmeraldas (48,39%), Pará de Minas (44,46%), Pequi (44,10%), São José da Varginha (41,4%) e Fortuna de Minas (40,69%) (Figura 5D).

Considerando o uso e cobertura do solo nas áreas definidas como de Muito Alta prioridade observamos, na Figura 6, que a maior parte dessas áreas está atualmente ocupada por pastagens (56,68%) e áreas de produção agropecuária, classificada como Mosaico de Usos (21,29%). As pastagens também são especialmente dominantes nas classes Alta (60,28%) e Média (65,41%). Também se observou a presença significativa de grandes áreas de produção agropecuária, definida como Mosaico de Usos, em todas as classes de prioridade. Embora presente em todas as classes, as maiores porcentagens de Silvicultura se encontram nas classes de Muito Baixa (12,32%) e Baixa (11,29%) prioridades.

O percentual de áreas de produção agrícola dentro das classes de priorização variou de 2,08% a 4,45%, sendo mais significativa nas classes de prioridade Muito Baixa e Baixa com 4,45% e 4,06%, respectivamente (Figura 6). Esse resultado indica baixa presença de áreas produção agrícola nas áreas mais próximas de cursos d'água, em comparação com outros usos produtivos.

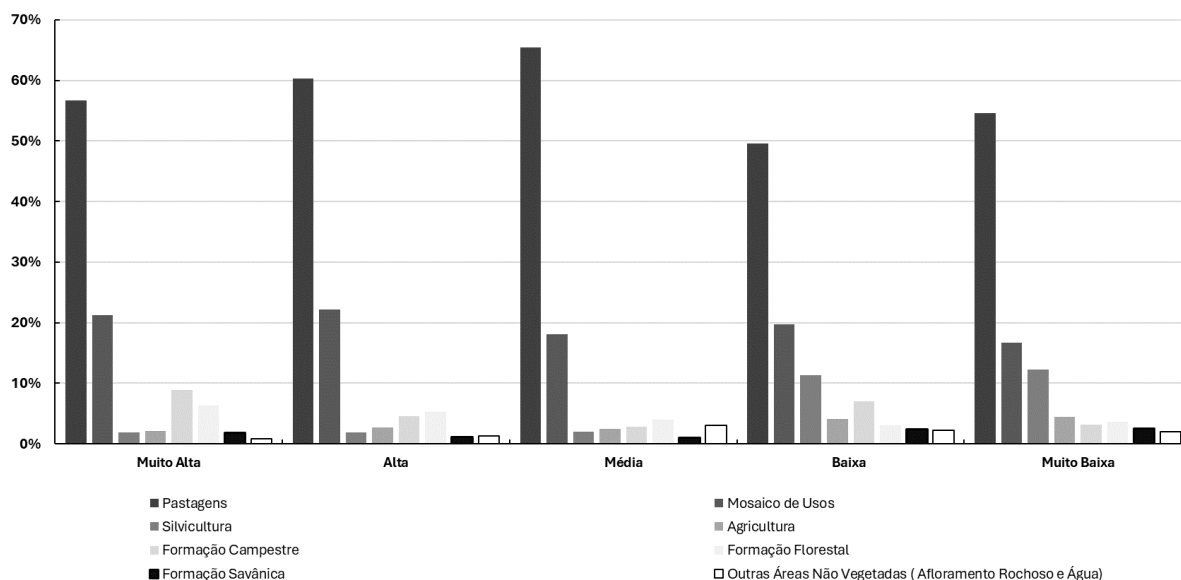


Figura 6: Distribuição das porcentagens de usos e cobertura do solo existentes por classe de áreas prioritárias para restauração florestal na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, Minas Gerais, Brasil.

## 2.4 Discussão

### 2.4.1. Definição de pesos

A participação ativa da comunidade nos processos decisórios da restauração, além de trazer transparência ao processo, trazem resultados mais positivos. As estratégias para restauração envolvendo comunidades em contextos pós-desastres são baseadas na capacidade de absorver um impacto, ressignificando interações e características do sistema socioecológico (Zaman et al., 2023). Logo, a participação das pessoas atingidas na hierarquização dos critérios qualifica o modelo ao considerar suas demandas em relação à recuperação de áreas impactadas pelo rompimento da barragem Mina Córrego do Feijão, na bacia do rio Paraopeba.

O maior peso de áreas próximas a águas superficiais, sejam córregos e rios ou nascentes, já foram identificados para priorização de áreas em outros trabalhos (Vettorazzi & Valente, 2016; Valente et al., 2021). Neste estudo esse fato se atrela à percepção do dano pelas pessoas atingidas, que foram privadas do uso desse recurso com o rompimento da barragem. Após



desastres ambientais são necessárias mudanças que direcionem ao desenvolvimento comunitário no qual a restauração deve se basear na busca de novas formas do homem se relacionar com a paisagem (Lin, 2019; UNDP, 2020), e a água é um recurso vital para essas relações. Os desafios no fornecimento de água devem ser resolvidos não apenas com soluções de engenharia, como proposto pela empresa e pelo estado (VALE, 2019; VALE, 2021; Minas Gerais, 2021), mas também por meio de alternativas baseadas na natureza, como a restauração de florestas nativas (Vettorazzi and Valente, 2016; Mello et al., 2017; Empinotti et al., 2019; Kroeger et al., 2019; Mello et al., 2020).

Em contrapartida, o baixo peso atribuído às áreas protegidas pode ser consequência da relação das pessoas com as unidades de conservação. Diversos conflitos são conhecidos entre populações, sejam elas tradicionais ou não, e áreas protegidas, dentre eles os processos não resolvidos de regularização fundiária, extrativismo em unidades de proteção integral, caça, uso do fogo como manejo de atividades agropastoris, pesca e criação de animais em áreas em que essas atividades não são permitidas (NUPAUB, 1995). Além disso, o conhecimento restrito das funções ecológicas e serviços ecossistêmicos potenciais provisionados por essas áreas pode ter contribuído pelo baixo peso de importância atribuído pelas lideranças comunitárias.

#### 2.4.2. Priorização de áreas para restauração florestal

A priorização de áreas para restauração deste estudo considera perspectivas importantes para definir locais para restauração porque trazem ao processo aspectos da paisagem e da participação social, se apresentando como um modelo de suporte para tomadas de decisão. O uso de critérios que representam características críticas da bacia relacionados ao objetivo do estudo (Valente e Vettorazzi, 2008) e que trazem diferentes perspectivas da paisagem de acordo com especialistas (Zhang et al., 2013) permitiu definir áreas prioritárias para restauração florestal com base nos serviços ecossistêmicos hídricos. Os critérios utilizados neste estudo também foram identificados como importantes para a priorização de áreas (Orsi & Geneletti, 2010; Ferreti & Pomarico, 2013; Vettorazzi & Valente, 2016) em estudos baseados no conhecimento dos serviços ecossistêmicos relacionados a bacias hidrográficas, especialmente relacionados à qualidade e quantidade de água (Gao et al., 2017). Este estudo reforça a utilidade da abordagem integrada de vários critérios pelo método AMC como uma ferramenta eficaz na definição de áreas prioritárias (Langemeyer et al., 2016; Vettorazzi and Valente, 2016; Duarte et al., 2016; Tobon et al., 2017; Valente et al., 2017; Lopes et al., 2020).

A restauração florestal nas áreas de Alta e Muito Alta prioridades distribuídas pela bacia hidrográfica do rio Paraopeba pode levar a uma melhoria da biodiversidade regional, bem como à conservação de recursos hídricos. Isso porque as áreas classificadas como Alta prioridade para restauração conectam as áreas de Muito Alta prioridade e são, em sua maioria, Áreas de Preservação Permanente (APPs) localizadas em áreas de cabeceira. Os benefícios da restauração florestal em regiões ripárias já foram registrados por outros estudos (Chin-Lung et al., 2021; Mackay et al., 2016). A presença de cobertura vegetal em áreas ribeirinhas pode aumentar significativamente a infiltração de água no solo, a recarga dos aquíferos e impedir o assoreamento de corpos hídricos (Liu et al., 2008; Croke et al., 2017; Novoa et al., 2018). Além disso, as APPs são importantes na conectividade da paisagem, e, portanto, para a movimentação de espécies (Zimbres et al., 2017; Paolino et al., 2018). Cabe destacar que o objetivo de melhorar a qualidade e quantidade dos recursos hídricos pode não ser alcançável, especialmente se as áreas a montante e os afluentes estiverem impactados (Parkyn et al., 2003). Segundo Parkyn et al. (2023), a reabilitação dos corpos hídricos será mais bem sucedida quando a restauração florestal começar a partir das cabeceiras e ir alcançando comprimento ao longo da bacia hidrográfica.

A análise das áreas prioritárias em diferentes escalas, considerando as regiões do Alto, Médio e Baixo Paraopeba e de seus municípios, pode oferecer um olhar mais robusto, capaz de contribuir para melhorar a tomada de decisão em diferentes níveis de planejamento. Logo, o modelo permite que os planejadores façam uso do mapa de prioridade e cruzem diversas informações, ajudando a destacar localizações específicas que direcionam os esforços de restauração florestal (Dragi'cevi'c et al., 2015).

A análise do uso e cobertura do solo dentro das áreas prioritárias para restauração florestal é importante para entender a viabilidade e os custos de oportunidade associados à substituição dessas classes por fragmentos florestais. Nossos resultados indicam que a grande presença de áreas de pastagens e mosaicos de usos nas áreas classificadas como Alta e Muito Alta prioridade para restauração florestal estão ocorrendo próximo a cursos d'água. A restauração florestal dessas áreas é favorecida (Valente et al., 2021), já que a legislação brasileira inclui as margens dos rios e ao redor de nascentes como APPs, cuja função é preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade (Brasil, 2012). A conversão dessas áreas para fragmentos florestais pode reduzir os efeitos negativos oriundos das atividades agropecuárias como a selagem do solo, o escoamento, o processo de erosão e o quantitativo de sedimentos em cursos d'água (Ogden et al., 2013; Yang

et al., 2016; Mello et al., 2020). Outros estudos já mostraram que a integridade do sistema ripário é vital para evitar a erosão do solo e, conseqüentemente, manter a água de alta qualidade (Collinge, 1996; Sweeney e Czapka, 2004; Lima, 2005).

Embora a conversão de áreas de pastagens possa trazer impactos socioeconômicos a nível local e regional a restauração florestal poderia estar condicionada a um processo gradual de mudança para modelos mais efetivos de produção agropecuária, a partir do uso de novas tecnologias para melhoria da relação entre produção e área utilizada. Além disso, medidas alternativas como a utilização de sistemas agroflorestais podem garantir a manutenção de parte da capacidade produtiva dessas áreas, enquanto contribuem para a recuperação ambiental, oferecendo um equilíbrio entre conservação e produção (Nair, 2011; Martinelli et al. 2019). Com o tempo, esse processo pode resultar em sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis, assegurando benefícios econômicos e ecológicos duradouros. Paisagens mistas com plantios de espécies lenhosas em pastagens são cada vez mais comuns em muitas regiões do mundo, contribuindo para o sequestro do carbono, aumentar o habitat para a flora e fauna nativas e melhorar a qualidade da água (Cunningham et al., 2015).

Nossos resultados indicam que o modelo proposto priorizou áreas relevantes para a restauração florestal, tendo como principais alvos de conversão as áreas de pastagens e os mosaicos agropecuários. Essas informações podem ajudar a direcionar políticas públicas e ações de restauração florestal, contribuindo para discussões em torno da gestão dos recursos hídricos em diferentes escalas.

## **2.5 Conclusão**

A restauração florestal em bacias hidrográficas impactadas por desastres como o rompimento de barragens é crucial para a recuperação da biodiversidade, a proteção dos recursos hídricos e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Neste contexto, a abordagem de Análise Multicritério (AMC) permitiu identificar áreas prioritárias para restauração florestal em uma bacia impactada pelo rompimento de barragem de rejeitos, com o objetivo de manter e recuperar os recursos hídricos. Os critérios utilizados na AMC abrangeram características da paisagem como declividade, tipo de solo, distância de cursos d'água, além de indicadores de qualidade da água e conectividade entre fragmentos florestais. A participação ativa das comunidades atingidas na definição dos critérios e na hierarquização das prioridades foi fundamental para garantir que as ações de restauração atendessem às suas necessidades e expectativas.

Os resultados deste estudo fornecem valiosos para a gestão ambiental da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, indicando as áreas de maior potencial para a restauração florestal. No entanto, a implementação dessas ações enfrenta desafios como a necessidade de investimentos financeiros, a definição de um marco legal adequado e a mobilização da sociedade civil. Os resultados obtidos podem servir como base para o desenvolvimento de projetos de restauração ecológica, a elaboração de políticas públicas e a criação de mecanismos de monitoramento e avaliação dos impactos dessas ações.

## REFERÊNCIAS

Arcadis. **Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba**. Rompimento das barragens B1, B4 e B4-A do Complexo Paraopeba II – Mina Córrego do Feijão. 1034 p. 2022.

Aronson, J., & Alexander, S. **Steering towards sustainability requires more ecological restoration**. *Natureza e Conservacao*, 11(2), 127–137, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/natcon.2013.021>. Acesso em 23 jun. 2024.

Boldy, R. et al. **Understanding the impacts of mining on ecosystem services through a systematic review**. *The Extractive Industries and Society*, v. 8, n. 1, p. 457-466, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214790X20303221>. Acesso em 19 jun. 2024.

Brasil. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e nº 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em 4 jul. 2024.

Brasil. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 19 jul. 2000. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19985.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm). Acesso em 03 jul. 2024.

Carranza, T., Balmford, A., Kapos, V., Manica, A. **Protected Area Effectiveness in Reducing Conversion in a Rapidly Vanishing Ecosystem: The Brazilian Cerrado**. *Conservation Letters*, 7: 216-223. 2014. Disponível em: <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/conl.12049>. Acesso em 14 mai. 2024.

Cassiano, C. C., Ferraz, S. F. D. B., Molin, P. G., Voigtlaender, M., & Ferraz, K. M. P. M. de B.. **Spatial assessment of water-related ecosystem services to prioritize restoration of**

**forest patches.** *Natureza e Conservação*, 11(2), 176–180, 2013. Disponível em: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/natcon.2013.027>. Acesso em 10 jan. 2024.

Chen, K. P.; Blong, R.; Jacobson, C. **Mce-Risk: Integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision-making in natural hazards.** *Environmental Modelling & Software*, v. 16, n. 4, p. 387-397, 2001. Disponível em: <https://researchers.mq.edu.au/en/publications/mce-risk-integrating-multicriteria-evaluation-and-gis-for-risk-de>. Acesso em 9 fev. 2024.

Chin-Lung Wu, Steven J., Herrington, Barbara Charry, Maria L. Chu, Jason H. Knouft. **Assessing the potential of riparian reforestation to facilitate watershed climate adaptation.** *Journal of Environmental Management*, Volume 277, 2021, 111431, ISSN 0301-4797. Disponível em: <https://experts.illinois.edu/en/publications/assessing-the-potential-of-riparian-reforestation-to-facilitate-w>. Acesso em 4 mar. 2024.

COBRAPE – Cia. Brasileira de Projetos e Empreendimentos. **Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.** São Paulo: Cobrape, 2020. 856 p.

Collinge, S.K. **Ecological consequences of habitat fragmentation: implications for landscape architecture and planning.** *Landscape Urban Plan.* 36, 59–77, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169204696003416>. Acesso em 18 mar. 2024.

Croke, J.; Thompson, C.; Fryirs, K. **Prioritizing the placement of riparian vegetation to reduce flood risk and end-of-catchment sediment yields: important considerations in hydrologically variable regions.** *Journal of Environmental Management*, v. 190, p. 9-19, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28024173/>. Acesso em 12 jul. 2024.

Cunningham, R. Mac S.C. Nally, P.J. Baker, T.R. Cavagnaro, J. Beringer, J.R. Thomson, R.M. Thompson. **Balancing the environmental benefits of reforestation in agricultural regions.** *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.*, 17 (2015), pp. 301-317. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1433831915000463>. Acesso em 13 mar. 2024.

Duarte, E. B., Neves, M. A., De Oliveira, F. B., Martins, M. E., De Oliveira, C. H. R., Burak, D. L., Orlando, M. T. D., Rangel, C. V. G. T. **Trace metals in Rio Doce sediments before and after the collapse of the Fundão iron ore tailing dam, Southeastern Brazil.** *Chemosphere*, Vol. 262, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32781334/>. Acesso em 28 mar. 2024.

Duarte, G. T., Ribeiro, M. C., & Paglia, A. P. **Ecosystem services modeling as a tool for defining priority areas for conservation.** *PLoS ONE*, 11(5), 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154573> . Acesso em 27 jan. 2024.

Dragićević, S., Lai, T., Balram, S.. **GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments.** *Habitat Int.* 45, 114–125, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.06.031>. Acesso em 21 mar. 2024.

Durbecq A., Jaunatre R., Buisson E., Cluchier A., Bischoff A. **Identifying reference communities in ecological restoration: the use of environmental conditions driving vegetation composition.** *Restoration Ecology* 28(6):1445–1453, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/rec.13232>. Acesso em 9 mar. 2024.

Eastman, J. R. Idrisi, T. **Guide to GIS and Image Processing.** Clark University, Clark Labs, Worcester, 2011.

Eastman, J. R. **Decision support: decision strategy analysis.** In: IDRIS 32 release 2: guide to GIS and image processing. Worcester: Clark University/Clark Labs, 2001. v.2.p.1-22.

Ellison, D.; Futter, M.; Bishop, K. **On the forest cover–water yield debate: from demand-to supply-side thinking.** *Global Change Biology*, v. 18, n. 3, p. 806–820, 2012. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3597246/> . Acesso em 24 jan. 2024.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). **Mapa de vulnerabilidade à erosão dos solos no Brasil.** 2022. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/#/> . Acesso em 17 jun. 2024.

Empinotti, V.L., Budds, J., Aversa, M.. **Governance and water security: the role of the water institutional framework in the 2013–15 water crisis in São Paulo, Brazil.** *Geoforum* 98, 46–54, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.09.022> . Acesso em 21 fev. 2024.

Ferretti, V., Pomarico, S.. **Ecological land suitability analysis through spatial indicators: an application of the Analytic Network Process technique and Ordered Weighted Average approach.** *Ecol. Indic.* 34, 507–519, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.005> . Acesso em 4 fev. 2024.

Ferrier, S. **Prioritizing where to restore Earth’s ecosystems.** *Nature*, v. 586, p. 680-681, 2020. doi: 10.1038/d41586-020-02750-2.

Gao, J., Li, F., Gao, H., Zhou, C., & Zhang, X. **The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China.** *Journal of Cleaner Production*, 163, S148–S155, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.049>. Acesso em 8 fev. 2024.

Geneletti, D. **Using spatial indicators and value functions to assess ecosystem fragmentation caused by linear infrastructures.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 5(1), 1–15, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2003.08.004>. Acesso em 13 fev. 2024.

Geneletti, D. **Biodiversity impact assessment of roads: an approach based on ecosystem rarity.** Environmental Impact Assessment Review, v. 23, n. 3, p. 343–365, 2003. Disponível em : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0195925502000999>, Acesso em 12 jun. 2024.

Grizzetti, B., Lanza Nova, D., Lique, C., Reynaud, A., & Cardoso, A. C. **Assessing water ecosystem services for water resource management.** Environmental Science and Policy, 61, 194–203, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.008>. Acesso em 1 ago. 2024.

Gutzwiller, K. J.; Barrow, W. C. **Influences of roads and development on bird communities in protected Chihuahuan Desert landscapes.** Biological Conservation, v. 113, n. 2, p. 225–237, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0006320702003610>. Acesso em 15 jun. 2024.

Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., Lovejoy, T. E., Sexton, J. O., Austin, M. P., Collins, C. D., Cook, W. M., Damschen, E. I., Ewers, R. M., Foster, B. L., Jenkins, C. N., King, A. J., Laurance, W. F., Levey, D. J., Margules, C. R., Townshend, J. R. **Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth’s ecosystems.** Science Advances, 1(2), 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>. Acesso em 26 mai. 2024.

Hatfield, J. H., Barlow, J., Joly, C. A., Lees, A. C., Parruco, C. H. de F., Tobias, J. A., Orme, C. D. L., & Banks-Leite, C.. **Mediation of area and edge effects in forest fragments by adjacent land use.** Conservation Biology, 34(2), 395–404, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/cobi.13390>. Acesso em 25 mai. 2024.

Hatje V., Pedreira R.M.A., Rezende C.E., Schettini, C. A. F, Souza, G.C., Marin, D. C., Hackspacher, P. C. **The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide.** Scientific Reports. v.7(1), 10706, 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5587546/>. Acesso em 23 mai. 2024.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). **Livro Vermelho Da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção vol. 1.** 2018.

Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISEMA). **Áreas Protegidas. Belo Horizonte: IEF/ICMBIO, 2022.** Dado em formato

vetorial (shapefile). Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/> . Acesso em 11 jun. 2024.

Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Nota técnica conjunta IGAM/SES N. 001/2019. Análise da Qualidade das águas do rio Paraopeba a jusante da barragem B1 após o rompimento da barragem B1 operada pela mineradora Vale.** 2019. Disponível em: [http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/DESASTRE\\_BARRAGEM\\_B1/NT\\_Igam-SES/Nota\\_tecnica\\_Conjunta\\_n1\\_IGAM.SES\\_assinada\\_digitalizada.pdf](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/DESASTRE_BARRAGEM_B1/NT_Igam-SES/Nota_tecnica_Conjunta_n1_IGAM.SES_assinada_digitalizada.pdf) . Acesso em 3 mai. 2024.

Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). **Suspensão do uso de água bruta é ampliada no Rio Paraopeba.** 2019b. Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/1/3770-suspensao-do-uso-de-agua-bruta-e-ampliada-no-rio-paraopeba> . Acesso em 15 jul. 2024.

Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). **Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.** Bonn: IPBES Secretariat, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673> . Acesso em 24 jan. 2024.

J.E. Mackay, S.C. Cunningham, T.R. Cavagnaro. **Riparian reforestation: are there changes in soil carbon and soil microbial communities?.** Science of The Total Environment, Volumes 566–567, 2016, Pages 960–967, ISSN 0048-9697. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.045>. Acesso em 28 jun. 2024.

Kroeger, T., Klemz, C., Boucher, T., Fisher, J.R.B., Acosta, E., Cavassani, A.T., Dennedy-Frank, P.J., Garbossa, L., Blainski, E., Santos, R.C., Giberti, S., Petry, P., Shemie, D., Dacol, K. **Returns on investment in watershed conservation: application of a best practices analytical framework to the Rio Camboriú Water Producer program, Santa Catarina, Brazil.** Sci. Total Environ. 657, 1368–1381, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.116>. Acesso em 22 jul. 2024.

Kuglerová, L. et al. **Towards optimizing riparian buffer zones: ecological and biogeochemical implications for forest management.** Forest Ecology and Management, v. 334, p. 74–84, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112714005222>. Acesso em 10 jul. 2024.

Langemeyer, J., Gómez-Baggethun, E., Haase, D., Scheuer, S., & Elmqvist, T. **Bridging the gap between ecosystem service assessments and land-use planning through Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA).** Environmental Science and Policy, 62, 45–56, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.02.013>. Acesso em 23 jul. 2024.



Lima, W.P. **Floresta natural protege e estabiliza recursos hídricos**. Visão Agrícola 4, 30–33, 2005. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va04-beneficios01.pdf> . Acesso em 27 jun. 2024.

Lima, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ – USP, 2008. 194 p. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002727964> . Acesso em 10 jul. 2024.

Liu, X. et al. **Major factors influencing the efficacy of vegetated buffers on sediment trapping: a review and analysis**. Journal of Environmental Quality, v. 37, p. 1667–1674, 2008. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/jeq2007.0437>. Acesso em 21 jul. 2024.

Lopes, T. R., Moura, L. B., Nasimento, J. G., Fraga Junior, L. S., Zolin, C. A., Duarte, S. N., Folegatti, M. V., & Santos, O. N. A. **Priority areas for forest restoration aiming at the maintenance of water resources in a basin in the Cerrado/Amazon ecotone, Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, 101, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102630>. Acesso em 5 mai. 2024.

Macedo, D. R., Hughes, R. M., Kaufmann, P. R., & Callisto, M. **Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome**. Science of the Total Environment, 635, 1267–1279, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.216>. Acesso em 28 jul. 2024.

Macklin, M. G. Cervejeiro, P.A., Edwards, H. K. A., Pássaro, G., Coulthard, T. J., Dennis, I. A., Lechler, P. J., Miller, J. R., Turner, J. N. **A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining**. Geomorphology 79, 423–447, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.024>. Acesso em 30 jul. 2024.

Macklin, Mark & Thomas, C. & Mudbhatkal, Amogh & Brewer, Paul & Hudson-Edwards, Karen & Lewin, John & Scussolini, Paolo & Eilander, D. & Lechner, Alex & Owen, J. & Bird, Graham & Kemp, D. & Mangalaa, K.. **Impacts of metal mining on river systems: a global assessment**. Science. 381. 1345-1350, 2023. Disponível em: <https://research.vu.nl/en/publications/impacts-of-metal-mining-on-river-systems-a-global-assessment>. Acesso em 22 jun. 2024.

Malczewski, J. **GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview**. Progress in Planning, v. 62, p. 3–65, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305900603000801>. Acesso em 20 jun. 2024.

Mansourian, S. **From landscape ecology to forest landscape restoration.** Landscape Ecology, v. 36, p. 2443–2452, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01175-6>. Acesso em 15 jul. 2024.

MapBiomas. **Projeto MapBiomas - Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil.** Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/> . Acesso em 9 jun. 2024.

Marmontel, C. V. F. et al. **Effects of land use and sampling distance on water quality in tropical headwater springs (Pimenta creek, São Paulo State, Brazil).** Science of The Total Environment, v. 622–623, p. 690–701, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717334307?via%3Dihub>. Acesso em 15 jul. 2024.

Marmontel, C. V. F. et al. **Parâmetros Indicativos para Qualidade da Água em Nascentes com Diferentes Coberturas de Terra e Conservação da Vegetação Ciliar.** Floresta e Ambiente, v. 22, n. 2, p. 171–181. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/FLjzsqWFfts4TQ46hshcSCJ/?lang=pt>. Acesso em 22 jul. 2024.

Martinelli, G. Do C., Schlindwein, M. M., Padovan, M. P., Vogel, E., & Ruviaro, C. F. **Environmental performance of agroforestry systems in the Cerrado biome, Brazil.** World Development, 122, 339–348, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305750X1930155X>. Acesso em 12 jul. 2024.

Martin-ortega, J.; Ferrier, R. C.; Gordon, I. J. **Water Ecosystem Services: A Global Perspective.** Global Water Forum, 2015. Disponível em: <http://www.globalwaterforum.org/2015/07/28/water-ecosystem-services-a-global-perspective> . Acesso em 24 jan. 2024.

MEA - Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis.** Washington, DC: Island Press, 2005.

Mello, K., Valente, R.A., Randhir, T.O., Vettorazzi, C.A. **Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds.** Ecol. Eng. 108, 514–524, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.049>. Acesso em 22 jul. 2024.

Mello, K., Valente, R.A., Randhir, T.O., Santos, A.C.A., Vettorazzi, C.A. **Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: watershed versus riparian zone.** Catena 167, 130–138, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.027>. Acesso em 19 mai. 2024.

Mello, K. de, Taniwaki, R. H., Paula, F. R. de, Valente, R. A., Randhir, T. O., Macedo, D. R., Leal, C. G., Rodrigues, C. B., & Hughes, R. M. **Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil**. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 270), 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110879>. Acesso em 22 jul. 2024.

Mendes, R. G., Do Valle Junior, R. F, Silva, M. M. A. P. De M., Fernandes, L. F. S., Fernandes, A. C. P., Pissarra, T. C. T., De Melo, M. C., Valera, C. A., Pacheco, F. A. L. **A partial least squares-path model of causality among environmental deterioration indicators in the dry period of Paraopeba River after the rupture of B1 tailings dam in Brumadinho (Minas Gerais, Brazil)**. *Environmental Pollution*, Volume 306, 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35469926/>. Acesso em 22

Minas Gerais (Estado). Poder Judiciário. Tribunal de Justiça de Minas Gerais. Centro Judiciário de Solução de Conflitos e Cidadania - 2º Grau. **Acordo judicial para reparação integral relativa ao rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA / Córrego do Feijão**. Processo de Mediação SEI nº 0122201-59.2020.8.13.0000. Belo Horizonte: TJMG, 2021.

Mingoti, R.; Vettorazzi, C. A.. **Relative reduction in annual soil loss in micro watersheds due to the relief and forest cover**. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 6, p. 1202–1211, dez. 2011.

Mittermeier R. A., Myers N, & Mittermeier C G. **Hotspots: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions**. *Journal of Mammalogy*, 83(2), 630–633, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1644/1545-1542\(2002\)083](https://doi.org/10.1644/1545-1542(2002)083). Acesso em 12 mai. 2024.

Ministério Público de Minas Gerais (MPMG). **Brumadinho - ACP Principal - Área socioeconômica**. Disponível em: [https://www.mpmg.mp.br/data/files/21/F4/E1/51/2D44A7109CEB34A7760849A8/Brumadinho%20-%20ACP%20Principal%20-%20rea%20socioec\\_nomica%20.pdf](https://www.mpmg.mp.br/data/files/21/F4/E1/51/2D44A7109CEB34A7760849A8/Brumadinho%20-%20ACP%20Principal%20-%20rea%20socioec_nomica%20.pdf) . Acesso em 1 ago. 2024.

Myers, N. et al. **Biodiversity hotspots for conservation priorities**. *Nature*, v. 403, 2000. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10706275/>. Acesso em 14 fev. 2024.

Nair, P. K. R. **Agroforestry Systems and Environmental Quality: Introduction**. *Journal of Environment Quality*, v. 40, n. 3, p. 784, 2011. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/jeq2011.0076>. Acesso em 21 mar. 2024.

Ngetich, K. F. et al. **Effects of selected soil and water conservation techniques on runoff, sediment yield and maize productivity under sub-humid and semi-arid conditions in Kenya**. *Catena*, v. 121, p. 288–296, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.026>. Acesso em: 10 maio 2024. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816214001611>. Acesso em 15 maio 2024.

Ningrum, W. S.; Widyaningsih, Y.; Indra, T. L. **Spatial modeling on the upperstream of the Citarum watershed: An application of geoinformatics**. AIP Conference Proceedings, v. 1827, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4979433>. Acesso em 25 abr. 2024. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/1827/1/020017/1020383/Spatial-modeling-on-the-upperstream-of-the-Citarum>. Acesso em 27 abr. 2024.

Nolte, C. et al. **Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 110, p. 4956-4961, 2013. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1214786110>. Acesso em 3 jul. 2024.

Novoa, J.; Chokmani, K.; Lhissou, R. **A novel index for assessment of riparian strip efficiency in agricultural landscapes using high spatial resolution satellite imagery**. Science of The Total Environment, v. 644, p. 1439–1451, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30743856/>. Acesso em 20 jan. 2024.

Núcleo de Apoio à Pesquisa Sobre Populações Humanas e Áreas Úmidas Brasileiras (NUPAUB)- USP. **Conflitos entre populações humanas e unidades de conservação e Mata Atlântica**. São Paulo, Junho, 1995.

Ogden, F. et al. **Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama**. Water Resources Research, v. 49, n. 12, p. 8443–8462, 2013. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013WR013956>. Acesso em 15 fev. 2024.

Randhir, T. O. **Water for Life and Ecosystem Sustainability**. Journal of Earth Science & Climatic Change, v. 3, n. 1, 2012. Disponível em: <https://www.omicsonline.org/water-for-life-and-ecosystem-sustainability-2157-7617.1000e107.php?aid=6719>. Acesso em 20 mar. 2024.

Orsi, F.; Geneletti, D. **Identifying priority areas for Forest Landscape Restoration in Chiapas (Mexico): An operational approach combining ecological and socioeconomic criteria**. Landscape and Urban Planning, v. 94, n. 1, p. 20–30, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169204609001510>. Acesso em 17 abr. 2024.

Pacheco, F. A. L. et al. **Water security threats and challenges following the rupture of large tailings dams**. Science of The Total Environment, v. 834, 2022. Disponível em: <https://europecpmc.org/article/med/35447180>. Acesso em 22 maio 2024.

Parkyn, S. M. et al. **Planted Riparian Buffer Zones in New Zealand: Do They Live Up to Expectations?** Restoration Ecology, v. 11, n. 4, p. 436–447, 2003. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1526-100X.2003.rec0260.x>. Acesso em 10 jun. 2024.

Paschoal, A. M. O. et al. **Use of Atlantic Forest protected areas by free-ranging dogs: estimating abundance and persistence of use.** Ecosphere, v. 7, p. 1–15, 2016. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002794932>. Acesso em 02 jul. 2024.

Patin, J. et al. **Effect of land use on interrill erosion in a montane catchment of Northern Laos: an analysis based on a pluri-annual runoff and soil loss database.** Journal of Hydrology, v. 563, p. 480–494, 2018. Disponível em: <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010073765>. Acesso em 27 fev. 2024.

Paula, F. R. de et al. **Multi-scale assessment of forest cover in an agricultural landscape of Southeastern Brazil: Implications for management and conservation of stream habitat and water quality.** Ecological Indicators, v. 85, p. 1181–1191, 2018. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002969562>. Acesso em 18 mar. 2024.

Paolino, R. M. et al. **Importância dos corredores de mata ciliar para a jagatirica em paisagens agrícolas.** Jornal de Mammalogia, v. 99, n. 4, p. 874–884, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyy075>. Acesso em 22 abr. 2024.

Perring, M. P.; Erickson, T. E.; Brancalion, P. H. S. **Rocketing restoration: enabling the upscaling of ecological restoration in the Anthropocene.** Restoration Ecology, v. 26, n. 6, p. 1017–1023, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/rec.12871>. Acesso em 12 jan. 2024.

Phua, M. H.; Minowa, M. **A GIS-based multi-criteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: A case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia.** Landscape and Urban Planning, v. 71, n. 2–4, p. 207–222, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.03.004>. Acesso em 30 jun. 2024.

Pysek, P. et al. **Contrasting patterns in the invasions of European terrestrial and freshwater habitats by alien plants, insects and vertebrates.** Global Ecology Biogeography, v. 19, p. 317–331, 2010. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1466-8238.2009.00514.x>. Acesso em 15 jan. 2024.

Randhir, T. O. et al. **A watershed-based land prioritization model for water supply protection.** Forest Ecology and Management, v. 143, n. 1-3, p. 47-56, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112700005041>. Acesso em 03 fev. 2024.

Reif, M. K.; Theel, H. J. **Remote sensing for restoration ecology: application for restoring degraded, damaged, transformed, or destroyed ecosystems.** Integr Environ Assess Manag, v. 13, n. 4, p. 614–630, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27627787/>. Acesso em 28 abr. 2024.

Rezende, C. L. et al. **From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest.** Perspectives in Ecology and Conservation, v. 16, n. 4, p. 208–214, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2530064418301317>. Acesso em 07 mar. 2024.

Rezzadori, T.; Hartmann, M. T.; Hartmann, P. A. **Proximidade de rodovias pode influenciar a fragmentação florestal? Um estudo de caso no norte do Rio Grande do Sul.** Biotemas, v. 29, n. 3, p. 21–33, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/biotemas/article/view/2175-7925.2016v29n3p21>. Acesso em 12 maio 2024.

Rodrigues-filho, J. et al. **Alterations in land uses based on amendments to the Brazilian Forest Law and their influences on water quality of a watershed.** Brazilian Journal of Biology, v. 75, n. 1, p. 125–134, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/bjb/a/T4nKsxGfk9ZYwkFqmYrs9dd/?lang=en>. Acesso em 17 jun. 2024.

Rudge, M. L. M. et al. **Developing landscape-scale forest restoration targets that embrace spatial pattern.** Landscape Ecology, v. 37, p. 1747–1760, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10980-022-01461-5>. Acesso em 24 jul. 2024.

Saaty, T. L. **Decision making for leaders.** Pittsburgh: WS. Publications, 2000.

Saaty, T.L. **The Analytic Hierarchy Process.** McGraw-Hill, New York, 1980.

Schilling, K. E.; Jacobson, P. **Effectiveness of natural riparian buffers to reduce subsurface nutrient losses to incised streams.** Catena, v. 114, p. 140–148, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.005>. Acesso em 21 fev. 2024.

Silva, V. A. et al. **Priority areas for forest conservation, aiming at the maintenance of water resources, through the multicriteria evaluation.** Revista Árvore, v. 41, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/TBNxHJnMvrhdjPnTpmwhKM/>. Acesso em 03 mar. 2024.

SOS Mata Atlântica **Observando os Rios. O Retrato da Qualidade da Água nas Bacias Hidrográficas da Mata Atlântica**. 2023. Disponível em: <https://cms.sosma.org.br/wp-content/uploads/2023/03/SOSMAObservando-os-Rios-2023.pdf>. Acesso em 15 jan. 2024.

SOS Mata Atlântica. **Observando rios: O retrato da qualidade da água nas bacias dos rios Paraopeba e Alto São Francisco um ano após o rompimento da barragem Córrego do Feijão – Minas Gerais**. Coord. Ribeiro, M. A. Janeiro, 2020. 28 p. Disponível em: <https://cms.sosma.org.br/wp-content/uploads/2020/01/observando-rios-brumadinho-2020digital.pdf>. Acesso em 07 mar. 2024.

Superintendência Regional de Meio Ambiente – Central Metropolitana (SUPRAM - CM). **Parecer Único Supram CM N.º 00037/1988/006/2010**. 2010. p. 1-38.

Sweeney, B.W.; Czapka, S.J. **Riparian forest restoration: why each site needs an ecological prescription**. For. Ecol. Manag., v. 192, p. 361–373, 2004. Disponível em: <https://stroudcenter.org/publications/riparian-forest-restoration-ecological-prescription/>. Acesso em 28 abr. 2024.

Tanaka, M. O. et al. **Influence of watershed land use and riparian characteristics on biological indicators of stream water quality in southeastern Brazil**. Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 216, p. 333–339, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.10.016>. Acesso em 12 jun. 2024.

Taniwaki, R. H. et al. **Impacts of converting low-intensity pastureland to high-intensity bioenergy cropland on the water quality of tropical streams in Brazil**. Science of the Total Environment, v. 584–585, p. 339–347, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.150>. Acesso em 03 jul. 2024.

Tobón, W. et al. **Restoration planning to guide Aichi targets in a megadiverse country**. Conservation Biology, v. 31, n. 5, p. 1086–1097, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/cobi.12918>. Acesso em 24 fev. 2024.

UNEP-WCMC, IUCN. **Protected planet: the world database on protected areas (WDPA)/the global database on protected areas management effectiveness (GD-PAME)**. UNEP-WCMC IUCN, Cambridge, UK, 2018. Disponível em: [www.protectedplanet.net](http://www.protectedplanet.net). Acesso em 17 de julho de 2024.

Vaezi, A. R. et al. **Interaction of land use, slope gradient and rain sequence on runoff and soil loss from weakly aggregated semi-arid soils**. Soil and Tillage Research, v. 172, p. 22–31, 2017. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017STiR.172...22V/abstract>. Acesso em 21 jun. 2024.



VALE S.A. **Vale entrega em definitivo nova adutora para captação de água à Prefeitura de Pará de Minas.** 2021. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-entrega-em-definitivo-nova-adutora-para-capta%C3%A7%C3%A3o-de-%C3%A1gua-%C3%A0-prefeitura-de-par%C3%A1-de-minas> . Acesso em 3 jul. 2024.

VALE S.A, **Balanço da Reparação.** P. 1 – 25. Belo Horizonte, dez. 2019a.

VALE S.A. **Vale atualiza sobre ações de reparação e assistência aos atingidos.** 2019b. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/vale-atualiza-sobre-a%C3%A7%C3%B5es-de-repara%C3%A7%C3%A3o-e-assist%C3%Aancia-aos-atingidos-1> . Acesso em 15 jun. 2024.

Valente, R.A., Mello, K., Metedieri, J.F., Americo, C. **A multicriteria evaluation approach to set forest restoration priorities based on water ecosystem services.** Journal of Environmental Management 285, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112049>. Acesso em 8 fev. 2024.

Valente, R. A., Petean, F. C. de S., & Vettorazzi, C. A. **Análise multicriterial para priorização de áreas à restauração florestal.** Cerne, 23(1), 53–60, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01047760201723012258>. Acesso em 29 jan. 2024.

Valente, R. de O. A., & Vettorazzi, C. A. **Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method.** Forest Ecology and Management, 256(6), 1408–1417, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.006>. Acesso em 12 mar. 2024.

Vellak, A., Tuvi, E.-L., Reier, Ü., Kalamees, R., Roosalu, E., Zobel, M. And Pärtel, M., **Past and Present Effectiveness of Protected Areas for Conservation of Naturally and Anthropogenically Rare Plant Species.** Conservation Biology, 23: 750-757, 2009. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32246081/>. Acesso em 1 ago. 2024.

Vergilio, C. S., Lacerda, D., Oliveira, B.C.V. Sartori, E., Campos, G. M., Pereira, A. L. S., Aguiar, D. B. De, Souza, T. S., Almeida, M. G, Thompson, F., Rezende, C. E. **Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil).** Scientific Reports. 10: 5936, 2020.

Vettorazzi, C. A., & Valente, R. A. **Priority areas for forest restoration aiming at the conservation of water resources.** Ecological Engineering, 94, 255–267, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.069>. Acesso em 23 mar. 2024.

Yalcin, A. **GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations.** Catena, v. 72, n. 1, p. 1–12, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816207000173>. Acesso em 28 jun. 2024.



Yang, H. et al. **Impact of land use changes on water quality in headwaters of the Three Gorges Reservoir**. Environmental Science and Pollution Research, v. 23, n. 12, p. 11448–11460, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-015-5922-4>. Acesso em 19 jun. 2024.

Zhang, Z., Sherman, R., Yang, Z., Wu, R., Wang, W., Yin, M., Yang, G., Ou, X. **Integrating a participatory process with a GIS-based multi-criteria decision analysis for protected area zoning in China**. Journal of Nat. Conserv. 21 (4), 225–240, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2012.12.006>. Acesso em 1 jun. 2024.

Zimbres, B., Peres, CA, & Machado, RB. **Respostas de mamíferos terrestres à estrutura e qualidade do habitat de matas ciliares remanescentes em uma paisagem pecuária amazônica**. Conservação Biológica, 206, 283–292, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.11.033>. Acesso em 1 ago. 2024.

## MATERIAL SUPLEMENTAR

Material Suplementar - S1

Tabela 1: Buffers de distância para as diferentes ordens de cursos d'água e suas respectivas notas

| Ordem do Curso D'Água | Distância (m) | Nota |
|-----------------------|---------------|------|
|-----------------------|---------------|------|

---

|   |     |    |
|---|-----|----|
| 1 | 30  | 10 |
| 1 | 100 | 9  |
| 1 | 200 | 8  |
| 2 | 30  | 10 |
| 2 | 100 | 8  |
| 2 | 200 | 7  |
| 3 | 30  | 10 |
| 3 | 100 | 7  |
| 3 | 200 | 6  |
| 4 | 30  | 10 |
| 4 | 100 | 6  |
| 4 | 200 | 5  |
| 5 | 50  | 10 |
| 5 | 100 | 5  |
| 5 | 200 | 4  |
| 6 | 50  | 10 |
| 6 | 100 | 4  |
| 6 | 200 | 3  |
| 7 | 100 | 10 |
| 7 | 200 | 3  |

---

## Material Suplementar – S2

Tabela 1: Matriz de comparação pareada e os pesos definidos para os fatores

| Matriz de<br>comparação pareada                                       | Áreas<br>próximas aos<br>córregos e<br>rios (cursos<br>d'água) | Áreas<br>próximas às<br>nascentes | Áreas<br>críticas<br>para o<br>balanço<br>hídrico | Áreas com<br>maiores<br>chances de<br>erosão | Áreas<br>próximas a<br>matas já<br>existentes | Áreas que estão<br>dentro e ao<br>entorno de áreas<br>protegidas por lei | Áreas que estão<br>mais distantes de<br>centros urbanos,<br>rodovias,<br>mineração | Áreas que<br>estão mais<br>distantes de<br>rodovias | PESOS |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|
| Áreas próximas aos<br>córregos e rios (cursos<br>d'água)              | 1                                                              | 1                                 | 1,43                                              | 1,62                                         | 2,03                                          | 2,42                                                                     | 2,17                                                                               | 2,17                                                | 0,19  |
| Áreas próximas às<br>nascentes                                        | 1                                                              | 1                                 | 1,43                                              | 1,62                                         | 2,03                                          | 2,42                                                                     | 2,17                                                                               | 2,17                                                | 0,19  |
| Áreas críticas para o<br>balanço hídrico                              | 0,7                                                            | 0,7                               | 1                                                 | 1,13                                         | 1,42                                          | 1,69                                                                     | 1,52                                                                               | 1,52                                                | 0,14  |
| Áreas com maiores<br>chances de erosão                                | 0,62                                                           | 0,62                              | 0,89                                              | 1                                            | 1,26                                          | 1,5                                                                      | 1,34                                                                               | 1,34                                                | 0,12  |
| Áreas próximas a matas<br>já existentes                               | 0,49                                                           | 0,49                              | 0,7                                               | 0,79                                         | 1                                             | 1,19                                                                     | 1,07                                                                               | 1,07                                                | 0,10  |
| Áreas que estão dentro<br>e ao entorno de áreas<br>protegidas por lei | 0,41                                                           | 0,41                              | 0,59                                              | 0,67                                         | 0,84                                          | 1                                                                        | 0,9                                                                                | 0,9                                                 | 0,08  |
| Áreas que estão mais<br>distantes de centros<br>urbanos e mineração   | 0,46                                                           | 0,46                              | 0,66                                              | 0,74                                         | 0,94                                          | 1,12                                                                     | 1                                                                                  | 1                                                   | 0,09  |
| Áreas que estão mais<br>distantes de rodovias                         | 0,46                                                           | 0,46                              | 0,66                                              | 0,74                                         | 0,94                                          | 1,12                                                                     | 1                                                                                  | 1                                                   | 0,09  |
| <b>TOTAL</b>                                                          | 4,2                                                            | 4,2                               | 6                                                 | 6,8                                          | 8,6                                           | 10,2                                                                     | 9,2                                                                                | 9,2                                                 | 1,00  |

## Material Suplementar – S3

Tabela 1: Distribuição de porcentagens de áreas classificadas como Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta prioridade para restauração florestal nos municípios da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

| Municípios             | Muito Baixa |       | Baixa    |       | Média    |       | Alta     |       | Muito Alta |       | Total     |
|------------------------|-------------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|------------|-------|-----------|
|                        | CA          | PLAND | CA       | PLAND | CA       | PLAND | CA       | PLAND | CA         | PLAND |           |
| BELO VALE              | 1461,08     | 5,59  | 3699,24  | 14,14 | 7914,43  | 30,26 | 9551,58  | 36,52 | 3530,05    | 13,50 | 26156,37  |
| BETIM                  | 943,29      | 6,14  | 1628,34  | 10,61 | 5586,68  | 36,39 | 5254,58  | 34,22 | 1941,30    | 12,64 | 15354,19  |
| BONFIM                 | 2248,47     | 9,29  | 2588,61  | 10,70 | 9284,90  | 38,36 | 7030,47  | 29,05 | 3049,31    | 12,60 | 24201,77  |
| BRUMADINHO             | 1731,42     | 5,39  | 3955,68  | 12,31 | 8728,97  | 27,17 | 11958,04 | 37,22 | 5750,04    | 17,90 | 32124,14  |
| CACHOEIRA DA PRATA     | 1020,65     | 30,02 | 333,52   | 9,81  | 1680,22  | 49,42 | 246,89   | 7,26  | 118,79     | 3,49  | 3400,07   |
| CAETANÓPOLIS           | 4099,50     | 32,01 | 2360,26  | 18,43 | 3824,51  | 29,86 | 1825,53  | 14,25 | 697,19     | 5,44  | 12806,99  |
| CASA GRANDE            | 1226,22     | 10,66 | 1233,45  | 10,72 | 4983,68  | 43,32 | 2888,03  | 25,10 | 1173,78    | 10,20 | 11505,16  |
| CONGONHAS              | 1117,02     | 9,89  | 1487,41  | 13,18 | 3903,23  | 34,58 | 3450,51  | 30,57 | 1330,60    | 11,79 | 11288,77  |
| CONSELHEIRO LAFAIETE   | 3003,96     | 12,97 | 2376,43  | 10,26 | 10034,51 | 43,33 | 5733,90  | 24,76 | 2010,96    | 8,68  | 23159,74  |
| CONTAGEM               | 59,96       | 1,50  | 479,38   | 12,03 | 800,28   | 20,08 | 1950,61  | 48,93 | 695,95     | 17,46 | 3986,19   |
| CRISTIANO OTONI        | 2284,20     | 22,51 | 948,43   | 9,35  | 5139,33  | 50,64 | 1234,57  | 12,16 | 542,54     | 5,35  | 10149,08  |
| CRCILÂNDIA             | 1443,66     | 10,10 | 1047,82  | 7,33  | 6551,41  | 45,83 | 3452,73  | 24,16 | 1798,33    | 12,58 | 14293,96  |
| CURVELO                | 38702,00    | 36,74 | 42449,03 | 40,30 | 15987,23 | 15,18 | 6976,13  | 6,62  | 1225,01    | 1,16  | 105339,40 |
| DESTERRO DE ENTRE RIOS | 1579,29     | 9,13  | 2979,90  | 17,23 | 5733,85  | 33,15 | 5355,15  | 30,96 | 1647,34    | 9,52  | 17295,52  |
| ENTRE RIOS DE MINAS    | 4152,95     | 12,09 | 4594,42  | 13,37 | 13453,77 | 39,16 | 9006,61  | 26,22 | 3147,08    | 9,16  | 34354,84  |
| ESMERALDAS             | 7029,52     | 14,27 | 4552,17  | 9,24  | 23831,75 | 48,39 | 9315,03  | 18,91 | 4522,97    | 9,18  | 49251,44  |
| FELIXLÂNDIA            | 6457,71     | 37,79 | 8479,18  | 49,62 | 1491,84  | 8,73  | 636,91   | 3,73  | 21,92      | 0,13  | 17087,56  |
| FLORESTAL              | 2078,98     | 18,30 | 854,19   | 7,52  | 5728,54  | 50,42 | 1851,38  | 16,30 | 847,59     | 7,46  | 11360,67  |
| FORTUNA DE MINAS       | 2182,69     | 16,69 | 2313,46  | 17,69 | 5323,24  | 40,69 | 2468,18  | 18,87 | 793,53     | 6,07  | 13081,11  |
| IBIRITÉ                | 73,41       | 2,41  | 155,13   | 5,08  | 655,83   | 21,49 | 900,51   | 29,50 | 1267,44    | 41,52 | 3052,32   |
| IGARAPÉ                | 218,91      | 3,67  | 1831,84  | 30,69 | 1265,83  | 21,21 | 2069,60  | 34,67 | 583,15     | 9,77  | 5969,33   |

|                      |                  |             |                  |             |                  |             |                  |             |                 |             |                  |
|----------------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|-----------------|-------------|------------------|
| INHAÚMA              | 7005,09          | 39,94       | 2227,13          | 12,70       | 5802,14          | 33,08       | 1865,54          | 10,64       | 638,08          | 3,64        | 17537,98         |
| ITATIAIUÇU           | 952,14           | 12,78       | 1539,64          | 20,66       | 2118,89          | 28,43       | 2159,03          | 28,97       | 683,41          | 9,17        | 7453,11          |
| ITAÚNA               | 172,78           | 4,96        | 447,19           | 12,83       | 1132,97          | 32,51       | 1280,21          | 36,73       | 452,21          | 12,97       | 3485,36          |
| ITAVERAVA            | 117,89           | 8,95        | 118,25           | 8,98        | 590,45           | 44,85       | 355,95           | 27,04       | 133,98          | 10,18       | 1316,52          |
| JECEABA              | 468,23           | 2,69        | 3402,86          | 19,58       | 3887,90          | 22,37       | 7274,98          | 41,86       | 2345,44         | 13,50       | 17379,41         |
| JUATUBA              | 1021,19          | 19,77       | 791,88           | 15,33       | 1982,76          | 38,39       | 946,79           | 18,33       | 422,10          | 8,17        | 5164,73          |
| LAGOA DOURADA        | 1446,50          | 6,37        | 3405,46          | 15,00       | 6458,47          | 28,45       | 8205,55          | 36,15       | 3181,36         | 14,02       | 22697,35         |
| MARAVILHAS           | 3675,76          | 26,59       | 3101,29          | 22,43       | 4258,13          | 30,80       | 2241,72          | 16,21       | 549,56          | 3,97        | 13826,47         |
| MÁRIO CAMPOS         | 48,79            | 3,00        | 232,98           | 14,33       | 341,47           | 21,00       | 647,88           | 39,84       | 355,17          | 21,84       | 1626,30          |
| MATEUS LEME          | 3408,10          | 19,57       | 2907,49          | 16,69       | 6720,22          | 38,59       | 3270,11          | 18,78       | 1110,11         | 6,37        | 17416,04         |
| MOEDA                | 312,67           | 3,27        | 1060,34          | 11,09       | 1849,40          | 19,34       | 4427,38          | 46,30       | 1912,25         | 20,00       | 9562,03          |
| OURO BRANCO          | 760,28           | 10,61       | 1263,39          | 17,63       | 1710,52          | 23,87       | 2354,57          | 32,86       | 1075,84         | 15,02       | 7164,61          |
| OURO PRETO           | 166,87           | 8,13        | 347,49           | 16,93       | 506,11           | 24,66       | 693,33           | 33,79       | 338,26          | 16,48       | 2052,06          |
| PAPAGAIOS            | 14917,92         | 39,88       | 12182,06         | 32,56       | 5752,14          | 15,38       | 3855,39          | 10,31       | 703,58          | 1,88        | 37411,07         |
| PARÁ DE MINAS        | 3629,88          | 30,59       | 826,72           | 6,97        | 5275,69          | 44,46       | 1393,11          | 11,74       | 739,94          | 6,24        | 11865,34         |
| PARAOPEBA            | 14993,48         | 34,11       | 13397,68         | 30,48       | 9148,62          | 20,81       | 5072,23          | 11,54       | 1343,86         | 3,06        | 43955,87         |
| PEQUI                | 5275,92          | 35,28       | 1674,44          | 11,20       | 6594,45          | 44,10       | 1094,76          | 7,32        | 315,02          | 2,11        | 14954,60         |
| PIEDADE DOS GERAIS   | 704,07           | 3,28        | 3204,52          | 14,94       | 4418,05          | 20,59       | 9376,75          | 43,71       | 3750,64         | 17,48       | 21454,04         |
| POMPÉU               | 15495,10         | 24,67       | 25416,76         | 40,47       | 9466,02          | 15,07       | 9745,89          | 15,52       | 2683,18         | 4,27        | 62806,95         |
| QUELUZITO            | 2689,74          | 24,70       | 2600,98          | 23,88       | 8002,26          | 73,48       | 6460,54          | 59,32       | 2027,20         | 18,61       | 21780,72         |
| RESENDE COSTA        | 33,27            | 0,35        | 1957,55          | 20,51       | 1128,51          | 11,82       | 4690,05          | 49,14       | 1735,67         | 18,18       | 9545,05          |
| RIO MANSO            | 619,43           | 3,77        | 2254,26          | 13,73       | 4012,22          | 24,44       | 6328,88          | 38,55       | 3202,05         | 19,50       | 16416,84         |
| SÃO BRÁS DO SUAÇUI   | 1305,37          | 15,60       | 832,79           | 9,95        | 3583,43          | 42,82       | 1928,39          | 23,05       | 717,79          | 8,58        | 8367,76          |
| SÃO JOAQUIM DE BICAS | 378,84           | 10,76       | 508,27           | 14,44       | 1108,89          | 31,51       | 1132,75          | 32,18       | 390,96          | 11,11       | 3519,71          |
| SÃO JOSÉ DA VARGINHA | 5039,27          | 32,14       | 2158,18          | 13,77       | 6490,38          | 41,40       | 1528,59          | 9,75        | 460,59          | 2,94        | 15677,02         |
| SARZEDO              | 60,41            | 2,47        | 253,56           | 10,38       | 625,42           | 25,59       | 960,96           | 39,32       | 543,51          | 22,24       | 2443,85          |
| SETE LAGOAS          | 4223,21          | 36,62       | 1952,93          | 16,94       | 2853,13          | 24,74       | 1847,63          | 16,02       | 654,53          | 5,68        | 11531,43         |
| <b>Total Geral</b>   | <b>172255,76</b> | <b>0,20</b> | <b>180526,32</b> | <b>0,21</b> | <b>247774,73</b> | <b>0,29</b> | <b>184374,63</b> | <b>0,22</b> | <b>69214,71</b> | <b>0,08</b> | <b>854146,15</b> |

### **CAPÍTULO 3 – Restoration of Riparian Corridors for Functional Connectivity in the Landscape of the Paraopeba River Basin, Brazil**

Irla Paula Stopa Rodrigues<sup>a</sup> - Ph.D. Student of Postgraduate Program in Ecology, Conservation and Wildlife Management, Institute of Biological Sciences (ICB), Federal University of Minas Gerais (UFMG). Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627. Campus UFMG, Pampulha – Belo Horizonte, MG – CEP 31270-901 Brazil

Corresponding Author: irla.paula@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4989-1807>

Dayane Lopes Pinto<sup>b</sup> - Nenuca Institute for Sustainable Development (INSEA), Rua Salinas, 1088 – Bairro Floresta, Belo Horizonte/MG - CEP 31010-060 Brazil

e-mail: dayanelopesp@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2704-1315>

Ramon Neto Rodrigues<sup>c</sup> - Advisory Nucleus for Communities Affected by Dams (NACAB), Rua Bueno Brandão, 351 – Bairro Santa Tereza, Belo Horizonte/MG - CEP 31010-060 Brazil

e-mail: ramonrodrigues.atir3@nacab.org.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0485-9616>

Marcelo Alvares Tenenwurcel<sup>c</sup> - Advisory Nucleus for Communities Affected by Dams (NACAB), Rua Bueno Brandão, 351 – Bairro Santa Tereza, Belo Horizonte/MG - CEP 31010-060 Brazil

e-mail: m-alvares@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-6152-9958>

Maria Auxiliadora Drumond<sup>d</sup> – Department of Genetics, Ecology and Evolution. Institute of Biological Sciences (ICB), Federal University of Minas Gerais (UFMG), Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627. Campus UFMG, Pampulha – Belo Horizonte, MG – CEP 31270-901 Brasil

e-mail: alatus@ufmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0677-6673>

### **ABSTRACT**

Fragmentation is one of the leading causes of significant impacts on landscapes and ecosystems, threatening biodiversity worldwide. It causes isolation of patches, habitat loss, reduced species permeability in the landscape, and extinction risk. Ecological corridors have proven to be an important strategy to minimize the effects of fragmentation by creating links between patches of pre-existing habitats. In this study, we quantified functional connectivity and evaluated how it responds to different scenarios of increased forest vegetation in Permanent Preservation Areas in the Paraopeba River basin, Minas Gerais, Brazil, heavily affected by the 2019 dam collapse. Our hypothesis is that increasing fragments in riparian corridors would enhance functional connectivity in a gradient that would primarily benefit low dispersal capacity fauna species. We conducted ten simulations with scenarios of increased fragments. For each scenario, we calculated landscape metrics and functional connectivity indices (Number of Components, Number of Links, Integral Connectivity Index, Connectivity Probability) for seven dispersal distances (100, 250, 500, 1.000, 2.500, 5.000, and 10.000 meters). Our results showed that initial scenarios benefited species with higher dispersal capacity. As more fragments were added, the integral connectivity index percentage increased for species with lower dispersal capacity. Fragment size, density, and shape influenced

functional connectivity differently across the analysed dispersal scales. Connectivity indices increased with the addition of forest fragments across all dispersal capacities. Connectivity indices and landscape metrics indicated that landscape configuration supports certain dispersal capacities, which are more relevant for functional connectivity than landscape composition. Overall, riparian corridor restoration is an effective strategy to enhance landscape functional connectivity, regardless of species dispersal capacity. Therefore, developing coordinated conservation actions such as wider riparian corridors and the creation or expansion of protected areas will sustain biological flows and human population well-being.

Keywords: fragmentation, conservation, landscape ecology, forest fragment, connectivity indices

### 3.1 Introduction

Habitat fragmentation is one of the primary threats contributing to the global species extinction crisis, driven by human actions such as land use changes, urbanization, mining activities, and road construction (Coelho et al., 2020; Crooks et al., 2017; Hasan et al., 2019; Zhuo et al., 2022). In Brazil, the conversion of vegetated areas to other uses has led to a total reduction of 12% in forest cover from 1985 to 2018 (Silva Junior et al., 2020). Despite being one of the countries with the highest biodiversity on the planet (Mittermeier et al., 1997), Brazil follows the pattern seen in other tropical countries, where remaining vegetation is largely composed of small and isolated fragments scattered across landscapes dominated by human activities (Haddad et al., 2015). The Atlantic Forest, one of Brazil's biomes and a biodiversity hotspot (ICMBio, 2018; Mittermeier RA et al., 2002; Myers et al., 2000), contains approximately 83% of remaining fragments smaller than 50 hectares (Ribeiro et al., 2009).

Fragmentation processes reduce patch size, increasing the total number and isolate vegetation patches (Fahrig, 2003; Hordley et al., 2022), leading to severe landscape and ecosystem issues, threatening and diminishing biodiversity worldwide (Haddad et al., 2015; Liu et al., 2019). Fragments in anthropized landscapes face even greater environmental quality threats, as they are more heavily impacted by edge effects (Magnago et al., 2015).

For animal populations, reduced areas imply a decrease in their occurrence areas. Patch isolation reduces species permeability in the landscape, decreases gene flow, increases competition among species, genetic drift, and consequently, the risk of extinction for more specialized species with specific habitat requirements (Crooks et al., 2017; Haddad et al., 2015; Hernando et al., 2017; Niculae et al., 2016; Raman, 2006).

Connectivity and fragment size are relevant parameters for species persistence in fragmented landscapes (Crooks et al., 2001). Connectivity refers to the landscape's ability to facilitate natural flows (Tischendorf & Fahrig, 2000). Structurally, connectivity can be assessed through landscape patterns such as corridor density and complexity (Beier & Noss, 1998), distance between fragments, and matrix permeability among habitats (Antongiovanni & Metzger, 2005). Functional connectivity, however, is more complex as it depends not only on landscape pattern but also on its interaction with target species' characteristics (Uezu et al., 2005). It is interpreted as the landscape's capacity to facilitate or hinder the movement of individuals or populations (Hanski, 1998) between resource patches (Taylor et al., 1993). Thus, species dispersal capacity is a traditional approach to calculating functional connectivity (Hordley et al., 2022) and should incorporate parameters of organism movement patterns between patches (Auffret et al., 2015).

Given the severe biodiversity threats posed by anthropogenic actions altering landscapes and ecological processes (Coelho et al., 2020), there is an increasing need to invest in strategies that address fragmentation issues and enhance habitat availability (Crouzeilles et al., 2014).

Conserving and creating connections between habitat patches help mitigate the impacts of anthropogenic activities on natural systems (Zhuo et al., 2022). Various strategies have been developed to improve or protect connectivity, including prioritizing conservation areas, establishing protected areas, proposing ecological corridors, and restoring degraded areas (Crouzeilles et al., 2013; Hanson et al., 2016; Niculae et al., 2016; Rayfield et al., 2016; Reza et al., 2022; Rincón et al., 2021; Shanthala Devi et al., 2013; Volk et al., 2018).

Maintenance of riparian corridors is also an important landscape management strategy to enhance connectivity, given the relevance of these areas for wildlife conservation, especially birds and mammals (Hawes et al., 2008; Lees & Peres, 2008; Zimbres et al., 2008; Lees & Peres, 2008; Zimbres et al., 2017; Paolino et al., 2018). Brazilian legislation requires the maintenance of riparian vegetation remnants, known as Permanent Preservation Areas (APPs), to protect hydrological functions and biodiversity (Brazil, 2012). Despite legal protection, APPs are highly altered and fragmented, presenting a significant opportunity for restoration actions capable of enhancing landscape functional connectivity, biodiversity conservation, and strengthening law enforcement (Tambosi et al., 2014).



In recent years, Minas Gerais (MG), located in the southeastern region of Brazil, has experienced two environmental crimes involving the rupture of ore tailings dams, causing major socioeconomic and socio-environmental impacts. One of these incidents, attributed to the company VALE S.A., was the rupture of dams BI, B-IV, and B-IVA at the Córrego do Feijão Mine, occurring on January 25, 2019, in the municipality of Brumadinho. This event released 13 million cubic meters of iron ore tailings into the Ferro Carvão stream sub-basin (MPMG, 2019), part of the Paraopeba River basin (BHRP). A Judicial Agreement for Reparation of the damages was signed between VALE, the government of MG, and State and Federal Justice Institutions. This agreement established the Socio-environmental Reparation Program for the Paraopeba River Basin (PRSBHRP) as the official tool for repairing the socio-environmental impacts caused by the dam breach.

The loss of connectivity caused by mechanical dragging and burial of vegetation areas was diagnosed only in the vicinity of the tailing's deposition zone in the Ferro Carvão stream sub-basin. However, the PRSBHRP envisages forest restoration actions aimed at conservation and recovery of spring, restoration of groundwater recharge areas, and recovery or restoration of native vegetation cover across the entire Paraopeba River basin (ARCADIS, 2022).

The BHRP presents a landscape predominantly occupied by anthropogenic land uses, with a predominance of pastures and crops (ARCADIS, 2022, p.153). The implementation of these socio-environmental repair plans and programs must consider improving the environmental quality of the entire basin, carrying out repair actions that improve these areas to a better environmental condition than before the crime disaster. In this context, it becomes relevant to understand the importance of riparian corridors in landscape functional connectivity, focusing not only on the recovery of springs, groundwater recharge areas, or vegetation cover, but also on wildlife conservation. Thus, it is possible to direct efforts and optimize the resources of the plan by investing in the best restoration ss functional connectivity in a gradient that primarily benefits species with low dispersal capacity.

In this study, we quantified functional connectivity and evaluated how it is affected in different scenarios of increased vegetation in water protection areas (PPAs) in the Paraopeba River basin. Our hypothesis is that increasing forest fragments enhances functional connectivity in a gradient that primarily benefits species with low dispersal capacity.

## 3.2 Methods

### 3.2.1. Study Area

The BHRP is located in the central region of Minas Gerais (Figure 1) and covers an area of 12,054 km<sup>2</sup> (COBRAPE, 2020). It comprises 48 municipalities, out of which 26 were affected by the deposition of mining tailings in the Paraopeba River channel, resulting from the breach of dams BI, B-IV, and B-IVA at the Córrego do Feijão Mine. The Upper Paraopeba region is part of the Atlantic Forest biome. The Middle and Lower Paraopeba are in the transition zone between the Atlantic Forest and Cerrado biomes (COBRAPE, 2020), both considered biodiversity hotspots (ICMBio, 2018; Myers et al., 2000; Mittermeier RA et al., 2002).

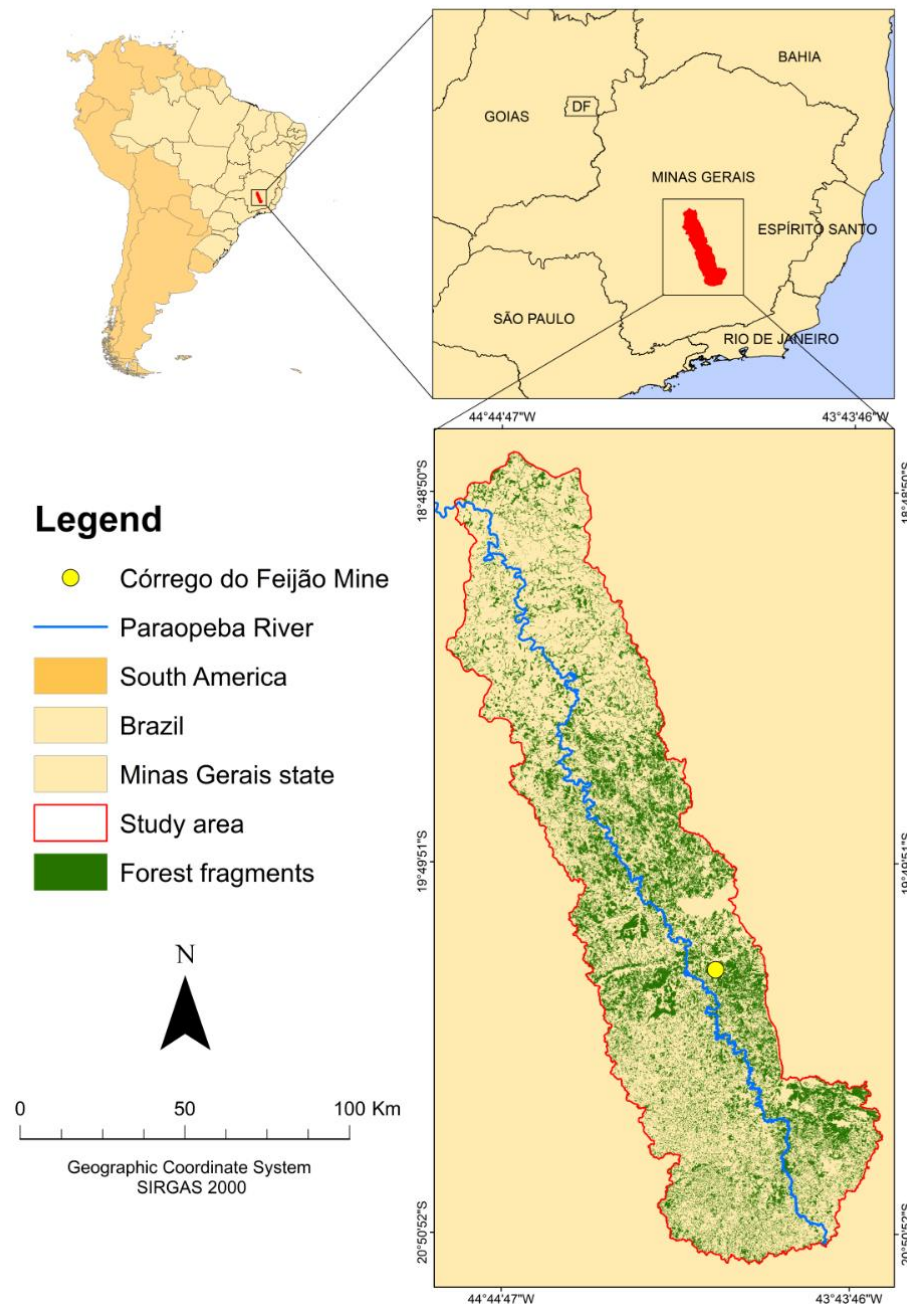


Figure 1. Study area, located in the Paraopeba River basin, state of Minas Gerais, Brazil. The green areas indicate the remaining forest fragments.

(Color support is necessary to identify map elements)

### 3.2.2. Landscape Structure Analysis

Landscape analysis, based on metrics, allows evaluating the structural and spatial state of remaining vegetation patches in a landscape. It constitutes a fundamental step in landscape management proposals at different scales. We analysed according to the following steps:

### 3.2.3. Spatial Database

We mapped forest fragment areas in the BHRP using Sentinel 2A optical satellite images, freely available on the Earth Explorer website (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). We georeferenced the images to the UTM (Universal Transverse Mercator) projection system, datum SIRGAS 2000, zone 23S. We acquired the spatial boundary of BHRP from the official MG spatial data platform (SISEMA, 2020) and used ArcGIS Pro software, version 2.8 (ESRI), for processing.

### 3.2.4. Classification of Forest Formations

Through Object-Based Image Analysis (OBIA), we delimited areas occupied by forest fragments. It is a supervised classification process widely used to categorize high-resolution satellite images (Ma et al., 2017; Wang et al., 2020). We collected samples following Mather (2004) to train the classification algorithm. We adopted six distinct land use and land cover classes: i) agriculture, ii) water, iii) herbaceous/shrub vegetation, iv) forestry, v) exposed soil/urban area, and vi) forest fragments. We selected 1,212 samples of forest fragments, excluding grassland and savanna formations from the Cerrado biome, to ensure better classification of PPAs. We excluded roads from mapping based on OpenStreetMap (OSM) data. Mapping was done at a scale of 1:20,000, with the smallest mapped area measuring 1 hectare.

We measured classification accuracy using a confusion matrix, assessing the following indices: user accuracy, producer accuracy, and Kappa index (Mastella et al., 2018; Macarringue et al., 2022). Data processing was conducted using ArcGIS Pro software, version 2.8 (ESRI).

### 3.2.5. Landscape Characterization

To characterize the landscape, we extracted forest fragment polygons from the land use and land cover map, removing areas smaller than 1 hectare. For landscape metrics analysis, we grouped the remaining fragments into the following size classes, following Santos et al. (2018): i) very small ( $C1 < 5$  ha), ii) small ( $5 < C2 < 20$  ha), iii) medium ( $20 < C3 < 100$  ha), and iv) large ( $C4 > 100$  ha). We calculated core area metrics for fragments within distances of 50 and 100 meters from the edge. Fragment analysis was performed using Fragstats 4.2 software

(McGarigal & Marks, 2012). Table 1 presents the selected metrics to quantify elements at the landscape class scale.

Table 1. Landscape metrics used to evaluate the structure of remaining forest fragments in the Paraopeba River Basin, Minas Gerais, Brazil.

| GROUP                   | METRIC                        | INITIALS (UNIT)          | DESCRIPTION                                                                                        |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Area</b>             | Class area                    | CA (ha)                  | Quantifies the area occupied by the class in the landscape.                                        |
| <b>Form</b>             | Mean Patch shape index        | SHAPE_MN (dim.)          | Measures the complexity of the fragments shape compared to a circle.                               |
| <b>Size and density</b> | Number of fragments           | NP (dim.)                | Characterizes and describes the configuration of the landscape.                                    |
|                         | Mean Patch Area               | AREA_MN (ha)             |                                                                                                    |
| <b>Core Area</b>        | Number of Disjunct Core Areas | NDCA (dim.)              | Measures the internal area of the fragments separated from the edge by a pre-established distance. |
|                         | Total Core Area               | TCA (ha)                 |                                                                                                    |
| <b>Edge</b>             | Total edge                    | TE (m)                   | Measures the total amount of fragment edges in the landscape.                                      |
|                         | Edge density                  | ED (m.ha <sup>-1</sup> ) |                                                                                                    |

### 3.2.6. Functional Landscape Connectivity

#### 3.2.6.1. Restoration Scenarios

The drainage network of MG available on the state spatial data platform (SISEMA, 2020) was used to generate and spatialize water Protection Areas (APPs) (rivers and springs). The beginnings of the tributaries, or 1st order channels, were considered as spring occurrence areas (Vivian et al., 2019). We defined APPs following Federal Law No. 12,651, of May 25, 2012 (Brazil, 2012): i) 50 meters around springs, ii) 30 meters for water bodies with a width less than 10 meters, iii) 100 meters for drainage channels between 50 and 200 meters. The areas of the APPs were simplified to reduce the number of vertices generated by the buffer tool. To verify their conservation status, we quantified forest cover in the APPs. Most urban centers were vectorized and used as a mask for the "Erase" tool to exclude APPs located in urban areas, which were not considered in this work.

Areas of APPs without forest fragments were considered "empty" and were divided into 10,000 equal parts. We randomly selected areas for restoration using the "Subset Features" tool. We proposed increments, starting with a scenario of 5%, followed by 5% increments up to a restoration scenario of 50% of the APPs, totaling ten analysis scenarios. ArcGIS Pro software, version 2.8 (ESRI), was responsible for data processing.

### 3.2.6.2. Quantifying Landscape Functional Connectivity

To assess the functional connectivity of forest fragments, we calculated: i) Probability Connectivity Index (PC), ii) Number of Connections (NL), iii) Number of Components (NC) (Saura and Pascual-Hortal, 2007), and iv) Integral Connectivity Index (IIC) (Pascual-Hortal & Saura, 2006). PC represents the probability of an individual moving between two randomly selected patches across the entire fragmented landscape, given an estimated dispersal distance (Saura and Pascual-Hortal, 2007). This index considers that the amount of habitat available to individuals depends on fragment attributes and functional connectivity (Crouzeilles et al., 2014).

Euclidean distance between fragments was used as a linking attribute, focusing on the effects of fragment number, size, and isolation (Crouzeilles et al., 2014). We considered only paths with a minimum probability of 0.05, avoiding the calculation of minimum connection probabilities and reducing processing time (Saura & Torné, 2009).

Functional connectivity can be assessed by a dataset representing a range of potential species dispersal distances, allowing results to make inference (de la Sancha et al., 2021). In this study, to evaluate how landscape functional connectivity varies according to dispersal capacity, we used mean distances, rounded numbers comparable to average dispersal distances found in the literature for bird and mammal species: 100, 250, 500, 1,000, 2,500, 5,000, and 10,000 meters (Supplementary Material S1). These distances represent 90% probabilistic direct dispersal capacity between two patches. As the objective of the study was solely to evaluate dispersal effects, other functional characteristics such as habitat specificity and minimum fragment size required for the species were not utilized.

We generated functional connectivity analyses for the Real Scenario and landscapes created by each incremented scenario, considering each of the seven dispersal distances,

totaling 77 analyses conducted using Conefor Sensing software version 2.6 (Saura & Torné, 2009).

For a better understanding of landscape configuration influence on landscape connectivity indices, we quantified, for all scenarios, different metrics at the landscape scale: i) Total Area of Forest Fragments, ii) Number of Fragments (NP), iii) Maximum Fragment Area, iv) Fragment Density (PD), v) Largest Patch Index (LPI), vi) Landscape Shape Index (LSI), vii) Mean Patch Area (AREA\_MN), and viii) Division Index (SPLIT). We calculated, with the assistance of Fragstats 4.2 software (McGarigal & Marks), the following core area metrics of fragments: i) Number of Disjunct Core Areas (NDCA), ii) Percentage of Landscape Core Area (CPLAND), and iii) Mean Core Area Index (CAI\_MN), with distances of 50 meters from the edge.

### **3.3 Results**

#### **3.3.1. Landscape Structure Analysis**

##### **3.3.1.1. Forest Formation Classification**

The confusion matrix showed a Kappa index of 87%, interpreted as excellent according to scientific literature (Landis & Koch, 1977). Accuracy indices performed well for the forest formation class, with 90% producer accuracy and 97% user accuracy.

##### **3.3.1.2. Landscape Characterization**

We identified 22,262 forest fragments, covering a total area of 308,686.02 hectares (25.61% of the total area). Figure 2 presents the distribution of forest fragments by size class.

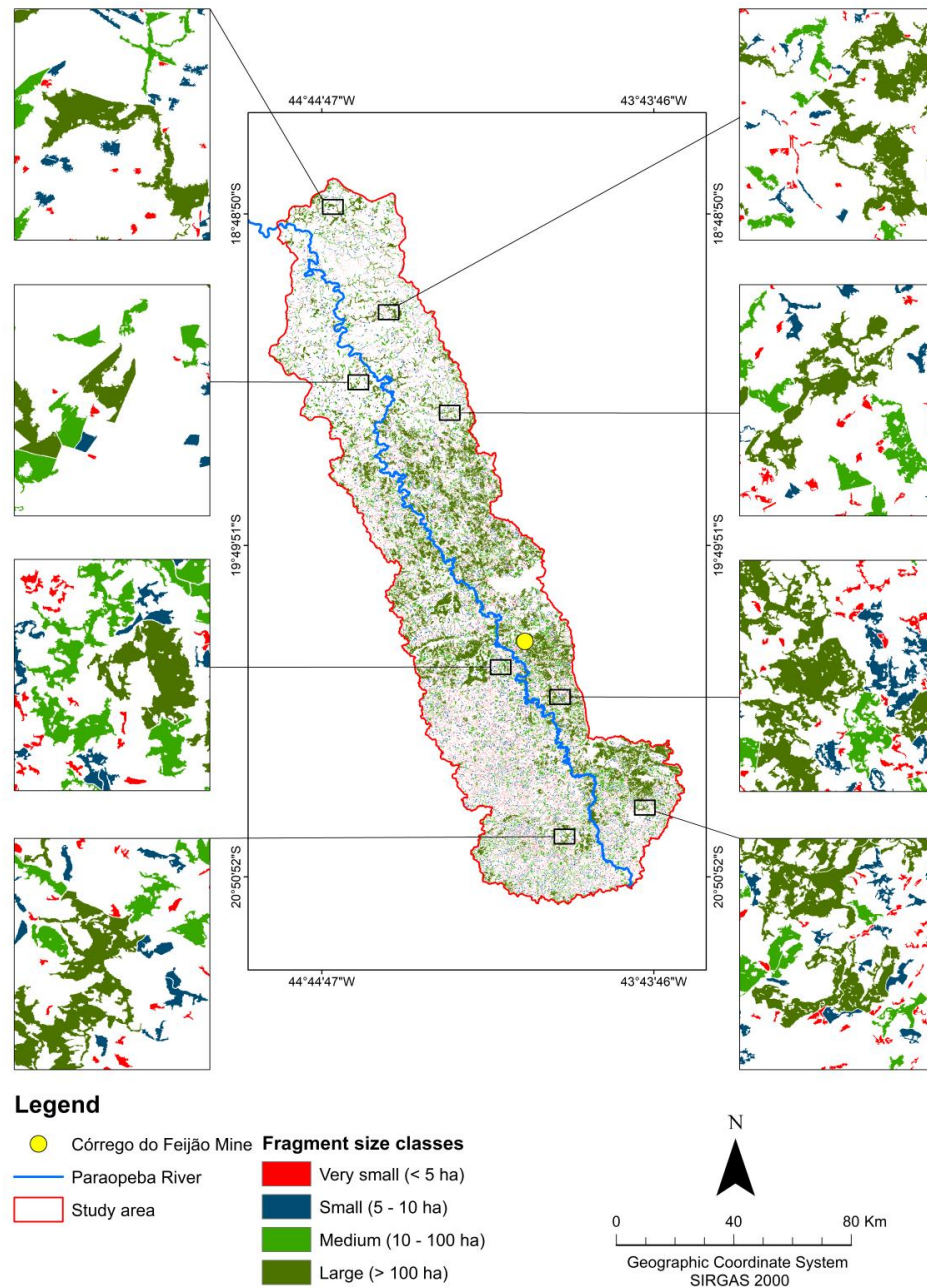


Figure 2 - Distribution of forest fragments in the Paraopeba River Basin, MG, Brazil, across different size classes.

Very Small Fragments ( $C1 < 5\text{ha}$ ) account for 64% of the total. Very Small and Small Fragments ( $5 < C2 < 20\text{ha}$ ) cover 87.4% of the forest cover in the basin. Only 3% of the fragments are Large ( $C4 > 100\text{ha}$ ), and due to their larger TE and ED, they are subject to greater edge effects (Table 2).



Table 2. Landscape ecology indexes calculated for the remaining forest fragments in the Paraopeba River watershed (BHRP), Minas Gerais, Brazil.

| Metric             | Unit               | Class sizes |             |              |             |
|--------------------|--------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
|                    |                    | C1 (<5ha)   | C2 (5-20ha) | C3(20-100ha) | C4 (>100ha) |
| <b>CA</b>          | ha                 | 31.279,22   | 48.745,24   | 80.104,30    | 148.557,41  |
| <b>SHAPE_MN</b>    | dim.               | 2.05        | 2,75        | 3,88         | 5,57        |
| <b>NP</b>          | dim.               | 14.282      | 5.182       | 2.069        | 729         |
| <b>AREA_MN</b>     | ha                 | 2.19        | 9.41        | 38,72        | 203,78      |
| <b>TE</b>          | m                  | 17541.620   | 17656.060   | 20473.260    | 26761.100   |
| <b>ED</b>          | m/ha <sup>-1</sup> | 56,83       | 57,20       | 66,32        | 86,69       |
| <b>NDCA (50m)</b>  | dim.               | 4.168       | 8.769       | 9.261        | 9.787       |
| <b>NDCA (100m)</b> | dim.               | 3           | 1.269       | 3.299        | 5.093       |
| <b>TCA (50m)</b>   | ha                 | 673,14      | 7367,63     | 25.157,61    | 69.051,31   |
| <b>TCA (100m)</b>  | ha                 | 0,05        | 610,73      | 7.149,49     | 30.797,7    |

CA = Total Class area; SHAPE\_MN = Mean Patch Shape Index; NP = Number of Fragments; AREA\_MN = Mean Patch Area; TE = Total Edge; ED = Edge Density; NDCA = Number of Disjunct Core Areas; TCA = Total Core Areas.

The Number of Disjunct Core Areas (NDCA) decreases as the edge distance increases, indicating that edges influence fragments and their complexity. Due to the tendency of fragments towards circularity, NDCA values tend to be lower. Total Core Area (TCA) values follow NDCA, with lower values for smaller classes, decreasing with increased edge distance. The total core area for class C1 was very low (0.05 ha) when considering an edge distance of 100 meters, which reduces NDCA (Table 2).

### 3.3.2. Functional Landscape Connectivity

#### 3.3.2.1. Fragment Increment and Connectivity Analysis

Water Protection Areas (APPs) cover 12.33% of the basin area, with 46% (58,715.7 ha) of these areas covered in forest vegetation. The remaining 67,839.7 ha of APPs (54%) are empty areas and were available for forest formation increments in the evaluated scenarios.

Compared to the real scenario, in the 10% Increment Scenario there is an increase in the number of isolated fragments, confirmed by the increase in NP and PD. However, in the 40% Scenario, the increment increases the area of pre-existing fragments. Figures 3 and 4 illustrate the difference in landscape composition between the Real Scenario and the 10% and 40% Scenarios, respectively.

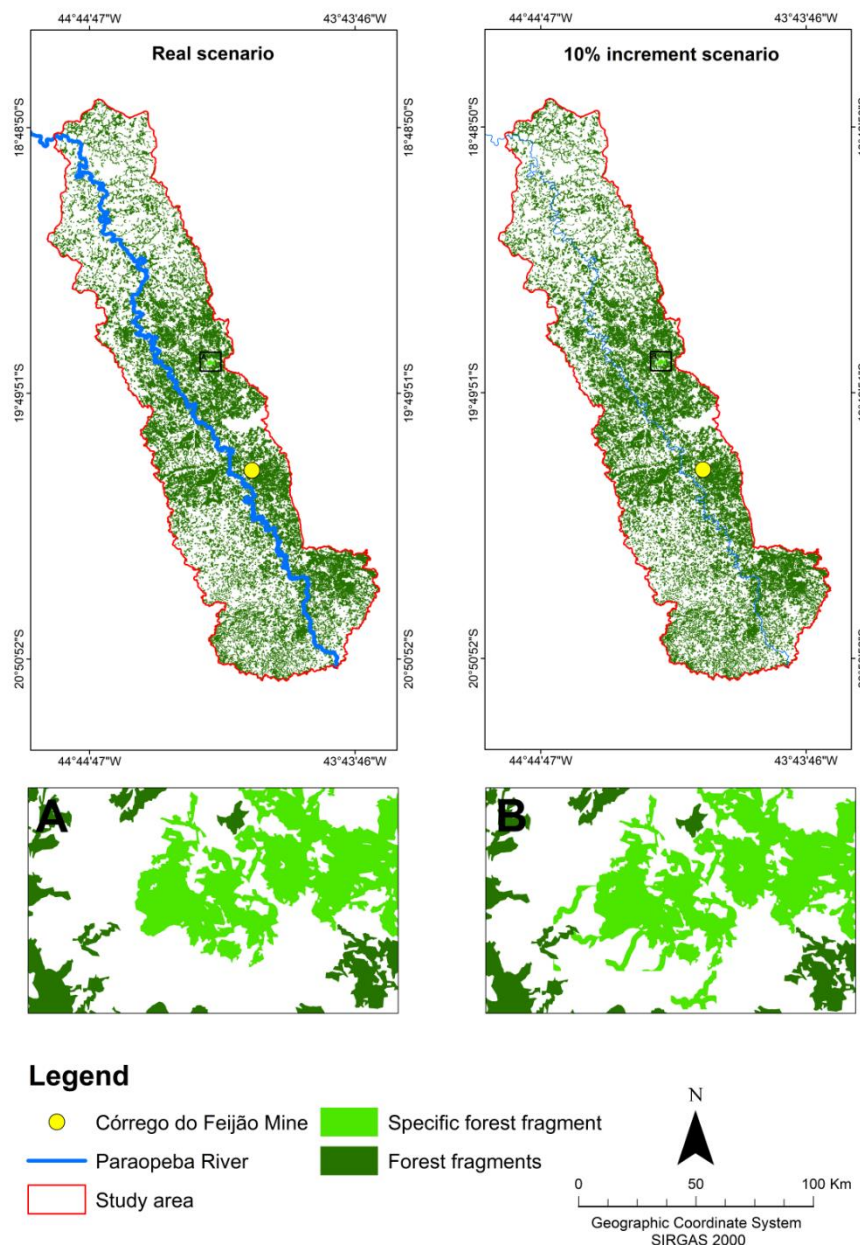


Figure 3 - Difference between the Real Scenario and the 10% increment Scenario.

(Color support is necessary to identify the elements of the map)

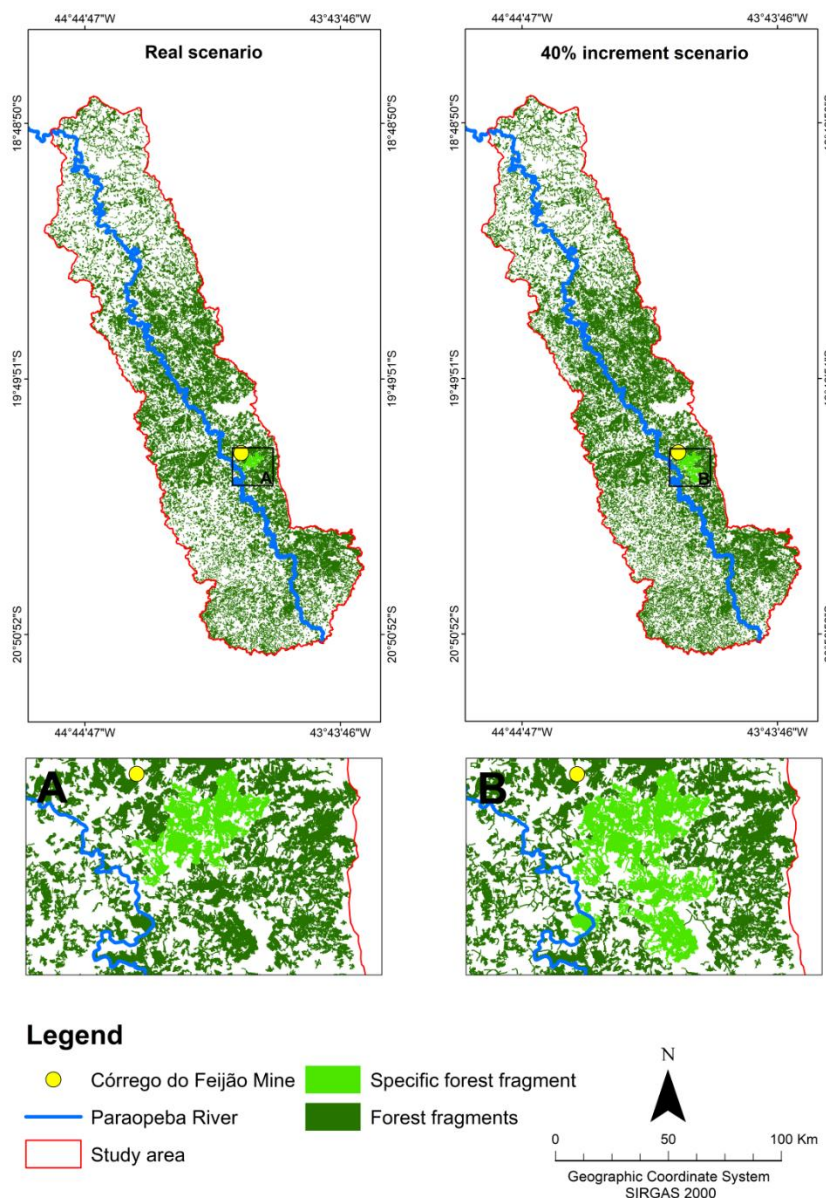


Figura 4 – Difference between the Real Scenario and the 40% increment Scenario.

(Color support is necessary to identify the elements of the map)

Table 3 presents the number of restored areas per Scenario, the total area, total number of fragments, maximum fragment area, and edge metrics. In the first restoration scenario, NP increases, with peaks occurring in the 30%, 25%, and 50% scenarios. PD initially increases in the early scenarios but decreases from the 15% scenario onwards, with the lowest values at 45% and 50% increments. The largest mapped fragment in the Real Scenario has an area of 2,530.89 ha, after restoration simulations. The 40% Scenario presented a fragment with an area of 4,962.95 ha.

Regarding edge metrics, as more forest fragments increase, CPLAND and CAI\_MN decrease, and NDCA increases, indicating a reduction in core area and an increase in edge area.

Table 3. Landscape ecology metrics calculated by increment scenarios in the Paraopeba River watershed (BHRP), Minas Gerais, Brazil.

| Cenário     | AR    | AT        | AR-AC    | NP      | MAX<br>AREA | PD   | Edges with 50 m distances |        |          |
|-------------|-------|-----------|----------|---------|-------------|------|---------------------------|--------|----------|
|             |       |           |          |         |             |      | COPLAND                   | CAI_MN | NDCA     |
| <b>Real</b> | 0     | 279490,60 | 0,00     | 7501,00 | 2530,89     | 2,91 | 37,04                     | 17,84  | 28143,00 |
| <b>5%</b>   | 500   | 281937,17 | 2.446,57 | 7553,00 | 3.036,64    | 2,91 | 36,76                     | 17h37  | 28261,00 |
| <b>10%</b>  | 1000  | 284417,83 | 4927,23  | 7640,00 | 2544,02     | 2,93 | 36,48                     | 16,86  | 28405,00 |
| <b>15%</b>  | 1500  | 287114,31 | 7623,71  | 7621,00 | 2594,12     | 2,90 | 36,18                     | 16,52  | 28589,00 |
| <b>20%</b>  | 2000  | 289850,82 | 10360,22 | 7655,00 | 2678,08     | 2,89 | 35,88                     | 16,12  | 28643,00 |
| <b>25%</b>  | 2500  | 292551,56 | 13060,96 | 7690,00 | 3026,26     | 2,89 | 35,59                     | 15,56  | 28761,00 |
| <b>30%</b>  | 3.000 | 295483,12 | 15992,52 | 7696,00 | 4301,16     | 2,87 | 35h30                     | 15h25  | 28932,00 |
| <b>35%</b>  | 3500  | 298303,48 | 18812,88 | 7607,00 | 4584,42     | 2,83 | 35h00                     | 14,85  | 29061,00 |
| <b>40%</b>  | 4000  | 301415,98 | 21925,38 | 7582,00 | 4962,95     | 2,79 | 34,72                     | 14h60  | 29103,00 |
| <b>45%</b>  | 4500  | 302270,30 | 22779,70 | 7598,00 | 4100,32     | 2,77 | 34,62                     | 14,54  | 29167,00 |
| <b>50%</b>  | 5.000 | 305049,99 | 25559,39 | 7670,00 | 3812,45     | 2,77 | 34,34                     | 14,27  | 29294,00 |

AR = Number of Restored Areas; AT = Fragments Total Area; AR-AC = Difference between Real Scenario Total Area and the area of Other Scenarios; NP = Number of Fragments; ÁREA MAX = Maximum area of fragments; PD = Fragments Density; Edge metrics (50 meters distance): CPLAND = Core Area Percentage of the Landscape; CAI\_MN = Core Area index; NDCA = Number of Disjunct Core Areas.

Table 4 presents the values of the calculated indices for the landscapes of each scenario. According to the results, the increase in forest fragments in the landscape coincides with an increase in the Landscape Shape Index (LSI). This index measures the geometric complexity of the landscape. The Average Patch Area (AREA\_MN) of the fragments also increases with the increments; however, it is only in the 40% Scenario that a patch covering 2.14% of the landscape appears, as indicated by the Largest Patch Index (LPI). The 40% Scenario also stands out for having the lowest value of the Division Index (SPLIT), indicating a less fragmented landscape.

Table 4. Landscape indexes calculated by increment scenarios in the Paraopeba River Watershed (BHRP), Minas Gerais, Brazil.

| Scenarios   | LPI (%) | LSI    | AREA_MN (ha) | SPLIT  |
|-------------|---------|--------|--------------|--------|
| <b>Real</b> | 1.17    | 298,59 | 34.40        | 709,72 |
| <b>5%</b>   | 1,37    | 301,75 | 34,38        | 661,46 |
| <b>10%</b>  | 1,15    | 305.11 | 34.16        | 653,26 |
| <b>15%</b>  | 1.18    | 308.41 | 34,49        | 665,44 |
| <b>20%</b>  | 1.16    | 311,95 | 34,66        | 637,89 |
| <b>25%</b>  | 1.12    | 315,53 | 34,58        | 559,10 |
| <b>30%</b>  | 1,80    | 318,93 | 34,81        | 556,44 |
| <b>35%</b>  | 1,80    | 322,39 | 35,39        | 500,30 |
| <b>40%</b>  | 2.14    | 325,91 | 35,83        | 427.07 |
| <b>45%</b>  | 1,73    | 326,91 | 36.09        | 477,17 |
| <b>50%</b>  | 1.23    | 330,43 | 36.06        | 509,68 |

LPI = Largest Patch Index; LSI = Landscape Shape Index; AREA\_MN = Mean Patch Area; SPLIT = Splitting Index.

Figure 5 depicts the connectivity indices. The Number of Components (NC) increases for the dispersal distance of 100m in Scenarios 5% and 10% but decreases for the other scenarios. The 250m distance shows a reduction in NC in all scenarios except for 10%, where there is a slight increase in the number of components. The most significant reduction in NC occurs for animals with a dispersal distance of 1,000 meters (Figure 5A). The largest decrease in NC (372) can be observed at the 250m distance, decreasing from 1,247 in the Real Scenario to 875 in the 50% Scenario (Supplementary Material S2). For dispersal distances of 2,500m, 5,000m, and 10,000m, the number of components is 1 in the Real Scenario and remains the same for the others, indicating that species capable of dispersing over these distances in non-forested areas can reach all forest fragments in the study area. Tables with NC, Number of Connections (NL), Probability of Connectivity (PC), and Integral Connectivity Index (IIC) values are in Supplementary Material S2.

NL increased compared to the Real Scenario for all distances up to the 30% increment Scenario. The number of connections decreases for species with dispersal capacities of 1,000m, 2,500m, 5,000m, and 10,000m in the 35% Scenario and increases again after the 40% Scenario (Figure 5B). Compared to the Real Scenario, the highest percentage increase in NL was 12.34% for the 250m distance in the 50% Scenario, and the lowest was 0.62% for 100m in the 5% Scenario.

PC and IIC values increase with increased restored area for all seven dispersal distances compared to the Real Scenario. PC indices peaked in the 40% increment scenario for 100m, 250m, 500m, and 1,000m distances (Figure 5C). For IIC, the highest increase appeared at 100m and 250m, increasing by over 100% connectivity in scenarios ranging from 35% to 50% (Figure 5D). The 250m distance increased by 173.55% in IIC when comparing the 50% Scenario to the Real Scenario.

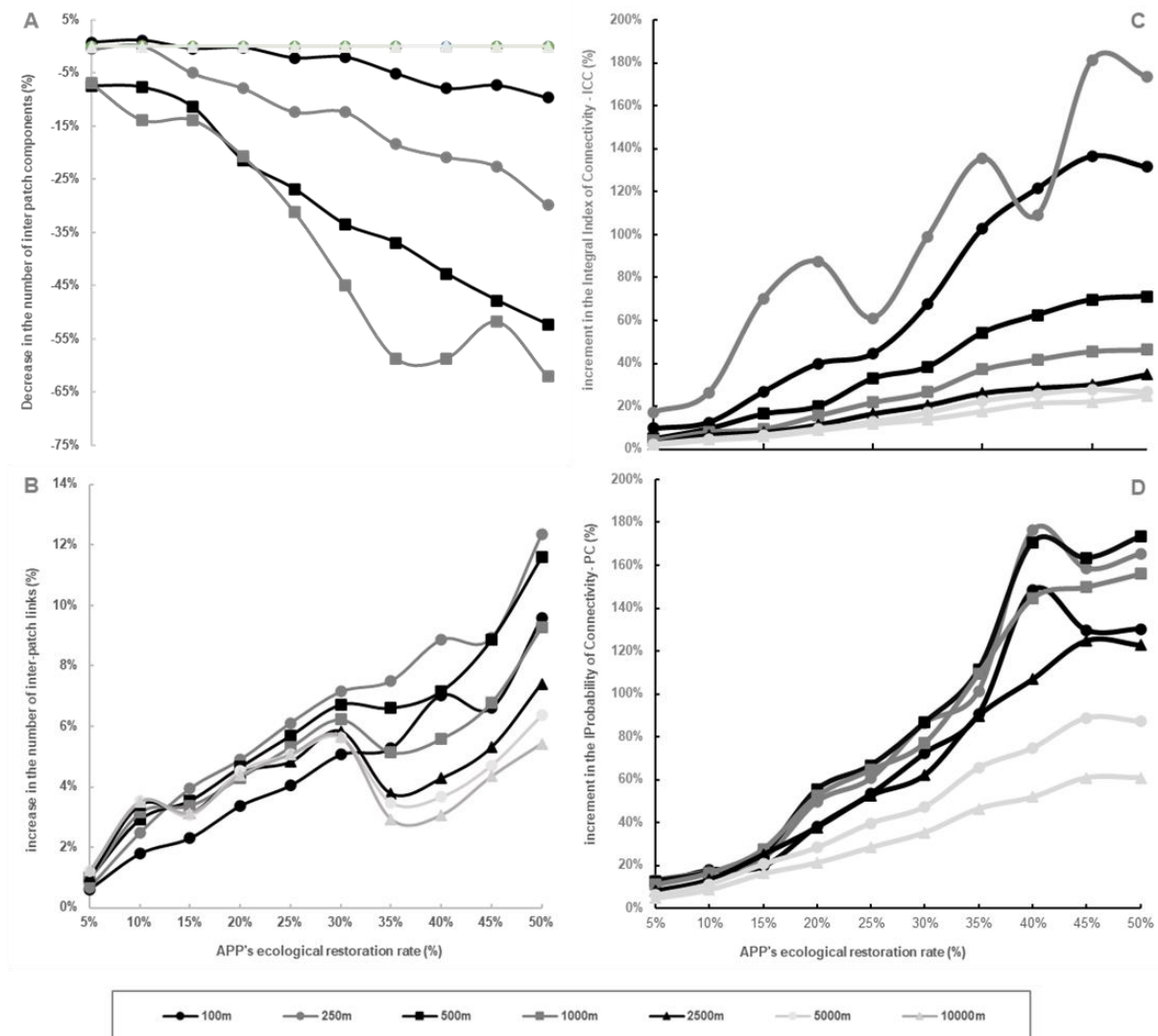


Figure 5 – Connectivity Analysis: A) Number of Components (NC); B) Number of Links (NL); C) Integral Index of Connectivity (IIC); D) Probability of Connectivity (PC).

### 3.4 Discussion

#### 3.4.1. Landscape Structure

Our results reveal a high degree of environmental degradation in the Paraopeba River Basin (PRB), with a forest cover of 25.5%, which is also observed in other Atlantic Forest and Cerrado areas (Zanella et al., 2012; Santos et al., 2018; MapBiomas, 2021). This proportion falls well below the minimum thresholds of 30% to 40% necessary for maintaining healthy populations, as suggested by Andrén (1994) and Metzger & D  camps (1997). The fact that 46% of the APPs show presence of native vegetation may indicate compliance with Brazilian legislation, which mandates the conservation of Permanent Preservation Areas (APPs) in their entirety. However, the expected outcomes for these areas, in terms of full and permanent preservation, are still far from being achieved. This reality underscores the urgent need for forest restoration throughout the entire basin.

The Paraopeba River Basin (PRB) is highly fragmented, characterized by numerous very small fragments and few large ones, which adversely affect biodiversity conservation (Moraes et al., 2015) and the maintenance of ecosystem services (Mitchell et al., 2015), since these fragments are under greater pressure from edge effects (Magnago et al., 2015). This heterogeneous landscape with small forest fragments contributes to population isolation and increased risk of extinction for threatened species (Ripperger et al., 2014; Haddad et al., 2015; Sousa et al., 2017).

The increasing complexity of fragments with their size suggests that although the BHRP still harbors large forest fragments, their irregular shape may compromise biodiversity conservation due to multiple negative effects of the anthropogenic matrix on these fragments (M  rcia, 1995; Peyras, 2013). For small fragments with virtually no central areas, their ability to sustain viable populations decreases. However, these areas can potentially serve as landscape connectors and refuge sites for species (Barbosa et al., 2017; Diniz et al., 2021).

#### 3.4.2. Riparian corridor restoration and landscape functional connectivity

##### 3.4.2.1. Number of links and number of components

According to NL, forest restoring up to 10% of the Riparian Permanent Preservation Areas (APPs) of the watershed will benefit species capable of movement equal to or greater

than 2,500 meters. This is because this scenario will create multiple isolated fragments in the landscape, inaccessible to species with lower dispersal capabilities. Conversely, NC data indicate that for species with movement capacities equal to or greater than 2,500m, the landscape was already functionally connected in a single component under the Real Scenario. For shorter dispersal distances, NC increases in the initial scenarios according to Landscape Patch Density (PD). Together, these results show that restored forest fragments in the initial hypothetical scenarios mainly act as stepping stones for species with high dispersal capacity but provide low dispersal function for species with movement less than 250 meters. Saura and Bodin (2013) indicate that stepping stones are particularly crucial for the spread of species or genotypes over long distances, and their area is crucial to ensure fragment utilization. Recent studies indicate that large mammals use riparian corridors more frequently than other landscape corridors, and the quality of these corridors directly influences species diversity (Zimbres et al., 2017).

Only in the hypothetical restoration scenario of 35%, the number of connections between fragments for species with dispersal capacities of 100 meters exceeds the gains in connections for species with distances greater than 2,500 meters. Therefore, we understand that restoration proposals exceeding 35% of degraded APPs will benefit more species with lower dispersal capacity (up to 250 meters) than individuals with greater dispersal capacity (between 2,500 and 10,000 meters).

Han et al. (2022), when evaluating the role of small fragment restoration in landscape connectivity, found that the most important parameter for species with low dispersal capacity is the number of possible existing connections. Pires et al. (2002), analyzing the movement frequency of small mammals, identified that in fragmented landscapes, it is common for most individuals to be restricted to few or even a single fragment throughout their lives, allowing the formation of connected local subpopulations by individuals occasionally moving between fragments, forming metapopulations in the landscape. For such small populations, a migration rate of one individual per generation would represent a sufficiently high genetic input to minimize the loss of genetic variability, thus reinforcing the importance of maintaining these fragments.

Based on the hypothetical restoration scenario of 15%, species with dispersal capacities between 250 and 1,000 meters achieve more significant gains in connectivity compared to species with greater dispersal capacity. Species with dispersal capacities close to 250 meters



benefit the most from the restoration of APPs, considering only the aggregated number of connections in this case. Empirical studies have already confirmed that riparian fragments facilitate permeability for small mammals, whether they are generalists or specialists, thereby increasing richness and abundance in highly fragmented environments (Machado et al., 2021; Paise et al., 2020).

Therefore, it is understood that the conservation and restoration of riparian corridors of BHRP are fundamental strategies to ensure landscape connectivity, with diverse benefits among organisms with different dispersal capacities, depending on the model and degree of restoration considered.

#### 3.4.2.2. Probability of connectivity and integral connectivity index

We also found that the Probability of Connectivity Index (PC) increases with the expansion of forest fragments, corroborating Crouzeilles et al. (2014), who report that habitat availability, quantified through this index, increases as native cover increases.

Restoration of Riparian Permanent Preservation Areas (APPs) of BHRP will promote increased functional connectivity for all analysed dispersal capacities. The forested strips of these riparian corridors, although not necessarily physically connected to other fragments, contribute to the movement of different species groups (Castellón & Siev, 2006; Pires et al., 2002). Species with lower dispersal capacity benefit the most from APP restoration, as they are more reliant on steppingstones.

Gains in Landscape Integral Connectivity (IIC) are more significant for species with a dispersal capacity of 250m compared to species with a dispersal capacity of 100m. For Probability of Connectivity (PC), species with dispersal distances between 250 and 1000m were more benefited than species with dispersal capacities less than 100m.

Despite the improvement in landscape functional connectivity due to preservation area restoration, the random insertion of forest fragments creates configurations where isolated fragments become inaccessible points in the landscape, especially for species with a dispersal capacity of 100m. Therefore, to ensure landscape connectivity improvement for species with low dispersal capacity, it is essential to strategically define the location of these areas to make the landscape permeable. Several recent studies have reinforced the importance of defining

priority areas for conservation (Albuquerque & Beier, 2015) and landscape recovery (Cruz et al., 2022; Cosimo et al., 2021), indicating the importance of connectivity indices as key variables for selecting the best areas to ensure gene flow between populations existing in the landscape (Avon & Bergès, 2016; Ayram et al., 2015).

The observed variations in the percentage increase of IIC for the 250-meter dispersal capacity indicate that landscape configuration had a greater influence on functional connectivity than the increase in restored area. Species with lower dispersal capacity are more strongly affected by landscape configuration compared to others, as limited dispersal reduces the likelihood of patch connection (Crouzeilles et al., 2014b). Recent studies suggest that landscape configuration is crucial for explaining landscape carnivorous species composition (Regolin et al., 2017), emphasizing the importance of site selection for areas to be restored for functional connectivity among organisms with lower dispersal capacity. Even with the potential for implementing connectivity networks, the characteristic structure of riparian forest remnants determines whether these areas effectively contribute to the functional connectivity of various species (Zimbres et al., 2017).

The percentage increase in PC shows an increase in landscape connectivity probabilities for the hypothetical scenario regarding a restoration of 40% of the BHRP's APPs. It is believed that the high PC values identified in this Scenario are related to random linkage between fragments, resulting in a large forest fragment of 4,962.95 hectares. As a result, this scenario identified the highest value for the Largest Patch Index (LPI) metric, indicating the proportionality between the largest fragment and the landscape as a whole, and the lowest value for the SPLIT metric among all analyzed scenarios. This result reinforces the importance of restoring forest fragment configuration to improve functional connectivity, especially for species with low dispersal capacity.

Therefore, promoting restoration in locations with high potential for creating corridors between landscape elements is essential for population maintenance. It is also understood that improving physical connections between isolated fragments would increase habitat availability and landscape permeability, ensuring an increase in species richness and abundance (Dixo et al., 2009; Magnago et al., 2013), even for those with low dispersibility (Crouzeilles et al., 2014b).

Other studies have also indicated the relevance of landscape configuration for functional connectivity, proposing the need to define priority areas for restoration and conservation to ensure the effectiveness of resource allocation and goal achievement. Santos et al. (2018) demonstrated that prioritizing large forest fragments (>100 hectares) in ecological corridor proposals is a good strategy, as these fragments are subject to smaller edge effects, with larger core areas essential for specialist species more sensitive to edge changes (Beca et al., 2017; Lyra-Jorge et al., 2010).

We observed a slight stabilization in connectivity rate increments due to APP restoration. Thus, beyond the restoration limit of 45% (approximately 22,779.7 hectares increased), landscape connectivity is not significantly expanded. This occurs because part of the fragments will already be functionally connected, especially for species with dispersal distances exceeding 500 meters.

Therefore, considering the intrinsic particularities of connectivity, landscape restoration must consider multiple strategies, in addition to restoring riparian corridors. Restoration should be integrated with other conservation strategies aimed at increasing high-quality environmental habitats capable of ensuring population maintenance and gene flow (Silva et al., 2018). The creation of protected areas, for example, is one of the main strategies for biodiversity conservation (Soulé, 2013; Mace, 2014), as well as social participation in environmental planning and management processes (Reed, 2008).

The random restoration of APPs makes the landscape more complex, leading to reduced average indices of core areas of fragments and consequently environmental quality. Thus, it is understood that although restoring riparian corridors increases landscape functional connectivity, the configuration produced by increases in riparian forest fragments, which are usually irregular, increases the edge effect within the fragment, which can alter how these forests are used by species and potentially have negative consequences for populations (Laurance & Yensen, 1991; Peyras et al., 2013), depending on the species' behavior type (Fuentes-Montemayor et al., 2009).

Some studies suggested that in the tropics, terrestrial species tend toward edge attraction behavior (Gomez et al., 2010; da Rosa et al., 2018), while arboreal species are more dependent on forest interior and exhibit edge avoidance behavior (Püttker et al., 2008). Other studies

indicated that predator densities and predation rates near edges vary and differ from species to species (Reis et al., 2017).

Thus, strategies recognizing that the irregularity of restored fragments may compromise their use by different species can contribute more effectively to the desired conservation goals. The need for creating wider corridors than those theoretically guaranteed by compliance with Brazilian legislation has been pointed out for snakes (Lima et al., 2011) and forest birds (Bueno et al., 2012). The bird communities studied by Bueno et al. (2012) require riparian corridors of at least 400 meters.

### **3.5 Conclusion**

A better understanding of the value of riparian corridors for landscape connectivity considering different groups with varying dispersal capacities, as examined in this study, can contribute to biodiversity conservation strategies.

The current version of the Socio-environmental Recovery Program for the Paraopeba River Basin does not yet detail how actions related to the conservation and restoration of springs and other water recharge areas will occur. This work highlighted, among other aspects, that randomly restoring and conserving riparian fragments in the basin can enhance functional connectivity. However, in addition to restoring riparian corridors, compensating for damages caused by dam breaches should involve combining different conservation strategies. Enlarging forest fragments throughout the basin, creating large central ecological corridors, and allocating resources to establish, expand, and manage protected areas are fundamental actions to improve environmental quality, conserve biodiversity, and maintain ecosystem services. These services, which depend on good water and soil quality, are essential for the well-being of society as a whole and particularly for human communities directly affected by socio-environmental disasters.

### **Acknowledgments**

The authors would like to thank the Federal University of Minas Gerais and Nacab for providing the necessary equipment for conducting this work. We also appreciate Wanderson Lamounier, our laboratory colleague, for sharing experiences, and Jef Cesar Campos Baetens for technical support. This study received financial support from the Coordination for the

Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq).

## REFERENCES

- Albuquerque, F., & Beier, P. (2015). Global patterns and environmental correlates of high-priority conservation areas for vertebrates. *Journal of Biogeography*, 42(8), 1397–1405. doi:10.1111/jbi.12498
- Albuquerque, F., & Beier, P. (2015). Global patterns and environmental correlates of high-priority conservation areas for vertebrates. *Journal of Biogeography*, 42(8), 1397–1405. doi:10.1111/jbi.12498
- Andrén H. (1994). Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. *Oikos*, 71:355-366. <http://dx.doi.org/10.2307/354582>.
- Antongiovanni, M., & Metzger, J. P. (2005). Influence of matrix habitats on the occurrence of insectivorous bird species in Amazonian forest fragments. *Biological Conservation*, 122(3), 441–451. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.09.005>
- Arcadis. Plano de reparação socioambiental da bacia do rio Paraopeba. Rompimento das barragens B1, B4 e B4-A do Complexo Paraopeba II – Mina Córrego do Feijão. 1034 p. 2022.
- Auffret, A. G., Plue, J., & Cousins, S. A. O. (2015). The spatial and temporal components of functional connectivity in fragmented landscapes. *Ambio*, 44(1), 51–59. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0588-6>
- Avon, C., & Bergès, L. (2016). Prioritization of habitat patches for landscape connectivity conservation differs between least-cost and resistance distances. *Landscape Ecology*, 31(7), 1551–1565. doi:10.1007/s10980-015-0336-8
- Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Etter, A., & Salicrup, D. R. P. (2015). Habitat connectivity in biodiversity conservation. *Progress in Physical Geography*, 40(1), 7–37. doi:10.1177/0309133315598713
- Barbosa, K. V. de C., Knogge, C., Develey, P. F., Jenkins, C. N., & Uezu, A. (2017). Use of small Atlantic Forest fragments by birds in Southeast Brazil. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(1), 42–46. doi:10.1016/j.pecon.2016.11.001
- Beca, G., Vancine, M. H., Carvalho, C. S., Pedrosa, F., Alves, R. S. C., Buscariol, D., ... Galetti, M. (2017). High mammal species turnover in forest patches immersed in biofuel plantations. *Biological Conservation*, 210, 352–359. doi:10.1016/j.biocon.2017.02.033
- Beier, P., & Noss, R. F. (1998). Do habitat corridors provide connectivity? In *Conservation Biology* (Vol. 12, Issue 6, pp. 1241–1252). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1998.98036.x>
- Brasil. LEI Nº 12.651, de 25 de maio de 2012 DE 2012. Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa.

Bueno, A.S., Bruno, R.S., Pimentel, T.P., Sanaiotti, T.M., Magnusson, W.E. (2012). The width of riparian habitats for understory birds in an Amazonian Forest. *Ecol. Appl.* 22, 722–734. <https://doi.org/10.1890/11-0789.1>.

Castellón, T. D., & Sieving, K. E. (2006). An experimental test of matrix permeability and corridor use by an endemic understory bird. *Conservation Biology*, 20(1), 135–145. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00332.x>

Coelho, A. J. P., Magnago, L. F. S., Matos, F. A. R., Mota, N. M., Diniz, É. S., & Meira-Neto, J. A. A. (2020). Effects of anthropogenic disturbances on biodiversity and biomass stock of Cerrado, the Brazilian savanna. *Biodiversity and Conservation*, 3151–3168.

Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos - COBRAPE. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba. São Paulo: Cobrape, 2020. 856 p.

Cosimo, L. H. E., Martins, S. V., & Gleriani, J. M. (2021). Suggesting priority areas in the buffer zone of Serra do Brigadeiro State Park for forest restoration compensatory to bauxite mining in Southeast Brazil. *Ecological Engineering*, 170, 106322.

Crooks, K. R., Suarez, A. v., Bolger, D. T., & Soulé, M. E. (2001). Extinction and Colonization of Birds on Habitat Islands. *Conservation Biology*, 15(1), 159–172. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2001.99379.x>

Crooks, K. R., Burdett, C. L., Theobald, D. M., King, S. R. B., di Marco, M., Rondinini, C., & Boitani, L. (2017). Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in terrestrial mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(29), 7635–7640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705769114>

Crouzeilles, R., Lorini, M. L., & Grelle, C. E. V. (2013). The importance of using sustainable use protected areas for functional connectivity. *Biological Conservation*, 159, 450–457. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.10.023>

Crouzeilles, R., Prevedello, J. A., Figueiredo, M. de S. L., Lorini, M. L., & Grelle, C. E. V. (2014). The effects of the number, size and isolation of patches along a gradient of native vegetation cover: How can we increment habitat availability? *Landscape Ecology*, 29(3), 479–489. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9978-6>

Cruz, D. C., Ferreira, G. C., Ribeiro, S. S., Schwartz, G., Monteiro, A. (2022). Priority areas for restoration in permanent preservation areas of rural properties in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*. 115: 106030. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106030>.

Da Rosa da, C. A., Secco, H., Carvalho, N., Maia, A. C., & Bager, A. (2017). Edge effects on small mammals: Differences between arboreal and ground-dwelling species living near roads in Brazilian fragmented landscapes. *Austral Ecology*, 43(1), 117–126. doi:10.1111/aec.12549

Diniz, M. F., Coelho, M. T. P., de Sousa, F. G., Hasui, É., & Loyola, R. (2021). The underestimated role of small fragments for carnivore dispersal in the Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(1), 81–89. doi:10.1016/j.pecon.2020.12.001

Dixo, M., Metzger, J. P., Morgante, J. S., & Zamudio, K. R. (2009). Habitat fragmentation reduces genetic diversity and connectivity among toad populations in the Brazilian Atlantic Coastal Forest. *Biological Conservation*, 142(8), 1560–1569. doi:10.1016/j.biocon.2008.11.016

Fahrig, L. (2003). Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. In *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* (Vol. 34, pp. 487–515). Annual Reviews Inc. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>

Fuentes-Montemayor, E., Cuarón, A. D., Vázquez-Domínguez, E., Benítez-Malvido, J., Valenzuela-Galván, D., & Andresen, E. (2009). Living on the edge: roads and edge effects on small mammal populations. *Journal of Animal Ecology*, 78(4), 857–865. doi:10.1111/j.1365-2656.2009.01551.x

Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., Lovejoy, T. E., Sexton, J. O., Austin, M. P., Collins, C. D., Cook, W. M., Damschen, E. I., Ewers, R. M., Foster, B. L., Jenkins, C. N., King, A. J., Laurance, W. F., Levey, D. J., Margules, C. R., ... Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>

Han, L., Wang, Z., Wei, M., Wang, M., Shi, H., Ruckstuhl, K., Yang, W., & Alves, J. (2022). Small patches play a critical role in the connectivity of the Western Tianshan landscape, Xinjiang, China. *Ecological Indicators*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109542>

Hanski, I. (1998). Metapopulation dynamics. In *NATURE* (Vol. 396). [www.nature.com](http://www.nature.com)

Hanson, D. A., Wolfson, A. W., Buckley, M. C., & Reimer, D. R. (2016). Incorporating landscape connectivity and uncertainty into ecosystem restoration scaling of environmental damage. *Environmental Impact III*, 1, 209–220. <https://doi.org/10.2495/eid160191>

Hasan, M.; Ullah, S.; Khan, M.J.; Khurshid, K. (2019). Comparative Analysis of SVM, ANN and CNN For Classifying Vegetation Species Using Hyperspectral Thermal Infrared Data. *Remote. Sens. Spat. Inf. Sci.*, XLII-2/W13, 1861–1868. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1861-2019>.

Hatfield, J. H., Harrison, M. L. K., & Banks-Leite, C. (2018). Functional Diversity Metrics: How They Are Affected by Landscape Change and How They Represent Ecosystem Functioning in the Tropics. *Current Landscape Ecology Reports*, 3(2), 35–42. doi:10.1007/s40823-018-0032-x

Hawes, J., Barlow, J., Gardner, T. A., & Peres, C. A. (2008). The value of forest strips for understorey birds in an Amazonian plantation landscape. *Biological Conservation*, 141(9), 2262–2278. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.06.017>

Hernando, A., Velázquez, J., Valbuena, R., Legrand, M., & García-Abril, A. (2017). Influence of the resolution of forest cover maps in evaluating fragmentation and connectivity to assess habitat conservation status. *Ecological Indicators*, 79, 295–302. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.031>

Hordley, L. A., Powney, G. D., Brereton, T., Gillings, S., Petchey, O. L., Roy, D. B., Tobias, J. A., Williams, J., & Oliver, T. H. (2022). Developing a national indicator of functional connectivity. *Ecological Indicators*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108610>

ICMBio. (2018). livro\_vermelho\_2018\_vol1. Livro Vermelho Da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção, 1, 1–495.

Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - IDE SISEMA. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2020. Disponível em: <idesisema.meioambiente.mg.gov.br>. Acesso em 19 nov. 2020

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data (Vol. 33, Issue 1). <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/2529310>

Lees, A. C., & Peres, C. A. (2008). Conservation value of remnant riparian forest corridors of varying quality for Amazonian birds and mammals. *Conservation Biology*, 22(2), 439–449. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00870.x>

Lima, A. P., Magnusson, W. E., de Fraga, R., Lima, A. P., & Magnusson, W. E. (2011). Mesoscale spatial ecology of a tropical snake assemblage: the width of riparian corridors in Central Amazonia. In *HERPETOLOGICAL JOURNAL* (Vol. 21). <http://ppbio.inpa.gov.br>

Liu, J., Coomes, D. A., Gibson, L., Hu, G., Liu, J., Luo, Y., Wu, C., & Yu, M. (2019). Forest fragmentation in China and its effect on biodiversity. *Biological Reviews*, 94(5), 1636–1657. <https://doi.org/10.1111/brev.12519>

Lyra-Jorge, M. C., Ribeiro, M. C., Ciocheti, G., Tambosi, L. R., & Pivello, V. R. (2009). Influence of multi-scale landscape structure on the occurrence of carnivorous mammals in a human-modified savanna, Brazil. *European Journal of Wildlife Research*, 56(3), 359–368. doi:10.1007/s10344-009-0324-x

Ma, L.; Li, M.; Ma, X.; Cheng, L.; Du, P.; Liu, Y. (2017). A review of supervised object-based land-cover image classification. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 130, 277–293. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.001>.

Macarringue, L.S.; Bolfe, E.; Pereira, P.R.M. (2022). Developments in land use and land cover classification techniques in remote sensing: A review. *J. Geogr. Inf. Syst.*, 14, 1–28. <https://doi.org/10.4236/jgis.2022.141001>.

Mace, G. M. (2014). Whose conservation? *Science*, 345(6204), 1558–1560. doi:10.1126/science.1254704

Machado, F. S., Moura, A. S., Mariano, R. F., Santos dos, R. M., Garcia, P. O., Oliveira, I. R. C., Fontes, M. A. L. (2021). Small mammals in high fragmented landscape in Cerrado/Atlantic Forest ecotone, Southeastern Brazil. *Iheringia, Sér. Zool.* 111 • 2021 • <https://doi.org/10.1590/1678-4766e2021022>

Magnago, L. F. S., Edwards, D. P., Edwards, F. A., Magrach, A., Martins, S. V., & Laurance, W. F. (2014). Functional attributes change but functional richness is unchanged after



fragmentation of Brazilian Atlantic forests. *Journal of Ecology*, 102(2), 475–485. doi:10.1111/1365-2745.12206

Magnago, L. F. S., Rocha, M. F., Meyer, L., Martins, S. V., & Meira-Neto, J. A. A. (2015). Microclimatic conditions at forest edges have significant impacts on vegetation structure in large Atlantic forest fragments. *Biodiversity and Conservation*, 24(9), 2305–2318. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0961-1>

MapBiomias (2021). Coleção 7.0 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Brasil. Acessado em 16/02/2023. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>

Mastella, A.F. and Vieira, C.A. (2018) Acurácia temática para classificação de imagens utilizando abordagens por pixel e por objetos. *Revista Brasileira de Cartografia*, 70, 1618-1643. <https://doi.org/10.14393/rbcv70n5-44559>.

Mather, P. M. (2004). Computer processing of remotely sensed images: An introduction. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons. 324p.

Mcgarigal, K.; SA Cushman, and E Ene. 2012. FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available in: <https://edisciplinas.usp.br/mod/folder/view.php?id=2917120>. Acesso em: 30.01.2023.

Metzger JP & Décamps H. (1997). The structural connectivity threshold: an hypothesis in conservation biology at the landscape scale. *Acta Ecologica*. 18:1-12. [http://dx.doi.org/10.1016/S1146-609X\(97\)80075-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1146-609X(97)80075-6)

Mitchell, M. G. E., Suarez-Castro, A. F., Martinez-Harms, M., Maron, M., McAlpine, C., Gaston, K. J., ... Rhodes, J. R. (2015). Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(4), 190–198. doi:10.1016/j.tree.2015.01.011

Mittermeier RA, Robles GP, Mittermeier CG (1997) Megadiversity: Earth's biologically wealthiest Nations. CEMEX and Agrupación Sierra Madre, 501 pp

Mittermeier R. A., Myers N, & Mittermeier C G. (2002). Hotspots: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions. *Journal of Mammalogy*, 83(2), 630–633. [https://doi.org/10.1644/1545-1542\(2002\)083<0630:>2.0.co;2](https://doi.org/10.1644/1545-1542(2002)083<0630:>2.0.co;2)

MPMG. (2019). AÇÃO CIVIL PÚBLICA. [http://portal.mpt.mp.br/wps/portal/portal\\_mpt/mpt/sala-imprensa/mpt-noticias/82ed3b0c-68a8-41ec-871b-](http://portal.mpt.mp.br/wps/portal/portal_mpt/mpt/sala-imprensa/mpt-noticias/82ed3b0c-68a8-41ec-871b-)

Myers, N., Mittermeier2, R. A., Mittermeier2, C. G., da Fonseca3, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. In *NATURE* | (Vol. 403). [www.nature.com](http://www.nature.com)

Niculae, M.-I., Nita, M. R., Vanau, G. O., & Patroescu, M. (2016). Evaluating the Functional Connectivity of Natura 2000 Forest Patch for Mammals in Romania. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.009>

Paise, G.; Vieira, E. M. & Prado, P. I. 2020. Small mammals respond to extreme habitat fragmentation in the Brazilian Atlantic Forest according to the landscape continuum model. *Mammal Research* 65:309-322.

Paolino, R. M., Royle, J. A., Versiani, N. F., Rodrigues, T. F., Pasqualotto, N., Krepschi, V. G., & Chiarello, A. G. (2018). Importance of riparian forest corridors for the ocelot in agricultural landscapes. *Journal of Mammalogy*, 99(4), 874–884. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyy075>

Pascual-Hortal, L., & Saura, S. (2006). Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: Towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 21(7), 959–967. <https://doi.org/10.1007/s10980-006-0013-z>

Peyras, M., Vespa, N. I., Bellocq, M. I., & Zurita, G. A. (2013). Quantifying edge effects: the role of habitat contrast and species specialization. *Journal of Insect Conservation*, 17(4), 807–820. doi:10.1007/s10841-013-9563-y

Pfeifer, M., Lefebvre, V., Peres, C. A., Banks-Leite, C., Wearn, O. R., Marsh, C. J., Butchart, S. H. M., Arroyo-Rodriguez, V., Barlow, J., Cerezo, A., Cisneros, L., D’Cruze, N., Faria, D., Hadley, A., Harris, S. M., Klingbeil, B. T., Kormann, U., Lens, L., Medina-Rangel, G. F., ... Ewers, R. M. (2017). Creation of forest edges has a global impact on forest vertebrates. *Nature*, 551(7679), 187–191. <https://doi.org/10.1038/nature24457>

Pires, A. S., Koeler Lira, P., Fernandez, F. A. ., Schittini, G. M., & Oliveira, L. C. (2002). Frequency of movements of small mammals among Atlantic Coastal Forest fragments in Brazil. *Biological Conservation*, 108(2), 229–237. doi:10.1016/s0006-3207(02)00109-x

Püttker, T., Meyer-Lucht, Y., & Sommer, S. (2007). Effects of fragmentation on parasite burden (nematodes) of generalist and specialist small mammal species in secondary forest fragments of the coastal Atlantic Forest, Brazil. *Ecological Research*, 23(1), 207–215. doi:10.1007/s11284-007-0366-z

Raman, T. R. S. (2006). Effects of habitat structure and adjacent habitats on birds in tropical rainforest fragments and shaded plantations in the Western Ghats, India. *Biodiversity and Conservation*, 15(4), 1577–1607. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-2352-5>

Rayfield, B., Pelletier, D., Dumitru, M., Cardille, J. A., & Gonzalez, A. (2016). Multipurpose habitat networks for short-range and long-range connectivity: A new method combining graph and circuit connectivity. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(2), 222–231. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12470>

Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. In *Biological Conservation* (Vol. 141, Issue 10, pp. 2417–2431). <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.07.014>

Regolin, A. L., Cherem, J. J., Graipel, M. E., Bogoni, J. A., Ribeiro, J. W., Vancine, M. H., ... Cáceres, N. C. (2017). Forest cover influences occurrence of mammalian carnivores within Brazilian Atlantic Forest. *Journal of Mammalogy*, 98(6), 1721–1731. doi:10.1093/jmammal/gyx103

Reza, M. I. H., Rafaai, N. H., & Abdullah, S. A. (2022). Application of graph-based indices to map and develop a connectivity importance index for large mammal conservation in a tropical region: A case study in Selangor State, Peninsular Malaysia. *Ecological Indicators*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109008>

Ribeiro, M. C., Metzger, J. P., Martensen, A. C., Ponzoni, F. J., & Hirota, M. M. (2009). The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, 142(6), 1141–1153. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021>

Rincón, V., Velázquez, J., Gutiérrez, J., Hernando, A., Khoroshev, A., Gómez, I., Herráez, F., Sánchez, B., Pablo Luque, J., García-abril, A., Santamaría, T., & Sánchez-Mata, D. (2021). Proposal of new Natura 2000 network boundaries in Spain based on the value of importance for biodiversity and connectivity analysis for its improvement. *Ecological Indicators*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108024>

Ripperger, S. P., Tschapka, M., Kalko, E. K. V., Rodríguez-Herrera, B., & Mayer, F. (2014). Resisting habitat fragmentation: High genetic connectivity among populations of the frugivorous bat *Carollia castanea* in an agricultural landscape. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 185, 9–15. doi:10.1016/j.agee.2013.12.006

Santos, J. S., Leite, C. C. C., Viana, J. C. C., dos Santos, A. R., Fernandes, M. M., de Souza Abreu, V., do Nascimento, T. P., dos Santos, L. S., de Moura Fernandes, M. R., da Silva, G. F., & de Mendonça, A. R. (2018). Delimitation of ecological corridors in the Brazilian Atlantic Forest. *Ecological Indicators*, 88, 414–424. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.011>

Saura, S., Pascual-Hortal, L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study, *Landscape and Urban Planning*, Volume 83, Issues 2–3, Pages 91–103, ISSN 0169-2046. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.005>

Saura, S., & Torné, J. (2009). Conefor Sensinode 2.2: A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling and Software*, 24(1), 135–139. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.05.005>

Saura, S., Bodin, Ö., & Fortin, M.-J. (2013). EDITOR’S CHOICE: Stepping stones are crucial for species’ long-distance dispersal and range expansion through habitat networks. *Journal of Applied Ecology*, 51(1), 171–182. doi:10.1111/1365-2664.12179

Silva Junior, C. H. L., Heinrich, V. H. A., Freire, A. T. G., Broggio, I. S., Rosan, T. M., Doblas, J., Anderson, L. O., Rousseau, G. X., Shimabukuro, Y. E., Silva, C. A., House, J. I., & Aragão, L. E. O. C. (2020). Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. *Scientific Data*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00600-4>

Silva, M.X, Paviolo, A., Tambosi, L. R., & Pardini, R. (2018). Effectiveness of Protected Areas for biodiversity conservation: Mammal occupancy patterns in the Iguaçu National Park, Brazil. *Journal for Nature Conservation*, 41, 51–62. doi:10.1016/j.jnc.2017.11.001

Soule, M. 2013. The “new conservation.” *Conservation Biology* 27:895– 897

Sousa, T. R., Costa, F. R. C., Bentos, T. V., Leal Filho, N., Mesquita, R. C. G., & Ribeiro, I. O. (2017). The effect of forest fragmentation on the soil seed bank of Central Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 393, 105–112. doi:10.1016/j.foreco.2017.03.020

Tambosi, L. R., Martensen, A. C., Ribeiro, M. C., & Metzger, J. P. (2014). A framework to optimize biodiversity restoration efforts based on habitat amount and landscape connectivity. *Restoration Ecology*, 22(2), 169–177. <https://doi.org/10.1111/rec.12049>

Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., & Merriam, G. (1993). Connectivity Is a Vital Element of Landscape Structure. *Oikos*, 68(3), 571–573. <https://doi.org/10.2307/3544927>

Tischendorf, L., & Fahrig, L. (2000). On the usage and measurement of landscape connectivity. In *Oikos* (Vol. 90, Issue 1, pp. 7–19). Blackwell Munksgaard. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.900102.x>

Uezu, A., Metzger, J. P., & Vielliard, J. M. E. (2005). Effects of structural and functional connectivity and patch size on the abundance of seven Atlantic Forest bird species. *Biological Conservation*, 123(4), 507–519. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.01.001>

Vivian, L. A. N., Prestes, M. M. B., Richter, M., Costa, E. S., Lara, D. M. (2019). Análise ambiental de nascentes no perímetro urbano de Soledade (Rio Grande do Sul, Brasil). *Revista Eletrônica Científica da UERGS*, 5(3), 302-310. <https://doi.org/10.21674/2448-0479.53.302-310>.

Volk, X. K., Gattringer, J. P., Otte, A., & Harvolk-Schöning, S. (2018). Connectivity analysis as a tool for assessing restoration success. *Landscape Ecology*, 33(3), 371–387. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0611-6>

Wang, J.; Zheng, Y.; Wang, M.; Shen, Q.; Huang, J. (2020). Object-Scale Adaptive Convolutional Neural Networks for High-Spatial Resolution Remote Sensing Image Classification. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 14, 283–299

Zanella, L., Borém, R.A.T, Souza, C. G., Alves, H. M. R., Borém, F. M. (2012). Atlantic Forest Fragmentation Analysis and Landscape Restoration Management Scenarios. *Natureza & Conservação* 10(1):57-63, July 2012.

Zhuo, Y., Xu, W., Wang, M., Chen, C., da Silva, A. A., Yang, W., Ruckstuhl, K. E., & Alves, J. (2022). The effect of mining and road development on habitat fragmentation and connectivity of khulan (*Equus hemionus*) in Northwestern China. *Biological Conservation*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109770>

Zimbres, B., Peres, C. A., & Machado, R. B. (2017). Terrestrial mammal responses to habitat structure and quality of remnant riparian forests in an Amazonian cattle-ranching landscape. *Biological Conservation*, 206, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.11.033>

## SUPPLEMENTARY MATERIAL

Table S1: Dispersal distances values for birds and mammals

| Species                          | Dispersal distance (m) | References                             |
|----------------------------------|------------------------|----------------------------------------|
| <i>Arremon flavirostris</i>      | 650                    | Marini (2010)                          |
| <i>Basileuterus culicivorus</i>  | 54                     | Awade and Metzger (2008)               |
| <i>Basileuterus flaveolus</i>    | 150                    | Duca and Marini (2005); Marini (2010)  |
| <i>Basileuterus hypoleucus</i>   | 150                    | Marini (2010)                          |
| <i>Chiroxiphia caudata</i>       | 650                    | Hansbauer et al. (2008); Marini (2010) |
| <i>Cnemotriccus fuscatus</i>     | 100                    | Marini (2010)                          |
| <i>Dryocopus lineatus</i>        | 425                    | Lees and Peres (2009)                  |
| <i>Dysithamnus mentalis</i>      | 650                    | Duca et al. (2006); Marini (2010)      |
| <i>Euglossa cordata</i>          | 1340                   | Tonhasca Jr et al. (2003)              |
| <i>Euglossa sapphirina</i>       | 1340                   | Tonhasca Jr et al. (2003)              |
| <i>Ilicura militaris</i>         | 150                    | Marini (2010)                          |
| <i>Lathrotriccus eulerei</i>     | 650                    | Marini (2010)                          |
| <i>Leptopogon amaurocephalus</i> | 200                    | Marini (2010)                          |
| <i>Mionectes rufiventris</i>     | 150                    | Marini (2010)                          |
| <i>Phaethornis ruber</i>         | 425                    | Lees and Peres (2009)                  |
| <i>Sittasomus griseicapillus</i> | 200                    | Johnson et al. (2011); Marini (2010)   |
| <i>Pantera onça</i>              | 7000–15400 m/ dia      | Adaptado de Sancha et al. (2021)       |
| <i>Leopardo pardalis</i>         | 4000                   | Adaptado de Sancha et al. (2021)       |
| <i>Artibeu fimbriado</i>         | 3700                   | Adaptado de Sancha et al. (2021)       |
| <i>Artibeu lituratus</i>         | 4900                   | Adaptado de Sancha et al. (2021)       |
| <i>Carollia perspicillata</i>    | 3700                   | Adaptado de Sancha et al. (2021)       |
| <i>Desmodus rotundo</i>          | 1600                   | Adaptado de Sancha et al. (2021)       |
| <i>Didelphis aurita</i>          | 73 - 640               | Adaptado de Sancha et al. (2021)       |
| <i>Akodon cursor</i>             | 335                    | Adaptado de Sancha et al. (2021)       |
| <i>Philander frenatus</i>        | 1050                   | Hatfield et al. (2018)                 |

### References

[OBJ]

Awade, M., Metzger, J. P., 2008. Using gap-crossing capacity to evaluate functional connectivity of two Atlantic rainforest birds and their response to fragmentation. *Austral Ecology* 33, 863-871.

Duca, C., Guerra, T. J., Marini, M. A., 2006. Territory size of three Antbirds (Aves, Passeriformes) in an Atlantic Forest fragment in southeastern Brazil. *Revista Brasileira De Zoologia* 23, 692-698.

Duca, C., Marini, M. A., 2005. Territory size of the flavescent warbler, *Basileuterus flaveolus* (Passeriformes, Emberizidae), in a forest fragment in Southeastern Brazil. *Lundiana* 6, 29-33.

Hansbauer, M. M., Storch, I., Pimentel, R. G., Metzger, J. P., 2008. Comparative range use by three Atlantic Forest understorey bird species in relation to forest fragmentation. *Journal of Tropical Ecology* 24, 291-299.

Hatfield, JH, Harrison, MLK, & Banks- Leite , C. (2018). Métricas de diversidade funcional: como são afetadas pelas mudanças na paisagem e como representam o funcionamento dos ecossistemas nos trópicos. *Relatórios Atuais de Ecologia de Paisagem*, 3(2), 35–42. doi:10.1007/s40823-018-0032-x

Johnson, E. I., Stouffer, P. C., Vargas, C. F., 2011. Diversity, biomass, and trophic structure of a central amazonian rainforest bird community. *Revista Brasileira De Ornitologia* 19, 1-16.

Lees, A. C., Peres, C. A., 2009. Gap-crossing movements predict species occupancy in Amazonian forest fragments. *Oikos* 118, 280-290.

Marini, M. A., 2010. Bird movement in a fragmented Atlantic Forest landscape. *Studies on Neotropical Fauna and Environment* 45, 1-10.

Sancha, N., Boyle, S., McIntyre, N., 2021. Identifying structural connectivity priorities in eastern Paraguay's fragmented Atlantic Forest. *Scientific Reports* 11 (1).

Tonhasca Jr, A., Albuquerque, G. S, Blackmer, J. L., 2003. Dispersal of euglossine bees between fragments of the Brazilian Atlantic Forest. *Journal of Tropical Ecology* 19, 99-102.

Table S2: Number of components (NC), Number of links (NL), Probability of connectivity (PC), and Integral Index of Connectivity (IIC) for each of the enhancement scenarios and for the seven dispersal distances selected in this study.

|     | Dispersion | Real | 5%   | 10%  | 15%  | 20%  | 25%  | 30%  | 35%  | 40%  | 45%  | 50%   |
|-----|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| NC  | 100        | 2859 | 2880 | 2891 | 2847 | 2852 | 2797 | 2801 | 2714 | 2634 | 2650 | 2583  |
|     | 250        | 1247 | 1241 | 1249 | 1185 | 1149 | 1094 | 1094 | 1018 | 988  | 965  | 875   |
|     | 500        | 377  | 349  | 348  | 334  | 296  | 276  | 251  | 238  | 216  | 197  | 180   |
|     | 1000       | 29   | 27   | 25   | 25   | 23   | 20   | 16   | 12   | 12   | 14   | 11    |
|     | 2500       | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     |
|     | 5.000      | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     |
|     | 10.000     | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     |
| NL  |            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
| (%) | 100        | 0    | 0,62 | 1,79 | 2,31 | 3,37 | 4,05 | 5,06 | 5,28 | 7,03 | 6,61 | 9,57  |
|     | 250        | 0    | 0,68 | 2,49 | 3,95 | 4,90 | 6,12 | 7h15 | 7h50 | 8,87 | 8,93 | 12,34 |
|     | 500        | 0    | 1.01 | 2,94 | 3,56 | 4,67 | 5,70 | 6,73 | 6,61 | 7.16 | 8,87 | 11,59 |

|                    |               |   |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |
|--------------------|---------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                    | <b>1000</b>   | 0 | 0,96  | 3.15  | 3,37  | 16h30 | 5.31  | 6.22  | 5.14   | 5,58   | 6,78   | 9.27   |
|                    | <b>2500</b>   | 0 | 1.04  | 3.41  | 3.14  | 4,46  | 4,83  | 5,84  | 3,78   | 4,28   | 5,31   | 7,42   |
|                    | <b>5.000</b>  | 0 | 1.21  | 3,56  | 3.06  | 4,54  | 5.08  | 5,63  | 3,49   | 3,67   | 4,71   | 6,37   |
|                    | <b>10.000</b> | 0 | 1,25  | 3.51  | 3.15  | 4,38  | 5.07  | 5,65  | 2,94   | 3.07   | 4,34   | 5.42   |
| <b>PC<br/>(%)</b>  | <b>100</b>    | 0 | 11.08 | 18.04 | 19,62 | 38,29 | 53,48 | 72,47 | 90,82  | 148,42 | 129,75 | 130,38 |
|                    | <b>250</b>    | 0 | 13h20 | 17.01 | 23.13 | 49,66 | 60,54 | 86,39 | 101,36 | 176,19 | 158,50 | 165,31 |
|                    | <b>500</b>    | 0 | 12,67 | 16,67 | 25h33 | 55,33 | 66,67 | 86,67 | 111,33 | 170,67 | 163,33 | 173,33 |
|                    | <b>1000</b>   | 0 | 11.04 | 16.56 | 27,61 | 52,45 | 64,72 | 77h30 | 109,51 | 144,79 | 150,00 | 156,13 |
|                    | <b>2500</b>   | 0 | 8.17  | 13h47 | 25.13 | 37,8  | 52,70 | 62,2  | 89,82  | 106,79 | 124,81 | 122,69 |
|                    | <b>5.000</b>  | 0 | 6.19  | 11h34 | 20,62 | 28h35 | 39,69 | 47,42 | 65,46  | 74,74  | 88,66  | 87.11  |
|                    | <b>10.000</b> | 0 | 4,80  | 8,71  | 16.22 | 21h32 | 28,53 | 35,44 | 46,55  | 51,95  | 60,96  | 60,96  |
| <b>IIC<br/>(%)</b> | <b>100</b>    | 0 | 9,73  | 12.58 | 26,85 | 39,93 | 44,63 | 67,79 | 103.02 | 121,48 | 136,58 | 131,54 |
|                    | <b>250</b>    | 0 | 17h36 | 26h45 | 70,25 | 87,60 | 61.16 | 99,17 | 135,54 | 109.09 | 180,99 | 173,55 |
|                    | <b>500</b>    | 0 | 5.04  | 9,71  | 16h55 | 20.14 | 33.09 | 38,49 | 54,32  | 62,59  | 69,78  | 71,22  |
|                    | <b>1000</b>   | 0 | 4.05  | 8.10  | 9,52  | 15,71 | 21h90 | 26,67 | 37.14  | 41,90  | 45,71  | 46,43  |
|                    | <b>2500</b>   | 0 | 2,45  | 6,43  | 7,81  | 11h33 | 16.54 | 20.52 | 26.19  | 28,64  | 30.17  | 34,92  |
|                    | <b>5.000</b>  | 0 | 2,47  | 4,84  | 6,67  | 9,68  | 12h90 | 17h20 | 22h58  | 25,81  | 27,96  | 26,88  |
|                    | <b>10.000</b> | 0 | 2.21  | 4.41  | 5,88  | 8,82  | 11,76 | 13,97 | 17h65  | 21h32  | 22.06  | 25h00  |

NC = Number of components; NL = Number of links. NL is presented as a percentage of each scenario relative to the Real scenario; PC = Probability of connectivity (PC\_num); IIC = Integral Index of Connectivity (IIC\_num).

#### 4. CONCLUSÃO

Concluimos que compreender o maior número possível das relações entre os impactos ambientais é fundamental para uma análise de rede complexa capaz de apoiar no planejamento de medidas mitigatórias. Além disso, é possível que cada impacto seja analisado em seus atributos, revelando características essenciais para a priorização de ações de reparação.

Considerando os impactos mapeados pós rompimento e suas possíveis relações identificadas pela Arcadis, observamos que investir em restauração florestal na bacia do rio Paraopeba se configura como uma estratégia relevante de reparação e compensação socioambiental. A restauração florestal em bacias hidrográficas impactadas por desastres, como o rompimento de barragens, é crucial para a recuperação da biodiversidade, a proteção dos recursos hídricos e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Cabe também destacar que a participação ativa de lideranças atingidas foi crucial para assegurar que o modelo de restauração florestal proposto atendesse às suas necessidades. Além disso, o incremento de fragmentos florestais em áreas de preservação permanente hídricas contribui com a conectividade funcional, favorecendo a dispersão das espécies.

Logo, os dados e modelos fornecem informações valiosas para a gestão ambiental da bacia do rio Paraopeba. É importante considerar os recursos financeiros destinados a reparação e compensação socioambiental previstos após o desastre-crime cometido pela VALE S.A. para superar desafios como a necessidade de investimentos. A mobilização das pessoas atingidas em torno da pauta da reparação também pode ser vista como um caminho para a mobilização da sociedade civil. A implementação de estratégias complementares à restauração de áreas de APP, como a criação de corredores ecológicos, a expansão de fragmentos florestais existentes, e a gestão de áreas protegidas, é essencial para melhorar a qualidade ambiental, conservar a biodiversidade e manter os serviços ecossistêmicos que são vitais para o bem-estar das comunidades diretamente atingidas pelo desastre socioambiental.