



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

BRENDA CAROLINE MARTINS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS NA BACIA DO RIO DOCE:
CÁLCULO DA EXTENSÃO ATINGIDA E IMPACTOS PRODUZIDOS**

BELO HORIZONTE
2019

BRENDA CAROLINE MARTINS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS NA BACIA DO RIO DOCE:
CÁLCULO DA EXTENSÃO ATINGIDA E IMPACTOS PRODUZIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof.^a. Dr.^a. Lilia Maria de Oliveira

BELO HORIZONTE
2019

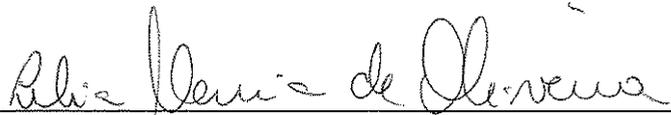
BRENDA CAROLINE MARTINS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS NA BACIA DO RIO DOCE:
CÁLCULO DA EXTENSÃO ATINGIDA E IMPACTOS PRODUZIDOS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Data de aprovação: 17/06/2019

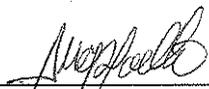
Banca examinadora:



Lília Maria de Oliveira – Presidente da Banca Examinadora
Profª. Doutora CEFETMG – Orientador(a)



Luciana Peixoto Amaral
Profª. Doutora CEFETMG



Carlos Wagner Gonçalves Andrade Coelho
Prof. Doutor CEFETMG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que colaboraram na elaboração deste trabalho, especialmente:

À minha professora orientadora Lilia Maria de Oliveira, pela sua atenção, paciência, compreensão e pelas críticas e sugestões indispensáveis à realização e à conclusão desta pesquisa.

Aos meus pais, Ilda e Ronaldo e ao meu irmão Pedro pelo apoio e incentivo constante na realização do meu trabalho.

Às amigas que adquiri no curso e que me ajudaram emocionalmente e tecnicamente para o desenvolvimento deste trabalho: Adir, Camila, Júnia, Marina, Regeane e Sarah.

E ao meu melhor amigo, Willer, pelo companheirismo, incentivo e sugestões.

Muito obrigada! Gratidão.

RESUMO

Brenda Caroline Martins da Silva, Avaliação de rompimento de barragens na bacia do Rio Doce: Cálculo da extensão atingida e impactos produzidos. 2019. 60f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

Os impactos causados por rompimento de barragens tornaram-se assunto emergente atualmente devido aos dois rompimentos ocorridos recentemente em Minas Gerais. Desenvolveram-se, portanto, estudos e metodologias que pudessem avaliar os impactos causados na hipótese de rompimento de barragens, a fim de classificar os barramentos e estabelecer através da classificação, exigências para prevenção de desastres. Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivos aplicar a metodologia desenvolvida pela Agência Nacional de Águas (ANA), para cálculo da extensão da área inundada para jusante, em barragens na Bacia do Rio Doce cadastradas no Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragens, avaliar a possibilidade de efeito cascata devido à ruptura destes barramentos, mapear a extensão de trecho de rio atingida pela possível ruptura das barragens, identificar os possíveis impactos socioeconômicos e ambientais causados pela ruptura dos barramentos e classificar as barragens selecionadas quanto ao Dano Potencial Associado (DPA). Para alcance dos objetivos descritos, utilizou-se a metodologia simplificada proposta pela ANA, que estabelece uma equação para o cálculo da extensão da área inundada para jusante de barragens em caso de rompimento, e o método estabelecido pela DN 62/2002 complementada pela DN 87/2005 para classificação de DPA. Os métodos foram aplicados em 8 barragens selecionadas na bacia do Rio Doce, sendo 3 delas, Usina Hidrelétrica (UHE) de Aimorés, UHE Baguari e UHE Risoleta Neves, localizadas no leito do rio principal da bacia, o rio Doce. As demais barragens foram selecionadas através de cinco critérios pré-estabelecidos aplicados na planilha de Cadastro do Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens do ano de 2017. Dessa forma, as demais barragens selecionadas foram: a pequena central hidrelétrica (PCH) Benjamim Mário Baptista, a PCH Cocais Grande, a PCH Furquim, a PCH Rio Piracicaba, e a usina hidrelétrica Sá Carvalho. Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta pela ANA permitiram delimitar com o auxílio de softwares (Google Earth Pro e QGIS 3.6.1 with GRASS 7.6.1) as áreas atingidas decorrentes das possíveis rupturas e as barragens que resultariam nos impactos socioeconômicos e ambientais mais significantes. Os possíveis casos de efeito cascata foram identificados na UHE Aimorés e na PCH Furquim.

Palavras-Chave: Rompimento de barragens. Bacia do Rio Doce. ANA.

ABSTRACT

Brenda Caroline Martins da Silva, Dam rupture evaluation in the Rio Doce basin: Calculation of the extent reached and impacts produced. 2019. 60f. Monograph (Graduate) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

The impacts caused by dam disruption became an emerging issue today due to the two recent disruptions in Minas Gerais. Therefore, studies and methodologies were developed that could evaluate the impacts caused by the rupture of dams, in order to classify the buses and establish through the classification, requirements for disaster prevention. The objective of this work was to apply the methodology developed by the National Water Agency (ANA) to calculate the extent of the flooded area downstream in dams in the Rio Doce Basin, registered in the National Information System for Dam Safety, to evaluate the possibility of a cascade effect due to the rupture of these buses, to map the extent of the river stretch reached by the possible rupture of the dams, to identify the possible socioeconomic and environmental impacts caused by the rupture of the buses and to classify the selected dams for Associated Potential Damage (DPA). In order to reach the described objectives, the simplified methodology proposed by the ANA was used, which establishes an equation for the calculation of the extension of the flooded area downstream of dams in case of disruption, and the method established by DN 62/2002 complemented by DN 87 / 2005 for classification of DPA. The methods were applied in 8 selected dams in the Doce River basin, 3 of them, Aimorés Hydroelectric Plant (HPP), HPP Baguari and HPP Risoleta Neves, located in the main river bed of the river Doce. The other dams were selected through five pre-established criteria applied to the National System of Information on Dam Safety Information for the year 2017. Accordingly, the other dams selected were: the small hydroelectric plant (SHP), Benjamim Mário Baptista, the SHP Cocais Grande, the SHP Furquim, SHP Rio Piracicaba, and the Sá Carvalho hydroelectric plant. The results obtained with the application of the methodology proposed by ANA made it possible to delimit the affected areas due to possible ruptures and dams that would result in socioeconomic and environmental impacts more significant. The possible cascade effects were identified in the Aimorés HPP and the Furquim SHP.

Keywords: Breaking of dams. River Doce Basin. ANA.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

APP - Área de Proteção Permanente

CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental

DN - Deliberação Normativa

DPA - Dano potencial associado

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDE – Sisema - Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

UC - Unidade de Conservação

UHE – Usina Hidrelétrica

USBR – United States Bureau of Reclamation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragem de Contraforte.....	15
Figura 2 – Barragem de concreto à gravidade e de concreto em arco.....	15
Figura 3 - Tipos de Barragem de alteamento a jusante a) e a montante b)	16
Figura 4 - Processo de formação de Piping. 1) Surgimento do Poro; 2) Aumento da erosão; 3) Colapso da porção superior e erosão.....	18
Figura 5 – Processo de formação do Galgamento. 1) Surgimento da brecha retangular; 2) Erosão do fundo da brecha; 3) Aumento progressivo da erosão.....	29
Figura 6 – Localização de Barragens da bacia do Rio Doce.....	26
Figura 7 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Doce.....	27
Figura 8 - Relação entre volume armazenado e distância máxima para jusante.....	28
Figura 9 – Localização dos barramentos selecionados	31
Figura 10 – Usina Hidrelétrica de Aimorés, 2018.....	32
Figura 11 – Usina Hidrelétrica de Baguari, 2018.....	33
Figura 12 – PCH Benjamim Mário Baptista, 2018.....	33
Figura 13 – PCH Cocais Grande, 2018.....	34
Figura 14 – PCH Furquim, 2018.....	34
Figura 15 – PCH Rio Piracicaba, 2018.....	35
Figura 16 – Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, 2018.....	35
Figura 17 – Usina Hidrelétrica Sá Carvalho, 2018.....	36
Figura 18 – Extensão da área inundada para jusante - Usina Hidrelétrica de Aimorés.....	37
Figura 19 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante - Usina Hidrelétrica de Aimorés.....	38
Figura 20 – Perfil de elevação do trecho - Usina Hidrelétrica de Aimorés.....	38
Figura 21 – Extensão da área inundada para jusante - Usina Hidrelétrica de Baguari.....	39
Figura 22 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante - Usina Hidrelétrica de Baguari.....	40
Figura 23 – Perfil de elevação do trecho - Usina Hidrelétrica de Baguari.....	40
Figura 24 – Extensão da área inundada para jusante – PCH Benjamim Mário Baptista.....	41
Figura 25 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante - PCH Benjamim Mário Baptista.....	42

Figura 26 – Perfil de elevação do trecho - PCH Benjamim Mário Baptista.....	42
Figura 27 – Extensão da área inundada para jusante – PCH Cocais Grande.....	43
Figura 28 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – PCH Cocais Grande.....	44
Figura 29 – Perfil de elevação do trecho – PCH Cocais Grande	44
Figura 30 – Extensão da área inundada para jusante – PCH Furquim.....	45
Figura 31 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – PCH Furquim.....	46
Figura 32 - Perfil de elevação do trecho – PCH Furquim.....	46
Figura 33 - Extensão da área inundada para jusante – PCH Rio Piracicaba.....	47
Figura 34 - Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – PCH Rio Piracicaba.....	48
Figura 35 - Perfil de elevação do trecho – PCH Rio Piracicaba.....	48
Figura 36 – Extensão da área inundada para jusante – UHE Risoleta Neves.....	49
Figura 37 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – UHE Risoleta Neves.....	50
Figura 38 – Perfil de elevação do trecho – UHE Risoleta Neves.....	50
Figura 39 – Extensão da área inundada para jusante – UHE Sá Carvalho.....	51
Figura 40 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – UHE Sá Carvalho.....	52
Figura 41 – Perfil de elevação do trecho – UHE Sá Carvalho.....	52

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Caracterização do Dano Associado à Ruptura de Barragens.....	22
Quadro 2 - Casos de rompimentos de barragens no Brasil em 2008 e 2009.....	23
Quadro 3 - Acidentes e incidentes ocorridos no período de abrangência do relatório de segurança de barragens, 2017.....	24
Quadro 4 - Dados das barragens selecionadas.....	31
Quadro 5 - Caracterização e Cálculo da extensão da área alagada a jusante nas barragens selecionadas.....	36
Quadro 6 - Resultado da avaliação dos critérios e classificação de DPA.....	53
Tabela 1 – Formas de Ruptura de Barragens.....	17

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVO.....	13
2.1 Objetivo Geral.....	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Tipos de Barragens.....	14
3.2 Ruptura de Barragens.....	16
3.2.1 Causas de Ruptura de Barragens.....	17
3.2.2 Formas de Ruptura de Barragens.....	17
3.2.2.1 Ruptura por Piping.....	18
3.2.2.2 Ruptura por Overtopping (Galgamento).....	19
3.2.2.3 Ruptura de Barragens em Cascata.....	19
3.2.3 Riscos Associados a Rupturas de Barragens.....	20
3.3 Legislação Brasileira sobre Segurança de Barragens.....	20
3.3.1 Classificação de Risco de Barragens.....	21
3.4 Rompimentos de Barragens no Brasil.....	23
3.5 Passivos Ambientais causados por Barragens.....	24
4. METODOLOGIA.....	26
4.1 Área de Estudo.....	26
4.2 Metodologia proposta pela ANA.....	27
4.3 Escolha das Barragens.....	29
4.4 Softwares utilizados.....	30
4.5 Classificação de DPA.....	30
4.6 Efeito Cascata.....	30
5. RESULTADOS.....	31
5.1 Descrição das barragens selecionadas.....	31
5.2 Cálculo da extensão da área inundada para jusante.....	36
5.3 Mapeamento e descrição da área alagada para jusante.....	37
5.4 Classificações de Dano Potencial Associado – DPA.....	53
6. CONCLUSÃO E PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....	54
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Segundo o art. 2º, inciso I, da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), entende-se por 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 as estruturas associadas”.

Atualmente, o Brasil possui cerca de 24.092 barragens cadastradas (ANA, 2017). Um comparativo com anos anteriores demonstra o crescimento significativo de barragens cadastradas representando a tendência de um aumento cada vez maior desse número. Nessa linha, Duarte (2008) discorre que existem no Brasil barramentos de diversas dimensões e destinados a diferentes usos, tais como barragens de infraestrutura para acumulação de água, geração de energia, aterros ou diques para retenção de resíduos industriais, barragens de contenção de rejeitos de mineração, entre outros. Diante disso, tal diversidade exige legislações e normas criteriosas devido à notável ameaça ambiental e socioeconômica.

Apesar da legislação vigente, o relatório de classificação de barragens reguladas pela Agência Nacional de Águas (ANA) (2017) evidencia que alguns barramentos não se encontram regulamentados (licenciados ou com outorgas devidamente emitidas). Muitos destes casos configuram o cenário potencial de falhas que resultam em tragédias, como o rompimento dos mesmos; nesses casos, dentre os atingidos têm-se vidas e passivos ambientais muitas vezes irreparáveis.

A segurança de uma barragem está associada a muitos fatores interligados, como seu projeto hidráulico e estrutural, condicionantes geológicas, geotécnicas, hidrológicas e meteorológicas, bem como à própria conduta humana na concepção, implantação, operação e manutenção da mesma (UEMURA, 2009).

Devido aos fatores, supraditos, associados à segurança de barragens são necessários estudos e modelagens matemáticas que possam prever situações de risco e avaliar os impactos causados na hipótese de rompimento de barragens a fim de classificar os barramentos e estabelecer através da classificação, exigências para prevenção de desastres.

O primeiro método trazido neste estudo é estabelecido pela Lei 12.334/2010, que determina a aplicação de um sistema de classificação de barragens por Dano Potencial Associado (DPA) (possível dano associado a rompimentos, vazamentos, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem), que avalia altura da barragem, volume do

reservatório, ocupação humana a jusante, interesse ambiental a jusante e instalações na área de jusante da barragem.

A partir desse supracitado sistema a ANA desenvolveu um modelo em que o volume de água armazenado no momento da ruptura foi considerado o fator de principal relevância na determinação da distância a jusante em termos de amortecimento do pico de vazão ao longo do vale. Salienta-se que quanto maior o volume menor será o amortecimento do pico de vazão.

Destarte, a metodologia proposta pela ANA de cálculo da extensão da área inundada para jusante, se mostra um importante parâmetro para efeitos de classificação das barragens quanto ao DPA, já que prescreve relação direta entre o volume armazenado e a distância máxima para jusante da barragem. Dessa forma, atribui-se também devida valia às três instâncias lesionadas em caso de desastres, o potencial de perdas de vidas humanas, os impactos sociais e os econômicos, uma vez que são fatores considerados na avaliação do DPA.

Em Minas Gerais, a Deliberação Normativa (DN) N.º 62/2002 do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM), em seu art. 3º, estabelece as classes de potencial de dano ambiental, estimando as consequências em relação ao dano ambiental em caso de ruptura.

Três anos depois, a Deliberação Normativa COPAM N.º 87/2005 surgiu com o intuito de alterar e complementar a Deliberação Normativa COPAM N.º 62/2002, acrescentando as prerrogativas técnicas para definição da área a jusante da barragem e definindo a periodicidade para a realização de Auditoria Técnica de Segurança de Barragem.

Também com um intervalo de três anos, em 2008, foi emitida a Deliberação Normativa COPAM N.º 124/2008 que complementa a DN N.º 87/2005. A nova DN estabelece a obrigatoriedade de disponibilização do Relatório de Auditoria Técnica de Segurança de Barragens no empreendimento para consulta durante as fiscalizações ambientais e apresentação à Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) da Declaração de Condição de Estabilidade. Em Minas Gerais, a FEAM é o órgão responsável pelo cadastro e classificação das barragens seguindo os parâmetros trazidos por tais deliberações.

Esse trabalho de conclusão de curso consistiu em avaliar barramentos na bacia do Rio Doce, podendo, assim, servir de subsídio para posteriores pesquisas a serem realizadas com enfoque na região.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo principal aplicar a metodologia desenvolvida pela Agência Nacional de Águas, para cálculo da extensão da área inundada para jusante, em barragens na Bacia do Rio Doce cadastradas no Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragens.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a possibilidade de efeito cascata devido à ruptura destes barramentos;
- Mapear a extensão de trecho de rio atingida pela possível ruptura dos barramentos;
- Identificar os possíveis impactos socioeconômicos e ambientais causados pela ruptura dos barramentos; e
- Classificar as barragens selecionadas quanto ao Dano Potencial Associado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) (2011), o Açude Apipucos construído aproximadamente no final do século XVI é o barramento mais antigo registrado no Brasil, localizado em Recife. Mais adiante no tempo, próximo da última década do século XIX houve um crescimento no número de barramentos, cenário ocasionado pelo desenvolvimento do país e pelas secas nordestinas. Nesse mesmo período, iniciou-se a implantação dos barramentos voltados para produção de energia elétrica com menores dimensões que os represamentos atuais, localizados nas regiões Sul e Sudeste.

3.1 Tipos de Barragens

De acordo com a United States Bureau of Reclamation (USBR) (2012), as barragens podem ser classificadas segundo sua utilização, seus materiais de construção e seu projeto hidráulico, sendo a segunda especificação a mais utilizada.

Segundo a referida agência, a classificação quanto aos usos dos barramentos são armazenamento, desvio ou retenção. As barragens para armazenamento são aquelas contruídas para represar a água com o propósito de abastecimento de água, recreação, pesca, geração de energia hidrelétrica, entre outros. As barragens de desvio são normalmente construídas para transportar água em valas, canais, ou outros sistemas de transporte e são usadas na irrigação, para desvio de um fluxo para um reservatório de armazenamento fora do canal ou para usos municipais e industriais. Por sua vez, as barragens de retenção são aquelas utilizadas para retardar uma inundação, escoamento ou minimizar o efeito de inundações súbitas. Nesse caso, a água pode ser armazenada e liberada por meio de uma estrutura ou mantida por muito tempo com o intuito de ocorrer infiltração.

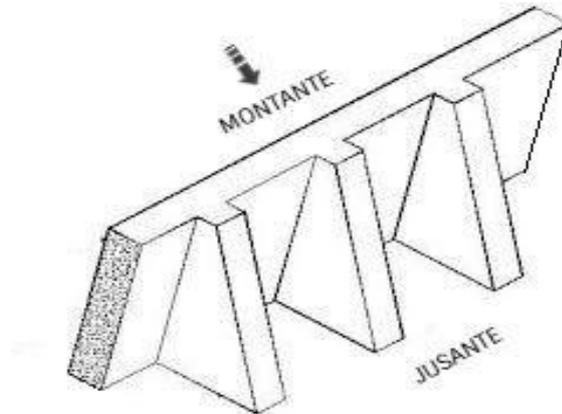
Segundo a Agência Nacional de Águas (2016), os materiais comumente empregados são: terra, rocha, concreto e borracha.

De acordo com Gouveia (2017), o tipo de barragem mais comumente utilizado no Brasil são as barragens de terra, sendo caracterizadas por vales largos e ombreiras¹ suaves e, um dos mais raros, são as barragens de contraforte.

As barragens de contraforte, concreto à gravidade e de concreto em arco, estão representadas respectivamente nas Figuras 1 e 2.

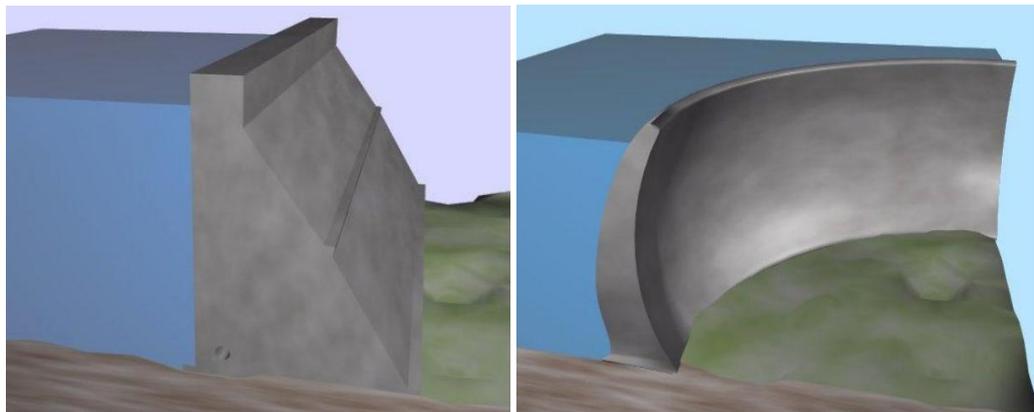
¹ Laterais do vale onde a barragem se apoia.

Figura 1 – Barragem de Contraforte.



FONTE: Adaptado. Vieira Junior e Salles (2011).

Figura 2 – Barragem de concreto à gravidade e de concreto em arco.



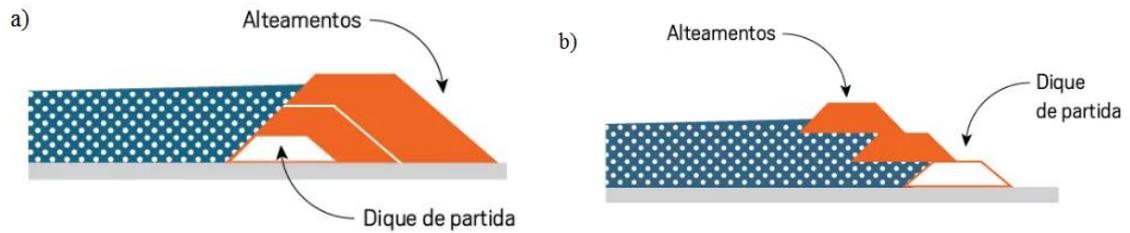
FONTE: ANA (2016).

Dois tipos de barragens ganharam destaque devido ao rompimento dos barramentos em Mariana, em 2015, e em Brumadinho em 2019, são elas as barragens de alteamento a montante e a jusante. Essa classificação é devido ao tipo de método de alteamento.

As barragens de alteamento a jusante são aquelas em que o maciço é contruido em solo compactado e os alteamentos progridem no sentido do fluxo de água. Já as barragens à montante são aquelas em que os alteamentos são realizados no sentido contrário do fluxo de água e a barragem é contruída com rejeitos por meio de alteamentos sobre o próprio rejeito depositado, (VALE, 2017).

As figuras 3a e 3b exibem a representação dos dois tipos de alteamentos sobreditos.

Figura 3 - Tipos de Barragem de alteamento a jusante (a) e a montante (b).



FONTE: Julio (2019)

No âmbito dos projetos hidráulicos, a classificação ocorre entre barragens com controle de vertimento ou de soleira livre, (USBR, 2012).

3.2 Ruptura de Barragens

O CBDB (2001) define a ruptura de barragens com relação a sua integridade estrutural e a seu desempenho. No contexto de integridade estrutural, apresenta o rompimento de barragens como uma liberação sem controle do conteúdo de um reservatório, sendo esse, ocasionado pelo colapso da barragem ou de alguma parte dela. Já no contexto de desempenho dos barramentos, o seu rompimento está associado à incapacidade de uma barragem de desempenhar suas funções.

Conforme a ANA (2016), o objetivo principal do estudo de ruptura de barragens é avaliar as diferentes hipóteses de ruptura das barragens e os efeitos dessas rupturas nas cidades localizadas a jusante das estruturas.

Os impactos desencadeados pela ruptura de barragens abrangem os meios físico, biótico e socioeconômico. Collischonn (1997) os classifica de modo geral em:

- Prejuízos materiais, incluindo as propriedades atingidas na área inundada a jusante, residências, automóveis, equipamentos, produtos e estradas;
- Interrupção de atividades de manufatura, serviços, transportes, atividades agrícolas e geração de energia;
- Operações de emergência, como operações de busca e resgate, assistência médica, evacuação e custo temporário dos desabrigados;
- Impactos para o meio ambiente; e
- Perda de vidas humanas.

3.2.1 Causas de Ruptura de Barragens

De acordo com Xiong (2011), as falhas de barragens resultam tanto de forças externas quanto internas. Estudos de caso mostram que essas falhas podem surgir devido a diferentes razões que variam de infiltração, erosão interna, deslizamentos de taludes e terremotos.

Em virtude desses inúmeros fatores, supracitados, as rupturas de barragens podem ocasionar incidentes de alta magnitude, aspecto que exige circunspeção sob todos os pormenores que envolvem o projeto, a implantação, a manutenção e fiscalização dessa estrutura, mesmo que tais eventos possuam baixa probabilidade de ocorrência.

Consoante a Collischonn (1997), a ruptura de barragens pode ser provocada por causas naturais ou antrópicas tendo relação direta com seu tipo. Posto isto, barragens de terra são suscetíveis ao galgamento, infiltração e entupimento do sistema de drenagem interno gerando brechas. Barramentos de concreto são propensos a problemas estruturais e de fundação e barragens de gravidade a gerar brechas instantâneas se a estrutura for de concreto.

3.2.2 Formas de Ruptura de Barragens

Segundo a ANA (2012), as formas de ruptura de barragens são estudadas mediante modelos de simulação de cheias provenientes de acidentes já ocorridos com barragens. Devido às falhas estruturais e de ruptura por galgamento se tratarem de formas de rupturas comuns, realizam-se nos referidos modelos, análises decorrentes destes tipos de rompimento.

Assim como apresentado anteriormente, há relação entre as causas de rompimento e os tipos de barragem. Por este motivo, Santos, França e Almeida (2007) apresentam a relação dos tipos de rupturas mais comuns para cada tipo de barragem (Tabela 1).

Tabela 1 – Formas de Ruptura de Barragens.

Tipo de Barragem	Forma de Ruptura
Aterro	Galgamento Erosão interna Escorregamento da fundação Ação de ondas da albufera Erosão da fundação a jusante da barragem
Concreto Gravidade	Deterioração dos materiais Falha da fundação da barragem Falta de estabilidade do corpo da barragem Erosão da fundação a jusante da barragem Atos de Guerra
Betão ² em arco	Falha dos encontros laterais do vale de fundação Saturação das fundações rochosas Carga excessiva resultante de um excessivo enchimento da albufera Deslizamento do corpo da barragem Erosão da fundação a jusante da barragem

FONTE: Adaptado. Santos, França e Almeida (2007).

² Concreto

Segundo a ANA (2016), a ruptura por galgamento e por erosão interna se encontram entre as causas de rompimento mais graves e mais frequentes em pequenas barragens de terra.

A erosão interna e o galgamento geram liberação brusca dos volumes reservados e, de acordo com Serafim (1981 apud Santos, Franca, Almeida, 2007), pode ter relação ainda com a ocorrência de cheias excepcionais ou falha dos mecanismos de abertura de comporta.

3.2.2.1 Ruptura por Piping

A percolação interna nas barragens se trata de um evento comum e natural em barragens, mas se torna um problema quando há ocorrência de arraste dos materiais do aterro ou da fundação, originando a erosão interna.

De acordo com a ANA (2012), piping é o rompimento produzido por uma falha estrutural devido à erosão interna. No caso de barragens de concreto, pode ocorrer devido a deficiências do próprio concreto utilizado.

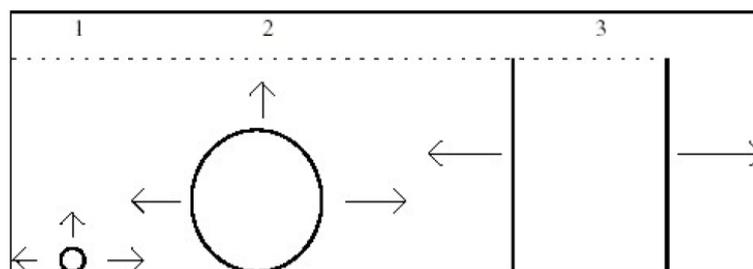
Ladeira explica o processo de desenvolvimento da falha:

É uma erosão regressiva, onde há formação de um tubo, originado do carreamento de grumos de silte e argila, de jusante para montante no maciço de terra compactada em uma barragem, no qual esse tubo tende a aumentar seu diâmetro à medida que a água percola pelo solo compactado. (2007)

Uemura (2009) traz que esse tipo de falha ocorre com mais frequência nos períodos secos, pois corresponde ao período em que os reservatórios se encontram cheios.

A seguir, a título de esclarecimento adicional, a figura 4 apresenta o processo de formação de piping.

Figura 4 - Processo de formação de Piping. 1) Surgimento do Poro; 2) Aumento da erosão; 3) Colapso da porção superior e erosão.



FONTE: Paquier (2002).

Dado o exposto anteriormente em consonância com Ladeira (2007), é possível notar que o grau de compactação do solo, a adequada graduação no tamanho das partículas nas áreas de transição e o adequado monitoramento de parâmetros geotécnicos se mostram de grande relevância para evitar a formação de piping.

3.2.2.2 Ruptura por Overtopping (Galgamento)

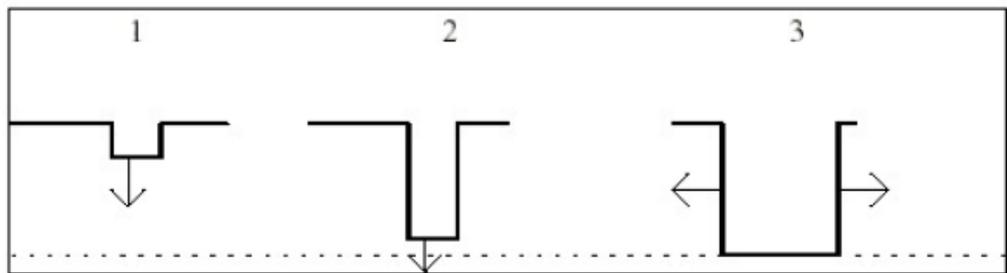
O galgamento é um das maiores causas de rupturas do mundo e sua ocorrência se dá quando o nível d'água no reservatório se eleva além da cota da crista da barragem (MOTA, 2017). No caso das barragens de terra, o galgamento produz um arraste dos materiais internos da barragem. Nas barragens de concreto, a ruptura pode ser causada por sobrecarga estrutural, (ANA, 2012).

De acordo com o dicionário, define-se galgamento como a transposição de uma estrutura por uma massa de água.

Uemura (2009) cita que situações como problemas operacionais relacionados ao mau funcionamento de comportas, obstrução de válvulas de descarga, problemas de despreparo dos operadores e ainda fatores acidentais podem ser condições que provoquem o rompimento por galgamento.

A figura 5 demonstra a evolução de uma ruptura por galgamento.

Figura 5 – Processo de formação do Galgamento. 1) Surgimento da brecha retangular; 2) Erosão do fundo da brecha; 3) Aumento progressivo da erosão.



FONTE: Paquier (2002).

3.2.2.3 Ruptura de Barragens em Cascata

“Em rios com vários reservatórios em cascata, o rompimento de uma barragem a montante pode resultar no colapso de todo o sistema, por rompimento sucessivo, chamado de “efeito dominó”, ou “rompimento em cascata” (COLLISCHONN,1997).

Esse tipo de ruptura acontece quando o volume liberado pelo reservatório localizado a montante não é suportado pelo barramento localizado à sua jusante. Ou seja, o subsequente não é capaz de verter ou laminar todo o volume recebido, o que eleva o nível acima da cota da crista provocando esse tipo de ruptura (ANA, 2012).

3.2.3 Riscos Associados a Rupturas de Barragens

De acordo com a DN COPAM N.º 62/2002, risco é a probabilidade e severidade de um efeito adverso para a saúde, para a propriedade ou para o meio ambiente, sendo avaliado em função das condições de implantação da barragem e da eficácia do sistema de gestão.

Em rompimentos de barragens, os níveis resultantes, quando de grandes proporções, são capazes de produzir danos severos a jusante devido à quantidade de água que é bruscamente liberada.

Por esse motivo, são desenvolvidas metodologias de análise de risco para conhecer as ameaças dos empreendimentos de forma a permitir o estudo das melhores medidas de gestão, a fim de evitá-las. Segundo Ladeira (2007), tais metodologias não são determinísticas. Elas trabalham com cenários de incertezas associadas a ameaças que, se puderem ser quantificadas, estarão aptas a serem gerenciadas por análise de risco.

Diante do exposto, segundo o art. 2º, inciso III, da Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, descrita na seção a seguir, a segurança de barragem é: “a condição que visa a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente”.

3.3 Legislação Brasileira sobre Segurança de Barragens

Segundo Lauriano (2009), de um modo geral, as normas legais existentes por todo o mundo, no campo de barragens, consideram o controle e a segurança de suas estruturas, além do planejamento de emergência em casos de possíveis rompimentos.

No Brasil, a Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

I - Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros); II - Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos); III - Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; e IV - Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas (Brasil, 2010).

Os objetivos da PNSB (Lei 12.334/10) são:

I - garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências; II - regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional; III - promover o monitoramento e o

acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens; IV - criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança; V - coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos; VI - estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público; e VII - fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos. (Brasil, 2010).

3.3.1 Classificação de Risco de Barragens

O artigo 7º da Legislação Federal, supracitada, define que as barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). A categoria de risco deverá ser feita em função das características técnicas, do estado de conservação do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem (PSB) e divididas em risco alto, médio ou baixo. Já para a classificação por categoria de Dano Potencial Associado (DPA) será dividida da mesma forma, em alto, médio ou baixo, porém, será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura de barragens.

Com enfoque na classificação de DPA, segundo a ANA (2012), existem diferentes critérios que podem ser utilizados no Brasil e um deles é apresentado na Deliberação Normativa COPAM/MG nº 62 (MINAS GERAIS, 2002), complementada e alterada pela Resolução COPAM nº 87 (MINAS GERAIS, 2005). A referida resolução dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais.

As três categorias de classificação por DPA trazidas pela DN N.º 87/2005 são:

- I. Baixo potencial de dano ambiental - Classe I: quando o somatório dos valores for menor ou igual a dois ($V \leq 2$);
- II. Médio potencial de dano ambiental - Classe II: quando o somatório dos valores for maior que dois e for menor ou igual a cinco ($2 < V \leq 5$);
- III. Alto potencial de dano ambiental - Classe III: quando o somatório dos valores for maior que cinco ($V > 5$).

Sendo V apenas uma incógnita representativa, a classificação é feita considerando o somatório dos valores de cada um dos parâmetros de classificação definidos nas colunas no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros de classificação de DPA.

Altura da Barragem H (m)	Volume do Reservatório (x10⁶ m³)	Ocupação Humana a Jusante	Interesse Ambiental a Jusante	Instalações na área de jusante
H < 15 V=0	V _r < 0,5 V=0	Inexistente V = 0	Pouco significativo V = 0	Inexistente V = 0
15 < H < 30 V=1	0,50 < V _r < 5,0 V = 1	Eventual V = 2	Significativo V = 1	Baixa concentração V = 1
H>30m V=2	V _r > 5,0 V = 2	Existente V = 3	Elevado V = 3	Alta concentração V = 2
-	-	Grande V= 4	-	-

FONTE: DN N.º 87/2005 (2005).

No que tange os parâmetros apresentados no Quadro 1, a Deliberação Normativa 87/2005 em complemento à DN N.º 62/2002 estabelece:

Ocupação humana a jusante da barragem, à época do cadastro, em quatro:

- i - Inexistente: não existem habitações na área a jusante da barragem;
- ii - Eventual: significa que 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 (exemplo: indústria, mina operante, planta de beneficiamento, escritórios, etc.);
- iii – Existente: significa que existem habitações na área a jusante, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas, sendo que a barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II B – Inertes, segundo a NBR 10.004/2004 da ABNT;
- iv - Grande: significa que existem habitações na área a jusante, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas, com o agravante de que a barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados como Classe I – Perigosos ou Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10.004/2004 da ABNT.

Interesse ambiental da área a jusante da barragem, em três níveis:

- i - Pouco significativo: quando a área a jusante da barragem não representa área de interesse ambiental relevante ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais;
- ii - Significativo: quando a área a jusante da barragem apresenta interesse ambiental relevante;
- iii - Elevado: quando a área a jusante da barragem apresenta interesse ambiental relevante e a barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados como Classe I - Perigosos ou Classe II - Não Inertes, segundo a norma NBR 10.004 da ABNT, ou outra equivalente que vier sucedê-la.

Instalações na área a jusante da barragem, em três níveis:

- i - Inexistente: quando não existem quaisquer instalações na área a jusante da barragem;
- ii - Baixa concentração: quando existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área a jusante da barragem;
- iii - Alta concentração: quando existe grande concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de grande relevância sócio-econômico-cultural na área a jusante da barragem.

3.4 Rompimentos de Barragens no Brasil

A ocorrência desses grandes eventos é remota e intervalada, mas catastrófica, estando relacionada na maioria dos casos, com óbitos, passivos ambientais e perdas socioeconômicas e culturais. Dessa forma, as rupturas já ocorridas mesmo que longínquas são relevantes para o melhor entendimento e aprendizado das deficiências de projetos, construção e operação das barragens, bem como para atuação em situações de emergência.

Apesar dos inúmeros rompimentos apresentados ao longo do tempo, dois rompimentos tiveram maior relevância nos últimos anos devido às suas proporções e atualidade dos eventos.

O primeiro deles ocorreu no dia 05 de novembro de 2015, na cidade de Mariana, em Minas Gerais. Segundo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (2018), a barragem de fundão, da mineradora Samarco, se rompeu caracterizando o maior desastre socioambiental do país. Foram lançados 34 milhões de metros cúbicos de rejeito no meio ambiente.

Como resultado dessa tragédia, morreram 19 pessoas, além de diversos danos socioambientais, fragmentação de habitat, destruição de Áreas de Preservação Permanentes (APP's), alteração da qualidade da água entre outros. (IBAMA, 2018)

O segundo desastre ocorreu no dia 25 de janeiro de 2019, no município de Brumadinho, também em Minas Gerais. O rejeito atingiu cerca de 269,84 hectares incluindo a devastação de 133,27 hectares de vegetação nativa de Mata Atlântica e 70,65 hectares de Áreas de Preservação Permanente (APP) ao longo de cursos d'água afetados pelos rejeitos de mineração, (IBAMA, 2019).

Nessa tragédia, segundo a Defesa Civil de Minas Gerais, o número de mortes foi de aproximadamente 216, representando 197 a mais do que no desastre de Mariana ocorrido em 2015.

A seguir, os Quadros 2 e 3 apresentarão algumas rupturas de barragens e suas consequências ocorridas no Brasil nos últimos 10 anos.

Quadro 2 – Casos de rompimentos de barragens no Brasil em 2008 e 2009.

Nome	Estado	Ano	Volume	Consequências
Barragem da PCH Apertadinho	Rondônia	2008	Volume máximo do reservatório igual a 31,74 hm ³	Grande impacto ambiental na área a jusante, com destruição de 50 km de mata e assoreamento do rio.

(Continuação)

Nome	Estado	Ano	Volume	Consequências
Barragem Algodões I	Piauí	2009	Volume acumulado de cerca de 51 hm ³	Mais de 2.900 pessoas foram afetadas, deixando 80 feridos e 11 mortos.

FONTE: Adptado de Lauriano (2009).

Quadro 3 – Acidentes e incidentes ocorridos no período de abrangência do relatório de segurança de barragens, 2017.

Data	Evento	Nome da Barragem	UF	Empreendedor	Órgão Fiscalizador	Causa provável
06/01/2017	Acidente	Rincão dos Kroeff	RS	Não informado	SEMA/RS	Cheia
16/02/2017	Acidente	Cacimba Nova	PE	Ministério da Integração Nacional	ANA	Percolação pela fundação
03/03/2017	Acidente	Barreiros	PE	Ministério da Integração Nacional	ANA	Percolação pela fundação
01/12/2017	Acidente	Lageado	MS	Luciano Loureiro	IMASUL/MS	Galgamento
07/03/2017	Incidente	Açude dos Irmãos	PB	Prefeitura de São José de Caiana	AESA/PB	Vertedor insuficiente quase causou galgamento
10/03/2017	Incidente	PCH Tamboril	GO	Tamboril Energética	ANEEL	Rompimento parcial da membrana PEAD e aterro na margem esquerda
08/05/2017	Incidente	Conjunto de Baías VIGA	MG	Ferrous Resources do Brasil S.A.	ANM	Recalque após remoção de rejeitos/sedimentos
23/05/2017	Incidente	Conjunto de Baías VIGA	MG	Ferrous Resources do Brasil S.A.	ANM	Recalque após remoção de rejeitos/sedimentos
05/06/2017	Incidente	Pindoba	AL	Desconhecido	SEMARH/AL	Vertedor insuficiente quase causou galgamento
11/07/2017	Incidente	Casa de Pedra	MG	CSN Mineração S.A.	ANM	Surgências após elevação do nível da água do reservatório alteado
07/2017	Incidente	PCH Rodulf	SC	Heidrich & Heidrich Ltda	ANEEL	Pequeno rompimento em junta de dilatação
12/08/2017	Incidente	PCH Verde 4A	MS	Phoenix Geração de Energia S.A.	ANEEL	Vazamento dentro da casa de força
05/10/2017	Incidente	Capané	RS	IRGA-RS	SEMA/RS	Excesso de percolação
16/12/2017	Incidente	Água Limpa	ES	Prefeitura de Jaguaré	AGERH/ES	Material carregado obstruindo vertedor

FONTE: Adaptado de ANA (2017).

3.5 Passivos Ambientais causados por Barragens

A construção e o rompimento de barramentos têm impactos diretos no meio ambiente das áreas afetadas devido, segundo Piasentin (2016), à alteração do regime fluvial, modificação dos ecossistemas, o comprometimento da qualidade das águas, aumento de doenças ligadas à água, entre outros fatores.

Mota (2017) apresenta que o principal efeito hidráulico causado por uma barragem ocorre devido à alteração da descarga da bacia que passaria a acontecer no reservatório e não

no leito do rio. Dessa forma, durante este intervalo temporário, o equilíbrio hidrológico pode entrar em colapso, aumentando a decadência da fauna e da flora.

Uma vez que Zanatta (2016) afirma que os fatores hidrológicos exercem influência sob os microclimas, é possível estabelecer relação entre barragens e parâmetros como, a porcentagem de umidade, temperatura e movimentação de ar, o que pode interferir significadamente nas espécies de fauna e flora mais sensíveis a estes indicadores.

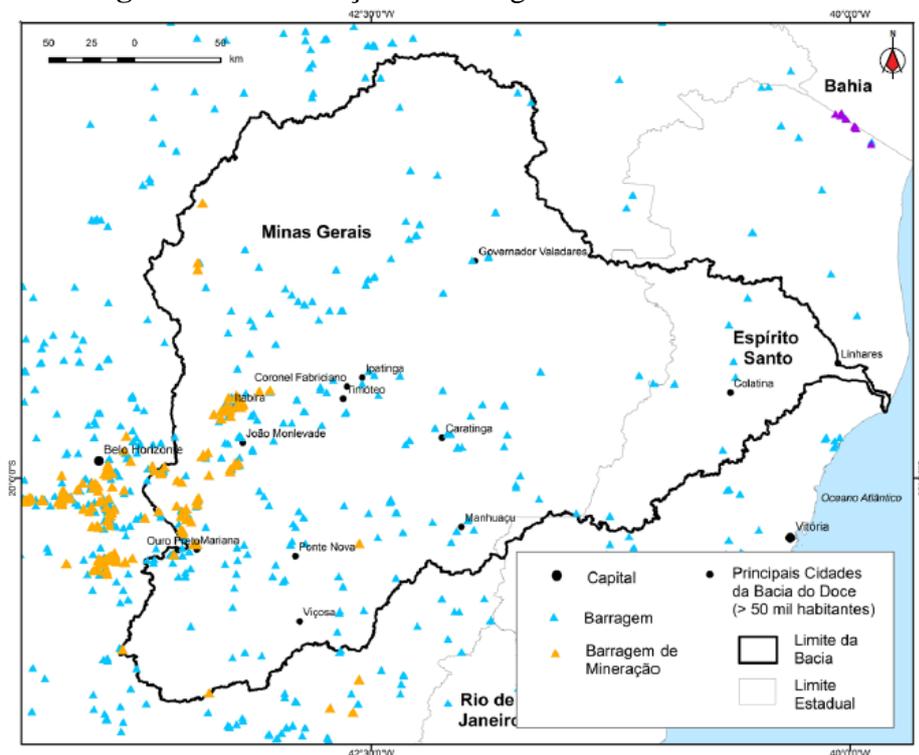
4 METODOLOGIA

4.1 Área de Estudo

A área de estudo do trabalho está localizada na região hidrográfica do Atlântico Sudeste, na região sudeste do Brasil, na bacia do Rio Doce. Segundo a ANA (2016), a bacia do Rio Doce possui uma área de drenagem de aproximadamente 84 mil km² e seu curso d'água principal, o Rio Doce, 888 km de extensão. Compreende 225 municípios distribuídos no território mineiro e capixaba onde residem cerca de 3.6 milhões de habitantes.

A região possui grandes reservas minerais, o que configura o cenário ideal para a presença de barragens de rejeitos, já que são estruturas comumente utilizadas em empreendimentos de exploração mineral. Segundo o mesmo estudo supracitado, a bacia possui grande relevância hidrelétrica e o minério de ferro como principal produto de extração, que somam 31,4% das concessões de lavra da região. A figura 6 apresenta a localização das barragens da bacia do Rio Doce.

Figura 6 – Localização de Barragens da bacia do Rio Doce.



FONTE: ANA (2015).

Seus principais rios são, segundo ANA (2016), o rio do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande, Suaçuí Grande, São José e Pancas, rio Casca, Matipó, Caratinga/Cuieté, Manhuaçu, Guandu, Santa Joana e Santa Maria do rio Doce. E os principais reservatórios localizados no Rio Doce são: Candonga, Baguari, Aimorés e Mascarenhas.

Segundo Coelho (2011), as principais cidades pelas quais o Rio Doce passa são:

- Minas Gerais - Aimorés, Belo Oriente, Caratinga, Coronel Fabriciano, Galileia, Governador Valadares, Guaraciaba, Ipatinga, Itabira, Mariana, Manhuaçu, Ouro Preto, Piranga, Ponte Nova, Santa Rita do Itueto, Santana do Paraíso, Timóteo, Viçosa, Rio Doce e Mutum;
- Espírito Santo - Colatina, Linhares, Itaguaçu, Santa Teresa e Afonso Cláudio.

A figura 7 apresenta o mapa da bacia do Rio Doce, suas sub-bacias e cursos d'água principais.

Figura 7 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Doce.



FONTE: Adaptado de Ministério do Meio Ambiente, 2016.

4.2 Metodologia proposta pela ANA

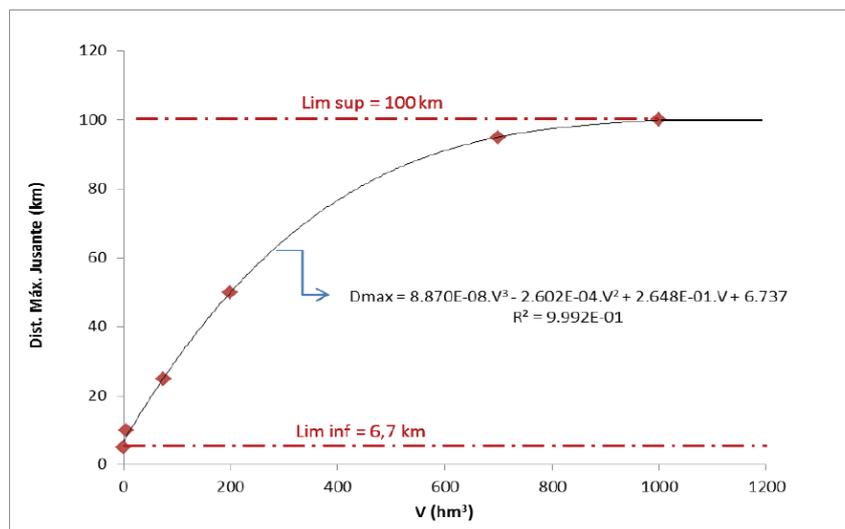
O método a ser aplicado neste estudo consiste na primeira etapa de uma metodologia simplificada a qual possui uma fundamentação técnica que permite juntamente com as demais etapas, a classificação do DPA (Dano Potencial Associado), (ANA, 2017).

A metodologia simplificada é composta pelas seguintes etapas:

1. Cálculo da extensão da área inundada para jusante;
2. Cálculo da vazão máxima na seção da barragem;
3. Cálculo da vazão máxima em cada uma das seções transversais ao longo do vale;
4. Análise de danos incrementais decorrentes de eventual ruptura face à vazão máxima do descarregador;
5. Altimetria de seções perpendiculares ao vale principal onde se propaga a onda de inundação;
6. Cálculo do nível máximo da onda de cheia para as barragens da ANA;
7. Superfície máxima de inundação e correção de incertezas associadas à sua determinação;
8. Critérios considerados na identificação de ocorrências; e
9. Análise de cascatas e eventual reclassificação de barragens quanto ao *DPA*.

A metodologia foi desenvolvida a partir de estudos de casos reais de ruptura de barragens e através da curva de ajustamento dos 6 pontos, apresentados na Figura 8, obteve-se a equação referente ao cálculo da extensão da área inundada para jusante (equação 1).

FIGURA 8 - Relação entre volume armazenado e distância máxima para jusante.



FONTE: Relatório de segurança de barragens (ANA, 2017).

$$D_{max} = 8,870 \times 10^{-8} V_{max}^3 - 2,602 \times 10^{-4} V_{max}^2 + 2,648 \times 10^{-1} V_{max} + 6,737 \quad (1)$$

Onde $0 \text{ hm}^3 \leq V_{max} \leq 1.000 \text{ hm}^3$, sendo, V_{max} o volume máximo do reservatório em hm^3 e D_{max} a Distância máxima em km.

Ou seja, a referida metodologia considera o volume máximo armazenado no reservatório como sendo o parâmetro único de avaliação. Sendo importante salientar que a menor distância a ser considerada para jusante é igual a 6,7 km. Já para reservatórios com volume excedendo 1.000 hm^3 , considera-se o valor fixo de 100 km para a extensão potencialmente afetada.

4.3 Escolha das Barragens

Foram utilizadas informações públicas disponíveis no Website da ANA, acerca dos reservatórios de Minas Gerais, mais precisamente os inseridos na bacia do Rio Doce para posterior aplicação da Metodologia Empírica Simplificada disponibilizada pela ANA no Relatório de Serviços Analíticos e Consultivos em Segurança de Barragens, Produto 6, Classificação de Barragens Reguladas pela Agência Nacional de Águas.

Após análise situacional e de contato com a planilha do Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens SNISB do ano de 2017 (planilha mais atual disponível), foram adotados 2 critérios de seleção para as barragens a serem avaliadas por esse estudo. O primeiro priorizou as barragens localizadas no leito do Rio Doce: Aimorés, Baguari e Risoleta Neves.

O segundo critério foi estabelecido a partir dos filtros disponibilizados na planilha de 2017 do SNISB. Foram eles:

- Estejam localizados em Minas Gerais;
- Não sejam de jurisdição da ANA;
- Estejam na Bacia do Rio Doce;
- Sejam barragens de água; e
- Possuam volumes inferiores a 1000 hm^3 .

Foram excluídos os reservatórios sob jurisdição da ANA em virtude da metodologia utilizada já ter sido aplicada a estas barragens no Relatório de Serviços Analíticos e Consultivos em Segurança de Barragens, Produto 6, Classificação de Barragens Reguladas pela Agência Nacional de Águas. Dessa forma, os filtros preliminarmente descritos foram definidos com base em barragens de água, uma vez que a metodologia utilizada é aplicável a este tipo de barragem, restando assim hidrelétricas e barragens reguladoras de vazão.

Posteriormente, foram retiradas as hidrelétricas Aimorés, Baguari e Risoleta Neves que já haviam sido selecionadas.

O último filtro foi estabelecido a partir de reservatórios com capacidades inferiores a 1000 hm³, em razão da metodologia fixar uma distância máxima a jusante de 100 km para reservatórios com capacidade acima de 1000 hm³. O intuito foi avaliar a aplicabilidade para os dois casos, visto que as primeiras 3 barragens selecionadas já apresentam capacidades superiores a 1000 hm³.

Ao aplicar os filtros descritos, obteve-se um número de 12 barragens, porém, 7 destas apresentam capacidades igual ou inferiores a 30 hm³ que de acordo com a Figura 8, são valores que se encontram muito próximo ao limite inferior de $D_{máx}$ de 6,7 km, condição que não permitiria uma boa avaliação dos possíveis cenários de inundação. Dessa forma, excluindo os reservatórios com tais características as barragens selecionadas foram: Furquim, Sá Carvalho, Benjamim Mário Baptista, Cocais Grande e Rio Piracicaba.

4.4 Softwares utilizados

Utilizaram-se dois softwares, Google Earth Pro e QGis 3.6.1 with GRASS 7.6.1 e uma plataforma de dados, Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema). O Google Earth Pro foi empregado para identificação da localização dos barramentos selecionados, para obtenção de imagens de satélite atuais do empreendimento, para obtenção do uso e ocupação do solo da região a ser alagada à jusante do reservatório em caso de rompimento, para traçar o provável percurso a ser inundado e para obtenção do perfil de elevação do referido traçado.

O segundo software, QGis 3.6.1 with GRASS 7.6.1, foi empregado para elaboração dos mapas de localização das barragens e extensão da área alagada a jusante.

A plataforma IDE-Sisema foi utilizada para identificação das restrições ambientais no trajeto de inundação.

4.5 Classificação de DPA

A classificação de Dano Potencial Associado foi feita a partir do método descrito pela DN 62/2002 complementada pela DN 87/2005, já apresentada nesse estudo.

4.6 Efeito cascata

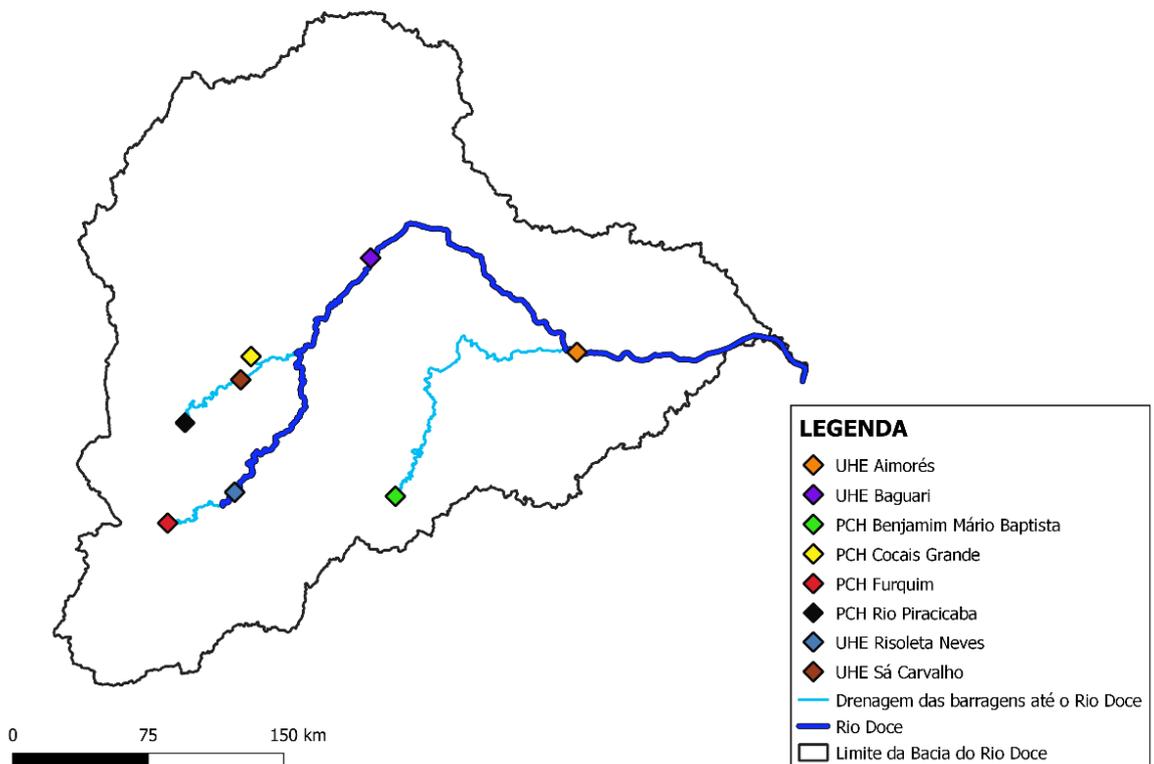
A localização de barragens no trajeto de inundação de outra barragem foi considerado o único critério para determinação da possibilidade de um efeito cascata.

5 RESULTADOS

5.1 Descrição das Barragens selecionadas

A figura 9 apresenta a localização das barragens selecionadas, dentro do limite da Bacia Hidrográfica do Rio Doce.

FIGURA 9 – Localização dos barramentos selecionados.



FONTE: Autoria Própria.

O quadro 4 exibe informações a cerca das 8 barragens a serem abordadas neste estudo.

Quadro 4 – Dados das barragens selecionadas.

Nome da Barragem	Coordenadas	Material	Altura acima da base de fundação (m)	Município	Rio em que está localizada	Capacidade (hm ³)	Empresa responsável
Aimorés	Latitude -19,45694 Longitude -41,0975	Terra enrocamento	29	Aimorés	Rio Doce	28900	Aliança Geração de Energia S.A.
Baguari	Latitude -19,0261111 Longitude - 42,12556	Terra enrocamento	43,15	Governador Valadares	Rio Doce	34910	Baguari I Geração de Energia Elétrica S.A e Baguari Energia

(Continuação)

Nome da Barragem	Coordenadas	Material	Altura acima da base de fundação (m)	Município	Rio	Capacidade (hm ³)	Empresa responsável
Benjamim Mário Baptista	Latitude -20.227675 Longitude -41.9945556	Concreto	19	Manhuaçu	Rio Manhuaçu	438	Rio Manhuaçu Energética S.A.
Cocais Grande	Latitude: -19.52 Longitude -42.76667	Concreto	6	Antônio Dias	Ribeirão Grande	150	Cocais Grande Energia S.A.
Furquim	Latitude - 20.36667 Longitude - 43.20333	Concreto	18	Mariana	Rio Carmo	484, 5	Maynart Energetica LTDA
Rio Piracicaba	Latitude -19.846667 Longitude -43.1225	Concreto	34	João Molevade	Rio Piracicaba	695,68	Arcelormittal Brasil S.A
Risoleta Neves	Latitude: -20.206944 e Longitude: -42.333	Concreto	53	Entre Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado	Rio Doce	54440	Aliança Geração de Energia S.A.
Sá Carvalho	Latitude - 19.63791667 Longitude -42.821861	Concreto	13	Antônio Dias	Rio Piracicaba	50	Sá Carvalho S/A.

FONTE : Autoria Própria.

A seguir, as figuras 10 a 17 exibem imagens, do ano de 2018, das barragens descritas pelo quadro 6.

FIGURA 10 – Usina Hidrelétrica de Aimorés, 2018.

FONTE: Google Earth (2018), Autoria própria.

FIGURA 11 – Usina Hidrelétrica de Baguari, 2018.



FONTE: Google Earth (2018), Autoria própria.

FIGURA 12 – PCH Benjamim Mário Bapista, 2018.



FONTE: Google Earth (2018), Autoria própria.

FIGURA 13 – PCH Cocais Grande, 2018.



FONTE: Google Earth (2018), Autoria própria.

FIGURA 14 – PCH Furquim, 2018.



FONTE: Google Earth (2018), Autoria própria.

FIGURA 15 – PCH Rio Piracicaba, 2018.



FONTE: Google Earth (2018), Autoria própria.

FIGURA 16 – Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, 2018.



FONTE: Google Earth (2018), Autoria própria.

FIGURA 17 – Usina Hidrelétrica Sá Carvalho, 2018.

FONTE: Google Earth (2018), Autoria própria.

5.2 Cálculo da extensão da área alagada para Jusante

Após a obtenção de informações e seleção das barragens aplicou-se a metodologia de cálculo da extensão da área inundada para jusante para os referidos barramentos mencionados. Salienta-se que a equação 1 apresentada na metodologia permite obter a extensão máxima a jusante em função do volume máximo do reservatório.

O quadro 5 apresenta as distâncias máximas obtidas pela metodologia simplificada.

Quadro 5: Caracterização e Cálculo da extensão da área alagada a jusante ($D_{máx}$) nas barragens selecionadas.

Nome da Barragem	UF	Uso Principal	Capacidade (hm ³)	D _{máx} (Km)
Aimorés	MG	Hidrelétrica	28900,00	1931340,19
Baguari	MG	Hidrelétrica	34910,00	3465893,41
Benjamim Mário Baptista	MG	PCH	438	80,25
Cocais Grande	MG	PCH	150	40,90
Furquim	MG	PCH	484,5	84,04
Rio Piracicaba	MG	PCH	695,68146	94,89
Risoleta Neves	MG	Hidrelétrica	54440,00	13554527,39
Sá Carvalho	MG	Hidrelétrica	50	19,34

FONTE: Autoria Própria.

A equação 1, aplicada a este estudo, prevê uma relação diretamente proporcional entre o volume máximo dos reservatórios para com a distância máxima a ser alagada a jusante da barragem. Essa relação pôde ser verificada no quadro 4. As barragens detentoras das maiores capacidades são aquelas que possuem maior distância a jusante.

Salienta-se que a metodologia estabelece uma distância máxima de 100 km para as barragens que possuem uma capacidade igual ou maior a 1000 hm³, por conseguinte os 100 km sobrepõem os resultados encontrados com a aplicação da equação.

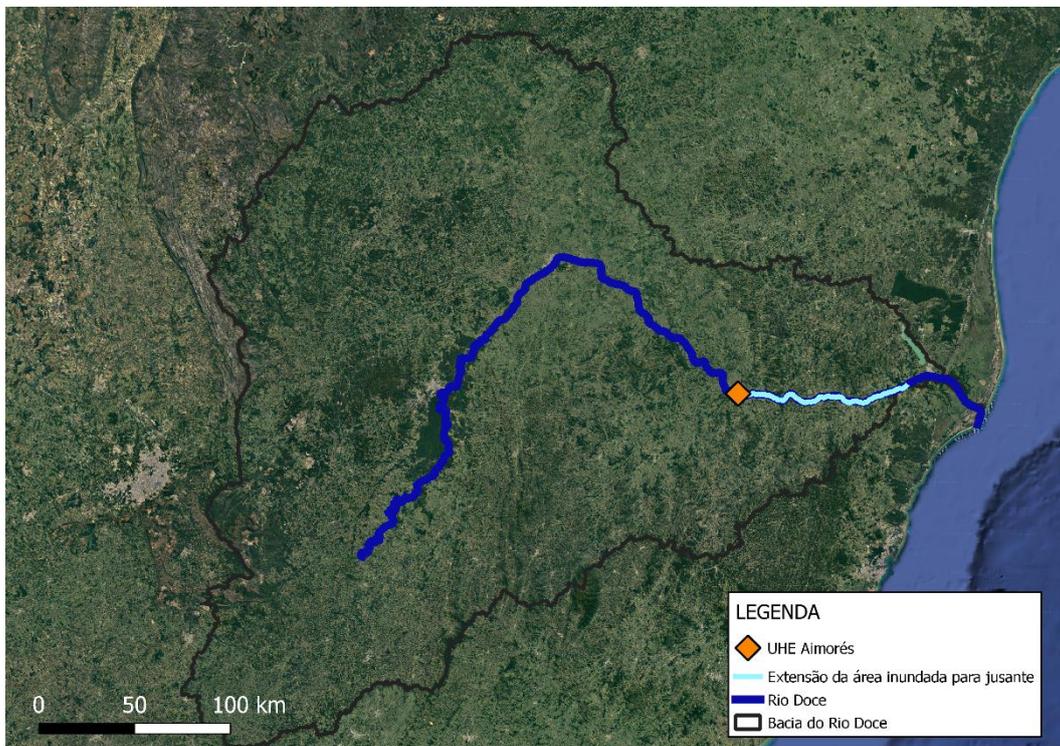
5.3 Mapeamento e descrição da área inundada a jusante

A seguir serão apresentados os mapas com a extensão da área inundada para jusante e seus respectivos perfis de elevação, bem como análise da possibilidade de efeito cascata e das características da região a jusante de cada reservatório, como a presença de empreendimentos e ocupação humana.

É possível notar nos perfis de elevação a serem apresentados adiante algumas irregularidades de altitude em alguns pontos do percurso, resultando em elevações consideráveis no canal fluvial. Essa característica ocorre pois existem matas ciliares, rochas e pontes de altitudes elevadas em relação ao solo ou ao próprio canal que o programa (Google Earth) não é capaz de reconhecer.

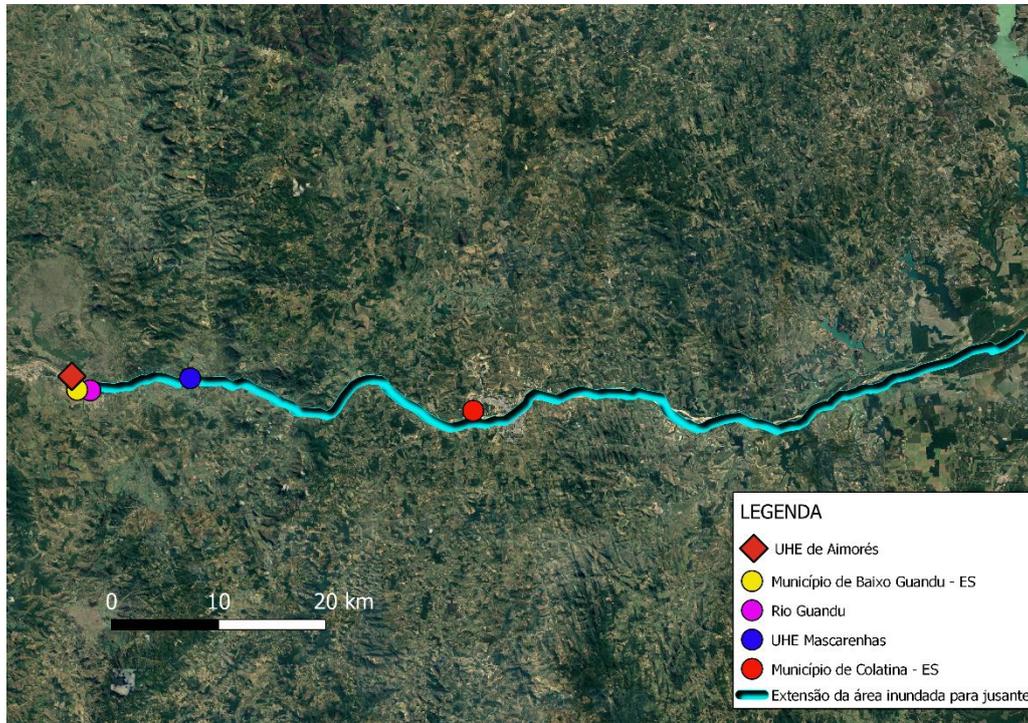
As figuras 18 e 19 apresentam os mapas referentes à extensão da área inundada para jusante da Usina hidrelétrica de Aimorés - MG. A figura 20 exibe o perfil de elevação do trajeto de inundação.

FIGURA 18 – Extensão da área inundada para jusante - Usina Hidrelétrica de Aimorés.



FONTE: Autorial Própria.

FIGURA 19 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante - Usina Hidrelétrica de Aimorés.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 20 – Perfil de elevação do trecho - Usina Hidrelétrica de Aimorés.



FONTE: Autoria Própria.

Diante da hipótese de rompimento na Usina Hidrelétrica de Aimorés, o percurso do volume do reservatório seguiria pelo Rio Doce até aproximadamente 100 km adiante em virtude de a UHE estar instalada no leito do supracitado rio. Os 100 km foram definidos de acordo com o limite estabelecido pela metodologia utilizada, por se tratar de um barramento com capacidade superior a 1000 hm³.

O fim da extensão de inundação limitou-se a uma distância aproximada de 52 km da foz do Rio Doce, no litoral Capixaba. No trajeto, diante do represamento, está o município de Baixo Guandu, do estado do Espírito Santo, com inúmeros empreendimentos e regiões

residenciais e uma população estimada pelo IBGE, para o ano de 2018, de 30.862. Diante da proximidade com a barragem seria a localização com impactos mais significantes em caso de rompimento. Por conseguinte, o Rio Guandu também seria afetado, devido à proximidade com a UHE, mas ainda com impactos de menor proporção já que o sentido da inundação seria oposto ao curso do rio.

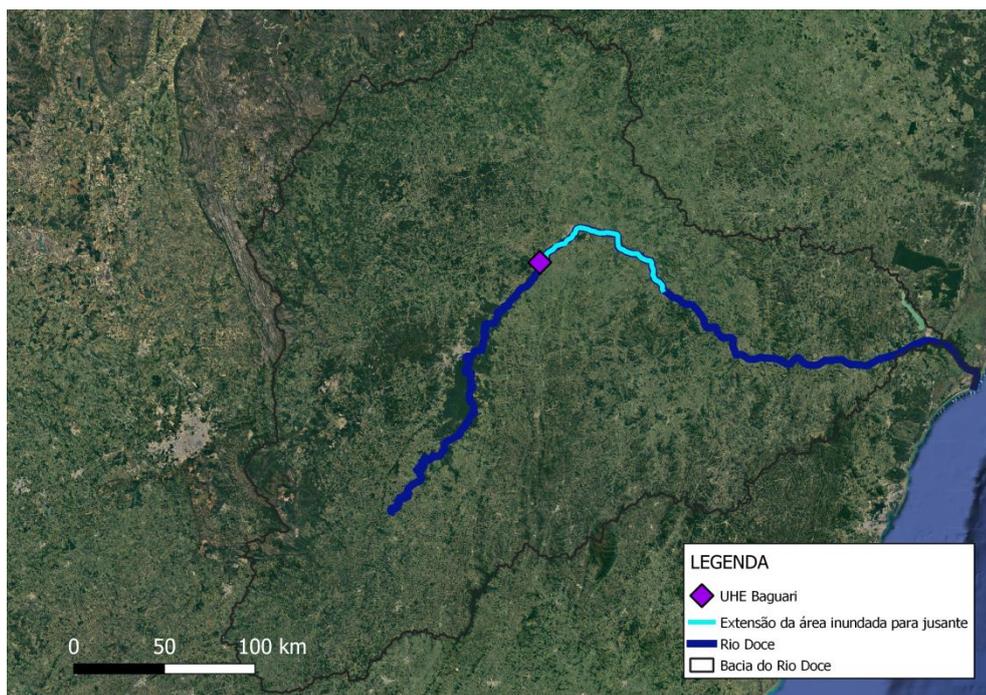
Também seriam atingidas regiões agrícolas localizadas às margens do Rio doce e a cerca de 12 km da UHE Aimorés, a UHE Mascarenhas que receberia parte do volume armazenado no momento da ruptura. Pelo fato das duas mencionadas usinas possuírem capacidades parecidas, o incidente poderia acarretar em um efeito cascata.

O rompimento acarretaria ainda em danos na malha viária, na cidade de Colatina (população estimada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, para o ano de 2018 de 121.580) e em bairros do município de Marilândia e Linhares entre outras pequenas comunidades localizadas às margens do Rio Doce.

Em termos de impactos ambientais, o rompimento da barragem resultaria em danos em área de transição de reserva de biosfera da mata atlântica e em área classificada como prioridade muito alta para conservação da biodiversidade.

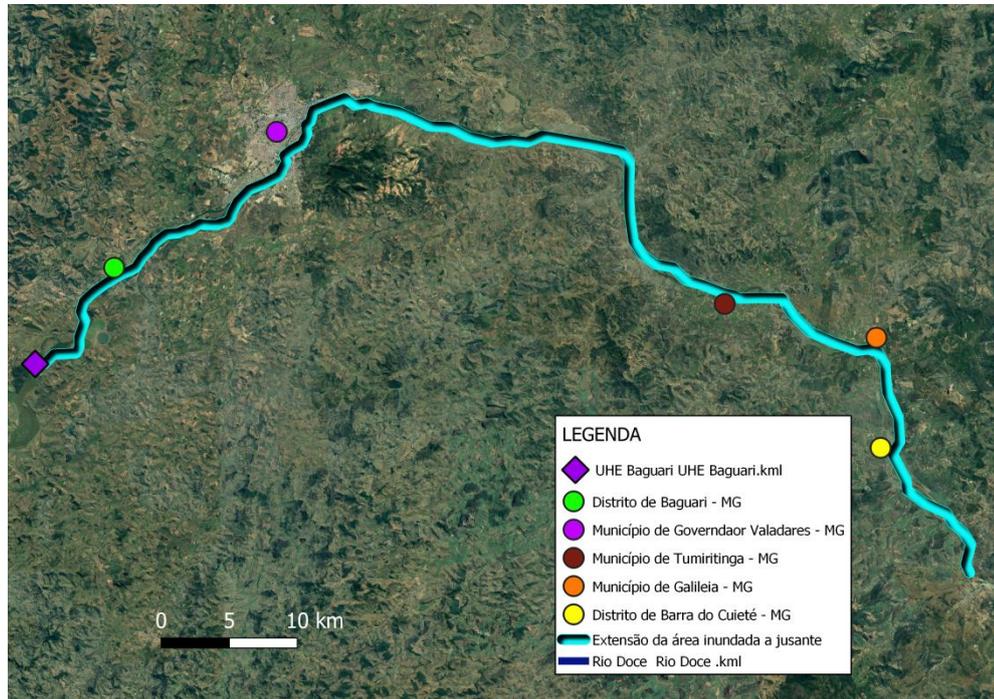
Nas figuras 21, 22 e 23 serão apresentados os mapas referentes à extensão da área inundada para jusante e o perfil de elevação do trajeto de inundação da Usina hidrelétrica de Baguari - MG.

FIGURA 21 – Extensão da área inundada para jusante - Usina Hidrelétrica de Baguari.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 22 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante - Usina Hidrelétrica de Baguari.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 23 – Perfil de elevação do trecho - Usina Hidrelétrica de Baguari.



FONTE: Autoria Própria.

Assim como para a UHE de Aimorés, a UHE de Baguari também teve a área inundada a Jusante fixada em 100 km seguindo a metodologia aplicada, por conter uma capacidade superior a 1000 hm³.

A Usina Hidrelétrica de Baguari está situada no leito do Rio Doce, por esta razão em caso de rompimento o volume armazenado seguiria seu curso. Diante disso, a porção de água atingiria primeiramente o distrito de Baguari, pertencente ao município de Governador Valadares, Minas Gerais, que em 2010 possuía 1.958 habitantes, segundo dados do IBGE, e está localizado a aproximadamente 10km da referida usina. Adiante, cerca de 10 km, o

volume atingiria o município de Governador Valadares (população estimada pelo IBGE para 2018 de 278.685 habitantes), com ocupação em ambas as margens do Rio Doce, inclusive em uma porção de terra localizada no leito do rio, circunstância que viabilizaria um grande desastre socioeconômico.

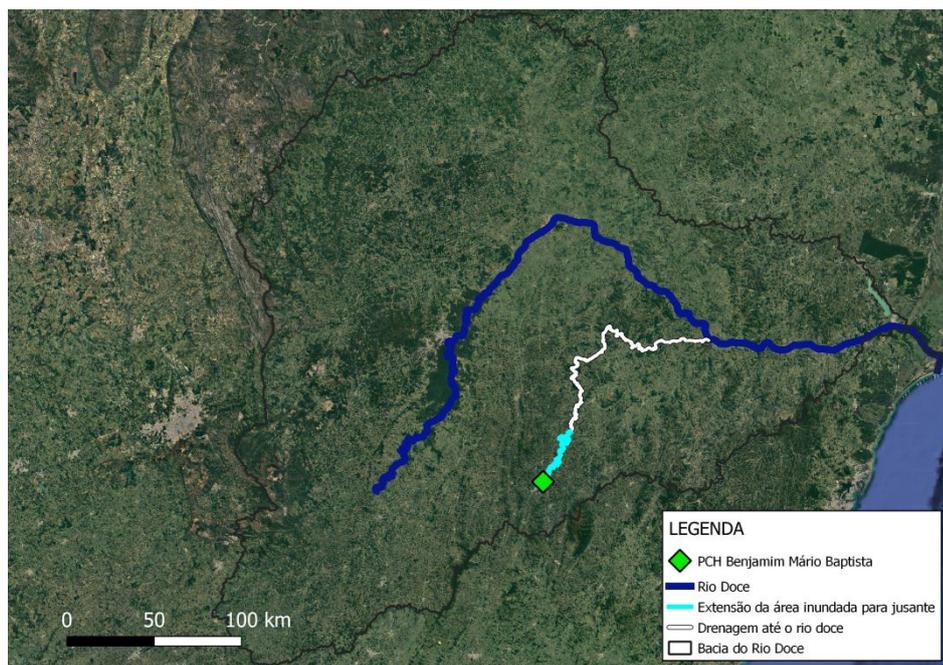
Entre os quilômetros 24 e 40, há uma área de proteção especial próxima ao trajeto de inundação que também seria afetada, o que caracterizaria um impacto ambiental considerável.

Em um lado do curso d'água se encontra o município e o centro de Tumiritinga (Estimativa para 2018, IBGE: 6.698 habitantes), aproximadamente no quilômetro 70 do trajeto de inundação, com alguns distritos localizados bem próximos ao leito do rio, além de residências rurais, por exemplo no distrito de São Tomé do Rio Doce. Do outro lado do curso está o distrito de Cachoeirinha (referente ao município de Galileia), além do próprio centro de Galileia (Estimativa para 2018, IBGE: 6.844 habitantes) localizado no quilômetro 82 aproximadamente.

Já próximo à distância máxima a ser afetada, no quilômetro 90, está o distrito de Barra do Cuieté, do município de Conselheiro Pena, Minas Gerais. Vale salientar que além dos distritos, seriam impactadas a malha viária e regiões agrícolas que se localizam próximo às margens do Rio.

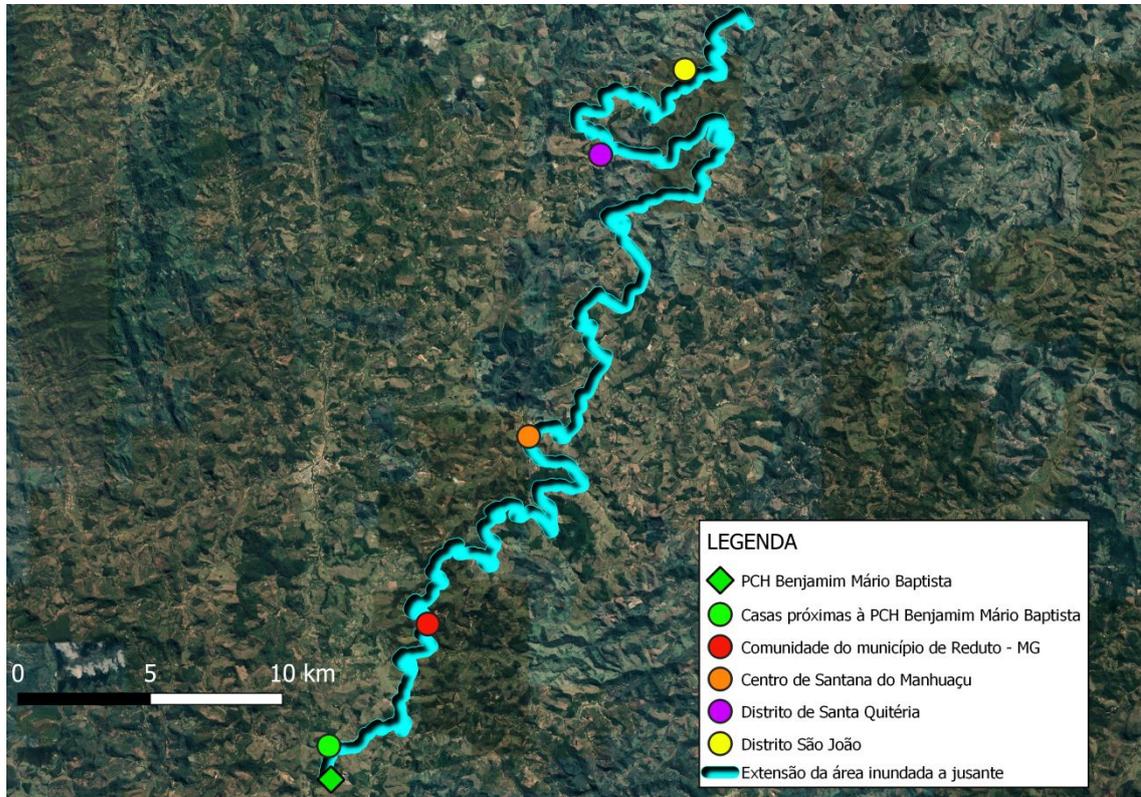
Nas figuras 24, 25 e 26 serão apresentados os mapas do trajeto de inundação e o perfil de elevação referente à Pequena Central Hidrelétrica Benjamim Mário Baptista.

FIGURA 24 – Extensão da área inundada para jusante – PCH Benjamim Mário Baptista.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 25 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – PCH Benjamin Mário Baptista.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 26 – Perfil de elevação do trecho – PCH Benjamin Mário Baptista.



FONTE: Autoria Própria.

O represamento da Pequena Central Hidrelétrica Benjamin Mário Baptista acontece no leito do rio Manhuaçu, por este motivo, em caso de rompimento, o volume armazenado pela referida PCH seguiria o curso do supracitado rio.

O resultado do cálculo de distância máxima a jusante a ser inundada em caso de rompimento foi de aproximadamente 80 km. Nesse trecho de inundação, além de impactos ambientais, do próprio rio e da vegetação de seu entorno, haveriam ainda impactos socioeconômicos relevantes.

Seguindo o trajeto de inundação obtido, o primeiro impacto seria na Rodovia MG 111, paralela ao curso d'água. Posteriormente seriam afetadas pousadas e residências de cunho rural, instaladas às margem do rio, algumas delas com proximidade de menos de 1 km do represamento.

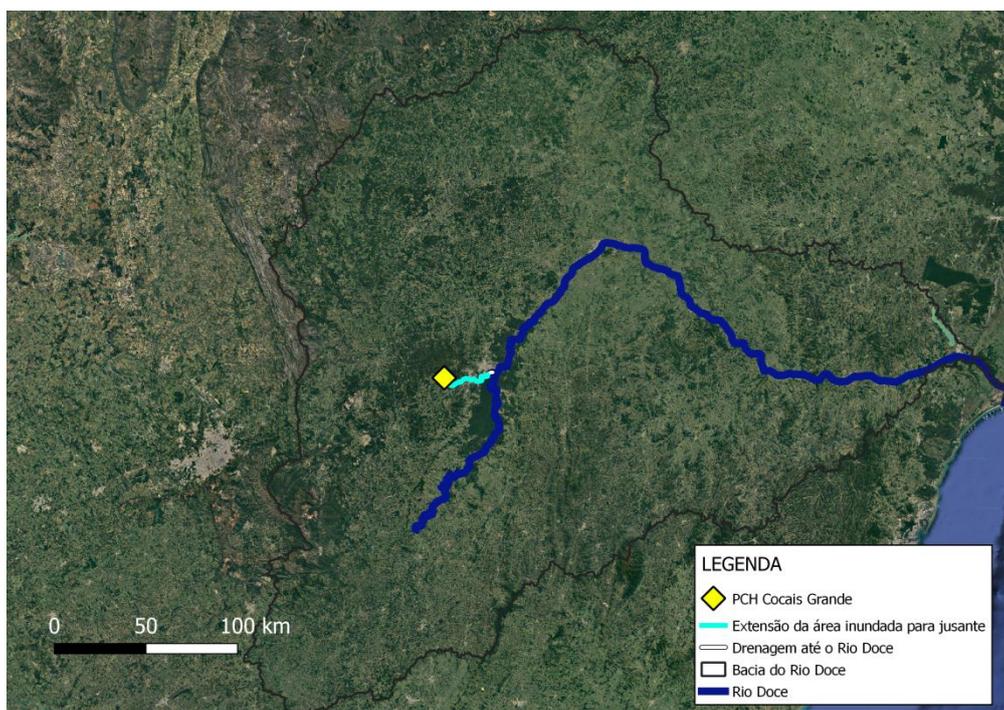
Por conseguinte, o volume atingiria uma pequena comunidade do município de Reduto, Minas Gerais, e aproximadamente 21 km adiante, o centro de Santana do Manhuaçu (População estimada para 2018, segundo o IBGE: 8.681 habitantes), já com considerável ocupação humana, representando ao longo do trecho de inundação a localização onde o maior número de pessoas seriam atingidas.

Outras pequenas comunidades já com certa proximidade do fim do trajeto de inundação também poderiam ser impactadas como, por exemplo, o centro do distrito de Santa Quitéria, e o distrito de São João, ambos do município de Santana do Manhuaçu, Minas Gerais.

Os impactos ambientais mais significativos ocorreriam porque o possível traçado de inundação está localizado em região de transição da reserva de Biosfera da Mata Atlântica e em alguns pontos possui classificação, de extrema e muito alta, em termos de prioridade, para conservação da biodiversidade.

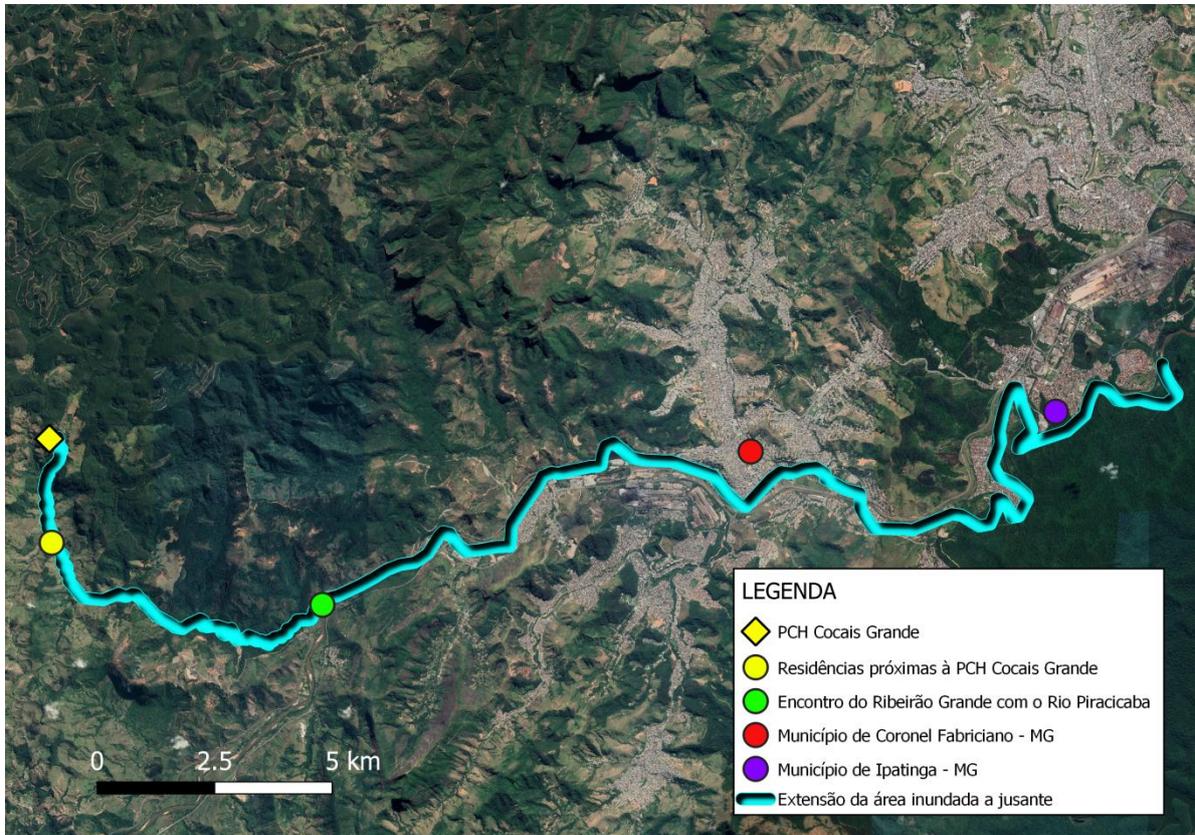
Nas figuras 27 a 29 serão apresentados os mapas do trajeto de inundação e o perfil de elevação referente à Pequena Central Hidrelétrica Cocais Grande.

FIGURA 27 – Extensão da área inundada para jusante – PCH Cocais Grande.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 28 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – PCH Cocais Grande.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 29 – Perfil de elevação do trecho – PCH Cocais Grande.



FONTE: Autoria Própria.

Para o caso de rompimento da Pequena Central Hidrelétrica de Cocais Grande, a distância máxima a ser afetada a jusante seria de aproximadamente 41 km. Os primeiros impactos socioeconômicos seriam em casas localizadas a uma distância entre 2,4 e 5 km da referida PCH.

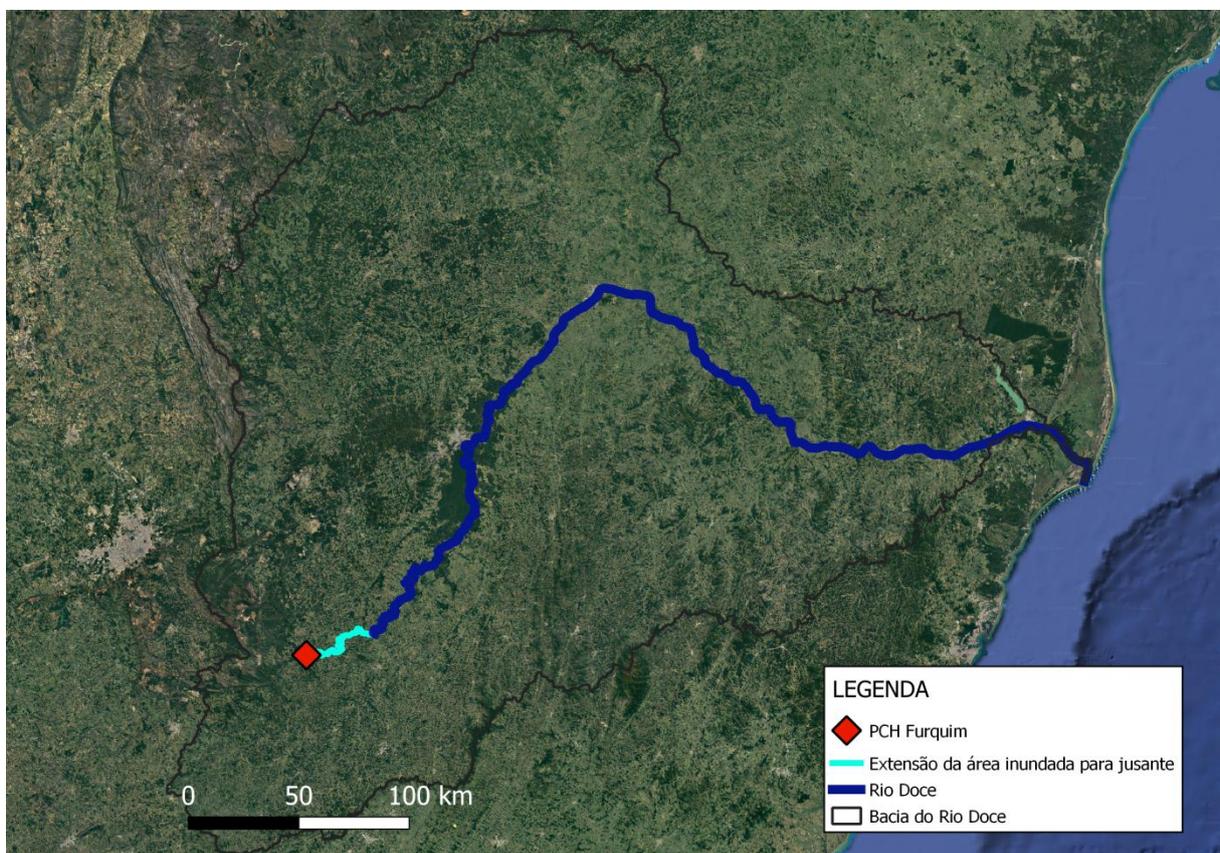
A PCH Cocais Grande se encontra localizada no Ribeirão Grande, alcançando o Rio Piracicaba em 11,7 km de trajeto de inundação. Posteriormente, a 20 km da central hidrelétrica, o volume do reservatório causaria impactos significativos em parte do município de Coronel Fabriciano, em Minas Gerais com população estimada pelo IBGE, para o ano de 2018, de 109.405 habitantes. O impacto seria de grande magnitude devido ao grande número de residências e empreendimentos localizados às margens do Rio Piracicaba.

O próximo município impactado seria o de Ipatinga (Estimativa IBGE, para 2018: 261.344 habitantes), também com grande número de residências e empreendimentos.

Também seriam afetadas uma unidade de conservação municipal de uso sustentável, uma área de proteção especial e uma unidade de conservação estadual de proteção integral, respectivamente ao longo do trajeto de inundação. Além de uma zona de transição e um núcleo de reserva da biosfera da mata atlântica e zonas classificadas como alta, muito alta e extrema prioridade para conservação da biodiversidade.

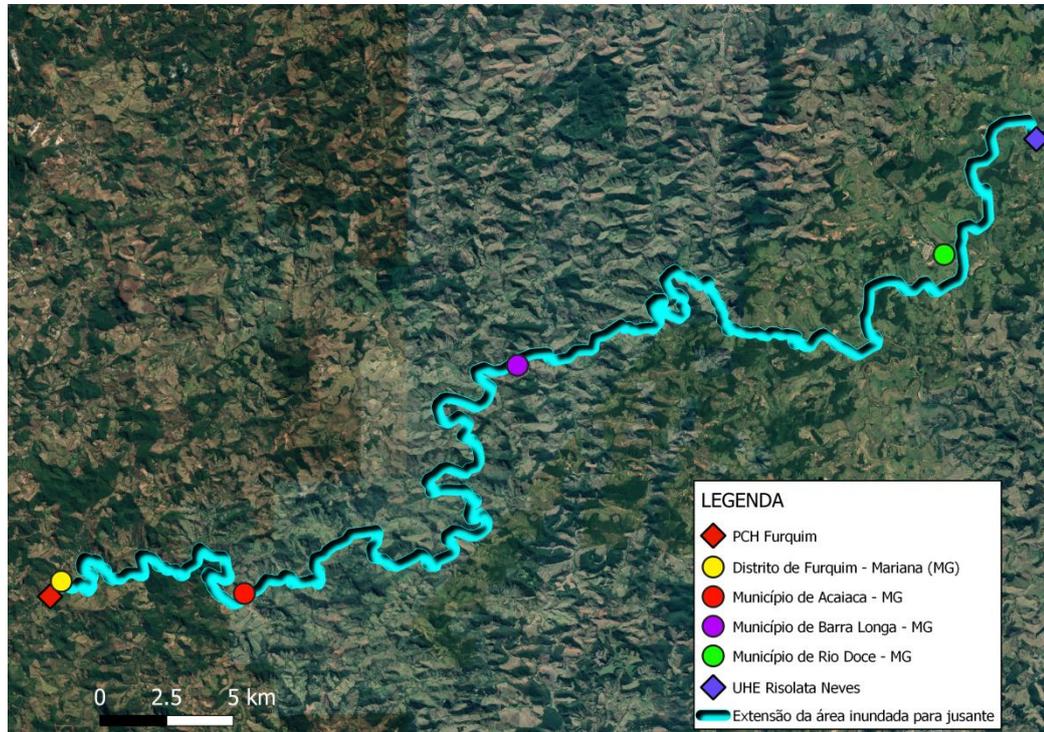
Nas figuras 30 a 32 serão apresentados os mapas do trajeto de inundação e o perfil de elevação referente à Pequena Central Hidrelétrica Furquim.

FIGURA 30 – Extensão da área inundada para jusante – PCH Furquim.



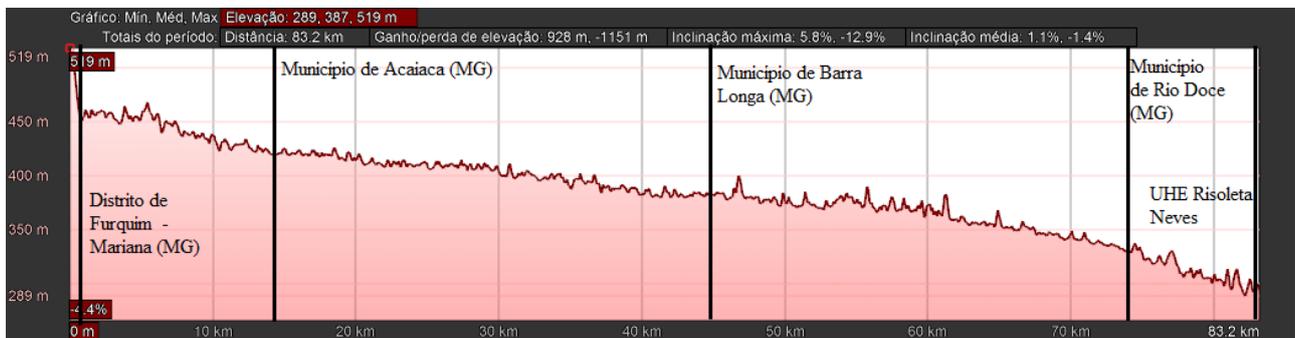
FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 31 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – PCH Furquim.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 32 – Perfil de elevação do trecho – PCH Furquim.



FONTE: Autoria Própria.

A pequena central hidrelétrica de Furquim encontra-se instalada no Rio Carmo. Em caso de rompimento, a distância máxima que poderia ser alcançada a jusante seria de 84 km seguindo o curso do supracitado rio.

A menos de 1 km da PCH Furquim está localizado o distrito de Furquim, referente ao município brasileiro de Marina, no interior do estado de Minas Gerais, com população de 1.656 habitantes em 2010, segundo dados do IBGE. Apesar de ser um distrito visivelmente de pequeno porte, a proximidade com o reservatório da referida central hidrelétrica causaria impactos socioeconômicos de grande relevância.

Em sequência, no quilômetro 15 do percurso, o volume atingiria o município brasileiro de Acaiaca, Minas Gerais, com população estimada pelo IBGE, para o ano de 2018, de 3.994 habitantes. Este, integra as duas margens do Rio do Carmo e apesar de ser um município com pequena dimensão, possui concentração populacional maior que o distrito de Furquim, apresentado anteriormente. Isso ocorre pelo fato de existirem, mais adiante do centro do município, pequenas comunidades instaladas às margens do Rio.

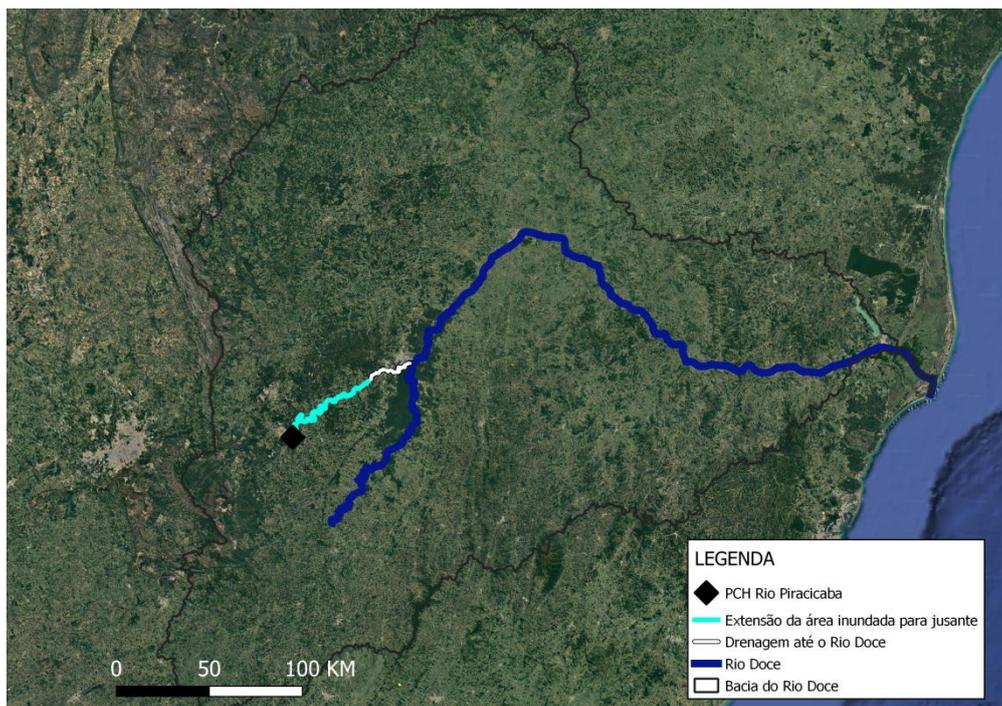
A inundação também atingiria os municípios de Barra Longa e Rio Doce do estado de Minas Gerais, nessa ordem especificamente.

Por fim, o último ponto do trajeto de inundação, totalizando 84 km de percurso, acabaria no reservatório da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves. Apesar da UHE possuir capacidade muito superior à PCH Furquim, o volume de 484,5 hm³ poderia representar riscos à UHE Risoleta Neves e ocasionar em um efeito cascata.

Em termos de impactos ambientais seriam afetadas áreas prioritárias classificadas como muito alta e extrema para conservação da biodiversidade, área de proteção especial, unidade de conservação municipal de uso sustentável, zona de transição de reserva da biosfera da mata atlântica e zona de amortecimento de reserva da biosfera da serra do espinhaço.

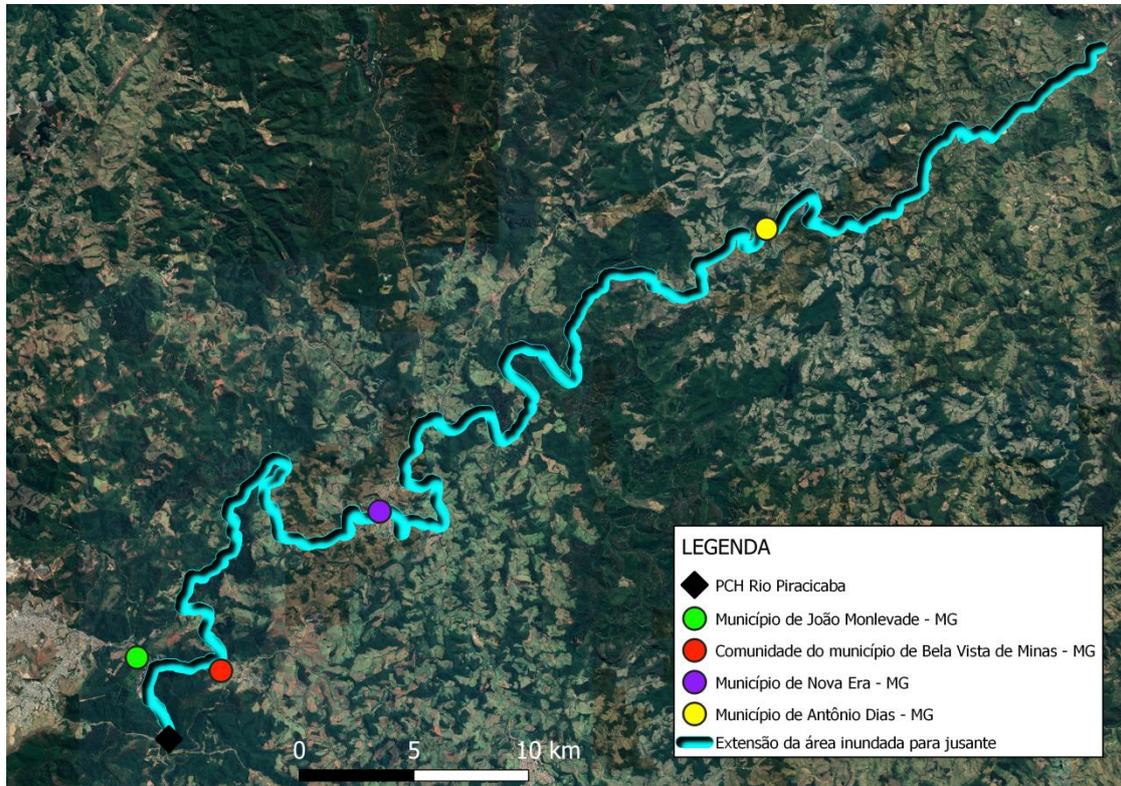
Nas figuras 33 a 35 serão apresentados os mapas do trajeto de inundação e o perfil de elevação referente à Pequena Central Rio Piracicaba.

FIGURA 33 – Extensão da área inundada para jusante – PCH Rio Piracicaba.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 34 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – PCH Rio Piracicaba.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 35 – Perfil de elevação do trecho – PCH Rio Piracicaba.



FONTE: Autoria Própria.

Através da aplicação da metodologia utilizada neste estudo, o resultado de distância máxima para a jusante para a pequena central hidrelétrica Rio Piracicaba é de 94,89 km. Esta distância obtida seguiria o curso do Rio Piracicaba onde está localizada a PCH em questão.

Paralela à PCH Rio Piracicaba se encontram alguns bairros do município de João Monlevade, Minas Gerais, e mais adiante, cerca de 3 km, o centro do referido município. Município este de grande porte, com um número elevado de empreendimentos e residências (população estimada pelo IBGE, para o ano de 2018, de 79.387 habitantes).

Também a cerca de 3 km, porém, na margem oposta do Rio, se encontra uma pequena comunidade do município de Bela Vista, Minas Gerais.

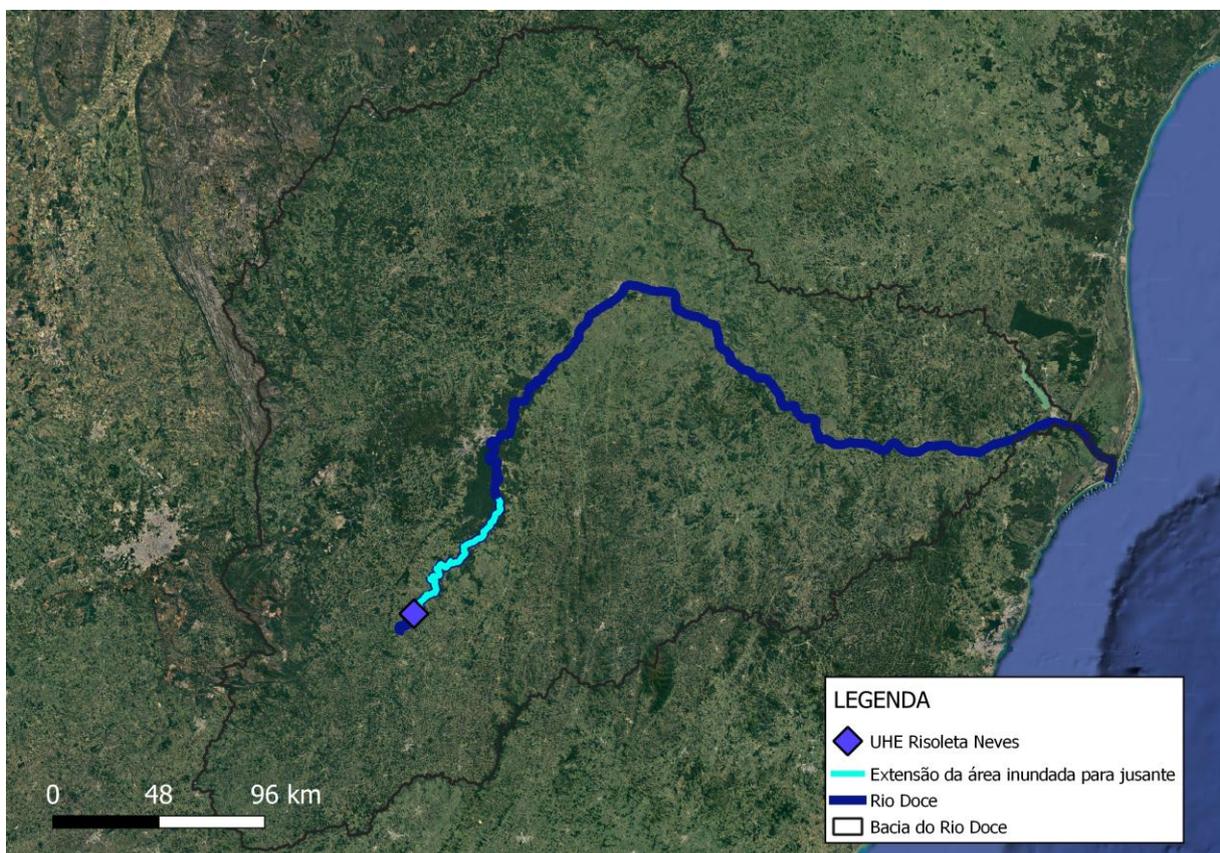
Já a aproximadamente 30 km do reservatório da PCH Rio Piracicaba está localizado o centro do município de Nova Era (17.607 habitantes segundo estimativa do IGBE para 2018), Minas Gerais, com significativa proximidade do curso d'água e concentração populacional ocupando as duas margens do rio.

Ao fim do percurso de inundação, o volume liberado alcançaria o município de Antônio Dias – MG (quilômetro 71), de pequeno porte mas com significativa proximidade do curso d'água.

Seriam atingidas ainda, de acordo com a plataforma IDE-Sisema, área de alta prioridade para conservação da biodiversidade, regiões de núcleo, transição e amortecimento de reserva da biosfera da mata atlântica, reservas particulares do patrimônio natural e unidades de conservação municipal de uso sustentável.

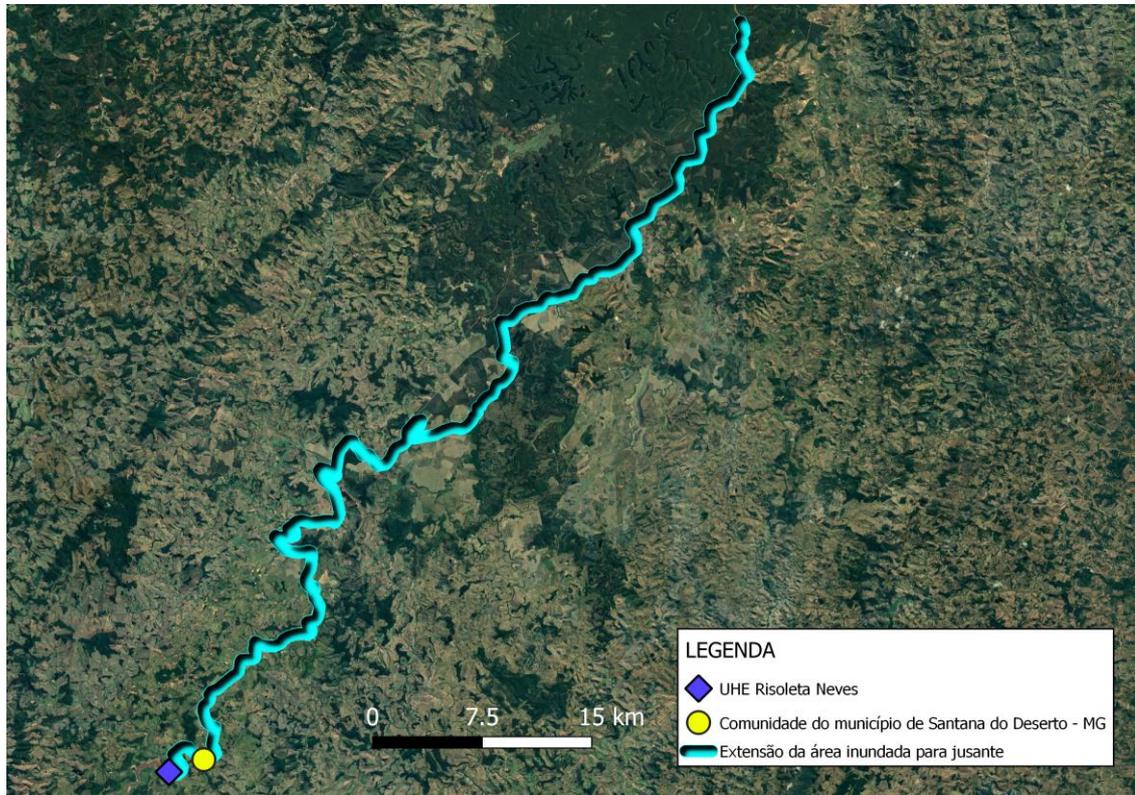
Nas figuras 36 a 38 serão apresentados os mapas do trajeto de inundação e o perfil de elevação referente à UHE Risoleta Neves.

FIGURA 36 – Extensão da área inundada para jusante – UHE Risoleta Neves.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 37 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – UHE Risoleta Neves.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 38 – Perfil de elevação do trecho – UHE Risoleta Neves.



FONTE: Autoria Própria.

Desconsiderando o possível efeito cascata ocasionado pelo rompimento da barragem de Furquim, em caso de rompimento, o volume armazenado pela Usina Hidrelétrica Risoleta Neves alcançaria 100 km para jusante do reservatório de acordo com o valor fixado pela metodologia utilizada.

A UHE Risoleta Neves realiza represamento do Rio Doce e, durante o caminho de inundação, é possível notar grandes regiões agrícolas localizadas às margens do Rio ao longo do provável trajeto a ser atingido pelo volume armazenado. Nota-se ainda pequenos

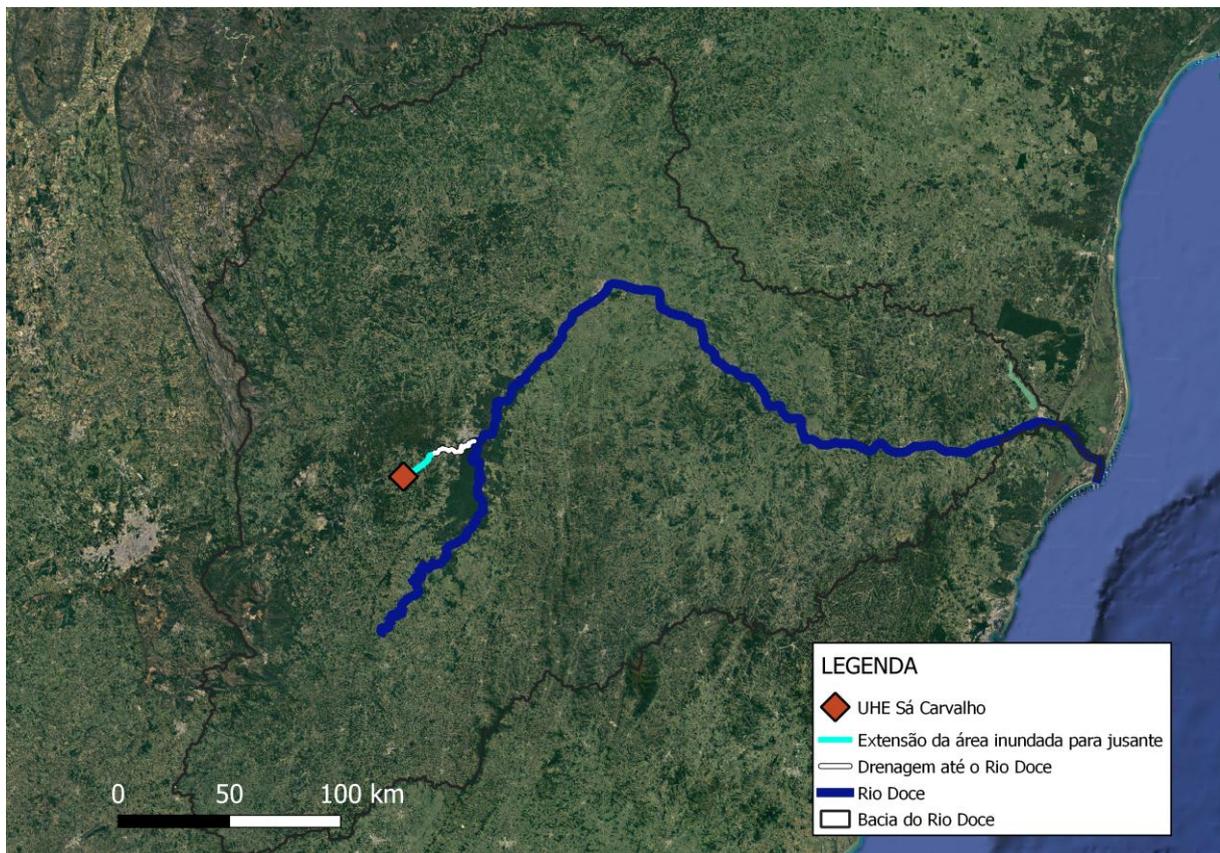
Condomínios e residências isoladas, sem nenhuma ocupação populacional significativa às margens do Rio.

É provável que o impacto socioeconômico mais significativo fosse em uma pequena comunidade do município de Santana do Deserto, Minas Gerais, localizada a apenas 5 km da referida barragem.

Os impactos ambientais mais significativos ocorreriam quando o volume atingisse regiões de relevância ambiental localizadas ao longo do percurso de inundação. Tais regiões são áreas de alta e especial prioridade para conservação da biodiversidade, zonas de transição e amortecimento de reserva da biosfera da mata atlântica, uma zona de amortecimento de unidade de conservação - UC definida em plano de manejo e duas unidades de conservação, uma UC estadual de proteção integral e uma municipal de uso sustentável.

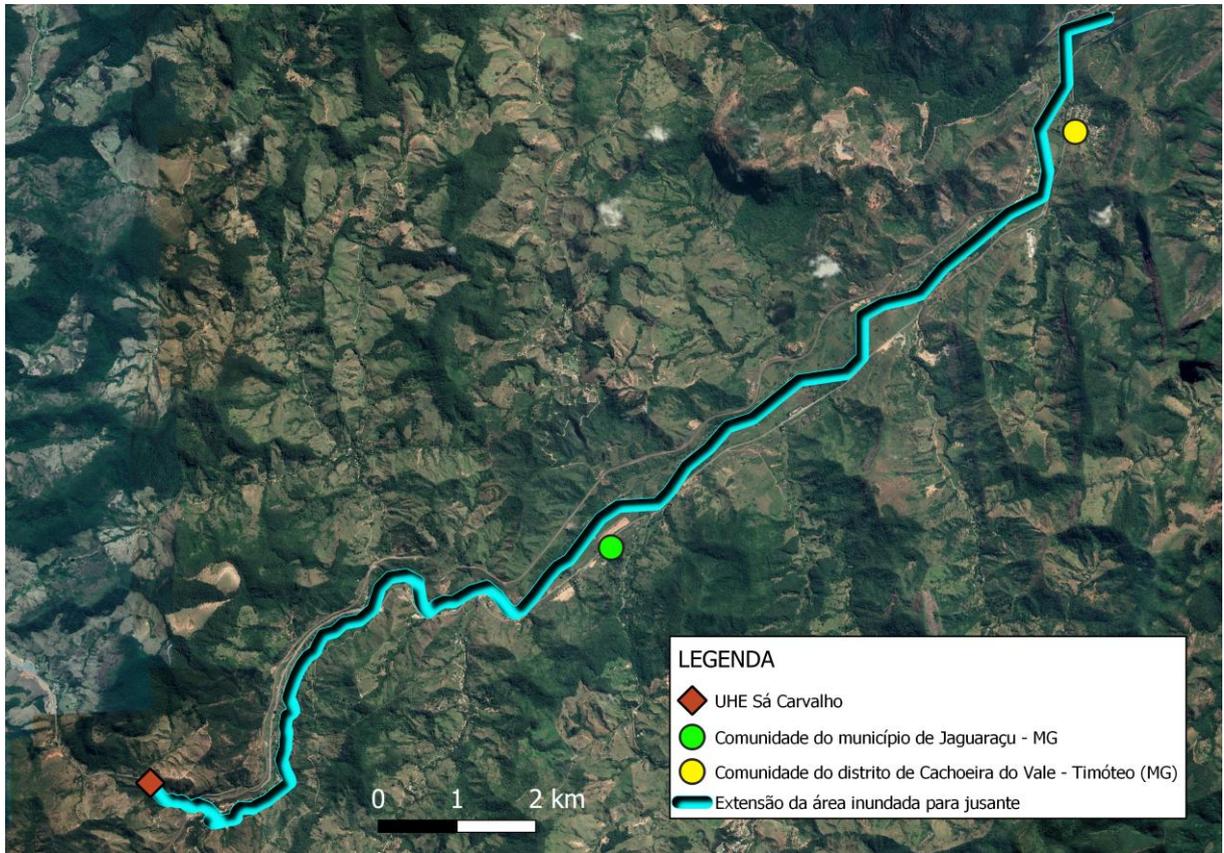
Nas figuras 39 a 41 serão apresentados os mapas do trajeto de inundação e o perfil de elevação referente à UHE Sá Carvalho.

FIGURA 39 – Extensão da área inundada para jusante – UHE Sá Carvalho.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 40 – Mapa aproximado da extensão da área inundada para jusante – UHE Sá Carvalho.



FONTE: Autoria Própria.

FIGURA 41 – Perfil de elevação do trecho – UHE Sá Carvalho.



FONTE: Autoria Própria.

Na hipótese de rompimento da Usina Hidrelétrica Sá Carvalho o volume armazenado alcançaria uma distância máxima para jusante de 19,34 km.

No provável trajeto de inundação os primeiros atingidos seriam a malha viária referente à BR 381 e os moradores de uma pequena comunidade localizada às margens do Rio Piracicaba, do município de Jaguaruçu, Minas Gerais.

Por se tratar de uma usina com capacidade consideravelmente inferior às demais usinas apresentadas neste estudo, os impactos socioeconômicos da UHE Sá Carvalho seriam em uma pequena comunidade localizada próximo ao fim do trajeto de inundação, aproximadamente no quilometro 18, referente ao distrito de Cachoeira do Vale, Timóteo, Minas Gerais.

Os impactos ambientais mais significativos seriam nas áreas prioritárias para conservação da biodiversidade classificadas como alta e muito alta, na zona de transição da reserva da biosfera da mata atlântica e na unidade de conservação municipal de uso sustentável que seriam atingidas no caso de rompimento da referida barragem.

5.4 Classificações de Dano Potencial Associado – DPA

Após avaliação do uso e ocupação do solo da região a ser alagada à jusante dos reservatórios, realizou-se classificação das barragens selecionadas quanto ao Dano Potencial Associado, seguindo os critérios de classificação apresentados na DN 87/2005 em complemento à DN 62/2002. O referido resultado é apresentado pelo quadro 6.

Quadro 6: Resultado da avaliação dos critérios e classificação de DPA.

Nome da Barragem	Altura da Barragem	Volume do Reservatório	Ocupação Humana a Jusante	Interesse Ambiental a Jusante	Instalações na área de jusante	Resultado
Aimorés	V = 1	V = 2	V = 2	V = 1	V = 2	Alto DPA*
Baguari	V = 2	V = 2	V = 2	V = 1	V = 2	Alto DPA
Benjamim M.B	V = 1	V = 2	V = 2	V = 1	V = 1	Alto DPA
Cocais Grande	V = 0	V = 2	V = 2	V = 1	V = 2	Alto DPA
Furquim	V = 1	V = 2	V = 2	V = 1	V = 1	Alto DPA
Rio Piracicaba	V = 2	V = 2	V = 2	V = 1	V = 2	Alto DPA
Risoleta Neves	V = 2	V = 2	V = 2	V = 1	V = 1	Alto DPA
Sá Carvalho	V = 0	V = 2	V = 2	V = 1	V = 1	Alto DPA

*Alto DPA ($\Sigma V > 5$)

FONTE: Autoria Própria.

Analisando os resultados, nota-se que barragens com volumes muito distantes podem apresentar classificações de DPA iguais, como é o caso da UHE Risoleta Neves e da UHE Sá Carvalho. A UHE Sá Carvalho possui capacidade de apenas 0,092% da capacidade da UHE Risoleta Neves e ambas obtiveram a mesma classificação como resultado.

6 CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Rompimentos de barragens são eventos esporádicos, porém, catastróficos, com danos sociais, econômicos, ambientais e culturais muitas vezes irreversíveis. Por esse motivo, exigem uma legislação específica no âmbito de segurança de barragens que subsidie tais estruturas. A legislação vigente no Brasil é recente e esse fator pode ser uma das justificativas do grande número de desastres ocorridos no Brasil antes de sua promulgação.

As maiores tragédias socioambientais por ruptura de barragens do Brasil aconteceram no ano de 2015 e 2019 envolvendo o mesmo estado do referido trabalho, o que o torna relevante, uma vez que apresenta análise da possibilidade de efeito cascata em casos similares, mediante a extensão da área inundada a jusante.

Diante dos resultados obtidos, a equação proposta não se revela tão adequada para barragens com capacidade acima de 1000 hm³. A fixação de 100 km para barragens acima de 1000 hm³ possibilita que reservatórios com volumes bem menores atinjam distâncias de análise muito próximas dos grandes barramentos, como foi o caso das barragens do Rio Piracicaba, com capacidade de 695,68 hm³ e $D_{máx}$ de 94,89 km, e as hidrelétricas de Aimorés, Baguari e Risoleta Neves com capacidades muito superiores a 1000 hm³ que obtiveram uma $D_{máx}$ de 100 km.

Os impactos ambientais mais relevantes decorreram da possibilidade do volume de água armazenado atingir, ao longo do trajeto, regiões de importância ambiental. As regiões mais afetadas com a hipótese dos rompimentos foram áreas prioritárias para conservação da biodiversidade, reservas de biosfera da mata atlântica e unidades de conservação. Dado isto, os rompimentos que se revelaram mais significativos para impactos ambientais foram da PCH Benjamim Mário Baptista, PCH Cocais Grande e PCH Furquim, devido à quantidade de áreas atingidas e suas respectivas classificações, mais frágeis, de prioridade de preservação.

Em termos de impactos socioeconômicos, as barragens com maiores volumes não necessariamente caracterizaram os maiores impactos, como foi o caso do reservatório Risoleta Neves que contém a maior capacidade dentre os demais barramentos e por não apresentar ocupação relevante no caminho de inundação, não foi a hipótese de rompimento de maior impacto. Das barragens abordadas aquela que ocasionaria nos maiores danos seria a usina hidrelétrica de Aimorés devido ao somatório dos agravantes de alto volume armazenado e de proximidade com o município de Baixo Guandu, de grande porte e alto nível de ocupação. Outro rompimento em destaque seria o da pequena central hidrelétrica Cocais Grande em

virtude do trajeto de inundação alcançar grandes centros, do município de Coronel Fabriciano e Ipatinga.

As barragens que apresentam possibilidade de causar efeito cascata em caso de rompimento são a UHE de Aimorés e a PCH de Furquim.

Todas as barragens selecionadas para realização desse estudo, após análise dos critérios estabelecidos pela DN 87/2005 em complemento à DN 62/2002, foram classificadas como de Dano Potencial Associado Alto, mesmo com capacidades muito distantes. Notou-se ainda que as descrições de classificação de cada parâmetro, propostas pelas supracitadas DN's, não são favoráveis à classificação de barragens de água, uma vez que mesmo barragens com expressiva ocupação humana a jusante acabam sendo classificadas como de eventual ocupação, já que para serem classificadas acima disso devem no mínimo armazenar rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II B – Inertes, segundo a NBR 10.004/2004 da ABNT.

Sugere-se ainda a aplicação das partes subsequentes da metodologia simplificada sugerida pela ANA, sendo elas o cálculo da vazão máxima na seção da barragem, cálculo da vazão máxima em cada uma das seções transversais ao longo do vale, análise de danos incrementais decorrentes de eventual ruptura face à vazão máxima do descarregador, altimetria de seções perpendiculares ao vale principal onde se propaga a onda de inundação, cálculo do nível máximo da onda de cheia em cada uma das seções, superfície máxima de inundação, zona de observação de ocorrências e análise de cascatas e eventual reclassificação de barragens quanto ao *DPA*.

Visto que a extensão da inundação obtida recorrendo à metodologia utilizada não é tão rigorosa, as etapas seguintes devem ser aplicadas de maneira minuciosa, utilizando de inspeções de campo e imagens para realizar a classificação final de Dano Potencial Associado, a partir da metodologia sugerida pela ANA.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasília). Ministério do Meio Ambiente. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Guia Prático de Pequenas Barragens**. Df, 2016. 126 p.

Agência Nacional de Águas. **Barragens**. [s.l]: Governo Federal, 2016. 79 slides, color.

ANA (Org.). **Módulo I – Barragens: Aspectos legais, técnicos e sócioambientais: UNIDADE 2: ASPECTOS GERAIS DA SEGURANÇA DE BARRAGENS**. [s.l]: Icba, 2012. 31 p.

BRASIL. CEMIG. . [Http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/Subsidiarias.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/Subsidiarias.aspx). Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/Subsidiarias.aspx>. Acesso em: 25 abr. 2019.

BRASIL. Constituição (2010). Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF.

BRASIL. COORDENADORIA ESTADUAL DE DEFESA CIVIL. . **Informações: Desastre Barragem de rejeitos de Brumadinho**. 2019. Disponível em: <<http://www.defesacivil.mg.gov.br/index.php/component/gmg/page/630-informacoes3003>>. Acesso em: 1 abr. 2019.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Ministério do Meio Ambiente. **Rompimento de barragem da Vale em Brumadinho (MG) destruiu 269,84 hectares**. 2019. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/noticias/730-2019/1881-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg-destruiu-269-84-hectares>>. Acesso em: 01 mar. 2019.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens. Agência Nacional de Águas. **Cadastro RSB 2017**. [s.l]: Snisb, 2017.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis. **Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG**. 2018. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/recuperacao-ambiental/rompimento-da-barragem-de-fundao-desastre-da-samarco/documentos-relacionados-ao-desastre-da-samarco-em-mariana-mg>>. Acesso em: 02 out. 2018.

BRASÍLIA. Agência Nacional de águas. Ministério do Meio Ambiente. **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce: Rompimento da Barragem em Mariana/MG**. Df: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, 2016.

BRASÍLIA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÀGUAS. Ministério do Meio Ambiente. **Relatório de segurança de barragens**. Df, 2017. 84 p.

BRASÍLIA. Secretaria de Infra-estrutura Hídrica. Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Df: Ns, 2002. 150 p. COELHO, Marco Antônio Tavares. **Rio Doce: A espantosa evolução de um vale**. [s.l]: Autentica, 2011.

CANDONGA. **A Usina**. Disponível em: <<http://www.candonga.com.br/a-usina/>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

CASTILHO, Breno de Matos. **Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da barragem do germano**. 2017. 116 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos E. M.. ANÁLISE DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM DE ERNESTINA. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p.191-206, dez. 1997.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Comissão Inter Nacional de Grandes Barragens. **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Rio de Janeiro, 2011. 533 p.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Guia básico de segurança de barragens**. São Paulo, 2001. 78 p.

COMPANHIA ENERGÉTICA INTEGRADA. **Usinas**. 2016. Disponível em: <<http://www.ceienergetica.com.br/usinas/>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

DUARTE, Anderson Pires. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

FERNANDA GOUVEIA. Grupo Idd. **O que saber para escolher o tipo de barragem ideal?**. 2017. Disponível em: <<https://www.idd.edu.br/blog/idd-news/o-que-saber-para-escolher-o-tipo-de-barragem-ideal>>. Acesso em: 16 nov. 2018.

GRUPO BANCO MUNDIAL (Brasília). **Serviços analíticos e consultivos em segurança de barragens: Classificação de barragens reguladas pela Agência Nacional de Águas**. 6. ed. Df: Agencia Nacional de Águas, 2014. 639 p. CONTRATO Nº 051/ANA.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>> Acesso em: 25 abr. 2019.

JULIO, Rennan A.. **Modelo de barragem usado em Brumadinho e Mariana é o mais barato e menos seguro: Conheça os principais tipos de barragem usados no Brasil, segundo especialistas**. 2019. Disponível em: <<https://epocanegocios.globo.com/Brasil/noticia/2019/01/modelo-de-barragem-usado-em-brumadinho-e-mariana-e-o-mais-barato-e-menos-seguro.html>>. Acesso em: 15 fev. 2019.

LADEIRA, Josias Eduardo Rossi. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: O caso UHE – São Simão**. 2007. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da Ufmg, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

LAURIANO, André Wilhiam. **Estudo de ruptura da barragem de funil: Comparação entre os modelos fldwav e hec-ras**. 2009. 251 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da Ufmg, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MINAS GERAIS (Estado). Constituição (2005). Deliberação Normativa nº 87, de 17 de junho de 2005. Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM N.º 62, de 17/12/2002, que dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais. Minas Gerais, 17 jun. 2005.

MINAS GERAIS (Estado). Deliberação Normativa Copam nº 62, de 17 de dezembro de 2002. Dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais.

MINAS GERAIS. Imprensa Oficial de Minas Gerais. Secretaria de Casa Civil e Relações Institucionais (Org.). RIO MANHUAÇU ENERGÉTICA S.A. **Imprensa Oficial de Minas Gerais**. [s.l], p. 8-8. 31 maio 2011.

MOTA, Kevin Reiny Rocha. **Rompimento hipotético e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG**. 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

PAQUIER, A. **Rupro, breach model used by Cemagref Impact Project**, 1st Impact Workshop HR Wallingford, 2002.

PIASENTIN, Corrado. **Curso segurança de barragens: Módulo I– Barragens: Aspectos legais, técnicos e sócioambientais unidade 2: Aspectos gerais da segurança de barragens 2**. [s.l]: Ministério do Meio Ambiente, 2016. 31 p.

SANTOS, J Brito dos; FRANÇA, M J; ALMEIDA, A Betamio de. Risco associado a Ruptura por galgamento de barragens em aterro. **Fundacion Para El Fomento de La Ingenieria del Agua**, [s.l], v. 14, n. 4, p.269-278, dez. 2017.

SETA ENGENHARIA S.A. **Obra Concluída: PCH Cocais Grande**. Disponível em: <<https://setaengenharia.com/obras/detalhes/concluido/29/pch-cocais-grande>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

UEMURA, Sandra. **Intrumentos de avaliação e gestão de impactos gerados por rupturas de barragens**. 2009. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

UNITED STATES. UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR. **Design of small dams: A water resources technical publication**. [s.l], 2012. 904 p.

VALE. **Entenda os tipos de barragens**. 2017. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Paginas/Entenda-as-barragens-da-Vale.aspx>. Acesso em: 15 fev. 2019.

VIEIRA JUNIOR, L. P. SALLES, M. F. **A tecnologia do concreto aplica**

da ao projeto de barragens. Melhores práticas tecnologia do concreto. *Concreto & construções*. Ano XXXIX nº 63, 2011, 15-23p.

XIONG, Yi. A Dam Break Analysis Using HEC-RAS. **Journal Of Water Resource And Protection**, [s.l.], v. 03, n. 06, p.370-379, 2011. Scientific Research Publishing, Inc., <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2011.36047>.

ZANATTA, Deborah. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Análise da influência da ocupação do solo no microclima de quatro regiões distintas de Cuiabá-MT.** São Paulo: Entac, 2016. 17 p.