



FERNANDO BALBINO DE SOUZA

**VULNERABILIDADE RIPÁRIA SOCIOECOLÓGICA À
JUSANTE DE BARRAGENS DE REJEITO EM MINAS
GERAIS**

**LAVRAS – MG
2018**

**VULNERABILIDADE RIPÁRIA SOCIOECOLÓGICA À JUSANTE DE
BARRAGENS DE REJEITO EM MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ecologia Aplicada para obtenção
do título de mestre.

Prof. Dr. Luis Marcelo Tavares de Carvalho
Orientador

Prof. Dr. Paulo Santos Pompeu
Coorientador

**LAVRAS – MG
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Souza, Fernando Balbino de.

Vulnerabilidade ripária socioecológica à jusante de barragens
de rejeito em Minas Gerais / Fernando Balbino de Souza. - 2018.
73 p.

Orientador(a): Luis Marcelo Tavares de Carvalho.

Coorientador(a): Paulo Santos Pompeu.

Dissertação (mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Vulnerabilidade Socioecológica. 2. Barragens de Rejeito. 3.
Zonas Ripária. I. Carvalho, Luis Marcelo Tavares de. II. Pompeu,
Paulo Santos. III. Título.

**VULNERABILIDADE RIPÁRIA SOCIOECOLÓGICA À JUSANTE DE
BARRAGENS DE REJEITO EM MINAS GERAIS**

**RIPARIAN SOCIOECOLOGICAL VULNERABILITY INDEX DOWNWARD OF
TAILINGS DAM IN THE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de
Lavras, como parte das
exigências do Programa de
Pós-Graduação em
Ecologia Aplicada para
obtenção do título de
mestre.

APROVADA em 06 de novembro de 2018

Prof. Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro

Prof. Dr. Nelson Henrique de Almeida Curi

Prof. Dr. Luis Marcelo Tavares de
Carvalho Orientador

Prof. Dr. Paulo Santos
Pompeu Coorientador

**LAVRAS – MG
2018**

Aos interessados no tema desta pesquisa
DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) por mais uma oportunidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada (PPGEA), bem como ao Laboratório de Projetos e Estudos em Manejo Florestal (LEMAF), pela excelente infraestrutura fornecida para o desenvolvimento da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Aos Professores e colegas do PPGEA pela amizade e mediação na construção do conhecimento.

Ao Prof. Luis Marcelo Tavares de Carvalho pela orientação, contribuindo na melhor compreensão da dimensão espacial nas análises de impactos ambientais. Ao Prof. Paulo Santos Pompeu pela coorientação, cujas aulas nos cursos da graduação e da pós-graduação já despertavam-me o interesse no entendimento dos impactos de barragens à biodiversidade. Sou muitíssimo grato pelo ambiente multidisciplinar proporcionado por ambas as orientações, fundamental no meu aprendizado e na busca de solução para um problema.

Aos colegas do LEMAF pela amizade, companhia e aprendizado. Agradeço a Paula, que compartilhou os dados do seu trabalho de conclusão de curso para o início das pesquisas. A Nathália Carvalho, Daniel Fernando, e Tássia Borges pela ajuda nos primeiros passos para o desenvolvimento da pesquisa. Agradeço Isabela Belchior, a Lizandra Araújo, a Samantha Ramos e Thiza Altoé pelo aprendizado e encorajamento.

Agradeço às respectivas secretárias dos PPGEA e LEMAF, Ellen e Glaucia, pela disposição em ajudar.

A minha família pelo apoio imaterial (com valor pessoal inextimável) e material, onde inclui pedidos de socorro nos diversos momentos de crise. O apoio dos amigos no ambiente extra-acadêmico também foi muito importante, até mesmo no financiamento de alguns meses de aluguéis em uma kitinet ao finalizar o recurso fornecido pela agência de fomento.

A todos que ajudaram, até mesmo sem minha percepção das suas intenções. Portanto, peço por omissão para não correr o risco de deixar de mencionar pessoas que deixaram escapar (ou jogaram) uma porção da sua luz no meu caminho e contiarei captando os vestígios desse brilho no decorrer do meu caminho. Gratidão!

“ ”

Carlos Drummond de Andrade.

RESUMO

A construção de barragens é uma parte vital na história das civilizações e, atualmente, desempenha um papel estratégico no desenvolvimento humano. Essas estruturas contribuem para o abastecimento de água à população, recreação, dessedentação de animais, geração de energia, controle de enchentes, controle da qualidade das águas e controle de sedimentos. Mas, os efeitos adversos da construção de barragens também podem atingir grandes proporções de ecossistemas, onde o ser humano é parte integrante. A drenagem ácida de mina é um dos impactos relacionados às barragens de rejeito, que contribui para a biodisponibilidade de elementos traço-tóxico nos ecossistemas. Contudo, a taxa de rompimento de barragens de rejeito é bem maior que a taxa de rompimento de barragens convencionais, o que amplifica os impactos ecológicos e sociais. O Estado de Minas Gerais é uma das unidades da federação com o maior número de barragens de rejeito, bem como o estado que possui a maioria dos registros de rompimento dessas estruturas. O rompimento da barragem do Fundão, por exemplo, é considerado o maior desastre socioecológico da história recente do Brasil. Além de degradar centenas de quilômetros de ecossistemas aquáticos e zonas ripárias adjacentes, também afeta a população humana. A partir de análises das bases de dados do Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE-MG) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), o objetivo do presente estudo foi caracterizar a Vulnerabilidade Ripária Socioecológica à jusante de barragens de rejeito, gerando informações importantes para tomadores de decisão para atendimento ao princípio da precaução. Informações ecológicas e sociais foram agregadas em um único Índice de Vulnerabilidade Ripária Socioecológico (IVRSE). Os valores encontrados no centro dos rios apresentaram valores mais elevados no IVRSE em relação às zonas ripárias. Áreas no entorno dos rios a jusante de barragens de rejeito, onde se concentram um maior número de pessoas, também contribuíram com os valores mais elevados nos IVRSE. Esses índices forneceram uma descrição geral das condições de vulnerabilidade dos ecossistemas a jusante das barragens. A apresentação dos IVRSE na mesma escala de representação espacial da rede hidrográfica oficial de Minas Gerais facilita a implementação e aplicação de medidas para gestão de riscos, observando o princípio da precaução.

Palavras-chave: Avaliação de impacto socioambiental. Mitigação de efeitos adversos. Modelagem de sistemas ambientais. Zonas ripárias à jusante de barragens.

ABSTRACT

The construction of dams is a vital part of the history of civilizations and currently plays a strategic role in human development. These structures contribute to water supply, recreation, animal watering, power generation, flood control, water quality control and sediment control. But the adverse effects of dam construction can also impact large proportions of ecosystems, where humans are an integral part. Acid mine drainage is one of the impacts related to tailings dams, but the rate of breakage of tailings dams much larger than the rate of breaking of conventional dams amplifies ecological and social impacts. The state of Minas Gerais is one of the federation units with the largest number of tailings dams, as well as the state that keeps records of most cases of disruption of these structures. The break of the Fundão's tailings dam, for example, is considered the greatest socioecological disaster in Brazil's recent history. In addition to degrading hundreds of kilometers of aquatic ecosystems, this disaster also affects seriously the biodiversity and human populations in riparian habitats, which account for 19 deaths. The objective of the present study was to characterize the Socioecological Riparian Vulnerability downstream of tailings dams, based on analyzes in the databases of the Economic Ecological Zoning of Minas Gerais (ZEE-MG) and the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), generating information useful to decision makers in meeting the precautionary principle. Ecological and social information has been aggregated into a Socioecological Riparian Vulnerability Index (IVRSE). The center of the rivers presented higher values in the IVRSE, compared to the analyses performed in riparian zones. The IVRSE provides a general description of the vulnerability conditions in rivers and riparian zones downstream of tailings dams. Notwithstanding the representation of the IVRSE in the same spatial scale of the official hydrography net of Minas Gerais facilitates its immediate application in risk management by the decision makers to compliance with the precautionary principle.

Keywords: Socio-Environmental Impacts Assessment. Environmental Modeling. Mitigation of Adverse Effects. Downstream's riparian zones.

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APP	Áreas de Preservação Permanente
BDA	Banco de Declarações Ambientais
CEFET-MG	Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DPA	Dano Potencial Associado
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOLD	International Commission on Large Dam
IEC	Instituto Evandro Chagas
IEF	Instituto Brasileiro de Florestas
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IVRSE	Índice de Vulnerabilidade Ripária Socioecológico
LEMAF	Laboratório de Estudos e Projetos em Manejo Florestal
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
ONGs	Organizações Não Governamentais
OSU	Oregon State University
PDA	Potencial de Dano Ambiental
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos

PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PPGEA	Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada
PUC-Minas	Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
QA	Qualidade Ambiental
RIMA/EIA	Relatório de Impacto Ambiental / Estudo de Impacto Ambiental
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SIGWEB	Sistemas de Informações Geográficas para Internet
TJPA	Tribunal de Justiça do Pará
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UN	United Nation
UPGRH	Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
USGS	United States Geological Survey
VE	Vulnerabilidade Ecológica
VN	Vulnerabilidade Natural
VS	Vulnerabilidade Social
WISE	World Information Service on Energy
ZEE-MG	Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais

Sumário

PRIMEIRA PARTE

INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo Geral	14
1.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Estrutura da Dissertação	15
Referencial Teórico	16
2.1 Barragens	16
2.2 Barragens Convencionais	17
2.3 Barragens de Rejeito	19
2.4 Segurança de Barragens de Rejeito	22
2.5 Monitoramento e Gestão de Riscos Relacionados à Barragens de Rejeitos	28
2.6 O Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE-MG)	29
2.7 Vulnerabilidade Natural e Qualidade Ambiental do ZEE-MG	30
Referências	32
Segunda Parte - Artigo	40
Resumo	26
1. Introdução	28
2. Material e Métodos	31
3. Análises	35
4. Resultados e Discussão	40
5. Conclusão	48
6. Sugestões para futuros trabalhos	48
Referências	48

PRIMEIRA PARTE

1 Introdução

Os Impactos antrópicos decorrentes da construção de barragens, observados desde as primeiras civilizações hidráulicas (MEYBECK, 2003) e passando pela mineração na idade do cobre (LEBLANC et al., 2000), persistem até os dias atuais. No passado, barragens eram construídas com a finalidade de fornecimento de água e irrigação. Porém, as civilizações se desenvolveram e passaram a utilizá-las para outros fins, visando a melhoria do bem estar humano, como a recreação, o controle de sedimentos, o controle de enchentes, o controle da qualidade das águas, além de servirem à navegação e à geração de energia (ICOLD, 2008; MCCARTNEY; SULLIVAN; ACREMAN, 1999). Porém, analisando especificamente as barragens de rejeito, observa-se que essas armazenam um passivo ambiental (DAVIES; MARTIN; LIGHTHALL, 2000; HUI; CHARLEBOIS; SUN, 2018) com potencial de degradação de centenas de quilômetros de ecossistemas no vale a jusante (LARRAURI; LALL, 2018; RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008).

A drenagem ácida de mina é um dos impactos ambientais gerados por barragens de rejeito em seu pleno funcionamento. O Estado de Minas Gerais tem potencial para gerar elevadas quantidades de drenagem ácida de mina (MELLO et al., 2006). Além das condições naturais, microrganismos também podem encontrar ambiente favorável em barragens de rejeito para seu desenvolvimento e contribuir para processos de geração de drenagem ácida de mina (CAMPOS et al., 2011). Gradiente de drenagem ácida de mina nos rios a jusante de barragens de rejeito resulta em declínio na abundância de macro invertebrados intolerantes (ZHAO et al., 2017) e favorece a biodisponibilidade de elementos traço-tóxico, como o Arsênio (JACKSON et al., 2015). Diversos estudos identificaram um gradiente na concentração de Arsênio acima dos limites estabelecidos na legislação ambiental ao longo de rios a jusante de barragens de rejeito no estado de Minas Gerais (BIDONE et al., 2018; CAGNIN et al., 2017). Contudo, os riscos de rompimento de barragens de rejeito amplificam esses impactos e representam um problema ainda maior (MADEJÓN et al., 2018).

Existem registros de cerca de 300 casos de rompimento de barragens de rejeito em todo mundo (WISE, 2018; STRACHAN; GOODWIN, 2015). No Brasil, há 14 casos foram registrados entre o período de 1981 até 2015, cuja maioria ocorreram no Estado de Minas Gerais (ANA, 2016a). O rompimento da Barragem do Fundão, em 05 de novembro de 2015, é um dos casos mais graves, sendo considerado o maior desastre socioecológico na história recente do Brasil (FERNANDES et al., 2016; NEVES et al., 2016). Segundo

Garcia *et al.* (2016), o rompimento da Barragem do Fundão serve como alerta oportuno de que ações urgentes são necessárias para limitar os sérios danos da mineração, tanto no Brasil quanto no mundo. Mas outros incidentes com barragens de rejeito continuam ocorrendo em diversos lugares (WISE, 2018), inclusive o Brasil (IEC, 2018; WISE, 2018; TJPA, 2018). Além disso, barragens de rejeito operaram sem garantia de estabilidade por várias auditorias consecutivas (SANTOS; WANDERLEY, 2016).

A declaração do Rio de Janeiro de 1992 afirma que, quando houver ameaças de danos irreversíveis ao meio ambiente, o princípio da precaução deve ser amplamente observado pelos Estados (DECLARAÇÃO..., 1992). Quanto mais e melhores informações estiverem disponíveis, maiores serão as possibilidades de acertos na tomada de decisões para redução de riscos com base no princípio da precaução. O Sistema de Informação Geográfica (SIG), desenvolvido no Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE-MG), disponibilizou a maior base de dados físicos, bióticos e sociais compilada, padronizada e publicada (SCOLFORO; OLIVEIRA; CARVALHO, 2008). Esse banco de dados é fundamental para a gestão de riscos no território com base no princípio da precaução, que de outra maneira exigiria conhecimentos altamente especializado e dependente de complexas modelagens espaciais para o suprimento da escassez de dados ecológicos em escala regional (FERNANDES *et al.*, 2018; PENA *et al.*, 2017). Além disso, após o rompimento da Barragem do Fundão, dados atualizados do censo demográfico em melhores escalas de representação espacial foram disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE, 2016) e podem ser integrados às bases de dados do ZEE-MG para análise da Vulnerabilidade Ripária Socioecológica à Jusante de Barragens de Rejeito.

1.1 Objetivo Geral

Caracterizar a vulnerabilidade ripária socioecológica nos rios e nas zonas ripárias a jusante de barragens de rejeito no Estado de Minas Gerais.

1.2 Objetivos Específicos

- Detectar mudanças no uso e ocupação dos solos em função do rompimento da barragem do Fundão, a fim de definir uma unidade de área para análise da vulnerabilidade nas zonas ripárias.

- Quantificar a densidade das populações humanas no entorno dos rios, representando em uma escala qualitativa, como um proxy para a vulnerabilidade social em razão de rompimento de barragens de rejeitos.
- Extrair informações das bases de dados do ZEE-MG para representação da vulnerabilidade ecológica no espaço geográfico.
- Agregar informação ecológica e social em um único Índice de Vulnerabilidade Ripária Socioecológica (IVRSE) a jusante de barragens de rejeito.

1.3 Estrutura da Dissertação

A primeira parte da dissertação apresenta uma introdução geral, bem como os objetivos gerais e específicos da pesquisa. Em seguida, o referencial teórico aborda o estado da arte que fundamenta o desenvolvimento do trabalho. A metodologia, os resultados, as discussões, bem como as conclusões da pesquisa são apresentadas na segunda parte da dissertação no formato de um artigo.

2 Referencial Teórico

2.1 Barragens

Além dos seres humanos, outros organismos também possuem traços naturais para construção de barragens (ECKE et al., 2017) e disposição de seus resíduos em locais apropriados (BERNADOU; CZACZKES; HEINZE, 2018). No entanto, traços socioculturais e o crescimento populacional ampliam a capacidade humana para alterar ecossistemas em escalas globais (ELLIS, 2015), o que diferencia os impactos de barragens geradas pela natureza daquelas oriundas da ação do homem. Visando fomentar a cultura da segurança de barragens e a gestão de riscos, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) define que o reservatório de uma barragem é “a acumulação não natural de águas, de substâncias líquidas e sólidas, ou mistura de líquidos e sólidos” e a barragem:

Qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e estruturas associadas (BRASIL, 2010a).

Essa definição engloba, tanto barragens convencionais, quanto barragens de rejeito. Porém, a PNSB aplica-se somente às barragens que atendam a, no mínimo, um dos seguintes critérios:

- a) altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação até a crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
- b) capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);
- c) reservatório que contenha resíduos perigosos; ou
- d) categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou perda de vidas humanas (BRASIL, 2010a).

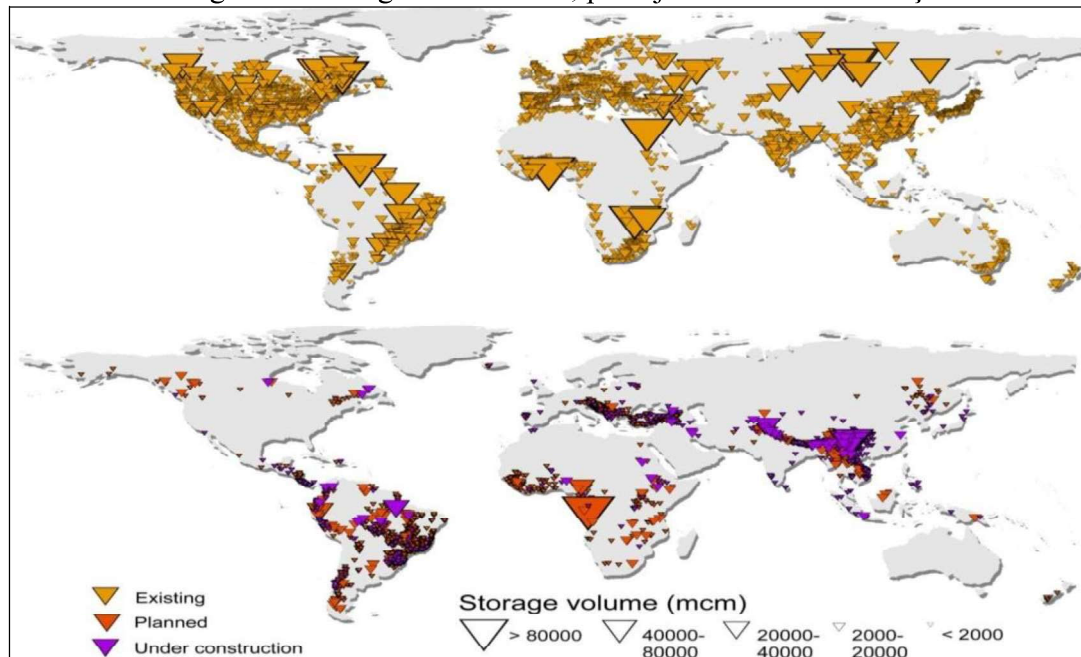
Alguns autores argumentam que, enquanto barragens convencionais são mantidas como um ativo pelo setor produtivo, barragens para acumulação de rejeitos são um passivo e, portanto, recebem menor atenção pelo empreendedor (DAVIES; MARTIN; LIGHTHALL, 2000; HUI; CHARLEBOIS; SUN, 2018). Porém, setores da indústria que utilizam barragens de rejeito para controle de poluentes também dependem de barragens

convencionais nos seus processos produtivos. A indústria de alumina, por exemplo, além de consumir energia fornecida por terceiros, também pretende produzir até 50% de sua demanda por energia (FEARNSIDE, 2016; PIASENTIN, 2011). Os impactos negativos causados por barragens de rejeito, além de afetarem a biodiversidade, também podem comprometer ativos depositados em barragens convencionais, como ocorreu no rompimento da barragem do Fundão, onde barragens para captação de águas e geração de energia elétrica do mesmo grupo de empresas foram afetadas (ANA, 2016b). Portanto, fica evidente a necessidade da gestão adequada de barragens de rejeito a fim de garantir a sustentabilidade ambiental em toda bacia hidrográfica.

2.2 Barragens Convencionais

A história da engenharia de barragens é uma parte vital na história das civilizações, principalmente em culturas altamente dependentes da irrigação. Um dos projetos de engenharia de barragens mais antigos atribui-se à primeira dinastia do antigo Egito, cerca de 5.700 a 2700 A.C. A construção dessas estruturas tem ligação com o surgimento e declínio de civilizações e são ranqueadas entre os maiores projetos concluídos pelo homem (JASEN, 1983), exercendo papel estratégico no desenvolvimento humano (MCCARTNEY; SULLIVAN; ACREMAN, 1999). A Figura 1 ilustra a quantidade de barragens existentes nos países desenvolvidos e outras que serão construídas, principalmente nos países em desenvolvimento (GRILL, 2015). No entanto, a decisão de construir barragens subestima impactos sociais e ambientais (FEARNSIDE, 2016).

Figura 1. Barragens existentes, planejadas ou em construção.



Fonte: (GRILL, 2015)

O crescimento populacional contribuiu para o aumento acentuado do número de barragens a partir da década de 1950 (ZARFL et al., 2015), de maneira que, atualmente, elas impactam cerca de 48% dos rios do globo, podendo chegar a 93% no futuro (GRILL et al., 2015).

Cabe, porém, salientar, que os efeitos adversos de barragens à biodiversidade podem ser bem maiores que outras atividades antrópicas em escalas de paisagem (COOPER et al., 2017), pois além de alterar os fluxos de matéria e energia no rio contínuo (MAAVARA et al., 2017), bloqueiam a passagem de espécies migradoras (LIRA et al., 2017; SILVA et al., 2018; SOKOLOW et al., 2018; WILKES et al., 2018). O Brasil é um dos países que detém o maior número de publicações científicas sobre esses impactos (BRANQUINHO; BRITO, 2016).

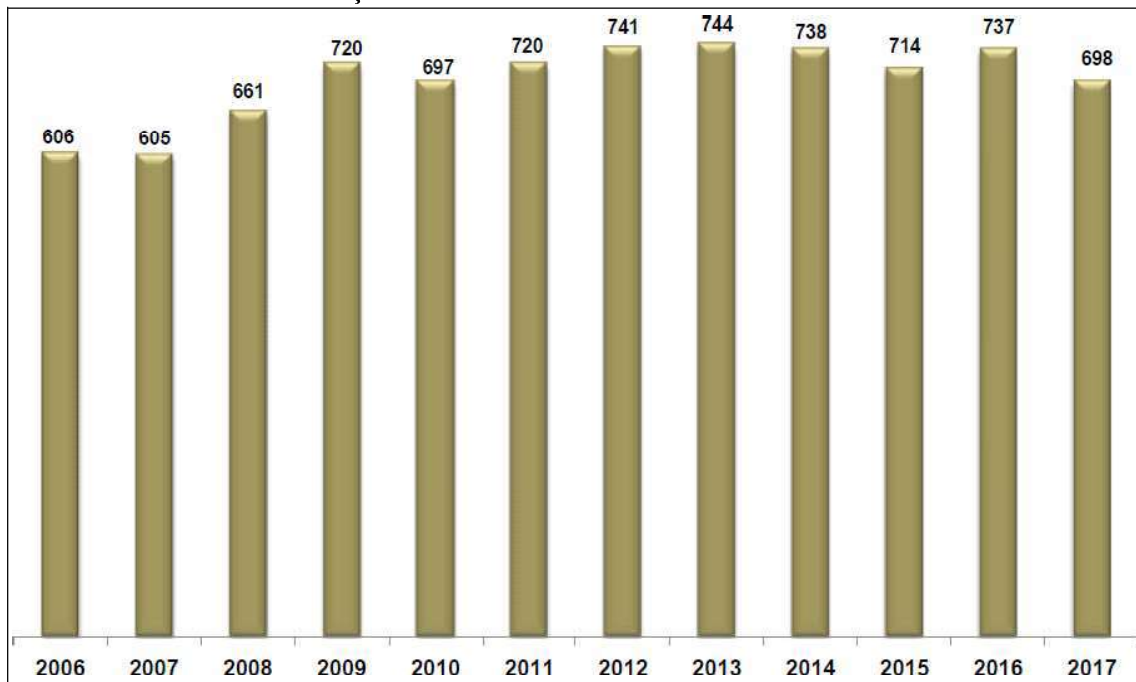
Habitats ripários também são afetados por barragens de rejeitos, principalmente de espécies que requerem distúrbios para propagar e estabelecer (BEJARANO; NILSSON; CONSTANÇA, 2017). Mesmo que os impactos negativos de barragens à humanidade sejam menores que os impactos à biodiversidade (VÖRÖMARTY et al., 2010), barragens afetam milhões de pessoas que vivem nas zonas ripárias. Segundo Richter et al. (2010), impactos da construção de barragens podem colocar em risco a segurança alimentar e o fornecimento de produtos e serviços ecossistêmicos a cerca de 472 milhões de pessoas a jusante de barragens em todo mundo. O bloqueio da migração de uma espécie de crustáceo

predadores do hospedeiro da esquistossomose, por exemplo, também expõe milhões de pessoas ao risco de contrair doenças (SOKOLOW et al., 2018).

2.3 Barragens de Rejeito

Barragens de rejeito são uma das alternativas adotadas pelo setor de mineração para o controle de poluição ambiental, iniciado a partir do início do século XX. Porém, poucas barragens permaneciam estáveis nos períodos de fortes chuvas (PIASENTIN, 2011). Atualmente, existem somente estimativas do número de barragens de rejeito, que podem chegar a cerca de 3.500 unidades (DAVIES; MARTIN; LIGHTHALL, 2000). O Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens (SNISB) é um importante instrumento da PNSB, no qual se reúne o cadastro de barragens no território brasileiro. Mas o número de barragens cadastradas no SNISB não abrange todo universo de barragens de rejeito (ANA, 2018). No Estado de Minas Gerais, a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) realiza inventário de barragens de rejeito e anualmente disponibiliza relatórios e informações da sua base de dados. Em 2017, por exemplo, incluíram 64 novas barragens de rejeito no Banco de Declarações Ambientais (DBA) da FEAM e, ainda assim, esse foi o ano com o menor número total de barragens cadastradas, considerando uma série histórica de sete anos consecutivos (FIGURA 2) (FEAM, 2018).

Figura 2. Evolução histórica do número de barragens registradas no Banco de Declarações Ambientais da Fundação Estadual de Meio Ambiente



Fonte: (FEAM, 2018).

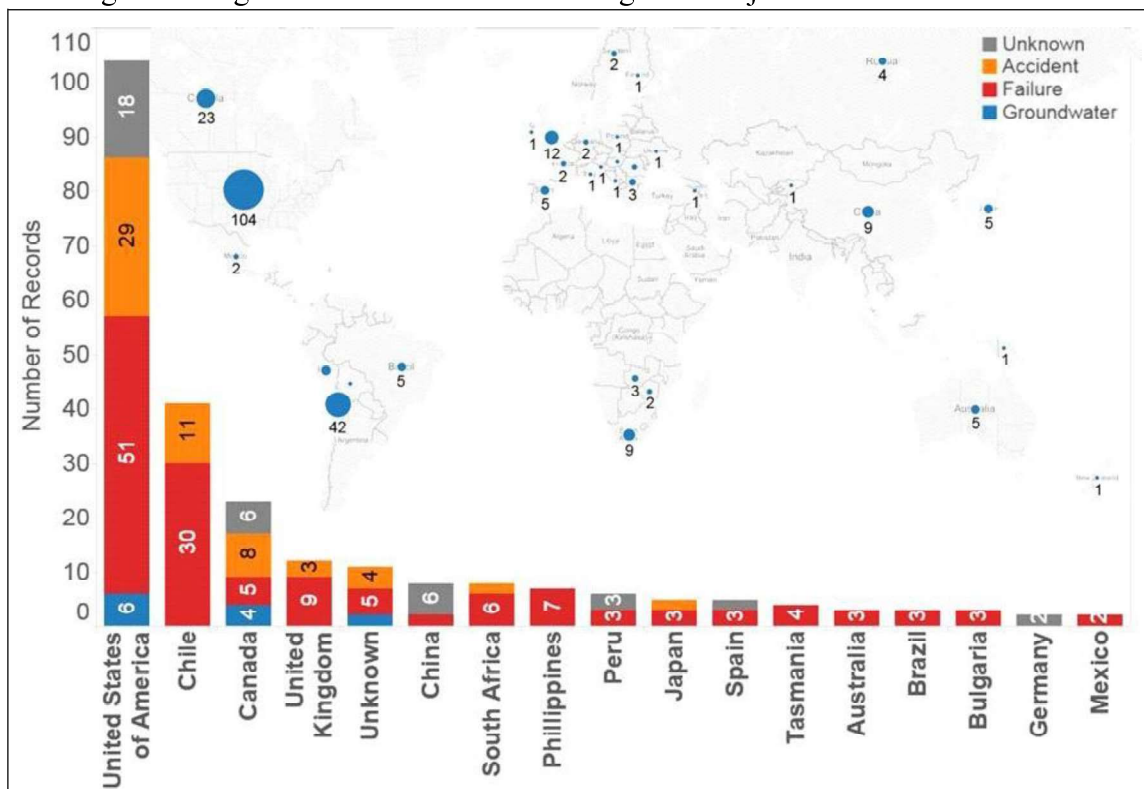
Efeitos adversos relacionados à segurança, ao bem estar da população e ao ambiente, provocados pelo lançamento de materiais e energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos, são caracterizados como poluição ambiental (BRASIL, 1981). A segurança de barragens também é considerada no contexto da poluição ambiental, abrangendo as fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento, primeiro vertimento, operação, desativação, bem como os usos futuros (BRASIL, 2010a).

Embora nem todas as barragens de rejeito gerem drenagem ácida de mina, o território de Minas Gerais tem potencial para gerar em torno de 31.4 a 103.7 bilhões de m³ de águas mais ácidas (MELLO et al., 2006). Um estudo avaliou o risco ecológico da drenagem ácida de mina nos rios e mostrou que o limiar de 35mg/L de sulfatos em uma gradiente de drenagem ácida nos cursos d'águas a jusante de barragens de rejeito é responsável pelo maior declínio de macro-invertebrado intolerante (ZHAO et al., 2017). A drenagem ácida de mina favorece a biodisponibilidade de elementos traços (JACKSON et al., 2015). Diversos estudos identificaram gradiente de elementos traços nos rios à jusante de barragens de rejeito no estado de Minas Gerais acima dos limites definidos nas normas ambientais (BIDONE et al., 2018; CAGNIN et al., 2017). Mas a taxa de rompimento de barragens de rejeitos bem maior que a taxa de rompimento de barragens convencionais (AZAM; LI, 2010), com potencial para degradar ecossistemas centenas de quilômetros no vale a jusante (LARRAURI; LALL, 2018), amplifica os problemas de poluição ambiental

(MADEJÓN et al., 2018).

Uma tentativa de compilar globalmente o número de incidentes com barragens de rejeito mostrou que a maioria dos casos ocorreu nos Estados Unidos da América e apenas três casos ocorreram no Brasil (FIGURA 3) (STRACHAN; GOODWIN, 2015). No entanto, o relatório da Agência Nacional das Águas apresenta registro de 14 acidentes com barragens de rejeitos no Brasil, a maioria no estado de Minas Gerais (ANA, 2016a). Isso mostra que o número de incidentes com barragens de rejeito globalmente ainda é subestimado, como afirma diversos especialistas (WISE, 2018; RICO et al., 2008; BOWKER; CHAMBERS, 2015; 2017).

Figura 3. Registro de incidentes com barragens de rejeitos ao redor do mundo



Fonte: (BOWKER; CHAMBERS, 2015)

O histórico de graves acidentes com barragens de rejeito em Minas Gerais motivaram a criação das normas de segurança de barragens. O marco das discussões de Segurança de Barragens no Brasil foi o ano de 2001, quando ocorreu o rompimento de uma barragem da Mineradora Rio Verde, no município de Nova Lima, em Minas Gerais, onde liberou-se cerca de 600 m³ de rejeitos, matando cinco pessoas, degradando os rios e desmatando 79 ha de vegetação nativa (CETEM, 2016). O rompimento da barragem da Mineradora Rio Verde deu origem a Deliberações Normativas (DN) do Conselho Estadual de Políticas Ambientais (COPAM): nº 62/2002 (FEAM, 2018). Em seguida ocorreu o

rompimento da barragem de rejeito da indústria Papel Cataguases em 2003, dando origem ao Projeto de Lei (PL) nº 1.181 da PNSB, cuja aprovação ocorreu somente em 2010, um pouco mais de um mês após a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2003). Outras normas para segurança de barragens de rejeito da mineração também foram atualizadas após o rompimento da Barragem do Fundão (BRASIL, 2017).

2.4 Segurança de Barragens de Rejeito

A NBR 13.028 determina a observação de normas relacionadas a resíduos sólidos na elaboração e apresentação de projetos de barragens de rejeito (ABNT, 1993). Essa exigência evidencia a natureza dos resíduos armazenados nessas barragens. Resíduos sólidos são definidos como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010b).

As sobras indesejáveis dos processos produtivos devem considerar sequencialmente a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos sólidos. Apenas depois de esgotarem-se todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, deve-se, então, propor a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010a). Após o tratamento dos resíduos, atendendo os limites permitidos pelas normas, os efluentes são lançados nos corpos hídricos para autodepuração (CONAMA, 2011). Dessa maneira, barragens de rejeito são caracterizadas como uma unidade de tratamento de resíduos sólidos e a disposição final de rejeitos.

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) é a principal norma no âmbito federal que visa assegurar a observância de padrões de segurança de barragens, de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências (BRASIL, 2010a). Mas a prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou do uso inadequado dos recursos hídricos também é um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), cuja competência para o estabelecimento e implementação dos instrumentos da PNSB cabe ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (BRASIL, 1997).

A classificação de barragens quanto ao risco e ao Dano Potencial Associado (DPA) é um dos instrumentos da PNSB (BRASIL, 2010a). Enquanto a classificação de barragens quanto ao risco está relacionada às características de cada barragem influenciar na probabilidade de ocorrência de um acidente, a classificação quanto ao DPA está relacionada às perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais (CNRH, 2012). Ambas as classificações são importantes e complementares nas análises da possibilidade de ocorrerem poluição ambiental e são utilizadas, em conjunto, na classificação de barragens de rejeito sob fiscalização do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (BRASIL, 2017).

A classificação de barragens de rejeito quanto ao DPA utiliza quatro critérios: i) o volume do reservatório; ii) existência de populações humanas, iii) impacto ambiental; e iv) impacto socioeconômico a jusante das barragens. Cada um desses critérios possui uma faixa de valores, cuja somatória determina a classificação do DPA. O Quadro 1 ilustra como é feito a classificação de barragens de rejeito quanto ao DPA no âmbito federal. O cabeçalho representa os atributos e as linhas representam as faixas de valores possíveis. Quando o somatório dos atributos é maior ou igual a 13, o DPA é Alto; menor que 13 e maior que 7, o DPA é médio; menor ou igual a 7, o DPA é baixo (CNRH, 2012).

Quadro 1. Classificação de barragens de rejeitos no âmbito federal quanto ao Dano Potencial Associado (DPA). (Continua)

Volume do reservatório (a)	População a jusante (b)	Impacto Ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
Muito pequeno $\leq 5.10^5 \text{ m}^3$ (1)	Inexistente (Não existem pessoas permanentes/residentes ou temporários/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	Insignificante (Área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B – Inerte, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (0)	Inexistente (Não existem quaisquer instalações na área afetadas a jusante da barragem) (0)
Pequeno $> 5.10^3 \text{ m}^3$ a 5.10^6 m^3 (2)	Pouco frequente (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	Pouco Significativo (Área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B – Inerte, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (2)	Baixo (Existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)

Fonte: (CNRH, 2012)

Quadro 1. Classificação de barragens de rejeito quanto ao Dano Potencial Associado (DPA) no âmbito federal. (Conclusão)

<p>Médio 5.10^6 m^3 a 25.10^6 m^3 (3)</p>	<p>Frequente (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)</p>	<p>Significativo (Área afetada a jusante da barragem apresenta áreas de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B – Inerte, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6)</p>	<p>Médio (Existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)</p>
<p>Grande 25.10^6 m^3 a 50.10^6 m^3 (4)</p>	<p>Existente (Existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)</p>	<p>Muito Significativo (Barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A – não Inerte, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (8)</p>	<p>Alto (Existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)</p>
<p>Muito Grande $\geq 50.10^6 \text{ m}^3$ (5)</p>	<p>-</p>	<p>Muito significativo agravado (Barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I A – não Inerte, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (10)</p>	

Fonte: (CNRH, 2012)

Os critérios utilizados na classificação de barragens de rejeito no Estado de Minas Gerais são definidos pela deliberação normativa (DN) nº 62/2002, alterada pela DN nº

87/2005, do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). No entanto, as faixas de valores e a nomenclatura utilizada na classificação das barragens no estado não são as mesmas utilizadas pela norma federal. Os critérios utilizados são a altura da barragem, o volume do reservatório, a ocupação humana, o interesse ambiental e instalações nas áreas a jusante. Esse sistema de classificação combina os critérios utilizados na norma federal para classificação e enquadramento de barragens em uma das classes I, II ou III. Cada uma dessas classes está relacionada ao Potencial de Dano Ambiental (PDA) das barragens.

O Quadro 2 ilustra como é feito a classificação de barragens de rejeito no âmbito estadual, atribuindo valores em função das características de cada barragem e do ambiente. O cabeçalho representa os atributos a serem valorados. Quando o somatório dos valores dos atributos é maior que 5, o PDA é Alto; menor ou igual a 5 e maior que 2, PDA Médio e; menor ou igual a 2, PDA Baixo.

Quadro 2. Classificação de barragens de rejeito no âmbito estadual quanto ao Potencial de Dano Ambiental (PDA) (Continua)

Altura da barragem	Volume do reservatório (m³)	Ocupação humana a jusante	Interesse ambiental a jusante	Instalação na área a jusante
Pequeno < 15 m (0)	Pequeno $5 \cdot 10^5 \text{ m}^3 <$ (0)	Inexistente (Não existe habitação na área a jusante) (0)	Pouco significativo (Não apresenta área de interesse ambiental relevante a jusante ou encontra totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (0)	Inexistente (Não existe qualquer instalação na área a jusante da barragem) (0)
Médio 15 m a 30m (1)	Médio $5 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ a $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (1)	Eventual (Não existem habitações na área a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal ou Rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas (Ex. indústria, mina operante, planta De beneficiamento, escritórios, etc.) (2)	Significativo (A área a jusante da barragem apresenta interesse ambiental relevante) (1)	Baixa concentração (Existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestruturas de relevância sócio econômico cultural na área a jusante da barragem) (1)

Fonte: (COPAM, 2002; COPAM, 2005)

Quadro 2. Classificação de barragens de rejeito no âmbito estadual quanto ao Potencial de Dano Ambiental (PDA) (Conclusão)

Grande 30m (2)	Grande 5.10^6 m^3 (2)	Existente (Existe habitação na área a jusante, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas e a barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe IIB – Inerte, segundo a NBR 10.004/2004 da ABNT) (3)	Elevado (A área a jusante da barragem apresenta interesse ambiental relevante e a barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados como Classe I – Perigoso ou Classe II – não Inertes, segundo a norma NBR 10.004 da ABNT) (3)	Alta concentração (Existe grande concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio econômico cultural na área a jusante da barragem) (2)
-	-	Grande (Não existe habitação na área a jusante) (4)		

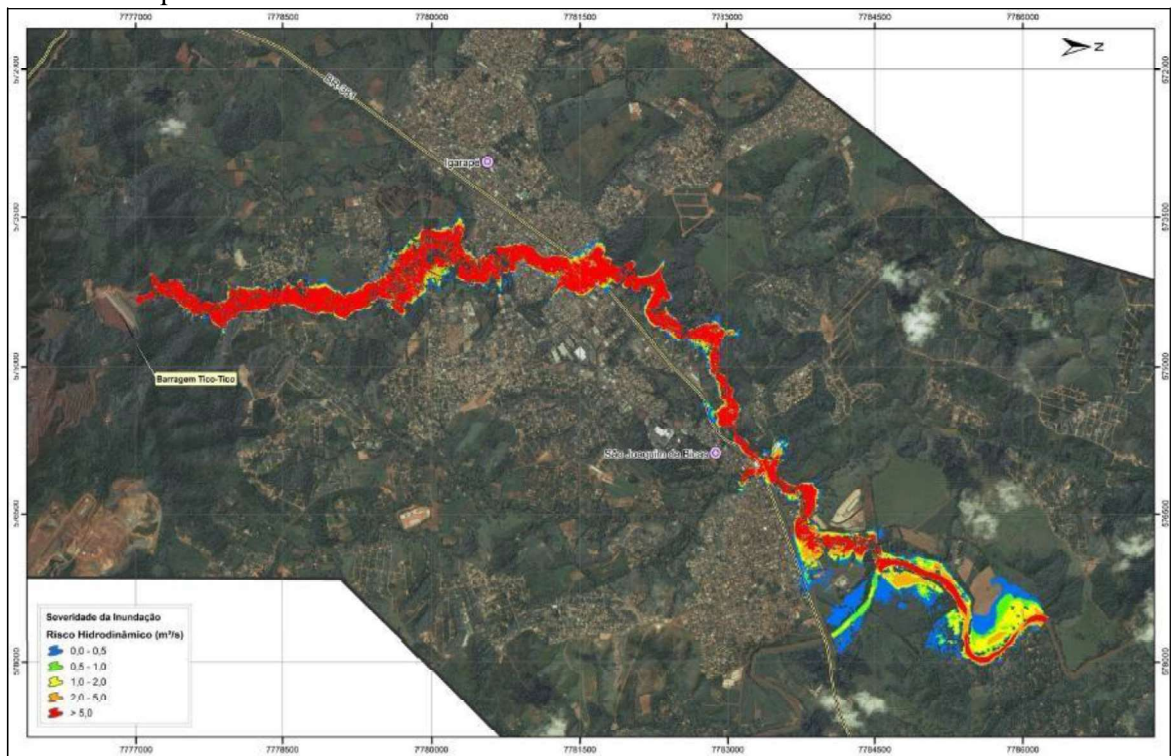
Fonte: (COPAM, 2002; COPAM, 2005)

A classificação de barragens de rejeito, além de ser um dos instrumentos da PNSB, também define critérios exigidos no licenciamento ambiental de barragens. Após o rompimento da Barragem do Fundão, critérios locais também passaram a ser exigidos nos processos de licenciamento ambiental no estado de Minas Gerais (COPAM, 2017), mas alguns parâmetros relacionados a normas complementares para o licenciamento de barragens de rejeito e gestão de riscos continuam inaplicáveis, como estimativa da diluição de contaminantes a níveis considerados toleráveis pela Organização Mundial de Saúde, valoração do interesse ambiental e ocupação no vale a jusante (SISEMA, 2018).

2.5 Monitoramento e Gestão de Riscos Relacionados à Barragens de Rejeitos

A mitigação de risco ambiental decorrente de barragens de rejeito, bem como a prevenção de perdas de vidas humanas, requerem informações adequadas e monitoramento constante (HUI; CHARLEBOIS; SUN, 2018). Em Minas Gerais, a modelagem dinâmica de propagação de cheias induzidas pelo rompimento de barragens é um dos métodos utilizados na aquisição de informações para o monitoramento e gestão de riscos no vale a Jusante. Esses modelos são estudados para testar sua capacidade de previsão, como nos estudos de retroanálise das áreas inundadas à jusante da Barragem do Fundão (MACHADO, 2017). Mas a modelagem também é utilizada nas estimativas das áreas inundadas no vale a jusante de barragens de rejeito em operação. A Figura 4 ilustra um dos resultados de um estudo da modelagem hidrodinâmica a jusante da Barragem Tico-Tico, localizada na região do quadrilátero ferrífero, no município de Igarapé-MG (MELO, 2013).

Figura 4. Modelagem hidrodinâmica a jusante da Barragem de Rejeito Tico-Tico na região do quadrilátero ferrífero



Fonte (MELO, 2013)

Após o rompimento da Barragem do Fundão, mapas de inundação passaram a ser um requisito mínimo nos planos de ações de emergências (BRASIL, 2017). Esses mapas exigem estudos apropriados especificamente para cada barragem, utilizando um conjunto

de variáveis ambientais do entorno.

Embora os mapas de inundações sejam fundamentais na gestão de riscos e prevenções de perdas de vidas humanas, a pluma de rejeito ainda pode ultrapassar as distâncias estimadas pelos modelos e alcançar ecossistemas com elevada vulnerabilidade socioecológica centenas de quilômetros no vale a jusante, como ocorreu no rompimento da Barragem do Fundão. Estimativas da distância máxima percorrida pela pluma de rejeito no vale a jusante envolve muitas incertezas em função de diversas variáveis, como obstáculos, topografia, tipo de falhas e reologia dos rejeitos (LARRAURI; LALL, 2018; RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008).

2.6 O Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE-MG)

O Zoneamento Ecológico Econômico é um dos instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) e um importante instrumento de organização do território. Esse instrumento estabelece medidas e padrões de proteção ambiental destinados a assegurar a qualidade ambiental dos recursos hídricos e do solo e a conservação da biodiversidade, garantindo o desenvolvimento sustentável e a melhoria das condições de vida da população (BRASIL, 2002). A premissa técnica do ZEE-MG é de subsidiar o planejamento e a orientação das políticas públicas e de Meio Ambiente, segundo critérios de sustentabilidade econômica, social e ambiental (SCOLFORO *et al.*, 2008).

Por ser a maior coleção de dados bióticos, físicos e sociais reunida, compilada, padronizada e publicada em Minas Gerais (CARVALHO *et al.*, 2008), o ZEE-MG tem subsidiado estudos técnicos (SAMARCO..., 2017) e científicos (CAMPOS, 2013; SILVA, 2014; LIMA, 2011). O ZEE-MG foi realizado pela Universidade Federal de Lavras com a colaboração da Fundação João Pinheiro e a participação de especialistas de diversas universidades, institutos, empresas de pesquisa, órgãos públicos e organizações governamentais (COPAM, 2008). Dessa maneira, buscou-se a participação democrática entre diferentes níveis de organização pública e a valorização do conhecimento científico multidisciplinar no processo de elaboração (BRAZIL, 2002).

Embora o ZEE-MG não substitua os estudos ambientais expressamente previstos na legislação estadual e federal, ele é utilizado como instrumento auxiliar em processos de licenciamento ambiental, de alteração de uso do solo, fiscalização, controle e monitoramento do uso dos recursos ambientais (COPAM, 2008).

Segundo Garcia (2012), o Zoneamento Ecológico Econômico oferece informações

técnicas georreferenciadas. O Relatório de Impacto Ambiental Integrado (RIMA/EIA), exigido no licenciamento corretivo do complexo Germano da mineradora Samarco S. A. para análise da viabilidade da retomada das operações após o rompimento da Barragem do Fundão, por exemplo, utiliza o ZEE-MG como base de informações complementares para caracterização do meio natural (SAMARCO, 2017).

Além da carta de risco ambiental, abrangendo setores da indústria, da mineração e agropecuário (CARVALHO et al., 2008); o ZEE-MG também contempla estudos de riscos dos impacto da disposição de resíduos sólidos e do lançamento de esgoto *in natura* nos corpos hídricos (MELLO et al., 2008). Porém, barragens de rejeito não foram contempladas no ZEE-MG. Então, no ano de 2009, o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA) desenvolveu estudo de risco ambiental por barragens de rejeito em escala regional para o estado de Minas Gerais (DÉSTRO et al., 2009). O estudo desenvolvido pelo IBAMA permite uma análise regional do problema, mas recomendam estudos em escalas menores.

A rede hidrográfica oficial do estado de Minas Gerais, compatível com as escalas espaciais de 1:50.000 e 1:100.000 (LUIZ; FARIA, 2013), fornece base para gestão de riscos a jusante de barragens de rejeito com uma melhor escala de representação espacial.

Após o rompimento da Barragem do Fundão, dados do censo demográfico foram disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em células com dimensões de 1km x 1km, nas áreas rurais, e dimensões de 200m x 200m, nas áreas urbanas (IBGE, 2016). Esses dados podem ser integrados às bases de dados do ZEE-MG com resolução espacial de 270m x 270m, gerando informações relevantes para gestão de riscos. Nesse sentido, os índices de Vulnerabilidade Natural e de Qualidade Ambiental do ZEE-MG também representam importantes atributos dos ecossistemas, podendo ser combinados às informações das populações humanas no entorno dos rios a jusante de barragens de rejeito para representar, em um único índice, a vulnerabilidade ripária socioecológica.

2.7 Vulnereabilidade Natural e Qualidade Ambiental do ZEE-MG

Os índices de vulnerabilidade Natural e de Qualidade Ambiental estão entre os produtos gerados no ZEE-MG e representam importantes atributos dos ecossistemas. Enquanto a Vulnerabilidade Natural representa “a incapacidade do meio-ambiente resistir ou recuperar-se de impactos antrópicos negativos”, a Qualidade Ambiental representa “a

capacidade de um dado ecossistema sustentar os seres vivos ali existentes” (SCOLFARO et al., 2008). Ambos índices foram desenvolvidos a partir da análise de um conjunto de variáveis, resultando em diversos indicadores (OLIVEIRA et al., 2008), pontuados de acordo com critérios estatísticos, com a condição de representar uma mudança para melhor ou para pior de uma determinada realidade. Depois de pontuados, esses indicadores foram combinados para representar um fator condicionante em determinado índice, o índice de Vulnerabilidade Natural (VN), por exemplo (SCOLFARO et al., 2008).

A elaboração do índice de VN considerou aspectos bióticos extraídos de levantamentos e estudos realizados sobre a flora e a fauna do estado de Minas Gerais, além dos aspectos físicos, como relevo, geologia, solos, água e clima. O Quadro 3 apresenta 23 indicadores de fatores condicionantes da vulnerabilidade biótica e abiótica utilizados no desenvolvimento do índice de VN (SCOLFARO et al., 2008).

Quadro 3 – Indicadores de fatores condicionantes da Vulnerabilidade Natural do ZEE-MG

Vulnerabilidade	Fatores Condicionantes	INDICADORES
1 BIÓTICA	1.1 Integridade da flora	1.1.1 Relevância regional de sistemas herbáceo-arbustivos
		1.1.2 Relevância regional de sistemas florestais
		1.1.3 Grau de conservação da vegetação
		1.1.4 Heterogeneidade espacial de fitofisionomias
		1.1.5 Prioridade para conservação da flora
	1.2 Integridade da fauna	1.2.1 Prioridade para conservação de mamíferos
		1.2.2 Prioridade para conservação de aves
		1.2.3 Prioridade para conservação de anfíbios e répteis
		1.2.4 Prioridade para conservação de invertebrados
	ABIÓTICA	2.1 Susceptibilidade dos solos à contaminação
2.1.2 Decomposição de matéria orgânica		
2.1.3 Contaminação ambiental		
2.2 Susceptibilidade de solos à erosão		2.2.1 Erodibilidade
		2.2.2 Chuvas
		2.2.3 Cobertura vegetal
		2.2.4 Relevo
2.3 Susceptibilidade geológica à contaminação das águas subterrâneas		2.3.1 Litologia
		2.3.2 Fraturas
		2.3.3 Falhas
2.4 Disponibilidade natural de água		2.4.1 Quantidade de água superficial
		2.4.2 Quantidade de água subterrânea
2.5 Condições climáticas		2.5.1 Evapotranspiração potencial
	2.5.2 Balanço hídrico climatológico	

Fonte: (SCOLFARO et al., 2008)

O índice de Qualidade Ambiental (QA) do ZEE-MG leva em consideração mapas da flora nativa, medidas diretas de sedimentação de sólidos, bem como modelagem matemática da qualidade das águas no estado de Minas Gerais. A partir desses estudos, três fatores condicionantes de QA foram sobrepostos com pesos de 40% para o grau de conservação da vegetação nativa, 30% para produção de sedimento e 30% para a qualidade das águas (CARVALHO et al., 2008). Destaca-se aqui que os índices de VN e QA também são utilizados no contexto das áreas prioritárias para conservação.

O componente humano também foi analisada no desenvolvimento do ZEE-MG por diversas dimensões (OLIVEIRA et al., 2008). Porém, optou-se nesse estudo apenas pela contagem populacional do censo demográfico atualizado e com melhor escala de representação espacial (IBGE, 2016) para estimar a densidade populacional no entorno dos rios como um proxy da Vulnerabilidade Social nas áreas a jusante de barragens de rejeito.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil informe 2015**: Encarte especial sobre a Bacia do Rio Doce - rompimento da Barragem em Mariana/MG. **Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos**. Brasília, DF. 2016b. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf>. Acesso em 17/10/2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de segurança de barragens 2015**. Brasília, DF: ANA 2016b. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cadastros/barragens/RelatoriodeSegurancadeBarragens.aspx>>. Acesso em 17/10/2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de segurança de barragens 2017**. Brasília, DF: ANA 2018. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cadastros/barragens/RelatoriodeSegurancadeBarragens.aspx>>. Acesso em 17/10/2018.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. **Geotechnical News**. p. 50 – 53, 2010. Disponível em: < <http://ksmpoject.com/wp-content/uploads/2017/08/Tailings-Dam-Failures-Last-100-years-Azam2010.pdf> >. Acesso em 17/10/2018.

AZEVEDO-SANTOS, V. M. et al. Removing the abyss between conservation science and policy decisions in Brazil. **Biodivers Conserv**. v. 26, n. 7, p. 1745 - 1722. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1316-x>.

BEJARANO, D; NILSSON, C; AGUIAR, F. C. Riparian plant guilds become simpler and most likely fewer following flow regulation. **Journal of Applied Ecology**. v. 55, n. 1, p.

365 – 376. 2017. doi: 10.1111/1365-2664.12949.

BERNADOU, A.; CZACZKES, T.J.; HEINZE, J. From inside to outside and back again: changing waste dump formation, defecation and worker localization in a clonal ant. **Insect. Soc.** (2018) v. 65, n. 1, p. 133 – 140, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00040-017-0594-3>.

BIDONE, E. et al. Mass balance of arsenic fluxes in rivers impacted by gold mining activities in Paracatu (Minas Gerais State, Brazil). **Environmental Science And Pollution Research.** v. 25, n. 9. p. 9085 - 9100, 2018. doi:10.1007/s11356-018-1215-z

BOWKER, L. N.; CHAMBER, D. M. In the Dark Shadow of the Supercycle Tailings Failure Risk & Public Liability Reach All Time Highs. **Environments.** v. 4, n. 4, p. 1 – 21, 2017. doi:10.3390/environments4040075.

BOWKER, L. N.; CHAMBERS, D. M. The risk, public liability, and economics of tailings storage facility failures. 2015. 56 p. Disponível em: < https://earthworks.org/cms/assets/uploads/archive/files/pubs-others/BowkerChambers-RiskPublicLiability_EconomicsOfTailingsStorageFacility%20Failures-23Jul15.pdf>. Acesso em 17/10/2018.

BRANQUINHO, A. A.; BRITO, D. Impact of dams on global biodiversity: A scientometric analysis. **Neotropical Biology and Conservation.** v. 11, n. 2, p. 101 – 109, 2016. doi: 10.4013/nbc.2016.112.07.

BRASIL. CAMARA. **Projeto de Lei nº 1.181**, de 03 de junho de 2003. Brasília, DF, 2003. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=118248>>. Acesso em: 09 de junho de 2018.

BRASIL. **Decreto nº 4.297**, de 10 de julho de 2002. Brasília, DF, 2002. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4297.htm>. Acesso em 17/10/2018.

BRASIL. **Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 09 de junho de 2018.

BRASIL. **Lei nº 6.938**, de 31 de agosto de 1981. Brasília, DF, 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm>. Acesso em 17/10/2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Portaria nº 70.389**, de 17 de maio de 2017. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/portaria-dnpm-no-70-389-de-17-de-maio-de-2017-seguranca-de-barragens-de-mineracao>>. Acesso em 09 de julho de 2018.20

CAGNIN, R. C. et al. Arsenic enrichment in sediment on the eastern continental shelf of Brazil. **Science of The Total Environment.** v. 607–608, p. 304–316, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.162>.

CAMPOS, I. C. **Risco ambiental associado à espécies da flora deficientes de dados em Minas Gerais:** novos argumentos para conservação. Dissertação (Mestrado em Ecologia

Conservação e Manejo da Vida Silvestre) - Universidade Federal de Minas Gerai. Belo Horizonte, 2013.

CAMPOS, M. B. et al. Environmental assessment of water from a uranium mine (Caldas, Minas Gerais State, Brazil) in a decommissioning operation. **Environmental Earth Sciences**. v. 62, n. 4, p. 857–863, 2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0572-9>.

CARVALHO, L. M. T. *et al.* Qualidade ambiental, risco ambiental e prioridade para conservação e recuperação. In: SCOLFORO, J. R. S; CARVALHO, L. M. T; OLIVEIRA, A. D. (Ed.). **Zoneamento ecológico Econômico de Minas Gerais**. Lavras: Editora UFLA, cap. 2, p. 21 - 36, 2008.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS). **Resolução nº 143**, de 10 de julho de 2012. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7231>. Acesso em 18/10/2018.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Disponível em: < <http://www2.mma.gov.br/port/conama/> >. Acesso em: 17/10/2018.

COPAM. **Deliberação Normativa nº 129**, de 27 de novembro de 2008. Conselho Estadual de Política Ambiental - COPAM. Belo Horizonte, 2008. Disponível em: < <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8733> >. Acesso em 17/10/2018.

COPAM (CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL). **Deliberação Normativa nº 217**, de 06 de dezembro de 2017. Belo Horizonte. Disponível em: < <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=45558> >. Acesso em 17/10/2018.

COPAM (CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL). **Deliberação Normativa nº 62**, de 17 de dezembro de 2002. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5008>>. Acesso em: 18/10/2018.

COOPER, A. R. et al. Assessment of dam effects on streams and fish assemblages of the conterminous USA. **Science of The Total Environment**. v. 586, n. , p. 879 – 889, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.067>.

DAVIES, M; MARTIN, T; LIGHTHALL, P. **Mine tailings dams: when things go wrong**. In: Proceeding of Tailing Dams. Association of State Dam Safety Officials, **US Committee of Large Dams**, Las Vegas, p. 261–273, 2000.

DECLARAÇÃO DO RIO DE JANEIRO. **Estudos Avançados**. v. 6, n. 15, p. 153 - 159. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141992000200013&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 17/10/2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40141992000200013>.

ECKE, F. et al. Meta-analysis of environmental effects of beaver in relation to artificial dams. **Environmental Research Letters**. v. 12, n. 11, p. 1 – 13. 2017. Disponível em: < <http://stacks.iop.org/1748-9326/12/i=11/a=113002> > Acesso em: 17/10/2018.

- ELLIS, E. C. Ecology in an anthropogenic biosphere. **Ecological Monographs**, v. 85 n. 3, p. 287 – 331, 2015. <https://doi.org/10.1890/14-2274.1>.
- ELLIS, E. C.; KAMANKUTTY, N. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Front Ecol Environ*. v. 6, n. 8, p. 439–447, 2008. doi: 10.1890/070062.
- FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Inventário de barragens do Estado de Minas Gerais**: ano 2017. Belo Horizonte: FEAM, 2018. 40 p.
- FEARNSIDE, P. M. Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry. **World Development**. v. 77, n. , p. 48 – 65, 2016. doi: 10.1016/j.worlddev.2015.08.015.
- FERNANDES, G. W. et al. The deadly route to collapse and the uncertain fate of Brazilian rupestrian grasslands. **Biodivers Conserv**. v. 27, n. 10, p. 2587 – 2603, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1556-4>.
- GARCIA, L. N. Experiência do Zoneamento Ecológico Econômico no Espírito Santo. In: Gonçalves, J. A.; Candido, A. B.; Neves, A. M. (Ed). **ZEE zoneamento ecológico-econômico**: base para o desenvolvimento sustentável do estado de São Paulo. Cap. 1, p. 57 - 63, 2012. Disponível em: < http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/portalezee/2016/12/SAO-PAULO_SMA_Semin%C3%A1rio-ZEE-SP.pdf>. Acesso em 17/10/2018.
- GARCIA, L. C. *et al.* **Brazil's worst mining disaster**: Corporations must be compelled to pay the actual environmental costs. **Ecological Applications**. v. 17, n. 1, p. 5- 9, 2016. <https://doi.org/10.1002/eap.1461>.
- GRILL, G. *et al.* An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. **Environmental Research Letters**. v. 10. n. 1, p. 1 – 15, 2015. doi:10.1088/1748-9326/10/1/015001.
- HUI, S. R; CHARLEBOIS, L; SUN, C . Real-time monitoring for structural health, public safety, and risk management of mine tailings dams. **CANADIAN JOURNAL OF EARTH SCIENCES**. v. 55, n. 3. 221 - 229. 2018. doi: 10.1139/cjes-2017-0186.
- IBGE -INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Grade estatística, 2016. Disponível em <ftp://geofp.ibge.gov.br/recortes_para_fins_estatisticos/grade_estatistica/censo_2010/grade_estatistica.pdf>. Acesso em 17/10/2018.
- ICOLD - INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **As barragens e a água no mundo**: um livro educativo que explica como barragens ajudam administrar a água no mundo. International Commission On Large Dams: ICOLD. 2008. 74 p.
- JACKSON, T. A. et al. Effects of bioavailable heavy metal species arsenic and acid drainage from mine tailings on microbial community sampled along a pollution gradient in freshwater ecosystem. **Geomicrobiology Journal**. v. 32, n. 8, p. 724–750, 2015. doi: 10.1080/01490451.2014.969412.
- JASEN, R. B . Dams and Public safety: **A water resources technical publication**. U. S.

Denver: Department of the Interior bureau of reclamation. 1983. p. 332. Disponível em: < <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/AZ1130.pdf> >. Acesso em: 17/10/2018.

LARRAURI, P. C.; LALL, U. **Tailings Dams Failures: Updated Statistical Model for Discharge Volume and Runout.** *Environments*. v. 5, n. 28, p. 1 - 10. 2018. doi:10.3390/environments5020028.

LEBLANC, M et al. 4,500-year-old mining pollution in southwestern Spain: long-term implications for modern mining pollution. *Economic Geology*. v. 95 n. 3, p. 655–662, 2000. doi: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.3.655>.

LIMA, L. P. Z. et al. Vulnerability analysis for implementation of conservation units in the Serra de Carrancas microregion, MG. *Cerne*. v. 17, n. 2, p. 151 - 159, 2011.

LIRA, N. A. et al. Fish passages in South America: an overview of studied facilities and research effort. *Neotropical Ichthyology*. v. 15, n. 2, p. 1 - 13, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1982-0224-20160139>.

LUIZ, C. H. P.; FARIA, S. D. Construção da base Otto-codificada em Minas Gerais: implementação da metodologia desenvolvida por Otto Pfafstetter (1989) para escalas 1:100.000 e 1:50.000. In: **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, 2013.

MAAVARA, T. et al. Global perturbation of organic carbon cycling by river damming. *Nature Communications*. v. 8, p. 1 – 10, 2017. doi: 10.1038/ncomms15347.

MACHADO, N. C. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da Barragem do Fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MADEJÓN, P. et al. **Soil-plant relationships and contamination by trace elements: A review of twenty years of experimentation and monitoring after the Aznalcóllar (SW Spain) mine accident.** *Science of The Total Environment*. v. 625, p. 50 - 63, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.277>.

MCCARTNEY, M. P; SULLIVAN, C. A; ACREMAN, M. C. Ecosystem Impacts of Large Dams. Background Paper Nr. 2. **International Union for Conservation of Nature and Natural Resources and the United Nation Environmental Programme.** 1999. 77 p.

MELLO, C. R. *et al.* Cenários simulados pelo impacto da disposição de lixo sólido e lançamento de esgoto in natura nos corpos de água. In: SCOLFORO, J. R. S; CARVALHO, L. M. T; OLIVEIRA, A. D. (Ed.). **Zonamento ecológico Econômico de Minas Gerais.** Lavras: Editora UFLA, cap. 6, p. 73 - 82, 2008.

MELO, L. P. R. **Análise comparativa de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos: caso hipotético da Barragem Tico-Tico.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MELLO, J. W. V et al. Preliminary evaluation of acid mine drainage in Minas Gerais State, Brazil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v. 30, n. 2, p.365-375,2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000200016>.

MEYBECK, M. Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 358, n. 1440, p. 1935–1955, 2003. <http://doi.org/10.1098/rstb.2003.1379>.

NEVES A.C.O. et al. **The Human Dimension in the Espinhaço Mountains: Land Conversion and Ecosystem Services**. In: Fernandes G. (ed). Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. Switzerland: **Springer**, p. 501–530. 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29808-5_21.

OLIVEIRA, C. F. S. O. *et al.* Componente humano. In: SCOLFORO, J. R. S; CARVALHO, L. M. T; OLIVEIRA, A. D. (Ed.). **Zoneamento ecológico Econômico de Minas Gerais**. Lavras: Editora UFLA, cap. 4, p. 77 - 100, 2008.

OLIVEIRA, M. S. *et al.* Conceitos e métodos estatísticos. In: SCOLFORO, J. R. S; CARVALHO, L. M. T; OLIVEIRA, A. D. (Ed.). **Zoneamento ecológico Econômico de Minas Gerais**. Lavras: Editora UFLA, cap. 1, p. 7 - 42, 2008.

PENA, J. C. C. et al. Impacts of mining activities on the potential geographic distribution of eastern Brazil mountaintop endemic species. **Perspectives in Ecology and Conservation**. v. 15, n. 3, p. 172 – 178, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.07.005>.

PIASENTIN, C. A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI : cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: **Comitê Brasileiro de Grades Barragens**. 2011. 524 p.

RICHTER, B. D. et al. **Lost in Development's Shadow: The Downstream Human Consequences of Dams**. **Water Alternatives**. v. 3, n. 2, p. 14 - 42, 2010.

RICO, M.; BENITO, G.; DÍEZ-HERRERO, A. Floods from tailings dam failures. **Journal of Hazardous Materials**. v. 154, n. 1, p. 79– 87, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.110>.

RICO, M. et al. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. **Journal of Hazardous Materials**. v. 152, n. 2, p. 846 -852, 2008. Disponível em:

<https://ac.els-cdn.com/S0304389407010837/1-s2.0-S0304389407010837-main.pdf?_tid=af7da901-dd47-4759-84b2-6de917a3ae1d&acdnat=1539890667_74d2457ee1a2433c388d88f5a897ff9>. Acesso em 17/10/2018.

SAMARCO MINERAÇÃO S. A. **Relatório de impacto ambiental: EIA/RIMA integrado do complexo Gernamo**. Belo Horizonte: Samarco. Disponível em: <<https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2017/11/rima-samarco-2017.pdf>>. Acesso em 17/10/2018.

SANTOS, R. S. P.; WANDERLEY, L. J. **Dependencia de barragens, alternativas tecnológicas, e a inanição do Estado:** Repercussões sobre o monitoramento de barragens e o licenciamento do Fundão. Cap. 3, p. 87 - 137. In: ZONTA, M.; TROCATE, C. (Org.). **Antes fosse mais leve a carga:** reflexões sobre o desastre da Samarco/Vale/BHP Billiton. Marabá, PA: **Iguana**, 2016.

SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, A.D.; CARVALHO, L.M.T. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado de Minas Gerais:** componentes geofísicos e bióticos. Lavras: Editora UFLA, 2008

SEMAD (SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL). **Instrução de Serviço SISEMA nº 02**, de 23 de abril de 2018. Belo Horizonte. Disponível em: http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2017/ASNOP/Instru%C3%A7%C3%A3o_d_e_Servi%C3%A7o_Sisema_n%C2%BA_02-2017_2017.04.07-novo.pdf. Acesso em 17/10/2018.

SILVA, A. T. et al. The future of fish passage science, engineering, and practice. **Fish and Fisheries**. 2018;v. 19, p. 340–362, 2018. doi: 10.1111/faf.12258.

SILVA, V. A. **Mapa de solos, conhecimento de campo, inventário florestal e zoneamento ecológico-econômico como base para a aptidão agrícola das terras em Minas Gerais elaborada em SIG.** Tese (Doutorado em Ciências dos Solos) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2014.

SOKOLOW, S. H. et al. Nearly 400 million people are at higher risk of schistosomiasis because dams block the migration of snail-eating river prawns. **Philosophical Transactions B**. doi: 10.1098/rstb.2016.0127.

STRACHAN, C.; GOODWIN, S. The role of water management in tailings dam incidents. **From Tailings and Mine Waste. Proceedings of the Tailings and Mine Waste Conference, University of British Columbia**, Oct. 26-29, 2015. 14 p. <http://dx.doi.org/10.14288/1.0320948>.

VÖRÖMARTY, C. J. et al. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**. v. 467, 2010. doi:10.1038/nature09440.

WILKES, M. A. et al. Not just a migration problem: Metapopulations, habitat shifts, and gene flow are also important for fishway science and management. **River Research and Applications**. p. 1 – 9, 2018. Doi: 10.1002/rra.3320.

WISE - World Information on Energy. **Chronology of major tailings dam failures:** from 1960 to last updated 29 aug. 2018. Disponível em: < <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html> >. Acesso em 17/10/2018.

ZARFL, C. et al. A global boom in hydropower dam construction. **Aquatic Sciences**. v. 77, n. 1, p. 161 – 170, 2015. DOI 10.1007/s00027-014-0377-0.

ZHAO, Q. et al. How sulfate-rich mine drainage affected aquatic ecosystem degradation in northeastern China, and potential ecological risk. **Science of The Total Environment**. v. 609, p. 1093-1102, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.276>.

Áreas de risco ambiental por barragens no Estado de Minas Gerais. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 5193-5200, 2009.

Segunda Parte - Artigo

VULNERABILIDADE RIPÁRIA SOCIOECOLÓGICA A JUSANTE DE BARRAGENS DE REJEITO NO ESTADO MINAS GERAIS

Fernando Balbino de Souza^{1,2}, Paulo Santos Pompeu¹, Luis Marcelo Tavares de Carvalho².

¹ Departamento de Ecologia, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, Lavras - MG, Brasil.

² Laboratório de Estudos e Projetos em Manejo Florestal, Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, Lavras - MG, Brasil.

(Artigo redigido conforme normas do formato da UFLA que segue a norma para publicação periódica científica NBR 6022 (ABNT, 2003a))

RESUMO

Barragens de rejeitos são consideradas como unidades de tratamento e disposição final de resíduos sólidos, utilizadas no controle de poluentes pelo setor produtivo. Mas essas estruturas podem comprometer a biodiversidade e a segurança hídrica de milhares de pessoas centenas de quilômetros no vale a jusante, se o controle de poluentes não forem efetivos. No Brasil, o Estado de Minas Gerais possui o maior número de barragens de rejeitos e também é a unidade da federação com o maior número de registros de rompimento destas estruturas. Diversos estudos avaliaram o risco ambiental do setor produtivo em escala regional. Mas o rompimento da barragem do Fundão, em 05 de novembro de 2015, reforçou a necessidade de informações mais precisas para gestão de riscos no Estado. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo caracterizar a Vulnerabilidade Ripária Socioecológica (VRSE) a fim de gerar informações relevantes para a gestão de riscos nos rios e nas zonas ripárias adjacentes a jusante. Os índices de Qualidade Ambiental (QA) e de Vulnerabilidade Natural (VN), disponibilizados pela aplicação SIGWEB, desenvolvidos no Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE- MG), foram integrados às bases de dados do censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), gerando um Índice de Vulnerabilidade Ripária Socioecológica (IVRSE), apresentados em uma melhor escala de representação espacial para todas as unidades de planejamento e gestão dos recursos hídricos. As análises realizadas no centro dos rios a partir das cartas de QA e VN destacaram uma maior proporção no comprimento dos rios com valores Alto e Muito Alto nos IVRSE, comparados com as análises realizadas nas zonas ripárias a jusante. As áreas no entorno dos rios onde concentram as maiores densidades de populações humanas também contribuíram nos valores mais altos nos IVRSE. Esses índices forneceram duas perspectivas mais precisas das condições de vulnerabilidade socioecológica a jusante de barragens de rejeitos no Estado Minas Gerais, suprimindo a lacuna de informações para gestão de riscos, observando o princípio da precaução.

Palavras-chave: Avaliação de Impactos Socioambientais. Mitigação de Efeitos Adversos. Modelagem de Sistemas Ambientais. Rompimento de Barragens de Rejeito.

ABSTRACT

Tailings storage facilities are units of treatment and final disposal of solid waste used to control pollutants by the productive sector. But these structures can compromise the biodiversity and water security of thousands of people hundreds of kilometers downstream, if pollution control is not effective. In Brazil, the state of Minas Gerais has the largest number of tailings dams and is also the federation unit with the highest number of rupture records of these structures. Several studies evaluate the environmental risk of the productive sector on a regional scale in the state of Minas Gerais. But the breach of the Fundão dam on 05 november 2015 reinforced the need to comply with the precautionary principle for decision-making in risk management in state of Minas Gerais. In this sense, to characterize of the Socioecological Riparian Vulnerability could generate relevant information to decision-making in risk management of rivers and riparian areas downstream of tailings dams in the state of Minas Gerais. The Environmental Quality and Natural Vulnerability indexes provided by the SIGWEB application developed in the Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE-MG) were integrated into the databases of the Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) in a single index of Socioecological Riparian Vulnerability with the best scale of spatial representation of the official hydrography of the state of Minas Gerais for all the units of planning and management of watersheds in Minas Gerais. The results show that the Environmental Quality and Natural Vulnerability indexes has higher proportion of High and Very High values in the Socioecological Riparian Vulnerability indexes downstream of tailings dams on the cells at the center of the hydrography, when compared with analyzes performed at a riparian zones. The areas around the rivers where the highest densities of human populations are concentrated also contributed to the higher values in the IVRSE. These indexes provided two more accurate perspectives of the socioecological vulnerability conditions downstream of tailings dams in Minas Gerais, supplying the information gap for risk management, observing the precautionary principle.

Keywords: Environmental Modeling. Mitigation of Adverse Effects. Socio-Environmental Impacts Assessment. Tailing Dam Failure.

1 Introdução

A construção de barragem é uma das atividades antrópicas milenares e está entre as maiores obras concluída já realizadas pelo homem. Essas estruturas têm relação com o surgimento e declínio de civilizações (JAZEN, 1983). Barragens têm um papel chave no desenvolvimento humano, como abastecimento de águas, controle de cheias, geração de energia elétrica e melhoria das condições econômicas (ICOLD, 2008; MCCARTNEY; SULLIVAN; ACREMAN, 1999). A partir da década de 1930, barragens também passaram a ser adotadas como medidas de controle de poluentes pelo setor de mineração no Brasil, mas, raramente, existiam engenheiros ou critérios técnicos nas fases de construção e operação. Consequentemente, poucas barragens permaneciam estáveis nos períodos das fortes chuvas (PIASENTIN, 2011). Embora a probabilidade de rompimento de barragens de rejeito esteja em declínio, a severidade dos incidentes está aumentando (AZAM; LI, 2010; BOWKER; CHAMBERS, 2015; 2017).

Barragens convencionais alteram a composição (MAAVARA et al., 2017), a distribuição das águas superficiais (PEKEL et al., 2016), a conectividade longitudinal (GRILL et al., 2015; MAAVARA et al., 2017; FULLER; DOYLER; STRAYER, 2015) e lateral dos rios, afetando diversos componentes nos ecossistemas ripários (BEJARANO; NILSSON; AGUIAR, 2017; BEJARANO; NILSON; AGUIAR, 2018; CHEN et al., 2018), onde incluem populações humanas (SOKOLOW et al., 2017) dependentes dos serviços ecossistêmicos (RICHTER et al., 2010). O número de barragens maiores que 0.01 ha (100m²) é cerca 16.7 milhões (LEHNER et al., 2011) e outras 3.700 ainda estão planejadas ou em construção, a maioria em países em desenvolvimento (ZARFL et al., 2015). Efeitos ambientais de projetos em larga escala, como mineração e barragens, podem ser destrutivos em biomas altamente fragmentados, como o Cerrado e a Mata Atlântica, onde mais perdas e degradação da vegetação nativa podem dificultar as oportunidades para restaurar a conectividade ecológica e prevenir extinções (FERREIRA et al., 2014).

O Brasil é um dos países que detém o maior número de publicações científicas sobre impactos de barragens convencionais sobre a biodiversidade (BRANQUINHO; BRITO, 2016), incluindo medidas mitigadoras (WILKES et al., 2018; POMPEU; AGOSTINHO; PELICICE, 2012; SUZUKI et AL., 2017; SILVA et al., 2018; LIRA

et al., 2017).

Barragens de rejeito são uma das medidas utilizadas na mitigação de impactos da mineração, adotadas no Brasil a partir do início do século XX (PIASENTIN, 2011). Porém, segundo Jazen (1983), o risco de barragens é um dos fardos para as civilizações. A probabilidade de rompimento de barragens de rejeito (1,2%) é duas ordens superiores que a taxa de rompimento de barragens convencionais (0,01%) (AZAM; LI, 2010). O maior número de registros de rompimento de barragens de rejeito ocorreu nos Estados Unidos (STRACHAN; GOODWIN, 2015) e no Brasil a maioria dos registros ocorreu no estado de Minas Gerais (ANA, 2016), onde se concentra a maior quantidade de barragens de rejeitos (ANA, 2016a).

Os rompimentos de barragens de rejeito em diversos lugares mostram o potencial destrutivo deste tipo de empreendimento, como as barragens de rejeito de chumbo-zinco na Bulgária em 1966 (488 óbitos), rejeitos de cobre no Chile em 1965 (300 óbitos) e rejeitos de ferro na China em 2008 (277 óbitos) (CARMO et al. 2017). Esses desastres podem destruir um vilarejo inteiro em cerca de dez minutos, como ocorreu em uma mina de florita na Itália em 1985 (268 óbitos e 20 feridos) (LUINO; GRAFF, 2012).

Além dos impactos negativos às populações humanas, a biodiversidade também pode ser gravemente afetada. O rompimento de uma barragem de rejeito em Aznalcóllar, Espanha, inundou o Rio Guadiamar com cerca de 4.5 milhões m³ de rejeitos rico em metais pesados (CABRERA et al., 1999; KRAUS; WIEGAND, 2006), impactando atividades socioeconômicas (MATEOS, 2001), os solos (MARTÍN et al., 2007; KRAUS; WIEGAND, 2006; CABRERA et al., 1999), as águas superficiais (KRAUS; WIEGAND; 2006; OLÍAS et al., 2006) e subterrâneas (FERNANDÉZ et al., 2005), a fauna (MIGUEL et al., 2013), com a bioacumulação de elementos traços-tóxicos na fauna estuarina dez anos após o desastre (TORNERO, ARIAS; BLASCO, 2011).

O rompimento da Barragem do Fundão, da mineradora Samarco, em 05 de novembro de 2015, é considerado um dos maiores desastres socioecológico da história recente do Brasil (CARMO et al., 2017; FERNANDES et al., 2016), cujas assinaturas dos impactos podem permanecer nos ecossistemas por milênios (LEBLANC et al., 2000). O desastre destruiu o distrito de Bento Rodrigues e provocou desaparecimentos, 19 mortes e desabrigou mais de 600 pessoas, além da perda de

serviços ecossistêmicos na Bacia do Rio Doce (ESCOBAR, 2015; NEVES et al., 2016) estimados em US\$ 521 de milhões por ano (GARCIA et al., 2016). Estudos também mostram aumento nos casos de doenças em populações humanas em municípios próximos ao epicentro do desastre (VORMITTAG et al., 2017) até municípios com mais de 600 km de distância da Barragem do Fundão (ROCHA et al., 2016).

O rompimento da Barragem do Fundão degradou mais de 600 km dos cursos d'água a jusante (CARMO et al., 2017) e cerca de 1.469 hectares de vegetação nativa, sendo 90% de habitats ripários (FERNANDES et al., 2016). Esses habitats são protegidos por lei como Áreas de Preservação Permanente (APP), com a “função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger os solos e assegurar o bem estar das populações humanas” (BRASIL, 2012). A resiliência dos ecossistemas aquáticos depende das APP e o déficit na bacia do Rio Doce de 716.000 ha (PIRES et al., 2017) dificulta a recuperação dos ecossistemas após o desastre (BOLZAN, 2017). Além disso, a pluma de rejeito avançou centenas de quilômetros oceano adentro (MARTA-ALMEIDA et al., 2016), sobrepondo áreas com ocorrência de espécies raras, pouco estudadas e ameaçadas (MIRANDA; MARQUES, 2016).

Modelagem dinâmica para análise de ruptura de barragens, tanto retrospectiva (MACHADO, 2017) quanto prospectiva (MELO, 2013), é uma das abordagens exigidas nos planos de ações de emergência e análises de riscos. Essas abordagens dependem de parâmetros estimados a partir de casos históricos de rupturas. Porém os casos que não são notificados dificultam a melhoria desses parâmetros (RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008; LARRAURI; LALL, 2018; STRACHAN; GOODWIN, 2015), como ocorreu recentemente em 17 de fevereiro de 2018 com a barragem da indústria Norsk Hydro Brasil - Hydro Alunorte no estado do Pará (IEC, 2018; WISE, 2018; TJPA, 2018).

Análises de risco ambiental realizadas no estado de Minas Gerais em escala regional, abrangendo os setores industrial, agropecuário e de mineração (CARVALHO et al., 2008), ou abordando o inventário de barragem de rejeitos de Minas Gerais, apresentam uma visão geral do problema (DÉSTRO et al., 2009).

Contudo, o rompimento da Barragem do Fundão reforçou a necessidade de estudos em escalas menores. Após o rompimento da Barragem do Fundão, estudos de

inundação, zoneamento das áreas de auto-salvamento, zoneamento de segurança secundária e análises da vulnerabilidade em áreas potencialmente afetadas tornaram-se exigências mínimas nos Planos de Segurança de Barragens de rejeito da mineração (BRASIL, 2017).

Segundo De Lange (2010), a avaliação da vulnerabilidade dos ecossistemas é uma valiosa ferramenta para gestão de riscos, preenchendo a lacuna entre abordagem ecotoxicológica e o complexo sistema de efeitos na qualidade de um ecossistema em exposição. A identificação de áreas onde a vulnerabilidade social e a vulnerabilidade ecológica são elevadas é útil na identificação de *hotspots* de vulnerabilidade Socioecológico (THIAULT et al., 2018).

As bases de dados do Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE-MG) permitem análises da Qualidade Ambiental (QA) e da Vulnerabilidade Natural (VN) em diversas escalas espaciais. Essas análises podem ser confrontadas com cenários relacionados à expansão de rodovias (CARVALHO et al., 2008), da mineração (CURE et al., 2008) e de hidroelétricas (CARVALHO et al., 2008). Esses estudos demonstram a importância do compartilhamento público de dados e informações, como o Inventário de barragens de Minas Gerais (FEAM, 2016), o ZEE-MG (SCOLFORO et al., 2008) e as bases de dados do censo demográfico fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo caracterizar a Vulnerabilidade Ripária Socioecológica a jusante de barragens de rejeito, tomando a hidrografia oficial do estado de Minas Gerais nas escalas de 1:50.000 e 1:100.000 (LUIZ; FARIA, 2013) como base para representação de atributos ecológicos e social em um único índice.

2 Material e Métodos

2.1 Área de estudo

O Estado de Minas Gerais está localizado na região sudeste do Brasil e é o segundo estado mais populoso, com 21.119.536 habitantes. Além disso, é um dos estados brasileiros com o maior número de municípios, que estão agrupados em 70 regiões geográficas imediatas e 13 regiões geográficas intermediárias (IBGE, 2017). O município de Belo Horizonte é a capital do estado e pólo das regiões geográficas

imediatas e intermediárias mais populosas, com populações de 2.523.794, 5.234.732 e 6.241.482 habitantes, respectivamente (IBGE, 2017). A mineração é uma das atividades econômicas mais importantes nesta região desde o período colonial (DORR, 1969; MACHADO; FIGUEIROA, 2001).

Minas Gerais é o segundo estado do Brasil que mais exporta. Enquanto o país teve déficit comercial de 3,96 bilhões de reais em 2014, o saldo positivo das exportações de foi de 18,32 bilhões de reais no mesmo período. O grupo de commodities contribuiu com 69,2% das exportações do estado, sendo 48% apenas referentes ao setor de mineração (EXPORTAMINAS, 2015). A comercialização pelo Brasil das principais substâncias metálicas no ano de 2015 foi de 67,5 bilhões de reais, sendo 48,66% apenas pelo estado de Minas Gerais (DNPM, 2016). A maior produção de minerais metálicos ocorre na região central do estado, com uma área em torno de 7.000 km², incluída entre os paralelos 19°45'S e 20°30'S e entre os meridianos 43°22'30''W e 44°7'30'', conhecida como quadrilátero ferrífero (DORR, 1969).

A gestão dos resíduos sólidos gerados pela atividade produtiva em Minas Gerais é feita pela Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), que disponibiliza anualmente relatórios do inventário desses resíduos. Em 2016 foram inventariados um total de 49.282.120,57 toneladas de resíduos industriais, sendo que 7,21% foram destinados em barragens de rejeito (FEAM, 2017). O número de barragens de rejeito contabilizado pela FEAM no ano 2016 foi de 737, a maioria do setor de mineração (FEAM, 2017).

A Caatinga, o Cerrado e a Mata Atlântica são os principais biomas que ocorrem em Minas Gerais. Em função do excepcional endemismo de espécies e da elevada pressão antrópica sobre os dois últimos biomas, eles estão entre os 25 *hotspots* mundiais para conservação da biodiversidade (MYERS et al., 2000), representando, juntos, cerca de 98% do território de Minas Gerais. Nasceram em Minas Gerais diversos rios com importância local, regional e internacional, de maneira que o estado é considerado caixa d'água do Brasil (FEAM, 2014).

Para conservação da biodiversidade em Minas Gerais são desenvolvidos diversos estudos e projetos em várias escalas de análise pelo poder público, ou em parceria com a iniciativa privada (CARVALHO et al., 2008; CALLISTO et al., 2014; DRUMOND et al., 2005), que geram robustas bases de dados para o desenvolvimento

de novas pesquisas.

A avaliação das condições ecológicas no entorno de empreendimentos hidroelétricos da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), por exemplo, foi desenvolvida em parceria com a Universidade Federal de Lavras (UFLA), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC - Minas), Centro Tecnológico de Minas Gerais (CEFET-MG), Oregon State University (OSU) e United State Environmental Protection Agency (US- EPA), resultando na identificação de 74 novas espécies de peixes (LEAL et al., 2014), bem como na avaliação da Vulnerabilidade Ambiental nas bacias hidrográficas onde estão localizado os respectivos empreendimentos (CALLISTO et al., 2014).

Em escala mais ampla, parcerias entre o poder público, Organizações da Sociedade Civil e a iniciativa privada permitiram que especialistas das diversas áreas do conhecimento construíssem juntos a maior base de dados bióticos, físicos e sociais reunida, compilada, padronizada e publicada no estado (CARVALHO et al., 2008): o Zoneamento Ecológico Econômico do Estado de Minas Gerais (ZEE-MG) (SCOLFORO et al., 2008). Este banco de dados serve como base para diversos estudos científicos (CAMPOS, 2013; SILVA, 2014; LIMA, 2011) e como recomendações técnicas georreferenciadas (GARCIA, 2012).

2.2 Bases de Dados

O ZEE-MG foi desenvolvido sob os conceitos de que a “Vulnerabilidade Natural é a incapacidade do meio-ambiente resistir ou recuperar-se de impactos antrópicos negativos” e a “Qualidade Ambiental é a capacidade de um dado ecossistema sustentar os seres vivos ali existentes, incluindo o homem” (SCOLFORO et al., 2008). Os índices de Vulnerabilidade Natural (VN) e Qualidade Ambiental (QN) foram desenvolvidos a partir da análise de um conjunto de variáveis, resultando em diversos indicadores (OLIVEIRA et al., 2008), pontuados de acordo com critérios estatísticos, com a condição de representar uma mudança para melhor ou para pior de uma determinada realidade. Depois de pontuados, esses indicadores foram combinados para representar um fator condicionante em determinado índice, o índice de VN, por exemplo, (SCOLFARO et al., 2008a).

O desenvolvimento do índice de VN levou em consideração aspectos bióticos extraídos de levantamentos e estudos realizados sobre clima, geologia, relevo, solos,

águas, fauna e flora (SCOLFORO et al., 2008). Mapas da flora nativa e medidas diretas de sedimentação nas bacias hidrográficas de Minas Gerais, bem como modelagem matemática para simulação da poluição e autodepuração dos corpos d'águas, também foram utilizados no índice de QA (CARVALHO et al., 2008).

Em função da característica multidisciplinar do ZEE-MG, as metodologias detalhadas para gerar os índices de VN e de QA podem ser consultadas em diversos capítulos da obra “Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado de Minas Gerais” (SCOLFORO et al., 2008), bem como a metodologia utilizada pelo IBGE para disseminação de dados do Censo Demográfico de 2010 pode ser consultada no relatório “Grade Estatística” (IBGE, 2016).

Para análise da Vulnerabilidade Ripária Socioecológica (VRSE), extraíram-se informações nas cartas de VN e QA das base de dados do ZEE-MG, cuja resolução espacial é de 270m x 270m (SCOLFORO et al., 2008). O número de pessoas no entorno dos rios a jusante de barragens de rejeito foi utilizado como um proxy para a vulnerabilidade social, obtido a partir de análises realizadas na base de dados do Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE, 2016). Os dados fornecidos pelo IBGE foram disponibilizados no modelo de dados vetorial, em grades, com dimensão espacial de 1km x 1km, nas áreas rurais, e de 200m x 200m, nas áreas urbanas. Os dados foram todos convertidos para o mesmo sistema de referência espacial utilizados no ZEE-MG, com modelo de dados matricial, resolução espacial de 270m x 270m, projeção Albers e Datum SAD1969. No entanto, a rede hidrográfica oficial do estado de Minas Gerais, com modelo de dados vetorial, compatível com as escalas espaciais de 1: 25.000 e 1: 50.000 (LUIZ; FARIA, 2013) foi utilizada para melhor representação gráfica dos resultados finais.

A base de dados do “inventário de barragens de Minas Gerais: ano 2015” (FEAM, 2016) foi utilizada para localizar a rede hidrográfica a jusante potencialmente afetadas por barragens de rejeito. Após a identificação de todos os rios a jusante, também definiu-se o tamanho das áreas no entorno dos rios potencialmente afetadas. As área no entorno dos rios utilizadas na caracterização da VRSE a jusante de barragens de rejeito foram definidas a partir de revisões bibliográficas, bem como análises espaciais e processamento digital de duas imagens do satélite Landsat/OLI 8, órbita/ponto 217/74, com resolução espacial de 30 metros, cujas datas de aquisição foram 11/10/2015 e 11/12/2015. O pré-processamento e as

análises dos dados foram realizadas com os softwares Microsoft Excel, ArcGIS e AutoCAD.

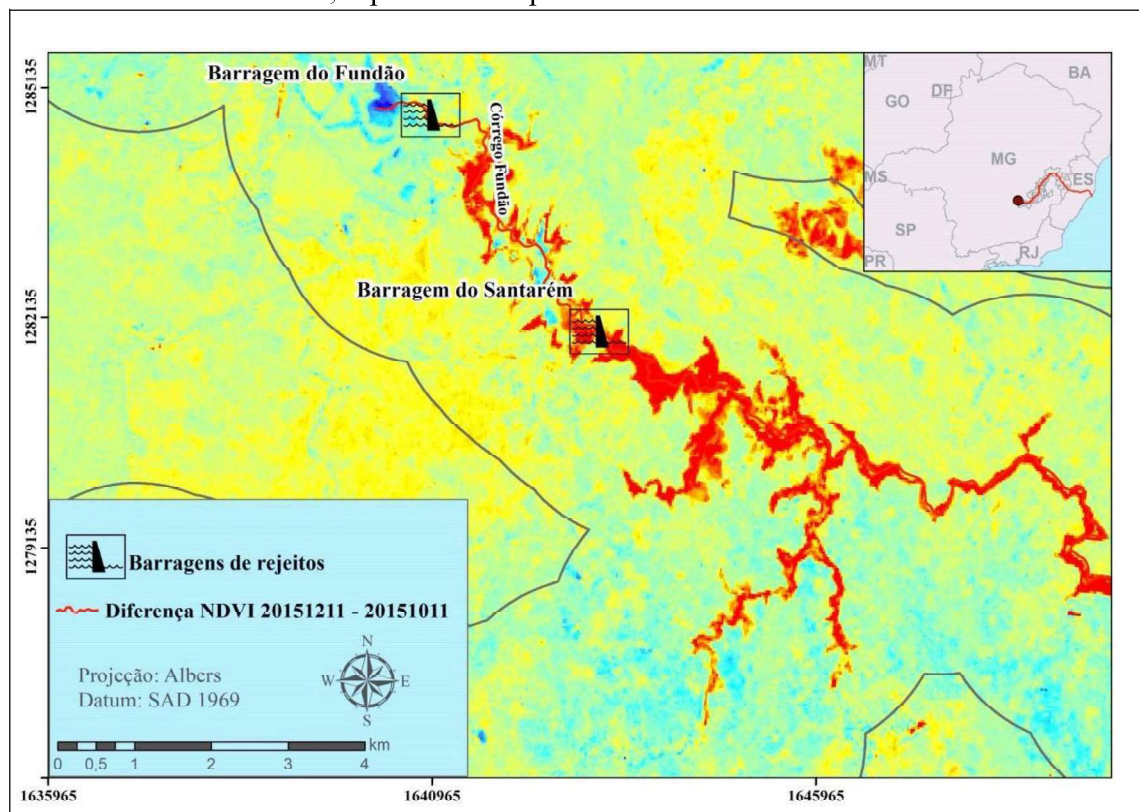
3 Análises

3.1 Definição da extensão das zonas ripárias a jusante de barragens

Considerando a dificuldade de definir as áreas potencialmente afetadas por barragens de rejeito (RICO; BENITO; DÍEZ-HERRERO, 2008; LARRAURI; LALL, 2018), exigindo análises de parâmetros específicos caso a caso (DNPM, 2017); essas áreas foram estudadas a partir da adoção de uma medida padrão simplificada. Portanto, estudos prévios realizados para avaliação da vulnerabilidade socioecológica de ecossistemas (THIAULT et al., 2017), bem como análises das áreas no entorno dos rios a jusante da Barragem do Fundão afetadas pela lama de rejeito, serviram como base para adoção de uma medida de área.

Portanto, calculou-se a diferença do Índice de Vegetação Diferença Normalizada (NDVI, sigla em inglês) de duas imagens do satélite Landsat 8, antes e após o rompimento da Barragem do Fundão, com datas de aquisição em 11/10/2015 e 11/12/2015, a fim de detectar as áreas no entorno dos rios mais afetadas pela lama de rejeito. Após a identificação dessas áreas, verificou-se por meio de análises de *buffer* que um raio de 2 km a partir centro dos rios abrangeu todas as afetadas pela lama. A Figura 1 ilustra os resultados desta análise.

Figura 1 – Mudança no uso e ocupação dos solos (representado pela cor vermelha) após o rompimento da barragem do fundão, destacando um radio de 2 km a partir dos centro dos rios, representados pela linha com a cor cinza.



Fonte: (USGS, 2018)

As cores em vermelho próximas aos rios a jusante da Barragem do Fundão destacam o desmatamento causado pela lama de rejeitos. Embora outros estudos utilizaram um raio de até 10 km para estimar impactos de barragem às populações humanas (RICHTER, 2010), verificou-se que um raio de até 2 km no entorno dos rios abrange as áreas mais afetadas pela lama de rejeito e adotaram-se essa medida padronizada nas análises na Vulnerabilidade Ripária (VRSE) a jusante de Barragens de Rejeitos em Minas Gerais.

3.2 Quantificação e representação da vulnerabilidade social a jusante de barragens

Definido a extensão das zonas ripárias a ser analisada na caracterização da VRSE, então, somaram-se o número de pessoas presentes nessas áreas e representaram-se os resultados pelo modelo de dados matricial com resolução espacial de 270 x 270 m.

Cada pixel foi interpretado como um índice de Densidade Populacional (DP),

utilizado como um proxy da Vulnerabilidade Social (VS). O Quadro 1 mostra as faixas de valores quantitativos do número de pessoas no entorno dos rios agrupadas em intervalo de classes geométrica, bem como os valores qualitativos relacionados, utilizados como um proxy da Vulnerabilidade Social a jusante de barragens de rejeito. Os resultados dessa etapa foram combinados com dados e informações extraídos do ZEE-MG, depois de analisados por dois procedimentos distintos.

Quadro 1 -Relação entre a densidade populacional e os respectivos valores da vulnerabilidade social no entorno dos rios.

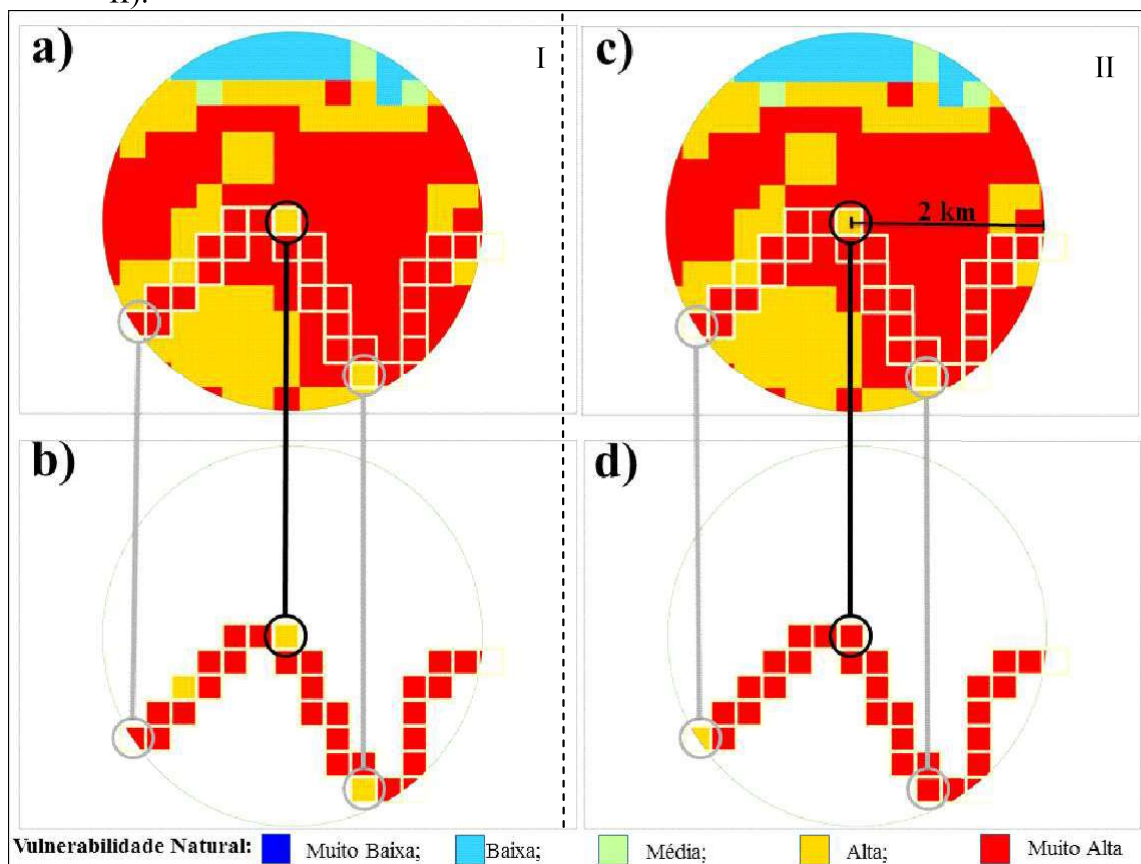
Número de pessoas no entorno dos rios em áreas com raio de até 2 km a partir do centro dos rios	Vulnerabilidade Social
9.883 – 174.745	Muito Alta
553 – 9.882	Alta
32 – 552	Média
3 - 31	Baixa
0 - 2	Muito Baixa

Fonte: dados (IBGE, 2016), Do autor.

3.3 Extração de informações ecológicas das bases de dados do ZEE-MG

Em seguida, extraiu-se dados e informações ecológicas da base de dados do ZEE- MG nos rios e nas zonas ripárias. As análises foram feitas por dois métodos distintos: considerando apenas o centro dos rios (I) e considerando as condições mais frequentes nas zonas ripárias em um raio de até dois 2 km (II). A Figura 2 ilustram os dois procedimentos realizados na carta de Vulnerabilidade Natural para as análises realizadas nos rios (Figura 2, a e b) e nas zonas ripárias (Figura 2, c e d). Os mesmos procedimentos utilizados nesta etapa também foram adotados na extração de informações da carta de Qualidade Ambiental.

Figura 2 – Ilustra as análises realizadas na Carta de Vulnerabilidade Natural do ZEE-MG no centro dos rios, a e b, (método I) e nas zonas ripárias, c e d (método II).



Fonte: (SCOLFORO, 2008), do autor (2018).

Cada uma das análises (I e II) resultou em distintos valores nos índices de Vulnerabilidade Natural e de Qualidade Ambiental: uma faixa de valores para os rios e outra para as zonas ripárias adjacentes. Enquanto o método I representa os valores dos índices de VN e QA no centro dos rios, o método II representa as condições de VN e QA mais frequentes nas zonas ripárias, considerando um raio de até 2 km a partir do centro dos rios.

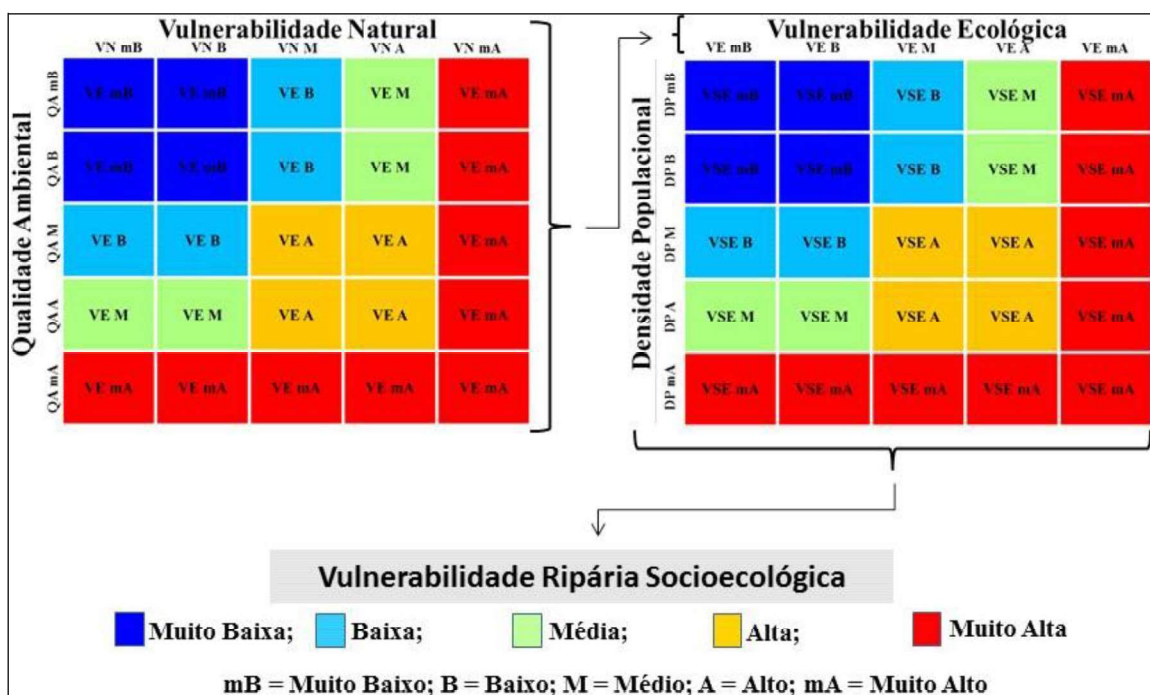
3.4 Agregação de informações ecológicas e social em um Índice de Vulnerabilidade Ripária Socioecológico (IVRSE)

Os valores qualitativos resultantes das análises precedentes foram combinados a partir de uma matriz de avaliação, adaptada de outro estudo (PELLICANI et al.,

2017). Embora a matriz de avaliação seja adaptada de estudo de impacto ambiental de outra natureza, o mesmo procedimento também foi utilizado nas análises de impacto ambiental de barragens (GRILL et al., 2015). Pelo princípio fundamental da contagem, a combinação dos cinco valores qualitativos (Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta) da VN, QA e DP resultam em 125 combinações distintas. A matriz de avaliação facilita a visualização dos parâmetros agregados nos Índices de Vulnerabilidade Ripária Socioecológico (IVRSEs) a jusante das barragens.

Os procedimentos adotados nestas análises estão representados na Figura 3. A combinação da VN e QA resultou num indicador de Vulnerabilidade Ecológica (VE). Esta análise foi realizada para ambos os métodos: considerando apenas os índices de VN e QA no centro dos rios (método I, Figura 2, a e b) e considerando as condições mais frequentes nas zonas ripárias (método II, Figura 2, c e d). Os indicadores de VE analisados por cada um dos métodos foram combinados com a proxy para a Vulnerabilidade Social (VS), a fim de caracterizar a Vulnerabilidade Ripária Socioecológica (VRSE). Cada uma das análises realizadas pela combinação da VN e QA, utilizando o método I e utilizando o método II, após a combinação com o índice de Densidade Populacional, utilizado como um proxy para a Vulnerabilidade Social, geraram distintos Índices de Vulnerabilidade Ripária Socioecológica (IVRSEs) (figuras 4 e 5). Cabe destacar que, em ambas as análises, considerou-se a soma do número de pessoas nas zonas ripárias extensão de até 2 km de raio a partir do centro dos rios.

Figura 3 - Combinação das informações em um índice de Vulnerabilidade Ripária Socioecológica (VRSE)



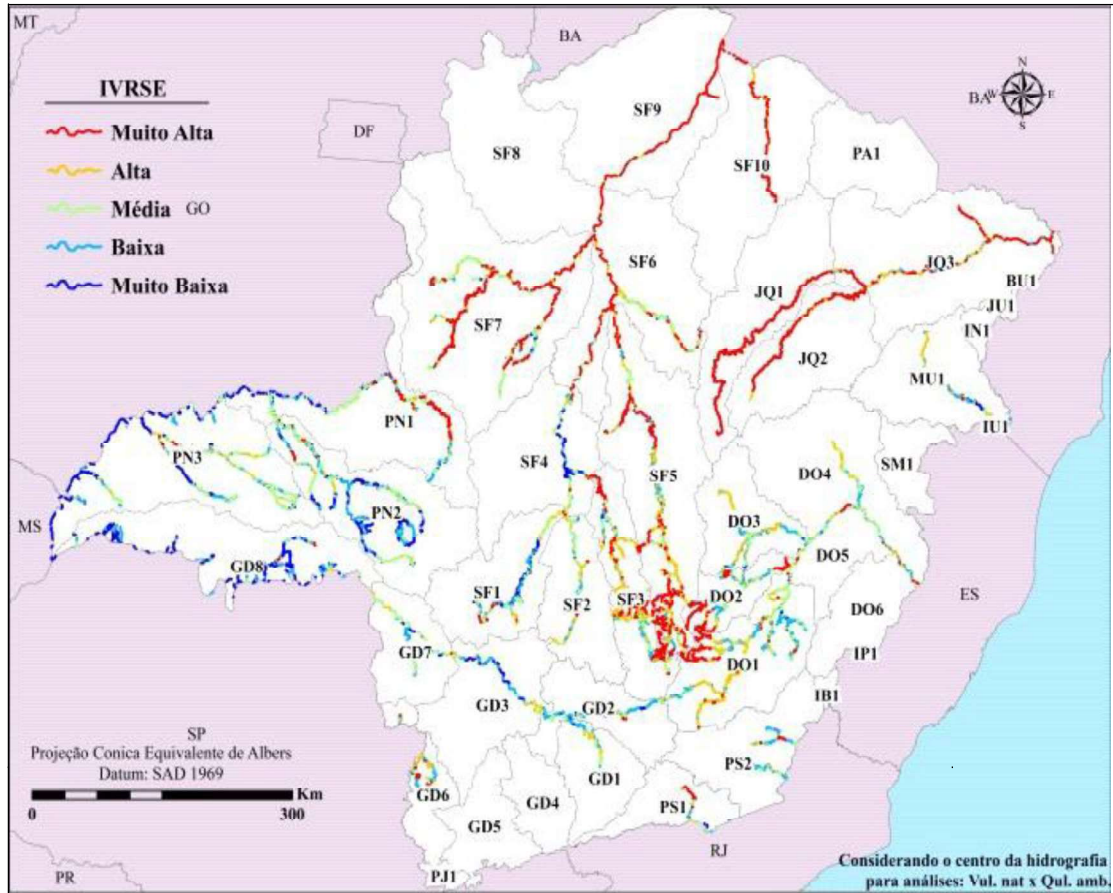
Fonte: (IBGE, 2016; SCOLFORO et al., 2008), do autor (2018).

Considerando que “a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos hídricos” é um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e que a unidade territorial para atuação do Sistema Nacional de Recursos Hídricos deva ocorrer na bacia hidrográfica (BRASIL, 1997), os resultados da pesquisa fornecem uma descrição global e por Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRH), cujas informações podem ser úteis a qualquer interessado, mas principalmente aos comitês de bacias hidrográficas (CERH, 2002).

4 Resultados e Discussão

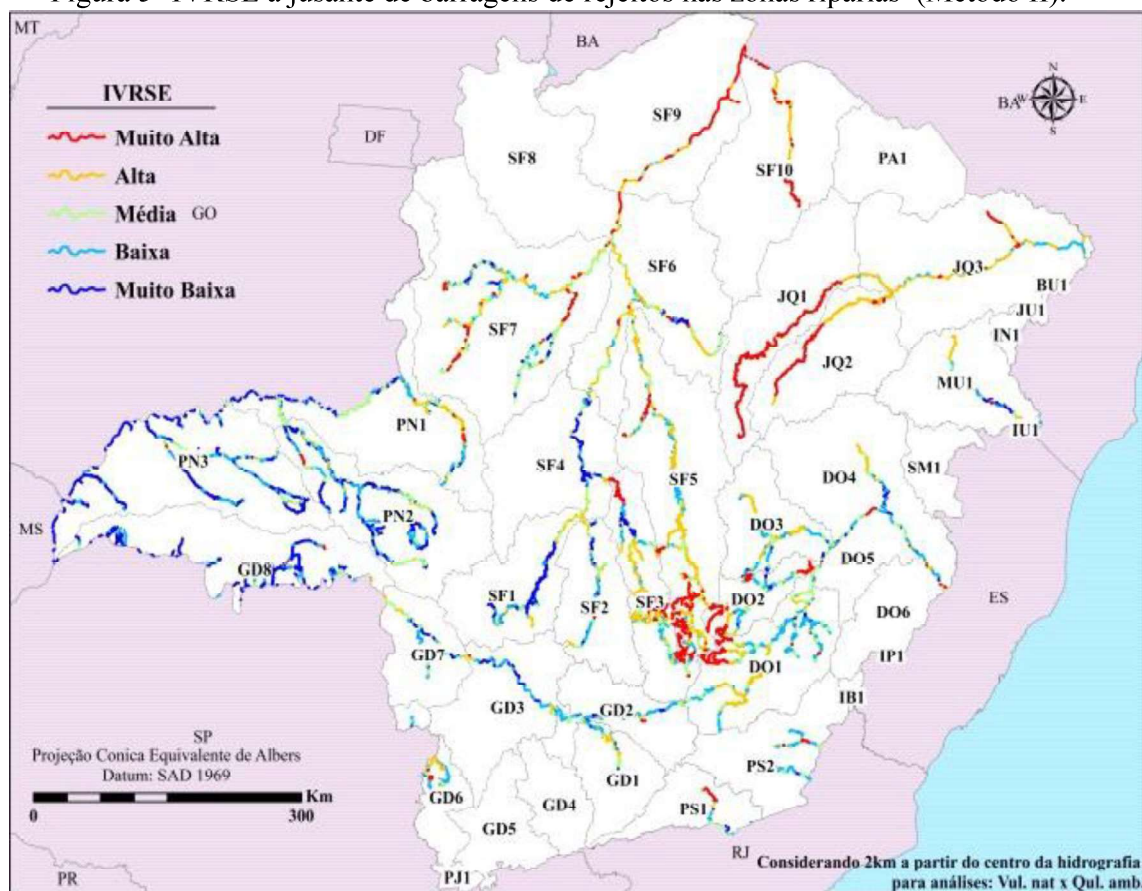
As Figuras 4 e 5 representam os resultados gerais dos IVRSE a jusante de barragens de rejeitos, considerando os índices de VN e QA nos rios (Figura 4) e os respectivos valores qualitativos mais frequentes nas zonas ripárias (Figura 5). Esses resultados foram apresentados por Unidade de Planejamento de Recursos Hídricos de Minas Gerais (UPGRH) (CERH-MG, 2002), representadas pelos polígonos no mapa de Minas Gerais, com os respectivos identificadores alfanuméricos das respectivas bacias hidrográficas.

Figura 4 – IVRSE a jusante de barragens de rejeitos nos rios (Método I).



Fonte: (IBGE, 2016; SCOLFARO et al., 2008), do autor (2018).

Figura 5- IVRSE a jusante de barragens de rejeitos nas zonas ripárias (Método II).



Fonte: (IBGE, 2016; SCOLFORO et al., 2008), do autor (2018).

Valores dos índices de VRSE Muito Baixo e Baixo predominaram em grande parte dos rios a jusante de Barragens de rejeitos no estado de Minas Gerais, quando analisados por ambos os métodos. No entanto, análises realizadas pelo método I destacou uma maior proporção no comprimento dos rios com valores Alto e Muito Alto nos IVRSE, comparados com o método II. Essa diferença pode ser entendida se considerarmos que faixas marginais no entorno dos rios são Áreas de Preservação Permanente (APP), “com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo, e assegurar o bem estar das populações humana” (BRASIL, 2012), mas perde essa função à medida que afasta da borda da calha regular dos rios.

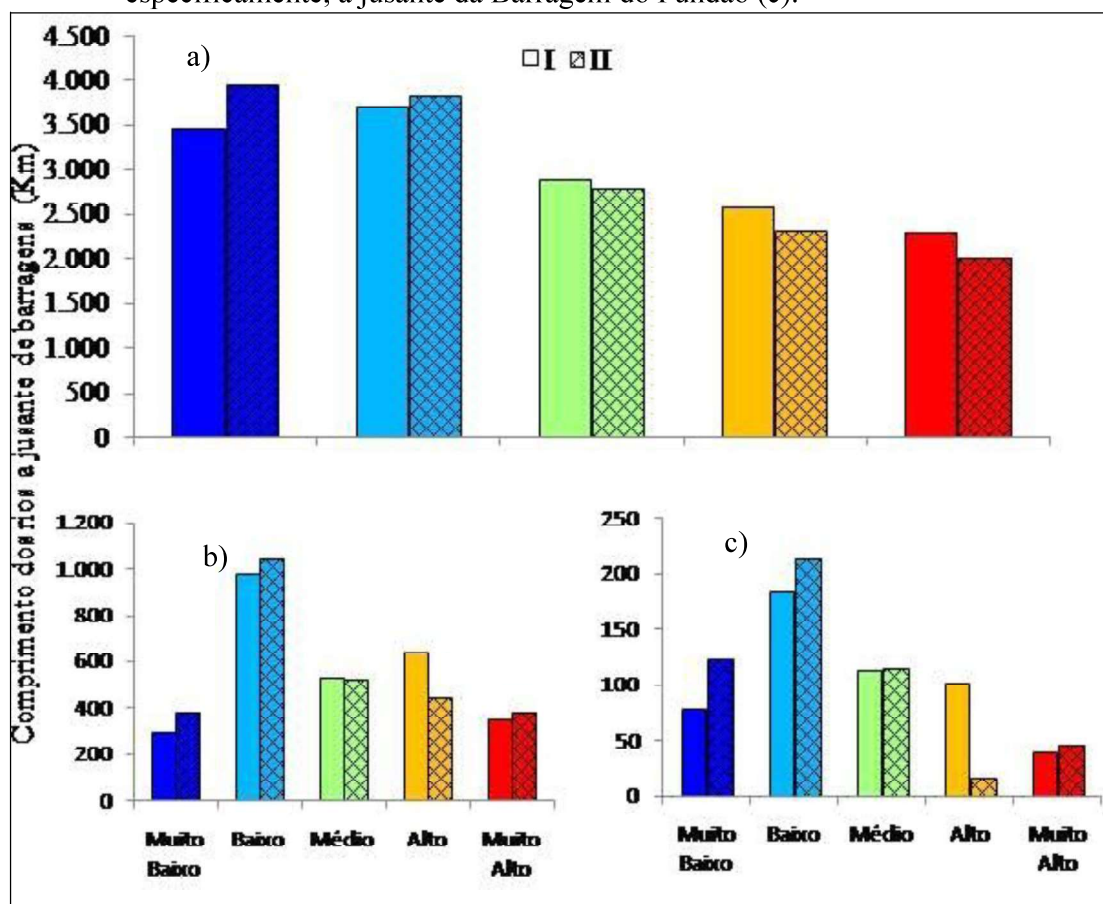
A região do quadrilátero ferrífero, localizada entre as cabeceiras das bacias do rio São Francisco e do Rio Doce é uma das regiões do estado com a maior atividade

de Mineração (DORR, 1969). Estudos mostram que atividades de mineração nesta região sobrepõem áreas com uma das maiores riquezas de espécies da fauna (PENA et al., 2017) e da flora (FERNANDES et al., 2018), além de sustentar uma população de cerca de 50 milhões de pessoas com provimento saneamento, água potável e recreação (NEVES et al., 2016). Os resultados mostram valores Alto e Muito Alto nos IVRSE para essa região, quando analisados por ambos os métodos.

Uma das motivações para o desenvolvimento desse estudo foi o rompimento da Barragem do Fundão. Portanto, a Figura 6 mostra os IVRSE à jusante da Barragem do Fundão, mostrando o desempenho desse índice na região afetada pela lama e indicando a intensidade dos impactos socioambientais potenciais em outras áreas a jusante de outras barragens de rejeito em Minas Gerais.

As condições de vulnerabilidade a jusante da Barragem do Fundão foram indicadas com os piores valores no IVRSE, comparados com os resultados para toda bacia do Rio Doce e em relação ao estado de Minas Gerais, respectivamente (Figura 6). Estudos recentes mostram que a bacia do Rio Doce apresentou déficit de 71% de vegetação em APP, sendo que 0.2% foram causados pelo rompimento da Barragem do Fundão (PIRES et al., 2017), demonstrando como a bacia do rio Doce já vem sendo degradada historicamente. A comparação dos valores dos IVRSE a jusante da Barragem do Fundão, a jusante de barragens na bacia do Rio Doce em outras regiões de Minas Gerais também demonstra a necessidade de intensificação nas atividades de gestão de risco em todo estado, em função da existência de áreas em situação de vulnerabilidade socioecológica ainda maior, comparadas com as áreas a jusante da Barragem do Fundão.

Figura 6 – Valores dos IVRSEs em função do comprimento dos rios, analisados pelo método I e pelo método II (a -c), à jusante de todas as 730 barragens de rejeitos localizadas no estado de Minas Gerais (a), somente na Bacia do Rio Doce (b) e, especificamente, a jusante da Barragem do Fundão (c).

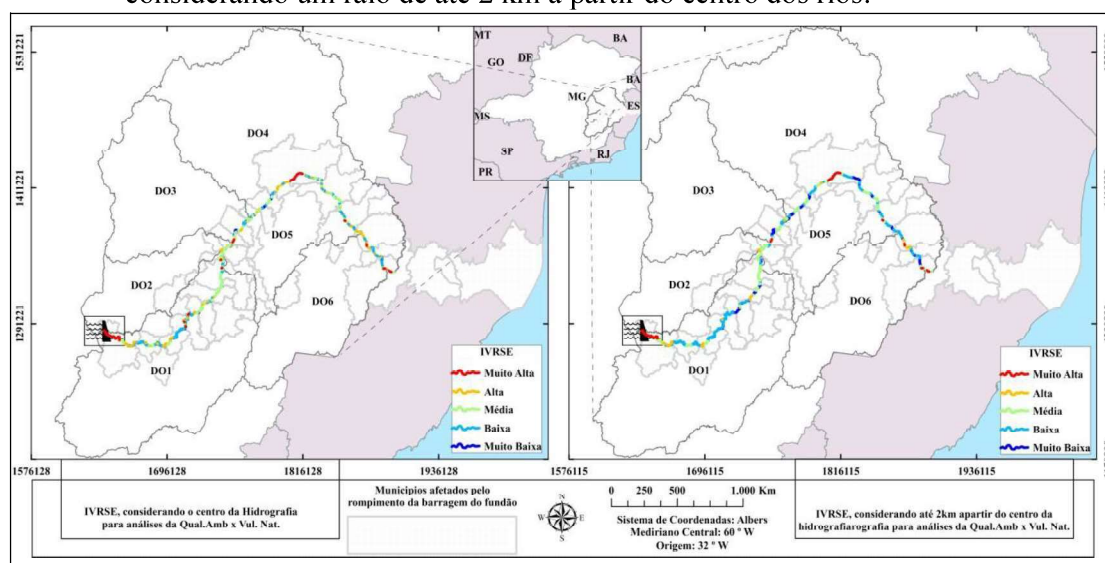


Fonte: (IBGE, 2016; SCOLFARO et al., 2008), do autor (2018).

Os resultados também mostram que os IVRSE próximos a Barragem do Fundão, incluindo as áreas onde se localizava o distrito de Bento Rodrigues, analisados por ambos os métodos, apresentaram valores de vulnerabilidade Muito Alta.

Pela Figura 7, pode-se verificar que porções dos rios nos municípios mais populosos também apresentaram índices de VRSE Muito Alto. Esses resultados servem como macrodiagnóstico das condições dos ecossistemas a jusante da Barragem do Fundão, mas também servem como base para tomadas de decisão na gestão do risco por barragem de rejeitos em todo estado de Minas Gerais.

Figura 7 - IVRSE a Jusante da Barragem do Fundão: a) nos rios e b) nas zonas ripárias, considerando um raio de até 2 km a partir do centro dos rios.

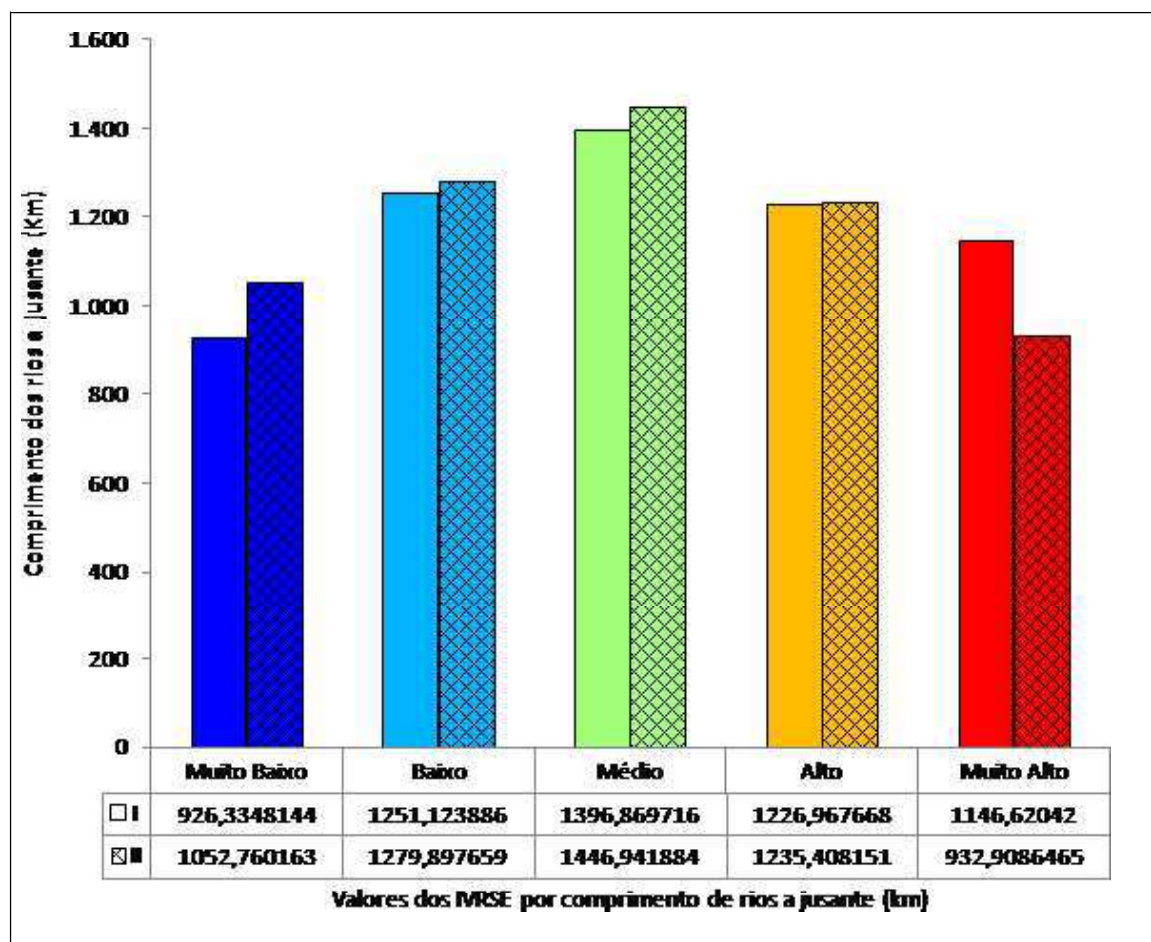


Fonte: (IBGE, 2016; SCOLFORO et al., 2008), do autor (2018).

No entanto, além de considerar os valores qualitativos dos IVRSE, o comprimento dos cursos d'água a jusante de barragens deve ser considerados. A bacia do rio São Francisco, por exemplo, é uma das que apresenta uma maior extensão do comprimento de rios localizados à jusante de barragens de rejeito (Figura 8), considerando apenas o estado de Minas Gerais. Depois da bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, a bacia do Rio São Francisco também é a que apresentou valores Alto e Muito Alto nos IVRSE, quando analisado por ambos os métodos.

A grande extensão territorial da bacia do rio São Francisco, com uma variedade de condições, recursos e uma das maiores concentrações populacionais, principalmente na região metropolitana de belo horizonte; elevaram os valores dos IVRSE nessas regiões. O desenvolvimento do ZEE-MG teve que levar em consideração essas características para não correr o risco de direcionar as atividades antrópicas para áreas onde são naturalmente frágeis e exige maior esforço para desenvolvimento humano, então também são áreas que mantêm melhor Qualidade Ambiental (CARVALHO et al., 2008).

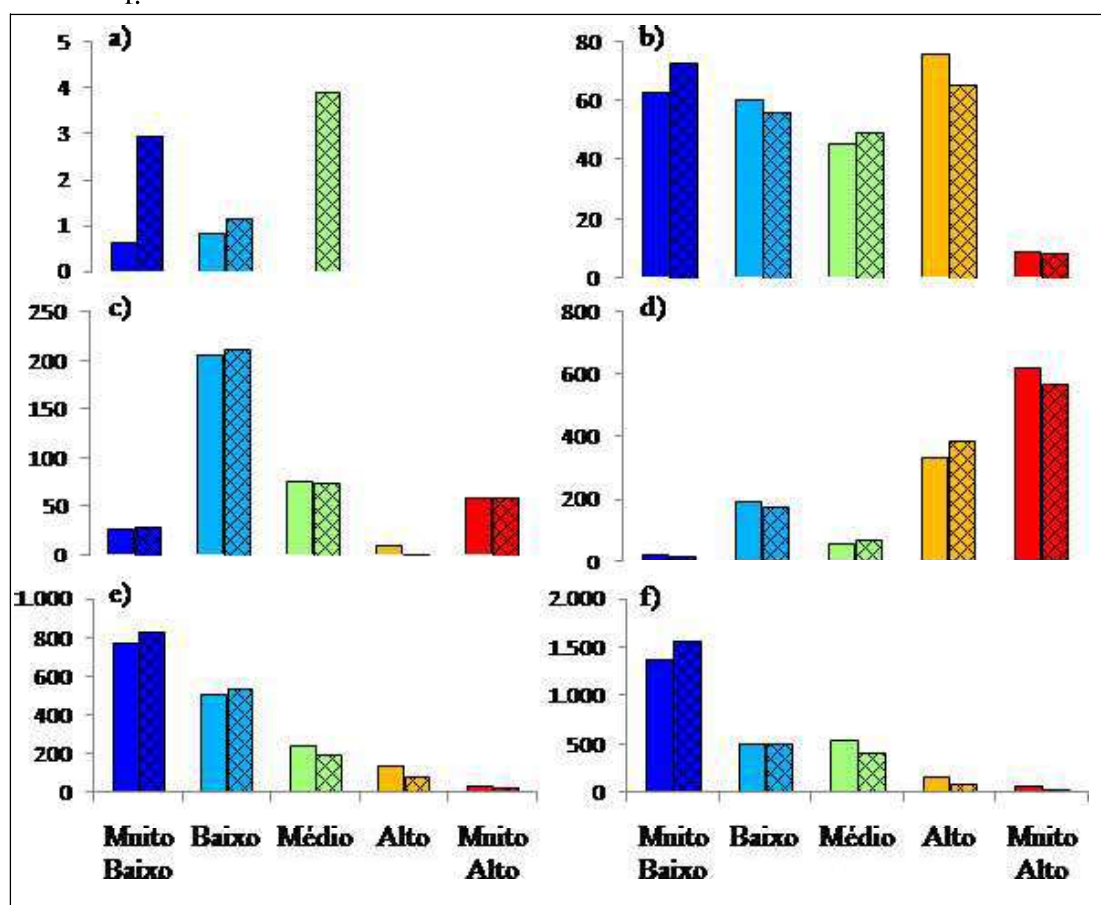
Figura 8 – IVRSEs a jusante de barragens de rejeito na bacia do rio São Francisco por comprimento dos rios, analisados pelo método I e II



Fonte: (IBGE, 2016; SCOLFARO et al., 2008), do autor (2018).

As bacias hidrográficas dos rios Mucuri e Jequitinhonha foram as que apresentaram as maiores proporções nos valores Alto e Muito Alto para os IVRSE (Figura 9, b e d, respectivamente). No entanto, o histórico de rompimento de barragens mostra que, mesmo aquelas bacias hidrográficas altamente impactadas, incluindo impactos por rompimentos de barragens de rejeitos e com predominância de valores Baixo e Muito Baixo nos IVRSE, continua apresentando elevada riqueza de espécies de peixes, como na bacia do Rio Paraíba do Sul (Figura 9, c).

Figura 9 - IVRSEs a jusante de barragens de rejeitos: nas bacias dos Rios do Leste (Itaúnas e Peruipe), a; bacia do Rio Mucuri, b; bacia do Rio Paraíba do Sul, c; bacia do Rio Jequitinhonha, d; bacia do rio Grande; e bacia do Rio Paraíba, f.



Fonte: (IBGE, 2016; SCOLFORO et al., 2008), do autor (2018).

O rompimento da barragem da indústria de papel Cataguases em 2003 na bacia do Rio Paraíba do Sul, por exemplo, liberou cerca de 1,2 bilhões de litros de resíduos nos rios e, onde a pluma de rejeito alcançou o oceano, prejudicou o fornecimento de águas para mais de 600 mil pessoas. Além dos impactos ambientais causados pela indústria Papel Cataguases, a bacia do Rio Paraíba do Sul também foi impactada reincidentemente por rompimento de barragens de rejeito nos anos de 2006 e 2007 (ROCHA, 2015). O rompimento de barragem que ocorreu em 2006 liberou cerca de 400 milhões de litros de lama, causando a interrupção na captação de água no norte e noroeste do estado do Rio de Janeiro, inutilizando áreas agricultáveis e de pastagens, bem como levando a mortandade de peixes. Os impactos causados pelo rompimento da mesma barragem no ano de 2007 foram mais grave ainda, atingindo 1200 casas e afetando cinco municípios localizados no estado de Minas Gerais e no estado do Rio de Janeiro (OLIVEIRA; ARAÚJO, 2012). Portanto, mesmo que os valores dos

IVRSE sejam Muito Baixos e Baixos, os impactos socioambientais extrapolam aqueles estimados pelos índices.

5 Conclusão

A apresentação dos IVRSE na mesma escala de representação espacial da hidrografia oficial do estado de Minas Gerais permitiu uma descrição mais precisa das áreas a jusante potencialmente mais impactadas pela pluma de rejeitos, bem como facilita sua implementação e a aplicação imediata em políticas públicas.

Análises realizadas nos rios e nas zonas ripárias adjacentes forneceram duas perspectivas distintas para as condições de vulnerabilidade socioecológica para cada local com maior probabilidade de serem atingidos pela pluma de rejeito. A primeira perspectiva apresentada destacou maiores proporções no comprimentos dos rios com valores Alto e Muito Alto IVRSE, comparado com análises realizadas nas zonas ripárias.

6 Sugestões para futuros trabalhos

A coleta de dados por outros métodos, como utilizado no Índice de Integridade Biótica, aplicado na avaliação de impactos ambientais no entorno de empreendimentos hidroelétricos em Minas Gerais, pode ser realizada a partir de outros estudos, gerando informações ainda mais precisas e acuradas nas áreas a jusante de barragens de rejeito, o que supre a escassés de informações para atender medidas mitigadoras em caso de um desastre. Além disso, a avaliação dos serviços ecossistêmicos também pode fornecer estimativas da vulnerabilidade socioeconômica, cuja incorporação ao IVRSE pode suprir a lacuna de informação requerida na classificação de barragens quanto ao Potencial de Dano Ambiental (PDA) (COPAM, 2002; 2005), no âmbito estadual e quanto ao Dano Potencial Associado (DPA), no âmbito federal (CNRH, 2012).

REFERÊNCIAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR n° 13.028**. de 14 de novembro de 2017. Mineração - elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. 2017.

AGURTO-DETZEL, H. et al. The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence. **Geophysical Research Letters** 10.1002/2016GL069257. 2016.

AIRES, U. R. V. et al. Changes in land use and land cover as a result of the failure of a mining tailings dam in Mariana, MG, Brazil. **Land Use Policy**. v. 70, p. 63 - 70, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.026>.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minérios de ferro através de ensaios de piezocone. 2004. 215 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

ANDRADE, D. C.; ROMEIRO, A. R. Serviços ecossistêmicos e sua importância para o sistema econômico e o bem-estar humano. Texto para discussão. IE/UNICAMP, n. 155, fev.2009. ISSN 0039466.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. **Geotechnical News**. p. 50 – 53, 2010. Disponível em: < <http://ksmproject.com/wp-content/uploads/2017/08/Tailings-Dam-Failures-Last-100-years-Azam2010.pdf> >. Acesso em 17/10/2018.

BEJARANO, M. D.; NILSSON, C.; AGUIAR, F. C. Riparian plant guilds become simpler and most likely fewer following flow regulation. **Journal Of Applied Ecology**. v. 55, n. 1, p. 365 - 376, 2018. 10.1111/1365-2664.12949.

BOIVIN, N. L. et al. Ecological consequences of human niche construction: Examining long-term anthropogenic shaping of global species distributions. **PNAS** June 7, 2016. 113 (23) 6388-6396; published ahead of print June 6, 2016. <https://doi.org/10.1073/pnas.1525200113>.

BOLZAN, M. (Ed.). **Observando os Rios 2017: o retrato da qualidade da água da bacia do rio Doce após dois anos do rompimento da barragem de Fundão. SOS Mata Atlântica**. 2017. Disponível em <<https://www.sosma.org.br/106705/qualidade-da-agua-na-bacia-rio-doce-piora-dois-anos-apos-tragedia-em-mariana>>. Acesso em 17/10/2018.

BOWKER, L. N.; CHAMBER, D. M. In the dark shadow of the supercycle tailings failure risk & public liability reach all time highs. **Environments**. v. 4, n. 4, p. , 2017. doi:10.3390/environments4040075.

BOWKER, L. N.; CHAMBER, D. M. Root Causes of Tailings Dam Overtopping: The Economics of Risk & Consequence. Disponível em: <https://miningwatch.ca/sites/default/files/2016-bowkerchamber-miningfailures.pdf>. Acesso em: 11/07/2018.

BOWKER, L. N.; CHAMBERS, D. M. The risk, public liability, and economics of tailings storage facility failures. 2015. 56 p. Disponível em: < https://earthworks.org/cms/assets/uploads/archive/files/pubs-others/BowkerChambers-RiskPublicLiability_EconomicsOfTailingsStorageFacility%20Failures-23Jul15.pdf >. Acesso em 17/10/2018.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Brasília, DF, 2010. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 09 de junho de 2018.

BRASIL. **Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: 09 de junho de 2018.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm>. Acesso em 17/10/2018.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 08 de janeiro de 1997. Brasília, DF, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/l9433.htm>. Acesso em: 09 de junho de 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 09 de junho de 2018.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Portaria nº 70.389**, de 17 de maio de 2017. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/portaria-dnpm-no-70-389-de-17-de-maio-de-2017-seguranca-de-barragens-de-mineracao>>. Acesso em 09 de julho de 2018.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, Rachael. Principles of geographical information systems. **Oxford: Oxford University Press**, 1998. 333 p.

CABRERA, F. et al., 1999. Heavy metal pollution of soils affected by the Guadamar toxic flood. **Science of The Total Environment**. v. 242, n. 1, p. 117 -129, 2017. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00379-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00379-4).

CADOTTE, M. W. et al. Solving environmental problems in the Anthropocene: the need to bring novel theoretical advances into the applied ecology fold. **Journal of applied ecology** [0021-8901] Cadotte, Marc yr:2017 vol:54 iss:1 pg:1 -6.

CARMO, F. F. et al. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**. v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017.

CARVALHO, L. M. T. et al. Qualidade ambiental, risco ambiental e prioridade para conservação e recuperação. In: SCOLFORO, J. R. S; CARVALHO, L. M. T; OLIVEIRA, A. D. (Ed.). Zoneamento ecológico Econômico de Minas Gerais. Lavras: **Editora UFLA**, cap. 2, p. 21 - 36, 2008.

CARVALHO, L. M. T. et al. Vulnerabilidade natural e qualidade ambiental associadas a rodovias. In: SCOLFORO, J. R. S; CARVALHO, L. M. T; OLIVEIRA, A. D. (Ed.). Zoneamento ecológico Econômico de Minas Gerais. Lavras: **Editora UFLA**, cap. 10, p. 113 - 116, 2008.

CHAPIN , F. S. III; MATSON, P. A.; MOONEY, H. A. Principles of terrestrial ecosystemecology. Springer. 2002. Disponível em:

<<http://www.crc.uqam.ca/Publication/Principles%20of%20terrestrial%20ecosystem%20ecology.pdf>> Acesso em: 25, de out., 2017.

CHEN, J. et al. Bacterial communities in riparian sediments: a large-scale longitudinal distribution pattern and response to dam construction. **Frontiers in Microbiology**. v. 9, n. 999, 2018. doi: 10.3389/fmicb.2018.00999.

COLLEN et al. Global patterns of freshwater species diversity, threat and endemism. **Global Ecology and Biogeography**. v. 23, p. 40 - 51, 2014. doi: 10.1111/geb.12096.

CURI, N. et al. Vulnerabilidade natural e qualidade ambiental associadas à mineração. In: SCOLFORO, J. R. S; CARVALHO, L. M. T; OLIVEIRA, A. D. (Ed.). Zoneamento ecológico Econômico de Minas Gerais. Lavras: **Editora UFLA**, cap. 8, p. 91 - 100, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário mineral 2015**. Brasília, DF. DNPM, 2016. 135 p. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>>. Acesso em: 17/10/2018.

DE LANGE, H. J.; SALA, S.; VIGHI, M.; FABER, J. H. Ecological vulnerability in risk assessment: a review and perspectives. **Science Of The Total Environment**. v. 408, n. 18, p. 3871 - 3879, 2010. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.11.009.

DORR, J. V. N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the quadrilátero ferrífero Minas Gerais, Brazil. Prepared in cooperation with the Departamento Nacional da Produção Mineral of Brazil under the auspices of the Agency for International Development of the United States Department of State. Washington: **United States Government Printing Office**, 2º ed. 1969.

DUDGEON, D. et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. **Biol. Rev.** (2006), 81, pp. 163–182. doi:10.1017/S1464793105006950.

ESCOBAR, H. Mud tsunami wreaks ecological havoc in Brazil. **American Association for the Advancement of Science**. v. 350, n. 6265, p. 1138 - 1139, 2015. 10.1126/science.350.6265.1138.

FARDILA, D. et al. A systematic review reveals changes in where and how we have studied habitat loss and fragmentation over 20 years. **Biological Conservation**, v. 212.P. 130 – 138, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2017.04.031>.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Inventário de barragens do Estado de Minas Gerais: ano 2017**. Belo Horizonte: **FEAM**, 2018. 40 p.

FERNÁNDEZ, I. et al. Application of lead stable isotopes to the Guadiamar Aquifer study after the mine tailings spill in Aznalcóllar (SW Spain). **Environmental Geology**. v. 47, n. 2, p. 197 - 204, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1143-8>.

FERREIRA, J. et al. Brazil's environmental leadership at risk. **Science**. v. 346, n. 6210, p. 706 - 707, 2014. 10.1126/science.1260194.

FULLER, M. R.; DOULE, M. W.; STRAYER, D. L. Causes and consequences of habitat fragmentation in river networks. **New York Academy of Sciences**. v. 1355, p. 31 - 51, 2015. doi: 10.1111/nyas.12853.

GARCIA, L. C. et al. **Brazil's worst mining disaster: Corporations must be compelled to pay the actual environmental costs.** *Ecological Applications*. v. 17, n. 1, p. 5- 9, 2016. <https://doi.org/10.1002/eap.1461>.

GATTI, R. C. Freshwater biodiversity: a review of local and global threats. *International Journal of Environmental Studies*, 2016 <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2016.1204133>.

GRILL, G. et al. An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environ. Res. Lett.* v. 10, 2015. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/015001>.

HDR 2006 – Beyond Scarcity: Power, Poverty and the Global Water Crisis (UNDO, 2006).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Grade estatística**, 2016. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/recortes_para_fins_estatisticos/grade_estatistica/censo_2010/grade_estatistica.pdf. Acesso em 17/10/2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE, 2017). **Resolução° PR-02**, de 29 de junho de 2017. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/areateritorial/principal.shtm>, acesso em 18 de outubro de 2017.

INSTITUTO EVANDRO CHAGAS: IEC. Avaliação dos impactos referente ao transbordo de efluentes de lama-vermelha na cidade de Barcarema, estado do Pará. **Coordenação da Qualidade, Relatório Técnico N° 002/2018**. Pará, 2018.

JASEN, R. B . Dams and Public safety: A water resources technical publication. U. S. Denver: **Department of the Interior bureau of reclamation**. 1983. p. 332. Disponível em: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/AZ1130.pdf>. Acesso em: 17/10/2018.

KOSSOFF, D. et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied geochemistry*. v. 51, p. 229 -245, 2014.

KRAUS, U; WIEGAND, J. Long-term effects of the Aznalcollar mine spill - heavy metal content and mobility in soils and sediments of the Guadiamar river valley (SW) Spain. *Science Of The Total Environment*. v. 367, n. 1 - 3, p. 855 - 871, 2006. doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.12.027.

KRAUSMANN, F. et al. Global human appropriation of net primary production doubled in the 20th century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. v. 110, n. 25, p. 10324 - 10329, 2013. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1211349110.

LALAND; K. N.; OLDLING-SMEE, J.; FELDMAN, M. W. Cultural niche construction and human evolution. *J. Evol. Biol.* 14 (2001) 22 ±33 ã 2001 blackwell science LTD.

LARRAURI, P. C.; LALL, U. **Tailings Dams Failures: Updated Statistical Model for Discharge Volume and Runout.** *Environments*. v. 5, n. 28, p. 1 - 10. 2018.

doi:10.3390/environments5020028.

LEAL., C. G. et al. Estrutura da ictiofauna de riachos do cerrado de Minas Gerais. In: CALLISTO, M. et al. (Org.) *Condições ecológicas em bacias hidrográficas de empreendimentos hidrelétricos*. Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais, v. 1. p. 69-96, 2014. (Série Peixe Vivo, 2).

LEHNER, B. et al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. **Frontiers in Ecology and the Environment**. v. 9, n. 9, p. 494 - 502, 2011. <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/100125>.

LIMA, M. O. et al. Avaliação preliminar dos impactos ambientais referente ao transbordo e lançamentos irregulares de efluentes de lama vermelha na cidade de barcarena, estado do Pará. Instituto Evandro Chagas – IEC/ SVS/ MS Coordenação Da Qualidade – Cq **Relatório Técnico nº: 003/2018 processo nº: 010/2018**.

LUINO, F.; GRAFF, J. V. **The Stava mudflow of 19 July 1985 (Northern Italy): a disaster that effective regulation might have prevented**. **Natural Hazards And Earth System Sciences**. v. 12, n. 4, p. 1029 - 1044, 2012.

LUIZ, C. H. P.; FARIA, S. D. Construção da base Otto-codificada em Minas Gerais: implementação da metodologia desenvolvida por Otto Pfafstetter (1989) para escalas 1:100.000 e 1:50.000. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, 2013.

MAAVARA, T. et al. Global perturbation of organic carbon cycling by river damming. **Nature Communications**. v. 8, p. 1 – 10, 2017. doi: 10.1038/ncomms15347.

MACHADO, I. F.; FIGUEIROA, M. **500 years of mining in Brazil: a brief review**. **Resources Policy**. v. 27, p. 9–24, 2001.

MARQUES, J. J. G.; CARVALHO, L. M. T.; MELLO, C. R. Vulnerabilidade natural e qualidade ambiental associadas a hidroelétricas. In: SCOLFORO, J. R. S; CARVALHO, L. M. T; OLIVEIRA, A. D. (Ed.). *Zoneamento ecológico Econômico de Minas Gerais*. Lavras: **Editora UFLA**, cap. 12, p. 125 - 128, 2008.

MARTA-ALMEIDA, M. et al. Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. **Marine Pollution Bulletin**. v. 112, n. 1, p. 359 - 364, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.07.039>.

MARTÍN, F. et al. Weathering of primary minerals and mobility of major elements in soils affected by an accidental spill of pyrite tailing. **Science of The Total Environment**. v. 378, n. 1 - 2, p. 49 - 52, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.031>.

MATEOS, J. C. R. The case of the Aznalcollar mine and its impacts on coastal activities in Southern Spain. **Ocean & Coastal Management**. v. 44, n. 1 - 2, p. 105 - 118, 2001. doi: 10.1016/S0964-5691(00)00081-8.

MIGUEL, R. J et al. **Habitat quality affects the condition of *Luciobarbus sclateri* in the Guadianar River (SW Iberian Peninsula): effects of disturbances by the toxic spill of the Aznalcóllar mine**. **Hydrobiologia**. v. 700, n. 1 p. 85 - 97, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1211-0>.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa nº 217**, de 06 de dezembro de 2017. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=45558>. Acesso em: 09 de junho de 2018.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa nº 62**, de 17 de dezembro de 2002. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5008>. Acesso em 09 de junho de 2018.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa nº 87**, de 17 de junho de 2005. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8251>. Acesso em 09 de junho de 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. 2011.

MIRANDA, L. S.; MARQUES, A. C. Hidden impacts of the Samarco mining waste dam collapse to Brazilian marine fauna - an example from the staurozoans (Cnidaria). **Biota Neotropica**. v. 16, n. 2, p. , 2016. doi: 10.1590/1676-0611-BN-2016-0169.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**. v. 403, p. 853– 858, 2000. <https://doi.org/10.1038/35002501>.

NEVES, A. C. O. et al. Neglect of ecosystems services by mining, and the worst environmental disaster in Brazil. **Natureza&Conservação**. v. 14, n. 1, p. 24 - 27, 2016. doi: 10.1016/j.ncon.2016.03.002.

OLÍAS, M; CERÓN, J. C.; MORAL, F.; RUIZ, F. Water quality of the Guadiamar River after the Aznalcóllar spill (SW Spain). **Chemosphere**. v. 62, n. 2, p. 213 -225, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.015>.

OLIVEIRA, R.; ARAÚJO, E. Rompimento de barragem da Mineradora Rio Pomba Cataguases afeta qualidade da água em MG e no RJ. In.: FERNANDES, F. R. C.; ALAMINO, R. C. J.; ARAÚJO, E. R. (Ed.). Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos. Disponível em: <http://verbetes.cetem.gov.br/verbetes/ExibeVerbete.aspx?verid=107>. Acesso em 10 de junho de 2018.

PEKEL, J. F. et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**. v. 540, n. 7633, p.418 - 422, 2016. doi: 10.1038/nature20584.

PENA, J. C. C. et al. Impacts of mining activities on the potential geographic distribution of eastern Brazil mountaintop endemic species. **Perspectives in Ecology and Conservation**. v. 15, n. 3, p. 172 – 178, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.07.005>.

PIASENTIN, C. A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI : cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: **Comitê Brasileiro de Grandes**

Barragens. 2011. 524 p.

PIRES, A. P. F. et al. Forest restoration can increase the Rio Doce watershed resilience. **Perspectives in Ecology and Conservation**. v. 15, n. 3, p. 187-193, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.08.003>.

POMPEU, P. S.; AGOSTINHO, A. A.; PELICICE, F. M. **Existing and future challenges: the concept of successful fish passage in south america. River research and applications**. v. 28, n. 4, p. 504 - 512, 2012. doi: 10.1002/rra.1557.

POMPEU, P. S. et al. Existing and future challenges: the concept of successful fish Passage in south America. **River research and applications River res. Applic**. v. 28, p. 504–512, 2012.

RICHTER, B. D. et al. **Lost in Development's Shadow: The Downstream Human Consequences of Dams. Water Alternatives**. v. 3, n. 2, p. 14 - 42, 2010.

RICO, M. et al. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. **Journal of Hazardous Materials**. v. 152, n. 2, p. 846 -852, 2008. Disponível em: <https://ac.els-cdn.com/S0304389407010837/1-s2.0-S0304389407010837-main.pdf?_tid=af7da901-dd47-4759-84b2-9de917a3ae1d&acdnat=1539890667_74d2457ee1a2e433c388d88f5a897ff9>. Acesso em 17/10/2018.

ROCHA, E. M. et al. The impact of disruption of the barrage in Mariana–MG on the health of the riverside population in the city of Colatina–ES. **Tempus, actas de saúde colet**. v. 10, n. 3, p. 31-45, 2016. <http://dx.doi.org/10.18569/tempus.v10i3.1902>.

ROCHA, F. F. Retroanálise da ruptura da Barragem São Francisco – Mirafá, Minas Gerais, Brasil. 2015. 200 p. Dissertação (mestre em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SILVA, A. T. et al. The future of fish passage science, engineering, and practice. **Fish and Fisheries**. v. 19, p. 340–362, 2018. doi: 10.1111/faf.12258.

SORIANO, E. et al. Crise hídrica em São Paulo sob o ponto de vista dos desastres. **Ambiente E Sociedade**. v. 29, n. 1. p. 21-42. 2016. United Nations Development Programme.

STRACHAN, C.; GOODWIN, S. The role of water management in tailings dam incidents. **From Tailings and Mine Waste. Proceedings of the Tailings and Mine Waste Conference, University of British Columbia**, Oct. 26-29, 2015. 14 p. <http://dx.doi.org/10.14288/1.0320948>.

SUZUKI, F. M. et al. Influencing movements of two migratory fishes within the tailrace of a large neotropical dam and their implications for hydropower impacts. **River Research And Applications**. v. 33, n. 4, p. 514 - 523, 2017. doi: 10.1002/rra.3105.

TEIXEIRA, T. P. et al. Diversidade das assembléias de peixes nas quatro unidades geográficas do rio Paraíba do Sul. **Iheringia, Sér. Zool**. v. 95 n. 4, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0073-47212005000400002>.

THIAULT et al. Space and time matter in social-ecological vulnerability assessments. **Marine Policy**. v. 88, p. 213–221, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.11.027>.

TORNERO, V.; ARIAS, A. M.; BLASCO, J. Following the Aznalcóllar toxic spill. **Environmental Research**. v. 111, n. 8, p. 1033 - 1036, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.07.011>.

TREGIDGO, D. J. et al. Rainforest metropolis casts 1,000-km defaunation shadow. **PNAS** August 8, 2017 | vol. 114 | no. 32 | 8655–8659. <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1614499114>.

TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO ESTADO DO PARÁ : TJPA. Medida cautelar inominada Nº 0002384-18.2018.8.14.0008 Autor: **Ministério Público do estado do Pará** requerido: Norsk Hydro Brasil - Hydro Aluminorte. Disponível em: <<http://www.mppa.mp.br/upload/Decisao%20JUDICIAL.pdf>>, acesso em: 04/07/2018.

UNITED NATION: UN. United Nation Economic Commission for Europe. **Safety Guidelines and good practice for tailing management facilities**. United Nation. New York and Geneva, 2014.

UNITED NATIONS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **United Nations conference on environment and development**. Rio de Janeiro, Brazil, 3 to 14 June 1992. Agenda 21. 1992.

VORMITTAG, E. M. P. A. A. et al. Avaliação de riscos em saúde da população afetada pelo desastre de Mariana. **Instituto Saúde e Sustentabilidade**. 2017. p. 217. Disponível em: <https://www.greenpeace.org.br/hubfs/Campanhas/Agua_Para_Quem/documentos/RelatorioGreenpeace_saude_RioDoce.pdf>. Acesso em 17/10/2018.

WISE - World Information on Energy. **Chronology of major tailings dam failures**: from 1960 to last updated 29 aug. 2018. Disponível em: < <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html> >. Acesso em 17/10/2018.

YOUNG, H. S. et al. Patterns, Causes, and Consequences of Anthropocene Defaunation. **Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.** 2016. 47:333–58.

ZARFL, C. et al. A global boom in hydropower dam construction. **Aquatic Sciences**. v. 77, n. 1, p. 161 – 170, 2015. DOI 10.1007/s00027-014-0377-0.

ZHANG et al. Ecological vulnerability assessment based on ppsr in yellow rivre delta. **Journal of Cleaner Production**. v. 167, p. 1106 - 1111, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.106>.