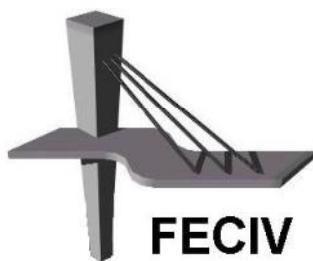


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Simulação de ondas de cheia induzidas pelo
rompimento hipotético da barragem de Peti
em São Gonçalo do Rio Abaixo-MG**

DIEGO ROGER BORBA AMARAL

UBERLÂNDIA-MG, 05 DE JUNHO DE 2017



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



DIEGO ROGER BORBA AMARAL

**Simulação de ondas de cheia induzidas pelo
rompimento hipotético da barragem de Peti em São
Gonçalo do Rio Abaixo-MG**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

A485s
2018

Amaral, Diego Roger Borba, 1991-
Simulação de ondas de cheia induzidas pelo rompimento hipotético
da barragem de Peti em São Gonçalo do Rio Abaixo-MG / Diego Roger
Borba Amaral. - 2018.
78 f. : il.

Orientador: José Eduardo Alamy Filho.
Coorientador: Carlos Eugênio Pereira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.232>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Barragens - Minas Gerais - Teses. I.
Alamy Filho, José Eduardo. II. Pereira, Carlos Eugênio. III.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA Nº: 200/2017

CANDIDATO: Diego Róger Borba Amaral **Nº. Matrícula:** 11612ECV019

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho

TÍTULO: "Simulação de ondas de cheia induzidas pelo rompimento hipotético da barragem de Peti em São Gonçalo do Rio Abaixo – MG".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento

PROJETO DE PESQUISA: Gestão de Reservatórios

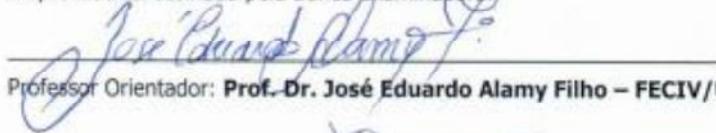
DATA DA DEFESA: 20 de dezembro de 2017.

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 8:30 / 11:30

Reuniu-se na **Sala de Reuniões Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Marcio Ricardo Salla – FECIV/UFU; Klebber Teodomiro Martins Formiga – EECA/UFG e José Eduardo Alamy Filho** orientador do candidato. Ressalta-se que o **Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga** participou da defesa por meio de vídeo conferência desde a cidade de Goiânia (GO) e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato APROVADO. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.


Professor Orientador: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU**


Membro externo: **Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga – EECA/UFG**


Membro interno: **Prof. Dr. Marcio Ricardo Salla – FECIV/UFU**

Uberlândia, 20 de DEZEMBRO de 2017.

AMARAL, D. R. B. **Simulação de ondas de cheia induzidas pelo rompimento hipotético da barragem de Peti em São Gonçalo do Rio Abaixo-MG.** 78 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

RESUMO

A ruptura de uma barragem é uma ocorrência que acarreta muitos impactos sociais, econômicos e ambientais e pode ser causada por diferentes fatores. A simulação do rompimento desse tipo de estrutura é necessária, pois trata-se de um processo preventivo na busca de ações para minimizar seus impactos. Esta análise avalia as possíveis consequências geradas caso ocorra rompimento. Este estudo trata-se de uma análise hipotética do rompimento da barragem de Peti, pertencente ao município de São Gonçalo do Rio Abaixo, em Minas Gerais. Localiza-se no Rio Santa Bárbara, integrante da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. A metodologia adotada foi delimitar a bacia hidrográfica a montante da barragem, classificar o uso e a ocupação do solo e também os tipos de solo de cada microbacia, utilizando ferramentas de geoprocessamento de imagens (QGIS) e de classificações de imagens por cores (MultiSpec). Na sequência, foi determinado o hidrograma de vazões de entrada do reservatório da barragem por meio do programa computacional HEC-HMS. Com esses dados, verificou-se a onda de cheia que ocasionaria o rompimento hipotético de Peti pela formação da brecha por meio do programa computacional HEC-RAS, definindo a área atingida a jusante. As consequências do rompimento simulado foram: impactos socioeconômicos e a perda de vidas humanas, atingindo cerca de 30 mil pessoas.

Palavras-chave: Barragens. Impactos. Ruptura. Simulação.

AMARAL, D. R. B. **Full wave simulation-induced hypothetical disruption of Peti dam in São Gonçalo do Rio Abaixo-MG.** 78 p. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2018.

ABSTRACT

The rupture of a dam is an occurrence that carries many social, economic and environmental impacts and can be caused by different factors. The simulation of the rupture of this type of structure is necessary, because it is a preventive process in the search of actions to minimize its impacts. This analysis evaluates the possible consequences generated in case of disruption. This study is a hypothetical analysis of the rupture of the Peti dam, belonging to the municipality of São Gonçalo do Rio Below, in Minas Gerais. It is located on the Santa Bárbara River, part of the Rio Doce River Basin. The methodology used was to delimit the hydrographic basin upstream of the dam, to classify the use and the occupation of the soil and also the soil types of each microbasin, using image geoprocessing tools (QGIS) and color image classification (MultiSpec) . Then, the hydrograph of inlet flows of the dam reservoir was determined by means of the HEC-HMS computational program. With these data, it was verified the flood wave that would cause the hypothetical breaking of Peti by the formation of the breach through the computational program HEC-RAS, defining the area reached downstream. The consequences of the simulated disruption were: socioeconomic impacts and the loss of human lives, reaching about 30 thousand people.

Keywords: Dams. Impacts. Rupture. Simulation.

SIGLAS

SIGLAS

<i>ANA</i>	Agência Nacinoal de Águas
<i>HEC-HMS</i>	Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System– Software de Simulação dos Processos de Precipitação-Escoamento das Bacias de Drenagem;
<i>HEC-RAS</i>	Hydrologic Engineering Center River Analysis System – Software de Análise Hidráulica Fluvial;
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
<i>INPE</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;
<i>MDE</i>	Modelo Digital de Elevação
<i>MDT</i>	Modelo Digital de Terreno;
<i>NRA</i>	Nível de Risco Aceitável;
<i>PAE</i>	Plano de Ação Emergencial;
<i>PCH</i>	Pequena Central Hidrelétrica;
<i>PNSB</i>	Política Nacional de Segurança de Barragens;
<i>SIG</i>	Sistema de Informações Geográficas;
<i>SNISB</i>	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

LISTA DE FIGURAS, GRÁFICOS, QUADROS E TABELAS

FIGURAS

Figura 1 – Esquema de riscos nas fases da vida de uma barragem.....	25
Figura 2 – Antes e depois do rompimento da barragem de Cataguases.....	28
Figura 3 – Imagem após o rompimento da barragem da Herculano, Itabirito-MG.....	28
Figura 4 – Lama em Bento Rodrigues, Mariana-MG.....	29
Figura 5 – Localização de São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais.....	31
Figura 6 – Barragem de Peti.....	32
Figura 7 – Localização da Barragem de Peti	33
Figura 8 – Hidrelétrica de Peti.....	34
Figura 9 – Representação dos termos da equação de energia.....	43
Figura 10 – Relevo Hipsométrico a montante da barragem de Peti.....	46
Figura 11 – Hierarquia dos cursos a montante da barragem de Peti.....	47
Figura 12 – Regiões hidrográficas a montante da barragem de Peti.....	48
Figura 13 – Microbacias a montante da barragem de Peti.....	48
Figura 14 – Imagem delimitada e com as bandas unificadas a montante.....	49
Figura 15 – Classificação do uso do solo à montante de Peti.....	50
Figura 16 – Classificação da área a montagem da barragem quanto aos tipos de solo.....	51
Figura 17 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Rio Barão de Cocais.....	53
Figura 18 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Ribeirão Caraia.....	53
Figura 19 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Ribeirão Preto.....	54
Figura 20 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Rio Conceição 1	54
Figura 21 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Rio Conceição 2.....	55
Figura 22 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Rio Santa Bárbara.....	55
Figura 23 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Rio Conceição 3	56
Figura 24 – Postos pluviométricos.....	58
Figura 25 – Polígonos dos postos pluviométricos.....	58
Figura 26 – Representação da bacia à montante da barragem no HEC-HMS.....	60
Figura 27 – Seções transversais ao longo do rio Santa Bárbara à jusante da barragem de Peti.....	61
Figura 28 – Características assumidas para a forma da brecha da PCH-Peti.....	64
Figura 29 – Área inundada à jusante de Peti.....	67
Figura 30 – Área de inundação a jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a barragem até 4,93Km jusante.....	67
Figura 31 – Hidrograma gerado pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti junto à crista da barragem.....	68
Figura 32 – Hidrograma gerado pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti à 11,06 km a jusante da barragem.....	68

Figura 33 – Área de inundaçāo a jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a distância 4,93Km e 11,06Km.....	69
Figura 34 – Área de inundaçāo a jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a distância 11,06 km e 21,60 km.....	69
Figura 35 – Hidrograma gerado pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti a 21,60 km à jusante da barragem.....	70
Figura 36 – Área de inundaçāo a jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a distância 21,60 km e 35,10 km.....	71
Figura 37 – Hidrograma gerado pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti a 31,31 km à jusante da barragem.....	71
Figura 38 – Área de inundaçāo à jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a distância 31,31 m e 43,65 km.....	72
Figura 39 – Área de inundaçāo à jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a distância 43,65 km e 59,66 km.....	72
Figura 40 – Área de inundaçāo a jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a seção 59,66Km e 94,96Km.....	73
Figura 41 – Hidrograma gerado pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti a 77,19 km a jusante da barragem.....	73

GRÁFICOS

Gráfico 1 – Vazão de pico em função da variação da largura da brecha da PCH Peti.....	62
Gráfico 2 – Vazão de pico em função da variação do tempo de abertura da brecha.....	63
Gráfico 3 – Vazão de pico em função da distância a jusante da barragem.....	65
Gráfico 4 – Vazão de pico em função da distância à jusante da barragem.....	66
Gráfico 5 – Vazão de pico em função da distância a jusante da barragem.....	66

QUADROS

Quadro 1 – Vazão de Pico estimada de acordo com a equação encontrada por cada autor.....	64
--	----

TABELAS

Tabela 1 – Composição percentual do uso do solo da bacia a montante de Peti.....	50
Tabela 2 – Área dos tipos de solo a montante da barragem e composição percentual.....	52
Tabela 3 – Área dos tipos de solo de cada microbacia a montante de Peti.....	57
Tabela 4 – Área dos polígonos e precipitação máxima dos postos pluviométricos.....	59
Tabela 5 – Resultados encontrados para a vazão de pico variando-se a largura da brecha-PCH Peti.....	62
Tabela 6 – Resultados encontrados para vazão de pico variando-se o tempo de abertura da brecha para a PCH Peti.....	63

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
SIGLAS	v
LISTA DE FIGURAS, GRÁFICOS, QUADROS e TABELAS	vi
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	12
1.2 Estrutura do trabalho	12
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Estudos desenvolvidos para análise do rompimento hipotético de barragens por meio de modelos matemáticos	17
2.1.1 Barragem de Ernestina.....	17
2.1.2 Barragens do Rio Paranapanema	18
2.1.3 Barragem de Rio das Pedras	20
2.2 Simulações numéricas de inundações de barragens com MPM.....	21
2.3 Fatores que influenciam um estudo de rompimento de uma barragem	22
2.4 Segurança de barragens	23
2.5 Casos históricos de ruptura de barragens	27
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Área de estudo	31
3.1.1 Usina hidrelétrica de Peti	33
3.2 Metodologia	34
3.2.1 Delimitação da bacia hidrográfica a montante	36
3.2.2 Classificação do uso do solo da bacia hidrográfica a montante da barragem	37
3.2.3 Classificação dos tipos do solo da bacia hidrográfica a montante da barragem	38
3.2.4 Determinação da precipitação média da bacia a montante	38
3.2.5 Obtenção do hidrograma de entrada do reservatório	40
3.2.6 Determinação da onda de cheia a jusante da barragem	41
3.2.7 Obtenção do mapa de inundaçāo.....	45
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	46
4.1 Características físicas e uso e ocupação do solo da bacia do Rio Santa Bárbara	46
4.2 Estudo das precipitações e vazões na bacia hidrográfica	57
4.2.1 Aplicação de modelo chuva-vazão na definição do hidrograma da onda de cheia a montante da barragem de Peti.....	59
4.2.2 Uso de programa computacional na simulação do rompimento hipotético da barragem de Peti.....	60
4.2.2.1 Equacionamento das Vazões de Pico.....	63
4.2.2.2 Características da forma da brecha para as simulações realizadas	64
4.2.2.3 Decaimento da Vazão de Pico no vale de jusante da barragem	65

4.3 Resultados encontrados nas simulações pelo programa computacional HEC-RAS para a área de inundação	67
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES.....	74
REFERÊNCIAS.....	75

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A água é o principal recurso natural, sendo essencial para a vida no planeta. Porém, a cada dia ela se torna mais escassa, devido à poluição proveniente da ação humana, às condições climáticas, etc. Além disso, o consumo diário de água tem crescido consideravelmente no último século.

As mudanças climáticas também tem contribuído, visto que o período de estiagem seja maior em grande parte do planeta, prejudicando setores como o da agricultura, abastecimento e geração de energia. Assim, a criação de barragens tem sido fundamental para suprir a falta de água nesses períodos de menores precipitações, pois armazenam água suficiente para a época da seca.

“Barragens são definidas como obstáculos artificiais com a capacidade de armazenar água, ou qualquer outro fluído, para fins de acumulação ou controle” (MOECKE, 2014, p. 27). São barreiras que atravessam córregos, canais ou rios para confinar e controlar o fluxo da água.

As barragens são soluções empregadas há muitos anos, pois as civilizações antigas já criavam recursos de armazenamento de água, para irrigação e para o sustento de fazendas e centros urbanos em épocas de estiagem. Atualmente, elas também são utilizadas para controle de enchentes, regularização de vazões, contenção de rejeitos, geração de energia elétrica, turismo e piscicultura.

Os primeiros barramentos brasileiros eram destinados a regularizar vazões dos rios para utilizar a água em projetos de irrigação, para combater a seca em locais áridos. Atualmente, houve uma diversificação de sua utilidade. A energia hidrelétrica é a principal fonte de produção de eletricidade no Brasil.

De acordo com os dados da Comissão Internacional de Grandes Barragens (2008), a maioria das barragens mundiais (71,7%) são de função única. Dessas, a utilizada para irrigação é a mais preponderante, representando 48,6% do total, seguido da energia hidrelétrica (17,4%), que apresentou crescimento ultimamente devido à demanda da produção de energia elétrica em muitos países.

Certas barragens têm a função de conter rejeitos. A construção desse tipo de barramento se faz necessária, pois em segmentos como a mineração (setor que aquece a economia por meio de exportações), os rejeitos oriundos dessa atividade não podem ser lançados na natureza devido aos impactos ambientais que provocam.

Outras regiões sofrem bastante em épocas de grande precipitação com a possibilidade da ocorrência de cheias inesperadas. Para esses locais, faz-se necessário a construção de barragem para controle de enchentes a jusante do curso do rio.

Regularizar a vazão de um rio significa armazenar o excesso de água nos períodos de chuva, além de compensar as deficiências nos períodos de estiagem. Esse controle de vazão é muito importante e é a principal função em muitas das maiores barragens.

Até o ano de 2005, no Brasil, baseando-se em contagens de fiscalização nas esferas federal e estaduais foram construídas 13.529 barragens, sendo que a grande maioria delas (11.748) foi executada para funções múltiplas, enquanto 1.261 são exclusivas para geração de energia elétrica, 264 para contenção de rejeitos de mineradoras e 256 para uso de resíduos industriais (ZINGANO, 2005).

As barragens podem ser dos mais diversos tipos e são escolhidas levando uma série de fatores, como localização, geologia e materiais disponíveis na região. Podem ser de enrocamento, concreto, e a maioria delas são de terra (MENDONÇA, 2012).

Assim, a importância da construção e operação de barragens é notável, visto que pode ser utilizada para diversos fins, trazendo como consequência impactos ambientais, sociais, econômicos, etc., sendo positivos ou negativos, e de diferentes magnitudes.

Um impacto negativo que afeta a sociedade, o meio ambiente e que traz consequências drásticas a todos os envolvidos no entorno de uma barragem, é quando ocorre a sua ruptura. Independentemente se o rompimento ocorreu devido à má inspeção, falha nos materiais ou métodos construtivos, os transtornos são inevitáveis quando não há um plano de evacuação da população ou medidas mitigatórias para combater tal ação.

Se a barragem vir a se romper serão acarretados inúmeros transtornos socioeconômicos e ambientais para a população a jusante da mesma. Esses transtornos são desfavoráveis e na

maioria das vezes ocasionam danos irreversíveis às comunidades, cidades e ao meio ambiente.

É necessário antecipadamente encontrar as possíveis consequências geradas pelo rompimento, buscando soluções para mitigação destes potenciais. Esse tipo de simulação também deve ocorrer devido à grande quantidade de casos de rupturas de barragens em escala mundial e por muitas vezes destruírem povoados, cidades e populações.

A escolha da área de estudo justifica-se por ser uma barragem antiga, por ter a estrutura de concreto e estar localizada à montante de uma cidade com 9.777 habitantes.

1.1 Objetivos

O objetivo da presente pesquisa foi simular as ondas de cheia induzidas pela barragem de Peti, em São Gonçalo do Rio Abaixo-MG. Já os objetivos específicos foram: analisar a área de uso e ocupação do solo a montante da barragem; definir o hidrograma de cheia e simular o avanço da onda de cheia hipotética da ruptura da barragem, com a utilização de programas computacionais; verificar a área de inundação gerada.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho é constituído de outros seis capítulos. O primeiro refere-se à própria introdução, a qual descreve-se o conteúdo da presente pesquisa, a relevância deste estudo, além de se apresentar os objetivos em se realizá-la. Os demais foram organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 2: apresentar uma revisão bibliográfica sobre o tema, destacando trabalhos de outros autores sobre análise hipotética de rompimento de barragens, identificar os principais fatores que influenciam nesse tipo de estudo, abordar a questão normativa da segurança de barragens, além de citar casos históricos de desastres em nível regional e internacional;
- Capítulo 3: detalhar melhor a área de estudo, ou seja, apresentando dados importantes da barragem de Peti, que são muitos úteis para o estudo hipotético de simulação da estrutura, além de relatar todos os métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa e a utilização de ferramentas computacionais, que são essenciais nas pesquisas da área tecnológica, como é o caso da Engenharia Civil. Além disso, descrever as

diversas fases do estudo de caso proposto, aplicadas à metodologia adotada, detalhando melhor os procedimentos utilizados em cada etapa da pesquisa desenvolvida;

- Capítulo 4: verificar os resultados encontrados com a utilização de programas computacionais e por meio das ferramentas de geoprocessamento, na verificação das áreas inundadas e as populações atingidas;
- Capítulo 5: finalizar o trabalho com as considerações finais acerca do assunto pesquisado.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A interferência humana pode impactar seriamente o equilíbrio de um ecossistema. A concepção de uma barragem é um exemplo típico dessa alteração, pois influencia o comportamento de corpos de água (rios, córregos, etc.). O Brasil é um país que possui inúmeras obras de retenção de água devido ao seu grande potencial hídrico.

Construir uma barragem significa controlar o fluxo da água de um recurso hídrico. A construção de barragens para reservar a água a ser utilizada para consumo é tão antiga que há registros desse tipo de obra em todas as culturas desde as primeiras gerações humanas (CRUZ, 1996).

É notável que uma barragem traz muitos benefícios para a sociedade em geral, desde a produção de energia elétrica, navegação até a utilização da água represada para fins de irrigação. Além disso, deve-se ponderar a criação de vários empregos nas diversas fases de sua construção e operação, além de serem úteis no controle de enchentes.

Moecke (2014) afirma que há muitos benefícios decorrentes da construção de barragens, porém devem ser analisados principalmente os riscos devido à possibilidade de sua ruptura.

Empreendimentos que visam à acumulação artificial de volumes d’água de tal envergadura devem ser objeto de estudo e de avaliação crítica, visto que as barragens não estão livres de acontecimentos de estabilidade de suas estruturas, podendo levá-las a uma condição de colapso ou ruptura. Percebe-se, então, uma condição de risco relativa a desastres de uma barragem, principalmente quando o processo de ruptura ocorre em barragens localizadas a montante de aglomerações urbanas. (BRASIL, 2005, p. 20).

O rompimento de uma barragem, além de comprometer a vida a jusante do local, pode destruir famílias, populações e bens, trazendo impactos negativos nas áreas ambiental, econômica, social, e outras.

A avaliação dos impactos provocados pelo colapso de uma estrutura de um barramento é uma forma preventiva. Essa é uma preocupação de órgãos públicos e da população em geral, pois suas consequências são trágicas. Assim, os estudos hipotéticos devem ser realizados para que o monitoramento das barragens seja preciso, reduzindo as possibilidades de ocorrências desses eventos (COLLISCHONN e TUCCI, 1997).

Portanto, é necessário que se façam estimativas das cotas máximas e das vazões de escoamento quando uma barragem se rompe, além de identificar as áreas inundadas e determinar suas consequências para inserir procedimentos operacionais do reservatório e encontrar medidas como evacuação da população em caso da ocorrência de sinal de rompimento.

Segundo Collischonn e Tucci (1997), o geoprocessamento e os modelos matemáticos são fundamentais para a determinação da população atingida e das áreas inundadas pelo rompimento. A maioria dos modelos é desenvolvida pelo método de diferenças finitas, por meio das equações de Saint Venant. Geralmente são constituídos de dois módulos: brecha e hidrograma. O primeiro corresponde à abertura obtida por uma falha na barragem, por onde a água do reservatório passa. O hidrograma de ruptura corresponde geralmente às estimativas de vazão de pico, tempo de esvaziamento e volume do reservatório, considerando o pior cenário.

Os modelos matemáticos são integrados a um SIG – Sistemas de Informações Geográficas, permitindo que os dados necessários de uma simulação estejam sempre integrados. As imagens de satélite, além de dados hídricos, dados operacionais, cartográficos e outros são informações relevantes para o desenvolvimento do estudo hipotético (PEREIRA et al., 2003).

Os estudos de ruptura hipotética de barragens são baseados por modelos matemáticos, porém é inviável aplicar diferentes métodos para um mesmo estudo de caso, devido ao fato de que possam obter nos resultados diferenças significativas. (FERREIRA; ANDRZEJEWSKI, 2015, p. 1).

Pereira et al. (2003) apontam que os resultados obtidos na modelagem devem ser comparados com os modelos similares de referência para validação do estudo desenvolvido.

De acordo com Brasil et al. (2005), existiam poucos estudos nacionais de simulação de rompimento de barragens para as grandes obras já executadas ou projetadas,

principalmente se comparados a outros países, uma vez que já são executados há muito tempo.

Mesmo que este tipo de estudo não infere a ocorrência do colapso de uma barragem, a análise hipotética de rompimento é cada vez mais necessária, pois os riscos de ocorrência e os impactos provocados tornam-se uma preocupação crescente e em nível mundial.

Os estudos de propagação de cheias oriundos do colapso de uma grande barragem não eram obrigatórios no Brasil, porém a situação vem se alterando, exigindo que se façam simulações para tais fins, principalmente após a tragédia do rompimento da barragem de Fundão, no distrito de Bento Rodrigues, em Mariana, Minas Gerais, ocorrida em 5 de novembro de 2015.

Na França, em 1968, foi criada a primeira lei europeia de análise de risco de rompimento de barragens. A partir daí, elaborou-se planos mitigatórios para possíveis eventualidades trágicas, iniciando os estudos de simulações de ondas de inundação (BRASIL, 2010).

No Brasil, em 2010, criou a Lei nº. 12.334, que estabelece que a Política Nacional de Segurança de Barragens deve garantir padrões de segurança quanto a acidentes e seus impactos, adotar meios de prevenção em todas as fases (planejamento, projeto, construção, operação e desativação), monitorar as medidas de segurança adotadas pelos responsáveis das barragens, além de universalizar a fiscalização das barragens brasileiros pelo poder público e gerenciar os riscos.

Os agentes fiscalizadores devem classificar as barragens por risco, volume e dano potencial associado. Essa última está relacionada em função do potencial de mortes e impactos em geral decorrentes do rompimento da barragem.

Para se garantir a segurança de todos os envolvidos à área de influência da barragem, nesses estudos de simulação, faz-se necessário criar o PAE – Plano de Ação Emergencial para barragens de alto risco. Nesse plano, devem ser apresentados mapas de inundação do alcance de ondas de cheia, além de sistemas de alerta como forma de soluções de evacuação da população se necessário (BRASIL, 2005).

As barragens que não atenderem aos requisitos de segurança da Lei nº. 12.334 deverão ser recuperadas ou desativadas. Dessa forma, após a publicação da Lei, os empreendedores terão prazo máximo de dois anos para entregar aos órgãos fiscalizadores um relatório que contenham as ações e o cronograma de implantação dos procedimentos de segurança da barragem.

Esse capítulo é subdividido em estudos hipotéticos de rompimento de barragens por meio de modelos matemáticos. Na sequência, são descritos os fatores que influenciam a análise de colapso de um barramento. Depois foi abordado um tópico sobre a segurança de barragem e por fim, serão apresentados alguns casos históricos de rompimento de barragens.

2.1 Estudos desenvolvidos para análise do rompimento hipotético de barragens por meio de modelos matemáticos

A utilização de modelos computacionais é uma prática bastante comum para o estudo hipotético de ruptura de uma barragem, visto que o processo de cálculo é iterativo e a programação é uma ferramenta muito importante em estudos tecnológicos.

A seguir, são apresentados alguns estudos desenvolvidos por pesquisadores da área.

2.1.1 Barragem de Ernestina

A barragem de Ernestina localiza-se no município de mesmo nome, no estado do Rio Grande do Sul, pertencente ao rio Jacuí. O estudo de análise do rompimento hipotético da barragem foi feito por Collischonn e Tucci (1997).

O modelo DAMBRK foi utilizado na simulação do escoamento a 200 km a jusante da barragem rompida. Os impactos de áreas inundadas e populações atingidas foram determinados por meio de geoprocessamento.

O programa computacional DAMBRK é também utilizado em muitos outros países para a simulação de cheias oriundas do colapso de uma barragem, pois o modelo é validado por apresentar boa confiabilidade em seus resultados.

O modelo matemático é formado por duas etapas: formação da brecha (falha da barragem que pode ser ampliada) e propagação do hidrograma (método parecido com o usado para se determinar a propagação de cheias normais em rios).

No DAMBRK, gera-se um hidrograma de ruptura a partir de uma brecha pré-determinada na estrutura de um barramento e a propagação deste hidrograma ao longo do rio a jusante.

A brecha formada pode ser determinada por meio de quatro formas distintas: hidrograma de ruptura estimado (método mais simples, obtido por meio de previsão de tempo de

esvaziamento de reservatório, volume do reservatório e vazões de pico), evolução pré-determinada da brecha (a brecha é crescente a partir de seu tempo de formação), evolução por erosão simplificada (erosão por descargas sólidas) e evolução por erosão completa (equações hidrodinâmicas combinadas com erosão por descargas sólidas).

O método usado para a determinação da brecha foi o simplificado e genérico, onde se determinam parâmetros como largura da base da brecha, declividade da brecha e tempo de formação da mesma. A incerteza quanto a evolução da brecha pode resultar em erros significativos.

A modelagem do DAMBRK foi desenvolvida a partir do método de diferenças finitas, por meio de equações completas de Saint Venant.

As simulações dos métodos hidrológicos e hidrodinâmicos apresentaram diferenças apenas próximas à barragem. Devido o reservatório ser largo e não muito longo, as diferenças entre os métodos são insignificantes.

Porém os resultados de áreas inundadas e pessoas atingidas apresentaram uma diferença maior (800 e 350 pessoas).

Os resultados apontaram que, no pior cenário, a ruptura da barragem de Ernestina atingiria centenas de pessoas. O local a jusante do rio Jacuí é pouco habitado, não havendo grandes centros urbanos. Os danos podem atingir a agricultura, pequenos povoados e o sistema de transportes. Caso se rompa, pode haver destruição de cinco pontes e atingir até 800 habitantes da área de influência e para muitos deles não haveria tempo hábil para alerta e fuga.

Portanto, a formação da brecha e o nível inicial de água no reservatório são parâmetros muito importantes nesse estudo.

2.1.2 Barragens do Rio Paranapanema

Pereira et al. (2003) apresentaram um estudo ao longo das barragens na cadeia de geração hidrelétrica ao longo do rio Paranapanema, um dos mais importantes do interior do estado de São Paulo, sendo ainda um divisor natural de águas entre os estados de Paraná e São Paulo.

A pesquisa baseou-se na necessidade de encontrar uma ferramenta tecnológica para se verificar as condições de risco por meio de cheias de projeto ou de ruptura hipotética de

barragens do sistema hidrelétrico do rio Paranapanema. Dessa forma, buscou-se gerenciar a operação da cadeia quanto aos riscos de desastres naturais ou de possíveis rompimentos. O método matemático utilizado foi baseado em modelos muito difundidos nos Estados Unidos: DUKE DAMBRK, software que possibilita a verificação da propagação de ondas de cheia induzidas pelo rompimento de uma barragem e também das operações de reservatórios, permitindo que se previsse superfícies inundadas.

O DUKE DAMBRK foi desenvolvido para possibilitar a avaliação dos riscos e as consequências ocasionadas pela ruptura hipotética de uma barragem.

O sistema integrado a um SIG permitiu a gestão dos dados e informações relevantes a este estudo: parâmetros hidráulicos, hidrografia, cartografia, imagens de satélite, entre outros aspectos.

Inicialmente, levantou-se dados pertinentes a questões hidrológicas e operacionais de usinas, barragens, reservatórios e cursos de água do rio Paranapanema.

Uma das partes mais trabalhosas em se realizar esse tipo de estudo foi a recuperação da documentação de uma barragem. Neste caso, por se tratar de várias barragens, inclusive algumas em construção, buscou-se levantar todos os dados essenciais, além da montagem de cartas geográficas e levantamentos de campo.

Gerou-se ainda, curvas dos reservatórios referentes à cota x área e cota x volume, curvas operacionais de extravasores, etc. Criou-se então um banco de dados relativos a essas informações em SIG, por meio do aplicativo MapInfo Professional 5.0, ferramenta que apresentou eficiência no geoprocessamento, armazenamento e análise dos dados.

Formulou-se, em seguida, um modelo matemático para a simulação das ondas de cheia ao longo do rio, por meio de escoamento unidimensional. Baseia-se na utilização de equações básicas de Saint-Venant, empregando o método matemática de diferenças finitas.

Equacionou-se o modelo empregado e com a entrada dos dados, gerou-se os resultados simulados em diversos cenários.

Os resultados foram comparados com modelos referenciados para a validação do mesmo. As curvas comparativas entre os modelos apresentaram uma ótima concordância, validando-o e tornando-o aplicável para estudos do tipo.

Avaliou-se os impactos dos rompimentos das barragens ao longo do rio por meio das áreas inundadas obtidas, mediante a base de dados do aplicativo de SIG utilizado.

O modelo desenvolvido, em razão da sua concepção, é genérico, pois pode ser utilizado pela propagação de ondas de cheia tanto para cenários naturais quanto por tragédias accidentais de rompimento de barragens.

2.1.3 Barragem de Rio das Pedras

Brasil (2005) fez a análise da barragem de Rio das Pedras, em Minas Gerais, utilizando as modelagens uni e bidimensional para a propagação da onda de cheias induzidas pelo seu rompimento fictício. O Rio das Pedras localiza-se na bacia do Alto Rio das Velhas.

O objetivo principal foi utilizar as duas metodologias dimensionais para analisar a influência de determinados fatores no hidrograma de cheias.

Inicialmente, foi definido que seria necessário determinar o hidrograma de uma possível brecha obtida pelo rompimento da barragem, além de se determinar o tempo de formação da mesma.

Para se determinar a descarga de pico defluente devido à ruptura, utilizou-se expressões matemática, onde relacionava-se vazão máxima de descarga e outras características da barragem, como comprimento da crista, volume do reservatório, altura da barragem, etc.

Devido as vazões de pico e do hidrograma de ruptura a serem adotadas podem ser variáveis, podem ser construídos diversos cenários de ruptura.

Foram adotados quatro cenários para esse estudo: cenário extremo de ruptura (situação que envolve a máxima área de risco a jusante; muito utilizado para situações de alerta e de planos de emergência), cenário de ruptura mais provável (mais real, usado com a finalidade de uso e ocupação do solo a jusante), cenário considerando somente a ruptura (cheia oriunda apenas do rompimento da barragem, desconsiderando o hidrograma afluente ao reservatório) e cenário de operação extrema (condições críticas da barragem, onde se utiliza os extravasores, porém não havendo o colapso da estrutura).

Devido à complexidade de cálculos numéricos devido à grande variação das variáveis hídricas, o autor optou pelo programa unidimensional FLDWAV (baseado em equações de Saint-Venant por meio do método de diferenças finitas) e bidimensional FESWMS (usado para regimes pluviais subcríticos e supercríticos, mudança desses regimes, presença de ressalto hidráulico, etc.). O modelo bidimensional foi utilizado para simular as descargas em sistemas fluviais com topografia complexa. Por meio das simulações, determinou-se

fatores como profundidade, velocidade e tempo de chegada ao pico do nível d’água e estes são necessários para a verificação da duração da inundação.

Por meio dos dados dos modelos matemáticos, utilizou-se as ferramentas de geoprocessamento, criando um MDT¹ e representar a inundação provocada pela onda de cheia. Utilizou-se o programa computacional Surfer para interpolar as elevações altimétricas do MDT e as cotas máximas de inundação, obtidas pelos modelos numéricos. Também utilizou-se o programa IDRISI para análise cartográfica da área de estudo, para se gerar os mapas de inundações a jusante do represamento. O mapeamento dessas áreas constitui locais de risco, e por meio disso, elabora-se estratégias a serem tomadas.

O autor infere que enfrentou alguns problemas com o software FESWMS e recomenda uma análise mais realista, comparando as modelagens uni e bidimensional, com escoamento não permanente. Porém percebe-se que os modelos matemáticos aliados às ferramentas de geoprocessamento foram determinantes para a delimitação das áreas de risco e para a criação de planos emergenciais e de evacuação da população.

2.2 Simulações numéricas de inundações de barragens com MPM

Zhao, Liang e Martinelli (2017) utilizaram o Método de Ponto Material (MPM) para aplicar a modelos hidrodinâmicos. Para validar o método, simularam rompimento de barragens e compararam com outros métodos numéricos validados.

O MPM foi desenvolvido para resolver muitos problemas numéricos inerentes nas implementações iniciais. Isso faz com que o método seja consistente com o método dos elementos finitos.

O ponto material permite a implementação de condições de contorno que faz com que seus recursos sejam computacionalmente eficientes. Portanto, o modelo desenvolvido é aplicado em barragens, visto que resolve problemas hidrodinâmicos ao longo do curso.

O ciclo computacional contém três fases: a primeira refere-se à inicialização, a segunda fase é a lagrangiana e por último o estágio convectivo. A informação é mapeada dos pontos materiais para a grade durante a fase de inicialização para que possa começar o cálculo. Em seguida, as equações são resolvidas na grade e os pontos materiais são atualizados com novas propriedades durante a fase lagrangiana. Finalmente, os pontos materiais são mantidos fixos enquanto a grade é redefinida na fase convectiva.

¹ MDT = Modelo Digital de Terreno. Representa-se as elevações altimétricas do terreno em estudo.

Comparando o modelo com o SPH (Hidrodinâmica de Partículas Suavizadas) e o SWE (Equações de Águas Rasas), verificaram que o algoritmo foi validado, pois as seleções de diferentes tamanhos de malha e números de pontos materiais por elemento não desempenham um papel significativo no modelagem de fluxo de barragens. Porém concluíram que o método criado tende a superestimar a velocidade do fluxo em barragens, e que os resultados são mais próximos da modelagem SPH.

2.3 Fatores que influenciam a análise de colapso de um barramento

O estudo de ruptura de uma barragem é feito por meio de muitas suposições, algumas vezes devido à falta de dados e informações para a simulação, sendo estes valores variados, obtendo diversos cenários distintos.

Verificando os métodos utilizados pelos casos analisados, é possível perceber que mesmo utilizando modelos matemáticos diferentes, os estudos apresentam muitas características em comum.

Os autores partiram do princípio de que é necessário fazer o estudo de hidrogramas de entrada da barragem, além de se determinar parâmetros como volume e tempo de esvaziamento de reservatórios, formação da brecha, etc.

Alguns parâmetros quantitativos, por serem utilizadas suposições, podem resultar em erros em simulações (BRASIL, 2005).

A formação da brecha é um deles. O método adotado para se avaliar o esvaziamento de um reservatório pode influenciar no resultado final de um estudo hipotético. Brasil et al. (2005) afirmam que a brecha (tempo de formação e o tamanho da mesma) depende de uma série de fatores: topografia, tipo de estrutura de barramento, forma da barragem, materiais construtivos utilizados, tipo de fundação, cargas de reservatório, etc. Isso traz dificuldades em se prever as dimensões que a brecha apresentará durante o rompimento.

O esvaziamento de um reservatório também influencia no hidrograma de entrada. Pode ser que ele ocorra de forma simultânea e progressiva, de acordo com o fluxo da brecha adotada; sua vazão é controlada pela equação de fluxo da brecha e de dados da curva cota-volume do reservatório. Mas pode ser ainda de forma mais realista, onde a descarga do reservatório é dada pela afluência da onda de cheia, ou seja, há uma resposta dinâmica do reservatório em relação ao rompimento da barragem.

O não detalhamento de fatores relacionados à topografia do local ou do caminho a ser percorrido no escoamento trazem incertezas quantitativas. A mudança de declividade, a alteração da forma da seção transversal do curso d’água e a possibilidade de locais de armazenamento em áreas pelas laterais a jusante podem gerar resultados com superestimação, principalmente quanto ao volume e nível d’água máximo atingido, além do prazo de disseminação da onda de cheia.

É necessário ainda prever valores de rugosidade dos canais. Certos detalhes atrapalham o fluxo do canal, como a presença de árvores de diferentes portes, arbustos ou outros tipos de obstruções, tais como paredes que se interpõem ao fluxo do curso.

Segundo Brasil (2005), nas simulações em áreas urbanas, ainda há várias restrições para o escoamento. Os motivos podem estar associados à perda do eixo preferencial do escoamento; pode haver locais de armazenamento de água em algumas edificações; as redes canalizadas permitem o desvio do percurso; pode haver o controle e canalização da onda de cheia.

Nos cursos d’água pode haver elementos que podem influenciar na propagação da onda induzida pela ruptura, tais como: bueiros, pontes, aterros, curvas, etc. É difícil prever ou mensurar a quantidade desses elementos, gerando novamente incertezas.

De acordo com Graham (1998), os sedimentos que podem ser transportados nos cursos d’água na ocorrência de eventos extremos, como é o caso de uma ruptura de barragem, geralmente não são considerados. Isso implica em diferenças significativas em seus resultados.

Todos esses fatores culminam com a não possibilidade de validar os resultados de um estudo específico de simulação de ondas de cheia induzidas pelo rompimento de uma barragem.

As variáveis relacionadas ao corrimento de sedimentos em cursos d’água, falta de dados topográficos a jusante, indeterminação da brecha, esvaziamento do reservatório são alguns exemplos de fatores que influenciam o estudo.

2.4 Segurança de barragens

É necessário que se faça o estudo da segurança de uma barragem, além do risco associado. O risco é relacionado à probabilidade de ocorrência de um fenômeno adverso. O gerenciamento do risco é avaliado por meio de parâmetros, como: viabilidade do projeto

em relação aos riscos, tomadas de decisões que podem gerar riscos, análise de erros humanos e medidas mitigatórias de risco (MENESCAL; VIEIRA; OLIVEIRA, 2005).

Há muitos benefícios, segundo Menescal, Vieira e Oliveira (2005), em se gerenciar o risco que uma barragem possa oferecer. E esse estudo é individualizado por barragem, devido às suas peculiaridades. Os resultados levam a adotar medidas corretivas de operação, otimizando os processos e garantindo a segurança de todos. É importante reconhecer que em todo barramento tem que ser levantado em conta o risco de rompimento. A definição dos parâmetros mais significativos de riscos e incertezas deve ser realizada, para que se criem alternativas de administração dos riscos.

O estudo de incertezas deve ser feito levando-se em conta todas as fases da vida de uma barragem. As incertezas estão relacionadas à ameaças, que por sua vez apresentam riscos distintos. A análise destes riscos é imprescindível para que se garanta a segurança estrutural e operacional. Muitas rupturas podem ocorrer por negligências, ou por falha de comunicação entre as equipes de projeto e construção, além das falhas provocadas por interpretação equivocada das condições geológicas do barramento (MENESCAL et al., 2005).

Menescal et al. (2005) ainda afirmam que muitos problemas de rompimento são devido à falta de fiscalização durante a construção de uma barragem, e não apenas à falhas de projeto. Pode ser que o desenvolvimento do projeto não tenha sido feito por profissional qualificado para tal fim, ou a construção do empreendimento seja por empresa inexperiente com esse ramo, inabilitada para a execução desse tipo de obra. Há ainda problemas com operação e monitoramento, que podem ser ineficientes, principalmente vinculados à erros do uso de estruturas hidráulicas.

Deve-se verificar todos os procedimentos de segurança em todas as etapas da vida de uma barragem, prevenindo acidentes ou até mesmo desastres de ruptura de barragens. Deve-se detectar as anormalidades nas diversas fases, diagnosticá-las em tempo hábil e solucionando-as, além de buscar medidas mitigatórias para minimização ou eliminação das ameaças que podem surgir.

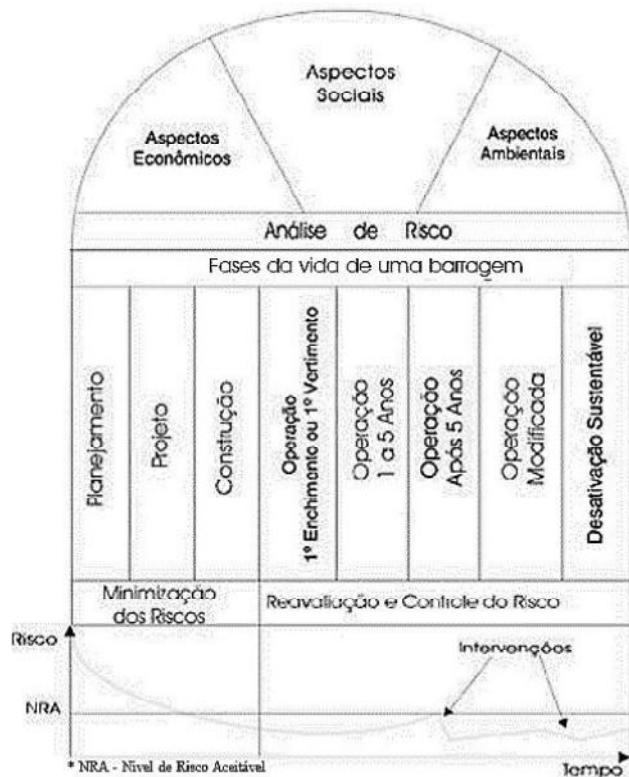
A incorporação de órgãos com a finalidade de gerenciar os recursos hídricos de um território é muito importante, visto que, por meio dele, são criados leis e diretrizes, buscando a segurança em seus processos, como por exemplo um manual de segurança de barragens.

Em 2010, instituiu-se no Brasil, a Lei 12.334, estabelecendo a PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens e o SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

A lei se aplica a todo e qualquer tipo de empreendimento destinado a acumular e represar água, independentemente do tipo de utilização. De acordo com o referido documento, a segurança de uma barragem pode ser definida como “condição que vise a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente”. Nota-se então a preocupação desses iminentes riscos, pois devem ser mantidos e preservados a vida e o equilíbrio dos ecossistemas.

A Figura 1 apresenta a evolução dos riscos ao longo das variadas etapas da vida de uma barragem. Essa evolução é perceptível, pois nas fases de planejamento, projeto e construção, os riscos são menores, enquanto nas demais fases (operação e desativação) faz-se necessário uma reavaliação e controle do risco para o manter abaixo do NRA (Nível de Risco Aceitável). Ainda se observa que os riscos estão relacionados a aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Figura 1 – Esquema de riscos nas fases da vida de uma barragem.



Fonte: MENESCAL et al. (2005).

A Política Nacional de Segurança de Barragens foi criada com o objetivo de reduzir as possibilidades de acidentes envolvendo estruturas de represamento de água, garantir todos os padrões de segurança das mesmas, por meio de monitoramento, acompanhamento e fiscalização contínua.

Além disso, verifica-se que a segurança é um parâmetro que deve ser considerado em todas as fases da vida de uma barragem, desde o projeto até a operação, e ainda até mesmo na sua desativação para usos futuros. Estabelece também que a população deve ser informada e convidada a participar de todas as ações preventivas e emergenciais que se fizerem necessárias.

A definição de planos de inspeção, monitoramento e de ações emergenciais traz como consequência a adoção de medidas para proteger a vida, reduzir danos aos recursos hídricos e ao meio ambiente.

A responsabilidade legal pela barragem é do empreendedor, que deverá desenvolver ações para garantir a segurança de todos os envolvidos.

A fiscalização da segurança das barragens cabe ao órgão vinculado à finalidade de cada tipo de barragem. Para barragens de acumulação de água, a entidade que outorgou o direito do recurso hídrico é a responsável fiscalizadora, enquanto para barragens de fins de geração hidrelétrica, a entidade que outorgou o direito do uso do potencial hídrico assume a responsabilidade de fiscalizar, a de rejeitos minerários cabe à outorgante desses direitos e para fins industriais à entidade que forneceu a licença ambiental, seja ela de instalação e/ou de operação.

O SNISB – Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens é um dos instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens, assim como o Relatório de Segurança de Barragens, o Plano de Segurança de Barragens, o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente, entre outros.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos deve classificar as barragens por risco, volume e dano potencial associado (relacionado à possibilidade de perdas de vidas humanas em decorrência do rompimento de uma barragem, além da mensuração dos impactos provocados: econômicos, sociais e ambientais).

Para a criação do PAE, deve ser elaborados os mapas de inundação, que são necessários no estudo hipotético de rompimento de barragens, pois, por meio deles, obtêm-se as áreas e populações atingidas pela água. No PAE, também devem ser apontadas as possíveis

situações de emergência e os procedimentos preventivos e corretivos, para que, em situações de emergência, possam ser adotados.

A partir da publicação da Lei nº. 12.334 (20 de setembro de 2010), as barragens deverão atender a todos os requisitos de segurança deverão ser recuperadas² ou desativadas.

Além dessas exigências, definiu-se que os fiscalizadores deverão exigir em, no máximo dois anos, todas as ações e os procedimentos necessários para que se garanta a segurança das barragens que operam, além do cronograma da implantação de todos esses requisitos a serem adotados.

2.5 Casos históricos de ruptura de barragens

As barragens brasileiras que apresentaram casos de ruptura são, na maioria das vezes, utilizadas para contenção de rejeitos minerários. E muitos desses desastres ocorreram em Minas Gerais, estado da área de estudo desta pesquisa.

O mais antigo registro de desastres com barragens neste estado ocorreu em 1986, quando a barragem dos rejeitos da mina de Fernandinho, em Itabirito-MG chegou a romper. Foram sete óbitos decorrentes deste acontecimento. O desastre foi provocado por falhas na estrutura.

No ano de 2001, foi a vez da barragem de Macacos, distrito da cidade metropolitana de Nova Lima-MG, também de rejeitos minerários. A onda de cheia foi responsável pela morte de cinco trabalhadores da mineração. Uma avalanche de rejeitos foi a causa do rompimento.

Já em 2003, a barragem em Cataguases-MG, apresentada na Figura 2, responsável por rejeitos industriais, rompeu-se, contaminando os rios Pomba e Paraíba do Sul, gerando uma mortandade³ de várias espécies de animais, principalmente peixes e interrompendo o abastecimento de água de cerca de 600 mil pessoas, nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. A mesma se rompeu devido à falta de manutenção no barramento (MENESCAL et al. (2005).

² A recuperação de uma barragem está relacionada à revitalização, por meio de roçagem, limpeza, recuperação da estrutura, reaterro de áreas erosivas, além de restauração de cabines de operação, entre outros, para que se garanta a segurança da mesma.

³ Mortandade refere-se a um número expressivo de mortes.

Figura 2 – Antes e depois do rompimento da barragem de Cataguases.

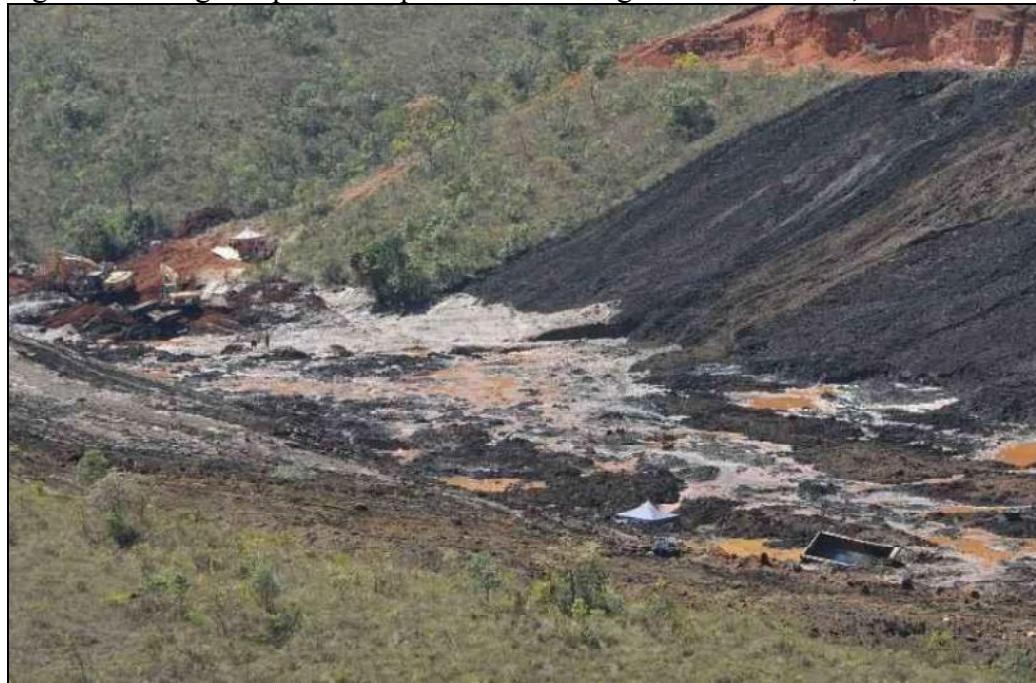


Fonte: MENESCAL et al. (2005).

A barragem de minérios da Rio Pomba / Cataguases, em Mirai-MG rompeu-se em 2007, deixando mais de 4000 pessoas desalojadas ou desabrigadas. O motivo está relacionado à uma forte chuva.

Em 2014, em Itabirito-MG, a barragem da Herculano, usada para conter rejeitos minerários, se rompeu, provocando a morte de três funcionários (Figura 3). A mesma se rompeu quando funcionários faziam a manutenção da barragem desativada (FARIA, 2015).

Figura 3 – Imagem após o rompimento da barragem da Herculano, Itabirito-MG.



Fonte: FARIA (2015).

Em 2015, um dos casos mais divulgados pela mídia nacional, o colapso das barragens de Fundão e Santarém, no distrito de Bento Rodrigues (Figura 4), em Mariana-MG, trouxe como consequência 19 óbitos, oito desparecidos, cerca de 600 desalojados ou desabrigados, interrupção do abastecimento de água de milhares de pessoas, mas principalmente a poluição do Rio Doce, que atingiu até o mar do estado do Espírito Santo, prejudicando a atividade pesqueira e turística. As causas estão sendo investigadas.

Percebe-se que a maioria das barragens em Minas Gerais são destinadas a exploração de atividade minerária, que é bastante intensificada. Nos casos citados, houve rompimento das barragens e as consequências foram extremamente drásticas, principalmente o ocorrido no distrito de Mariana.

Figura 4 – Lama em Bento Rodrigues, Mariana-MG.



Fonte: AGOSTINO (2015).

Em nível nacional, outras barragens também sofreram ruptura, como: Camará, em Alagoa Nova-PB (2004), Apertadinho, em Vilhena-RO (2008), Algodões, em Cocal e Buriti de Lopes-PI (2009) e Santo Antônio, em Laranjal do Jari-AP (2014), que foram projetadas como barragens de água para a geração de energia elétrica. Elas apresentaram problemas estruturais devido a ausência de inspeções contínuas e de estudos consistentes de sondagem.

Em nível mundial, tem-se registro de barragens rompidas, em ordem cronológica, nos Estados Unidos (1928), França (1959), Itália (1963), Estados Unidos (1972), China (1975), Estados Unidos (1976), Canadá (1996), Espanha (1998) e Estados Unidos (2015). Os motivos foram respectivamente: colapso das fundações; pressão excepcional de chuvas torrenciais; deslizamento de terras e rochas; chuvas fortes; forte tempestade; erros de engenharia; chuvas torrenciais; falhas estruturais; passagem de furacão.

As falhas dessas barragens tiveram consequências múltiplas, tais como contaminação de rios, afetando a qualidade de vida de muitas pessoas que dependem deles para o abastecimento público; lamas soterrando edificações e matando pessoas; morte de peixes diversos; destruição de vilas e povoados; envenenamento de água; desaparecimento de pessoas, etc.

Portanto, percebe-se a necessidade de se estudar as possibilidades de ocorrências de eventos desse tipo, buscar soluções preventivas e de operação de reservatórios, buscando a segurança das barragens durante as fases de implantação, construção, operação, desativação, etc., preservando a vida humana, fauna, elementos da flora, povoados e cidades a jusante de locais onde foram construídos os barramentos das mais diversas formas.

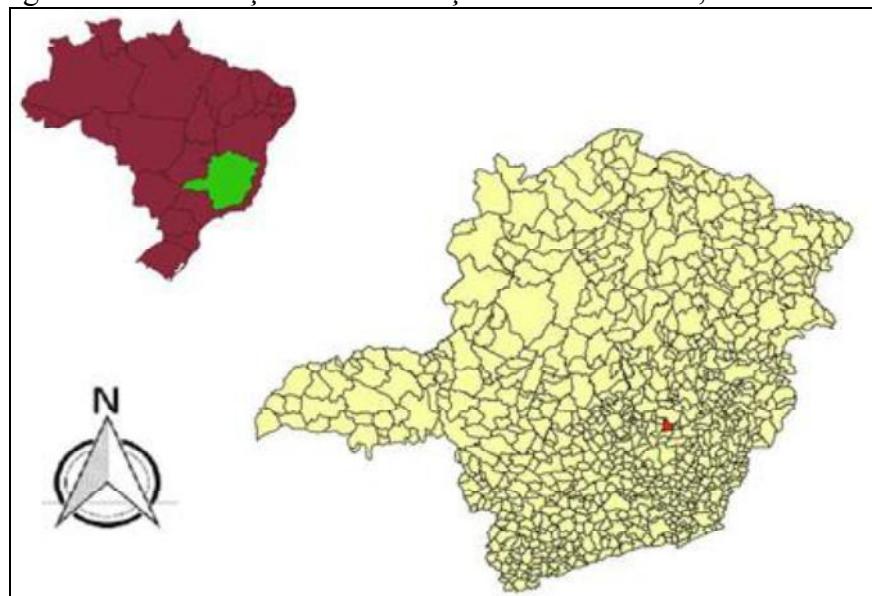
CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A barragem de Peti está localizada no estado de Minas Gerais, no município de São Gonçalo do Rio Abaixo, conforme mapa da Figura 5. Foi instalada no rio Santa Bárbara, integrante da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. A barragem de Peti fica na região central de Minas e o rio Santa Bárbara é afluente do rio Piracicaba e contribuinte do Rio Doce, que pertence a Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH-DO2).

Figura 5 – Localização de São Gonçalo do Rio Abaixo, Minas Gerais.



Fonte: Autor (2017).

O barramento tem a função de controlar a vazão do rio e produzir energia elétrica. Em 1905 foi construída a antiga usina de Peti. A atual PCH Peti iniciou sua operação em 1946,

sendo que no local da antiga usina desinstalada, a Cemig⁴ instalou um centro de pesquisas ambientais (RIBEIRO et al., 2012).

A barragem de Peti (Figura 6) foi executada em concreto armado em arco, tendo 46 metros de altura e 85 metros de comprimento na crista. Cada vertedouro possui largura e altura respectivamente iguais a seis e cinco metros. Contém seis comportas verticais (RIBEIRO et al., 2012).

Figura 6 – Barragem de Peti.



Fonte: MURTA (2009).

Por meio de informações obtidas pelo Atlas Digital das Águas de Minas, da Universidade Federal de Viçosa, o local de estudo (Figura 7) possui as seguintes coordenadas geográficas: Latitude: 19,880833° S e Longitude: 43,3675° W.

Segundo informações da Cemig, o volume do reservatório da usina é equivalente a 43,578 hm³, com área de 6,78km², possuindo duas unidades geradoras, com uma potência de 9,4 MW.

⁴ Companhia Energética de Minas Gerais; atualmente é a empresa responsável pela operação da barragem de Peti.

Figura 7 – Localização da Barragem de Peti.



Fonte: Google Maps. Adaptado por Autor (2017).

3.1.1 Usina hidrelétrica de Peti

Em fevereiro de 1905, foi inaugurada a antiga usina de Peti, construída pela empresa inglesa de mineração The São Bento Gold Estates. O empreendimento buscou o aproveitamento hídrico das cachoeiras de Peti e auxiliar na exploração do ouro de uma mina próxima, uma das maiores do Brasil, conhecida pelo nome de São Bento. Porém os trabalhos da mineradora foram suspensos no mesmo ano que a hidrelétrica foi inaugurada (CEMIG, s. d.).

Registros históricos de 1914 afirmam que as instalações de Peti eram ótimas e a hidrelétrica era a responsável pelo abastecimento da rede elétrica da cidade de Santa Bárbara e pelo então distrito de São Gonçalo. Contava com uma pequena barragem e três unidades geradoras totalizando uma potência de 980 kW (CEMIG, s. d.).

Em 1942, um decreto autorizava a construção de uma nova usina hidrelétrica em Peti (CEMIG, s. d.).

A construção da usina e a ampliação do sistema de transmissão permitiriam um acréscimo de carga para a região de Belo Horizonte, além da utilização de energia elétrica e atendimento das necessidades da exploração da atividade minerária de Itabira (CEMIG, s. d.).

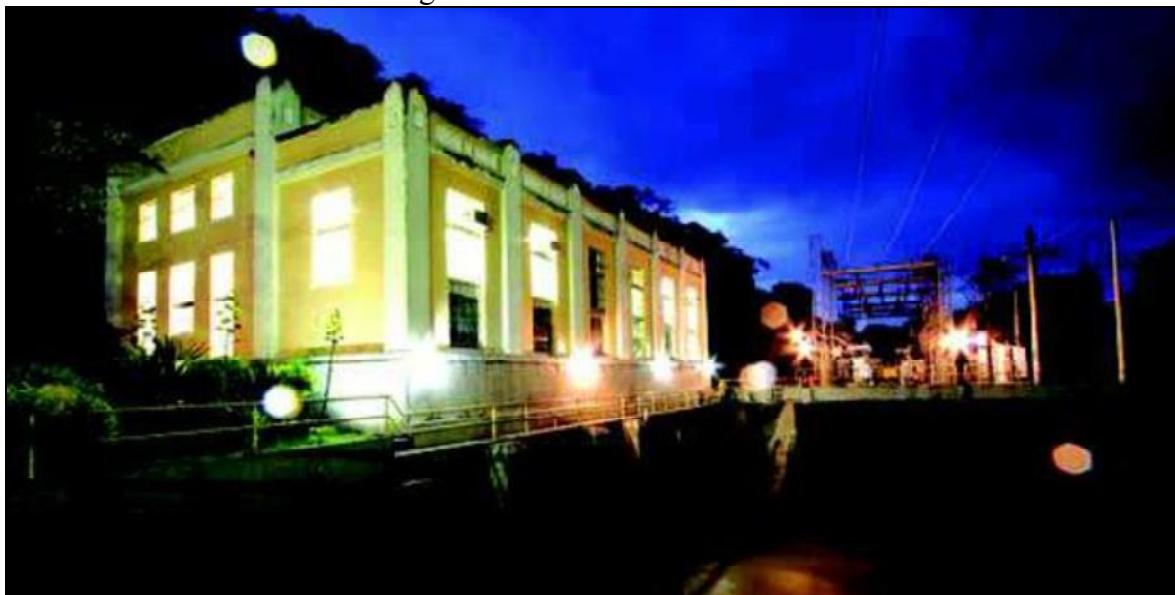
Em 1946, a Companhia de Força e Luz de Minas Gerais (CFLMG) iniciou a operação da usina nova, com duas unidades geradoras que somavam 9400 kW. A transmissão de 67 km

de extensão passou a atender Belo Horizonte, onde instalou-se uma subestação na capital mineira de 3750 kVA (CEMIG, s. d.).

O aproveitamento hídrico de Peti foi possível por meio da construção de um barramento de concreto armado, em forma de arco, chegando a atingir 85 metros de comprimento na crista. Passou-se a utilizar a casa de força da antiga usina, já desativada, para se implantar um centro de pesquisas ambientais de Peti (CEMIG, s. d.).

Em 1973, a usina (Figura 8) passou a integrar o parque gerador da Cemig, que incorporou a CFLMG.

Figura 8 – Hidrelétrica de Peti.



Fonte: Cemig (s.d.).

Desde então, a Cemig é detentora da concessão do local, a qual foi prorrogada por mais vinte anos em 1997 pelo Ministério de Minas e Energia. É uma das várias PCHs que a concessionária pública mineira opera (CEMIG, s. d.).

3.2 Metodologia

O presente trabalho trata de um estudo de caso, método amplamente usado em pesquisas, que baseia-se em dados coletados em situações reais, com a finalidade de se estudar assuntos atuais e pertinentes à área de estudo (EISENHARD, 1989; YIN, 2009).

O estudo de caso não se trata de uma pesquisa genérica, que pode ser amplamente utilizada para outras situações, mas sim da coleta de dados quantitativos e qualitativos, relevantes ao

tema e local da pesquisa, chegando-se às conclusões, recomendações acerca de um determinado assunto.

Para tanto, a fundamentação teórica e a análise de estudos semelhantes de outros autores é muito importante para o entendimento do processo da pesquisa, visto que dessa forma é possível encontrar os parâmetros principais a serem utilizados na simulação e comparar os resultados encontrados.

Nesta pesquisa, a abordagem será o estudo de caso da simulação de rompimento hipotético da barragem de Peti, localizada no estado de Minas Gerais. Por meio deste analisou-se toda a área a montante do barramento, para que os dados de entrada do reservatório sejam utilizados para se verificar uma ruptura hipotética da barragem, tendo como consequência impactos de diferentes magnitudes, inundações de áreas, populações atingidas, etc.

A análise da simulação do rompimento hipotético da barragem localizada no município de São Gonçalo do Rio Abaixo teve grande parte de sua metodologia baseada principalmente em modelos matemáticos, devido à necessidade de se verificar a alternância de variáveis durante as simulações, para se obter diferentes cenários. A adoção de modelos matemáticos justifica-se pela praticidade e agilidade no estudo, muito úteis no desenvolvimento de pesquisas tecnológicas.

As imagens de satélite para a presente pesquisa foram obtidas de diversos sites, como Earth Explorer USGS e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, além do Mapa de Solos dos municípios mineiros, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa juntamente com outras instituições.

Para a classificação de imagens quanto ao uso e ocupação do solo, utilizou-se o programa computacional MultiSpec, usado para análise de imagens multiespectrais⁵, bastante útil nesse tipo de pesquisa. A análise do uso e ocupação do solo interferem na passagem da onda de ruptura, uma vez que influenciam o hidrograma de entrada do reservatório.

A finalidade da análise de uso e ocupação do solo a montante da barragem é a de verificar o hidrograma de onda de cheia a ser gerado, a partir de uma simulação hipotética.

Para que a utilização de programas de simulação da onda de cheias fosse possível, optou-se pelo uso do modelo HEC-HMS e HEC-RAS. O primeiro é usado para simular os processos hidrológicos a montante da barragem e, assim, obter o hidrograma de entrada. O segundo é um programa computacional unidimensional que modela o sistema hidráulico de fluxo de

⁵ Imagens multiespectrais são aquelas de um mesmo objeto, tomadas com diferentes comprimentos de ondas eletromagnéticas.

água por meio de rios e canais, amplamente difundido por pesquisadores da área de Recursos Hídricos.

Foi necessário que o estudo se baseasse em dados obtidos do local (topográficos e hidrológicos). Também foi preciso determinar parâmetros, como vazão de pico e hidrograma de entrada do reservatório, para que a partir destes dados a simulação efetivamente ocorresse, para serem encontrados os resultados necessários para identificar as consequências e os impactos induzidos pelo rompimento da barragem de Peti, para que se possa avaliar as medidas preventivas e de emergência em caso de sinistros.

Ainda foi necessário o uso de programa de Sistemas de Informações Geográficas que fez a função de permitir a integração dos dados: o QGIS. Estes foram utilizados para localizar a região de estudo e analisar as áreas inundadas após a modelagem. Por meio desses programas computacionais obtiveram-se todas as imagens de satélites georreferenciadas em um mesmo sistema UTM, condição necessária para a precisão de dados e resultados em todo o estudo.

A seguir, serão apresentadas, detalhadamente, cada fase da parte prática do trabalho e no capítulo seguinte os respectivos resultados de cada fase aqui apresentada.

3.2.1 Delimitação da bacia hidrográfica a montante

A barragem de Peti está, conforme mencionado anteriormente, na Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Inicialmente, foi necessário baixar o shapefile⁶ de toda a bacia a montante para dados iniciais de entrada. Para isso, a obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE) torna-se necessária para que se delimite uma bacia hidrográfica.

Dessa forma, por meio de dados do Topodata⁷ verificou-se a quantidade de imagens de satélites seriam necessárias a serem obtidas para a unificação das mesmas e a criação de um mosaico das mesmas.

Assim, as imagens de satélite foram adquiridas por meio do Earth Explorer USGS, que mediante a identificação do local (por exemplo, o nome do município onde a barragem está localizada) geravam-se as imagens.

⁶ O shapefile é um formato de armazenamento de dados em relação à posição, forma e atributos de feições geográficas.

⁷ O Topodata fornece o Modelo Digital de Elevação e as suas derivações locais básicas.

O conjunto delas permitiu fazer o mosaico (unificação das imagens em um único mapa) para que se fizesse a correta delimitação da bacia hidrográfica.

Utilizou-se a ferramenta taudem, que trata-se de um aglomerado de procedimentos e acessórios para a confecção dos estudos hidrológicos com base nos Modelos Digitais de Elevação.

O taudem gera as microbacias de todos os cursos, o que a partir daí, manualmente, identificou-se as microbacias desejadas, onde selecionava-se as feições⁸ e copiava para um novo shapefile.

Então, foi determinada a localização do ponto exutório da barragem, para que se dividisse o que seria a região a montante e a jusante da barragem dentro da mesma bacia hidrográfica.

Esse procedimento foi utilizado para identificar toda a bacia hidrográfica a montante, as microbacias e as regiões hidrográficas também. Aí então, dissolia-se tudo para gerar um único polígono.

Gerou-se mapa de altimetria, definiu-se os cursos hídricos de acordo com sua ordem hierárquica, apresentou-se as regiões hidrográficas a montante de Peti e as microbacias pertencentes à elas.

3.2.2 Classificação do uso do solo da bacia hidrográfica a montante da barragem

Para a classificação das imagens da área delimitada a montante, foi necessário utilizar outras imagens de satélite, pois essa tarefa foi realizada pelo programa MultiSpec, e as imagens obtidas anteriormente geraram erro de leitura, por várias tentativas.

Portanto, as imagens foram obtidas por meio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela Divisão de Geração de Imagens (DGI).

Foram baixadas duas imagens, que representavam toda a bacia a montante. Essas imagens contém muitas bandas e por meio do MultiSpec fez-se a unificação delas, para uma melhor resolução das imagens.

Foram feitas diversas combinações de unificações e a melhor utilizou apenas as bandas 3, 4 e 5, nessa sequência, ficando a imagem com uma excelente resolução.

⁸ Feições correspondem à figura, ou seja, o aspecto, a forma de um local ou de uma região.

As imagens foram trabalhadas também de forma a fazer um mosaico e quando obtido, foi usado para a classificação de cada tipo de utilização do solo na bacia hidrográfica à montante da barragem.

A análise dos diferentes tipos de uso do solo, identificada por meio de padrões homogêneos permitiram a classificação destes em classes distintas, como rio, pasto, vegetação, solo nu, nuvens e rocha.

3.2.3 Classificação dos tipos do solo da bacia hidrográfica a montante da barragem

Para essa etapa de classificação da área da bacia hidrográfica à montagem de Peti, utilizou-se de imagens obtidas por meio do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, da Universidade Federal de Viçosa et al. (2010). Esse documento foi elaborado por várias instituições, para se obter todos os solos dos municípios do estado mineiro.

E por meio dele, fez-se a sobreposição no mesmo sistema de referências de coordenadas no programa computacional QGIS. Recortou-se a área desejada e classificou-se por solo.

Foi notável a necessidade de se fazer o mesmo para cada microbacia, pois o próximo programa computacional a ser utilizado exige-se a área de cada uma delas para a simulação e obtenção do hidrograma de entrada.

3.2.4 Determinação da precipitação média da bacia a montante

Para se determinar a precipitação média da bacia a montante da barragem, utilizou-se o método de Thiessen. Essa opção foi em razão de que, se escolhida a Precipitação Máxima Provável, seriam selecionadas as maiores precipitações ocorridas na região, havendo uma maximização dessas precipitações críticas, superdimensionando o estudo, o que teria baixa probabilidade de ocorrência.

Primeiramente, no QGIS, abriu-se o shapefile da bacia. E em seguida marcou-se com um ponto cada posto pluviométrico na bacia dissolvida para a determinação do polígono, ou seja, delimitou-se área que cada estação abrange.

Para isto, fez-se a compatibilização entre a área da bacia a montante da barragem com o mapa do Hidroweb da ANA – Agência Nacional de Águas. Dessa forma, identificou-se cada posto por meio de um código e por meio deste foram encontradas as séries históricos

do local, identificando a precipitação máxima de todos os tempos de cada estação pluviométrica. Dessa forma, utilizou-se a média ponderada das precipitações máximas.

Optou-se por utilizar dados de quatro postos pluviométricos localizados dentro da área da bacia.

Para a marcação dos postos pluviométricos no mapa da bacia, digitaram-se as coordenadas latitude e longitude de cada um deles, também obtidas por meio da ANA. Assim, criou-se uma nova camada shapefile do tipo ponto, usando o mesmo sistema de referências de coordenadas. Instalou-se a ferramenta “NumericalDigitize” no comando de gerenciar e instalar complementos. Dando continuidade, no comando instalado informa-se as coordenadas de cada posto e as mesmas são identificadas no mapa da bacia como um ponto.

Já que se tinha o mapa da bacia e os pontos das estações pluviométricas identificadas, seria necessário se determinar o polígono, demarcando a área de cada posto. Assim, abriu-se a ferramenta Polígono de Voronoi, contida em Vetor – Geometrias. Nela entrou-se com a camada vetorial de pontos criada, adicionou-se o percentual da região abrangida e salvou-se o shapefile de saída.

O polígono gerado precisou ser recortado, onde o corte foi baseado pela camada da bacia. Assim, por meio da tabela de atributos, determinou-se a área relativa à cada posto pluviométrico.

A determinação da precipitação média da bacia a montante de Peti foi determinada pela fórmula de Thiessen, demonstrada a seguir:

$$P_m = \frac{\sum A_i \times P_i}{A} \quad (I)$$

Na equação I:

- **P_m** é o valor da precipitação média da bacia (em milímetros = mm);
- **A_i** corresponde à área de cada posto pluviométrico (em quilômetros quadrados = km²);
- **P_i** é o valor da precipitação em cada posto pluviométrico (em milímetros = mm);
- **A** equivale à área total da bacia (em quilômetros quadrados = km²).

3.2.5 Obtenção do hidrograma de entrada do reservatório

Para se obter o hidrograma de entrada, foi escolhido o uso do programa computacional HEC-HMS, pela sua funcionalidade e por ser gratuito. Neste, é feito uma representação esquemática dos rios de maior ordem até chegar ao reservatório à montante da barragem e todas as microbacias.

Após, foi determinado qual corpo hídrico está a jusante de cada um, fazendo a caracterização e a vinculação de todos, para que o programa entenda o sentido do fluxo d’água.

Na sequência, foram inseridas todas as áreas (em km²) das microbacias, além de outros dados individuais pertencentes a cada uma delas, como o número de curva (CN) e o tempo de retardo.

O número de curva foi determinado por meio da tabela rural e de acordo com a característica de cada microbacia, incluindo o grupo de solo A, B, C ou D (TOMAZ, 2016). A microbacia do Rio Santa Bárbara foi classificada com CN igual a 84, por ter predominância de florestas esparsas com solos com textura com maior teor de argila (grupo D). As microbacias do Rio Barão de Cocais/São João e Ribeirão Preto foram classificadas com CN equivalente a 79, por serem campos permanentes normais com solos com textura com 40% de argila (grupo D). Já as microbacias do Rio Conceição 1 e Ribeirão Caraia foram classificadas com CN igual a 71, devido à preponderância de campos permanentes normais com solos com textura argilosa em torno de 30% (grupo C) e as microbacias do Rio Conceição 2 e 3 como CN 78, por serem florestas esparsas com solos com textura argilosa em torno de 20% (grupo C).

Primeiro determinou-se o tempo de concentração, fora do HEC-HMS, que foi obtido por meio da fórmula do método Califórnia Culverts Pratice (TOMAZ, 2016).

$$tc = 57 \times L^{1,155} \times H^{-0,385} \quad (II)$$

Na equação II, têm-se:

tc = tempo de concentração (dado em minutos – min);

L = comprimento do trecho analisado (dados em quilômetros – km);

H = diferença de cotas entre a saída da bacia e o ponto mais alto do trecho analisado (dado em metros – m).

Em seguida, calculou-se o tempo de retardo (em minutos), que pelo método Califórnia Culverts Pratice correspondente a 60% do tempo de concentração; este valor que foi inserido no HEC-HMS.

Depois, descreveu-se o modelo meteorológico da bacia e as especificações de controle, onde se determinava qual a data e o horário de início e término da simulação, além do tempo de intervalo para a obtenção dos dados tabelados. Definiu-se a simulação com resultados em intervalos de quinze minutos, pois assim os resultados nesse intervalo de tempo definiriam bem as informações no hidrograma de entrada.

Ainda introduziram-se os dados da série de tempos, obtida por meio do método do hietograma⁹ de Huff para o primeiro quartil, pois refere-se às chuvas com duração menor ou igual a seis horas de precipitação. Assim, foi utilizado o método do SCS (Soil Conservation Service). Nesse método inseriu-se a precipitação adotada conforme descrito no tópico anterior.

Dessa forma, fez-se a simulação para obtenção do hidrograma de entrada para chuvas de duas horas e os resultados foram apresentados em forma de gráficos de dispersão. Optou-se por duas horas de chuvas, pois formam o tipo de chuvas que geram o maior pico de vazão (chuvas convectivas).

Calibrou-se o CN das microbacias e por fim, verificou-se a influência do tempo de precipitação na geração do hidrograma de cheia, adotando diferentes tempos de chuvas.

3.2.6 Determinação da onda de cheia a jusante da barragem

Para se determinar a área atingida pela onda de cheia após o rompimento da barragem, optou-se por usar o programa computacional HEC-RAS, por ser gratuito e por ser utilizado em estudos de mesma finalidade, ou seja, por sua aplicabilidade em simulações em barragens. A escolha também baseou-se porque quando se utiliza programas simplificados é necessário comparar os resultados com o HEC-RAS para a sua validação (PEREIRA et al., 2017).

Incialmente demarcou-se 61 seções transversais ao longo do rio a jusante, por aproximadamente 77 km de extensão, para que se pudesse analisar a influência da onda de cheia a jusante do barramento de Peti em uma distância considerável a ser impactada. Para

⁹ Trata-se do registro gráfico dos valores de precipitação em uma determinada região durante um certo período de tempo.

isso, utilizou-se o complemento *Terrain profile* no QGIS, que gerava o perfil de cada seção demarcada.

As informações sobre o modelo matemático do programa descritas a seguir, bem como suas equações, foram baseadas no Manual de Referência Hidráulica (CENTER, 2010).

Os dados obtidos no hidrograma calibrado de entrada do reservatório são utilizados como dados para a simulação no HEC-RAS.

O HEC-RAS é uma ferramenta capaz de realizar cálculos de fluxo de água em canais em regime subcrítico, supercrítico, fluxo constante, instável e até mesmo a análise da qualidade da água. Trata-se de um sistema integrado projetado para uso interativo, para análise hidráulica, armazenamento de dados e geração de relatórios e gráficos.

Para que seja possível determinar os perfis de superfície de água de uma seção transversal para outra em escoamento permanente, o modelo computacional faz um processo iterativo por meio da equação (III) de energia:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + HE \quad (III)$$

onde:

Z₁ e **Z₂** = cotas do fundo dos canais em relação a um referencial;

Y₁ e **Y₂** = profundidade da água nas seções transversais;

V₁ e **V₂** = velocidades médias nas seções (vazão / área);

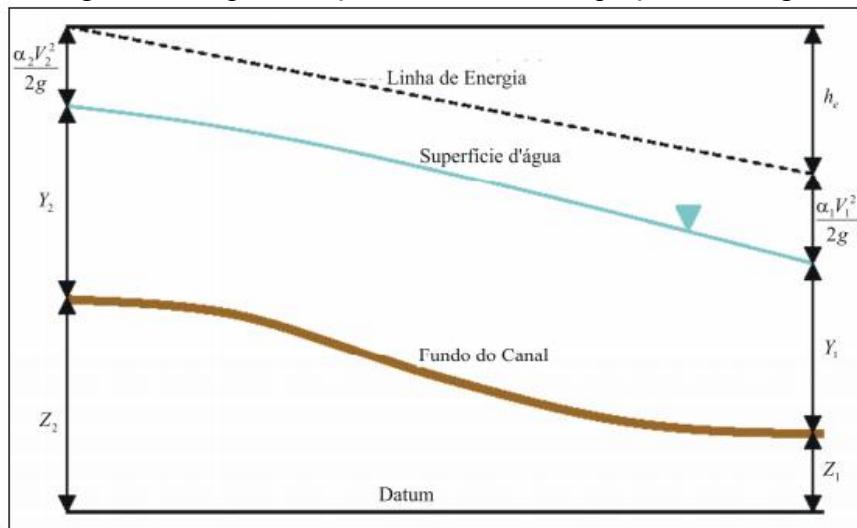
a₁ e **a₂** = coeficientes de ponderação de velocidades;

g = aceleração gravitacional;

HE = perda de carga no trecho.

O cálculo dos perfis da superfície líquida se dá por meio iterativo para a resolução da equação. Na Figura 9, nota-se a representação esquemática dos termos utilizados na fórmula apresentada:

Figura 9 – Representação dos termos da equação de energia.



Fonte: CAMPOS (2011).

Entre uma seção e outra há perda de carga devido às perdas por atrito, e por contração e expansão. A equação da perda de energia (IV) é a seguinte:

$$He = L Sf + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (IV)$$

onde:

L = comprimento do trecho;

Sf = coeficiente de perda de carga entre uma seção e a outra;

C = coeficiente da perda de carga por expansão ou contração.

O comprimento do trecho é demonstrado pela equação (V):

$$L = \frac{L_{lob} \times Q_{lob} + L_{ch} \times Q_{ch} + L_{rob} \times Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (V)$$

onde:

L_{lob}, **L_{ch}** e **L_{rob}** são, respectivamente, os comprimentos dos trechos para as seções especificadas em suas margem esquerda, canal principal e margem direita;

Q_{lob}, **Q_{ch}** e **Q_{rob}** são, nessa ordem, as médias aritméticas das vazões em sua margem esquerda, canal principal e margem direita entre as seções especificadas.

Para o escoamento transitório, as equações utilizadas são as de Saint-Venant. Para se analisar a situação típica desse tipo de escoamento, têm-se a equação da conservação da quantidade de momento, descrita em (VI):

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g (S_o - Sf) \quad (VI)$$

Também se utiliza a equação da conservação de massa (VII):

$$b \frac{\partial y}{\partial t} + A \frac{\partial y}{\partial x} + vb \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (\text{VII})$$

A simplificação dessas equações para esse escoamento é baseada na admissão de que o escoamento é unidimensional, sendo desprezadas as variações de velocidades nas direções transversais e verticais. Ou seja, o processo iterativo é considerado longitudinal, na direção do corpo hídrico ou de sua declividade.

As equações das diferenças finitas de Saint-Venant são formuladas por meio de equações diferenciais parciais oriundas da continuidade e do momento. As soluções são obtidas para tempos e distâncias desenvolvidas ao longo do corpo hídrico.

As equações diferenciais são transformadas em equações de diferenças finitas algébricas, podendo ser não lineares ou lineares. As soluções avançam de uma linha de tempo para o vizinho mais próximo ($i+1, j+1$).

Assim, a aproximação por diferenças finitas permite a determinação das derivações espacial (equação VIII) e temporal (equação IX), sendo escritas para um ponto desconhecido ($i+1, j+1$).

$$\frac{\partial u_{i+1}^{j+1}}{\partial x} = \frac{u_{i+1}^{j+1} - u_i^{j+1}}{\Delta x} \quad (\text{VIII})$$

$$\frac{\partial u_{i+1}^{j+1}}{\partial t} = \frac{u_{i+1}^{j+1} - u_{i+1}^j}{\Delta t} \quad (\text{IX})$$

O processo é iterativo e para o início da simulação o programa computacional HEC-RAS exige o detalhamento de determinados parâmetros.

Para que a simulação do rompimento da barragem pela formação da brecha efetivamente ocorresse, é necessário estipular alguns parâmetros, que ficaram assim definidos: 50 metros de largura por 17 metros de altura da brecha, inclinação de 1% da mesma e tempo de formação da brecha igual a 0,5 hora. Tais valores são reais para as dimensões da barragem, como descritas no capítulo referente à Área de Estudo.

Optou-se por fazer a simulação variando parâmetros, como a largura, a altura, a inclinação e o tempo de formação da brecha, comparando os resultados e para que se pudesse encontrar uma determinada vazão e estabelecer o mapa de inundação.

3.2.7 Obtenção do mapa de inundação

O mapa de inundação corresponde à toda a área atingida pela onda de cheia induzida pelo rompimento da barragem em estudo. Ao se determinar a vazão máxima a jusante da barragem, é necessário determinar o máximo alcance da onda. Dessa forma, optou-se pelo uso do programa computacional de geoprocessamento, devido possuir um complemento que permite a importação dos dados simulados no HEC-RAS trazendo ao programa toda a área atingida. A imagem é salva e pode ser visualizada também pelo QGIS, por serem do mesmo tipo (shape = .shp).

A área inundada deve ser unificada à bacia à montante de Peti e obter uma imagem de satélite à jusante da barragem para análise das cidades atingidas. Essa imagem de satélite unificada à esses mapas foi possível devido à instalação do complemento do QGIS, o OpenLayers Plugin, onde se obteve a imagem através do Google Maps. Assim, foi possível analisar toda a área seguinte atingida pela onda de cheia do rompimento hipotético de Peti e verificar os impactos gerados.

Após a análise variada dos parâmetros, optou-se por verificar o alcance da onda de cheia. Ao final analisou-se a área e a população atingidas.

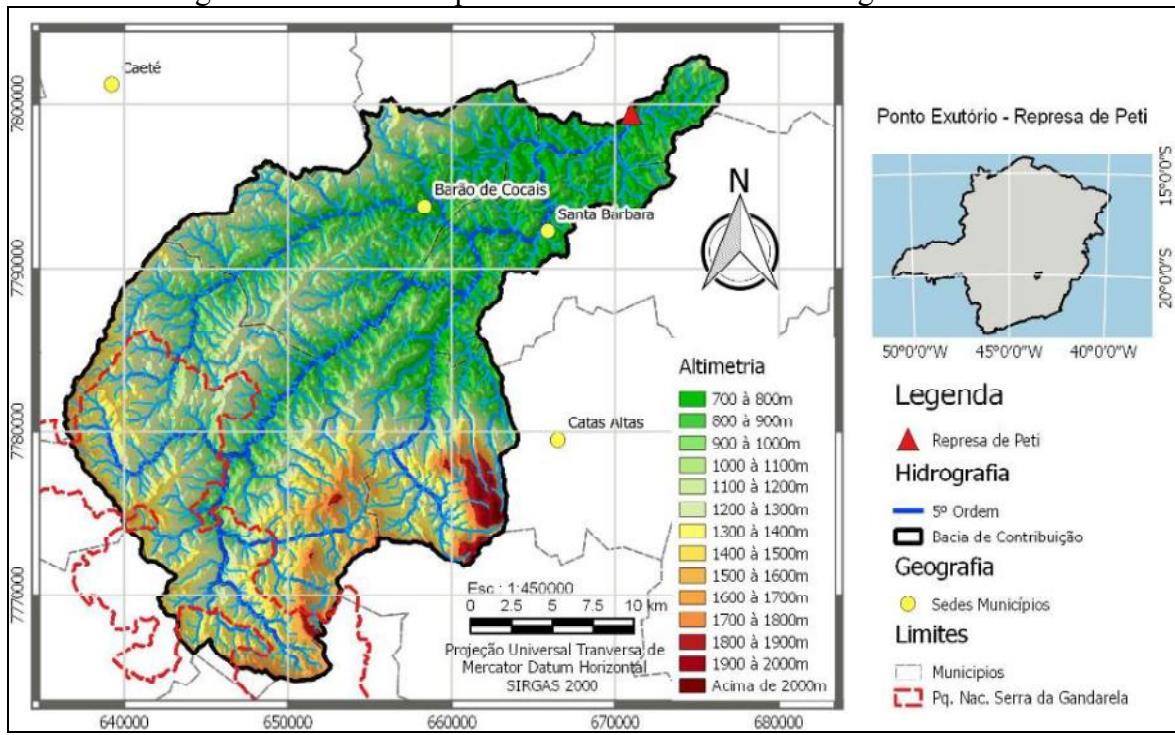
CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Características físicas e uso e ocupação do solo da bacia do Rio Santa Bárbara

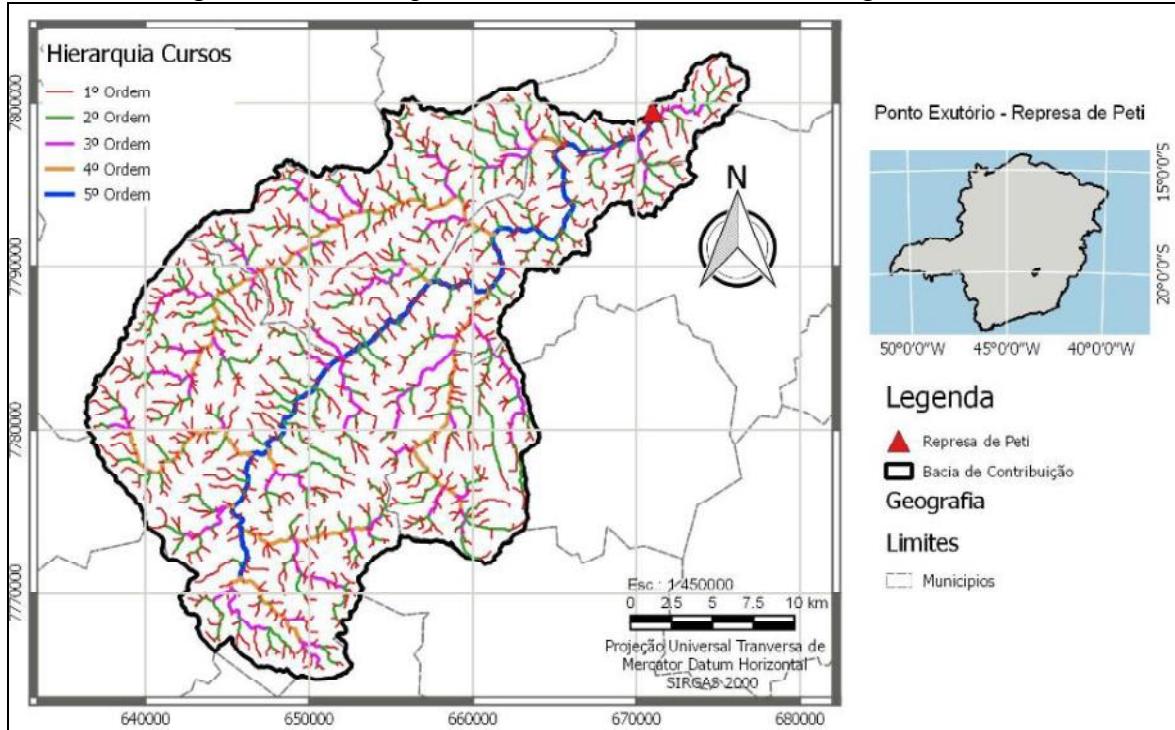
A Figura 10 representa o relevo da região da bacia a montante da barragem de Peti, identificando as diferentes altitudes. O processamento da imagem foi obtido pelo QGIS, que corresponde ao programa de Sistema de Informações Geográficas e processada pelo Compositor de Imagens do programa.

Figura 10 – Relevo Hipsométrico a montante da barragem de Peti.



Os cursos de água a montante da barragem foram classificados de acordo com a sua hierarquia, sendo de primeira a quinta ordem e a representação é mostrada na Figura 11.

Figura 11 – Hierarquia dos cursos a montante da barragem de Peti.



Fonte: Autor (2017).

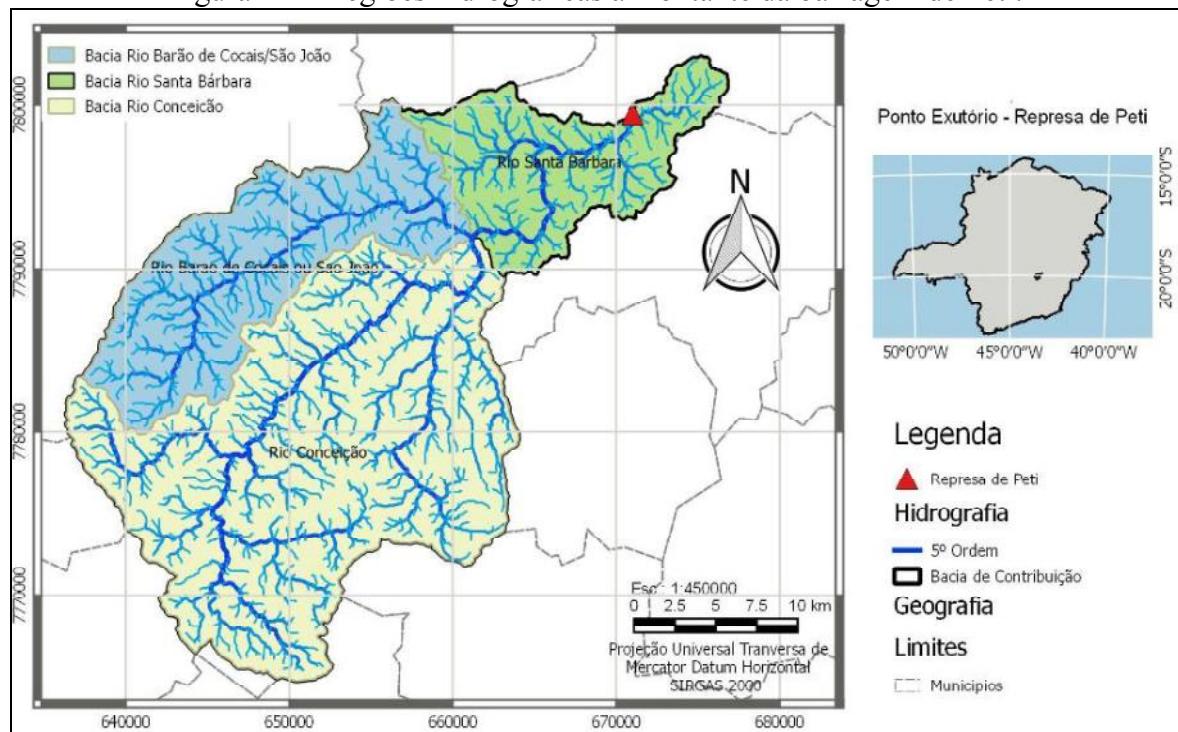
A bacia hidrográfica foi separada em três regiões, conforme pode ser visto na Figura 12, sendo elas:

- Rio Barão dos Cocais / Rio São João;
- Rio Santa Bárbara;
- Rio Conceição.

Essas regiões hidrográficas foram subdivididas em microbacias, conforme a denominação a seguir e apresentadas na Figura 13.

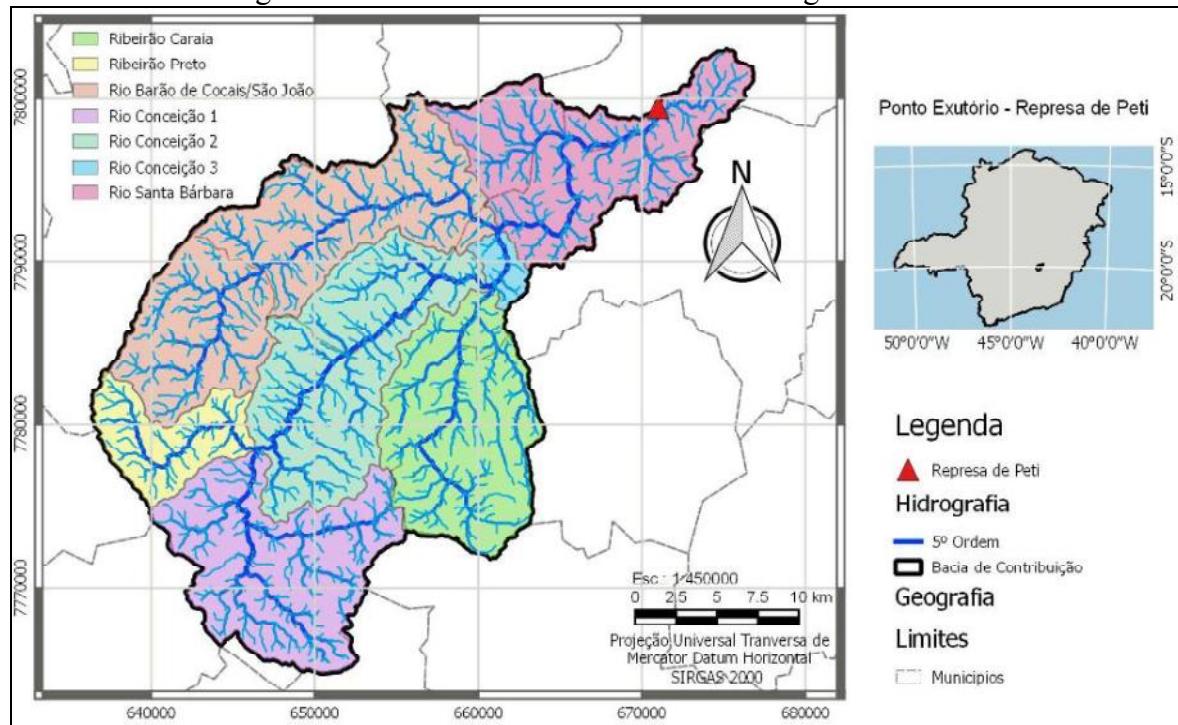
- Ribeirão Caraia;
- Ribeirão Preto;
- Rio Barão dos Cocais;
- Rio Conceição 1;
- Rio Conceição 2;
- Rio Conceição 3;
- Rio Santa Bárbara.

Figura 12 – Regiões hidrográficas a montante da barragem de Peti.



Fonte: Autor (2017).

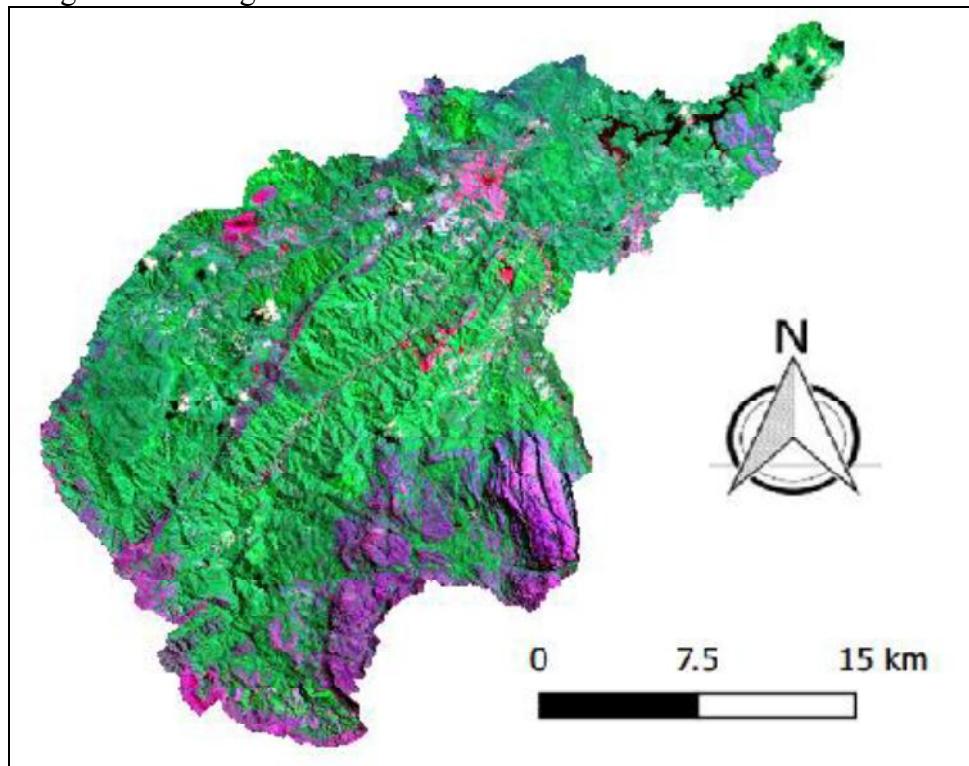
Figura 13 – Microbacias a montante da barragem de Peti.



Fonte: Autor (2017).

Dando continuidade, sobre a classificação do uso do solo, foram obtidas duas imagens da região de estudo, e por meio de suas bandas unificadas, fez-se um mosaico das imagens no QGIS. A área de montante foi delimitada e é apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Imagem delimitada e com as bandas unificadas a montante.



Fonte: Autor (2017).

Por fim, fez-se a classificação no programa computacional MultiSpec dos tipos de uso do solo da bacia à montante da barragem de Peti.

A imagem da Figura 14 não possui legenda, pois a classificação do tipo de uso do solo é feito manualmente e de forma visual, identificando os pixels¹⁰ e atribuindo a eles uma caracterização.

A classificação foi baseada nas cores dos pixels da Figura 14, onde era selecionado pelo menos três amostras de cada uso do solo.

Definiu-se os seguintes usos para classificação: rio, pasto, vegetação nativa, solo nu, nuvem e rocha. As imagens anteriormente baixadas pela Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais foram as mais recentes e as que apresentavam menor quantidade de nuvens possíveis.

Na Tabela 1 é apresentada a quantidade de amostras de cada uso e o seu percentual.

¹⁰ Elementos de imagens.

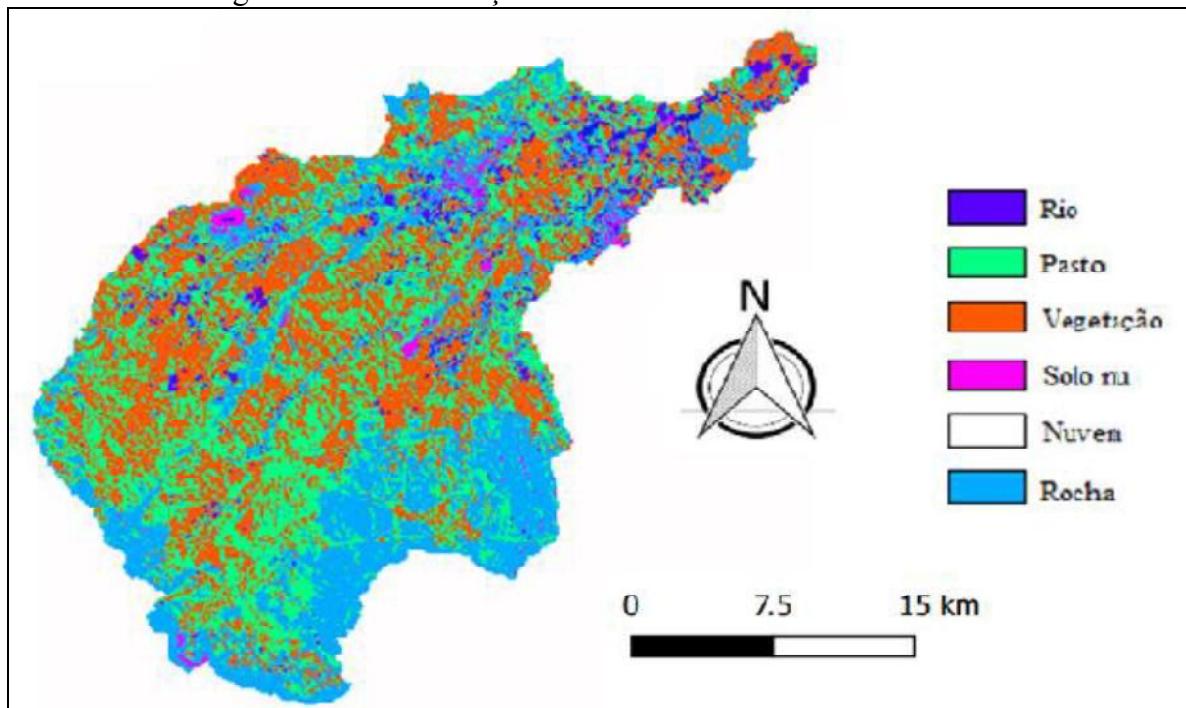
Tabela 1 – Composição percentual do uso do solo da bacia a montante de Peti.

Uso do solo	Quantidade de amostras	Composição percentual do uso do solo
Rio	3.218	0,41%
Pasto	269.818	34,44%
Vegetação Nativa	247.358	31,57%
Solo Nu	11.200	1,43%
Nuvem	26.423	3,37%
Rocha	225.430	28,77%
Total	783.447	100%

Fonte: Autor (2017).

O resultado final da classificação à montante da barragem de acordo com o uso do solo é mostrada na Figura 15.

Figura 15 – Classificação do uso do solo à montante de Peti.

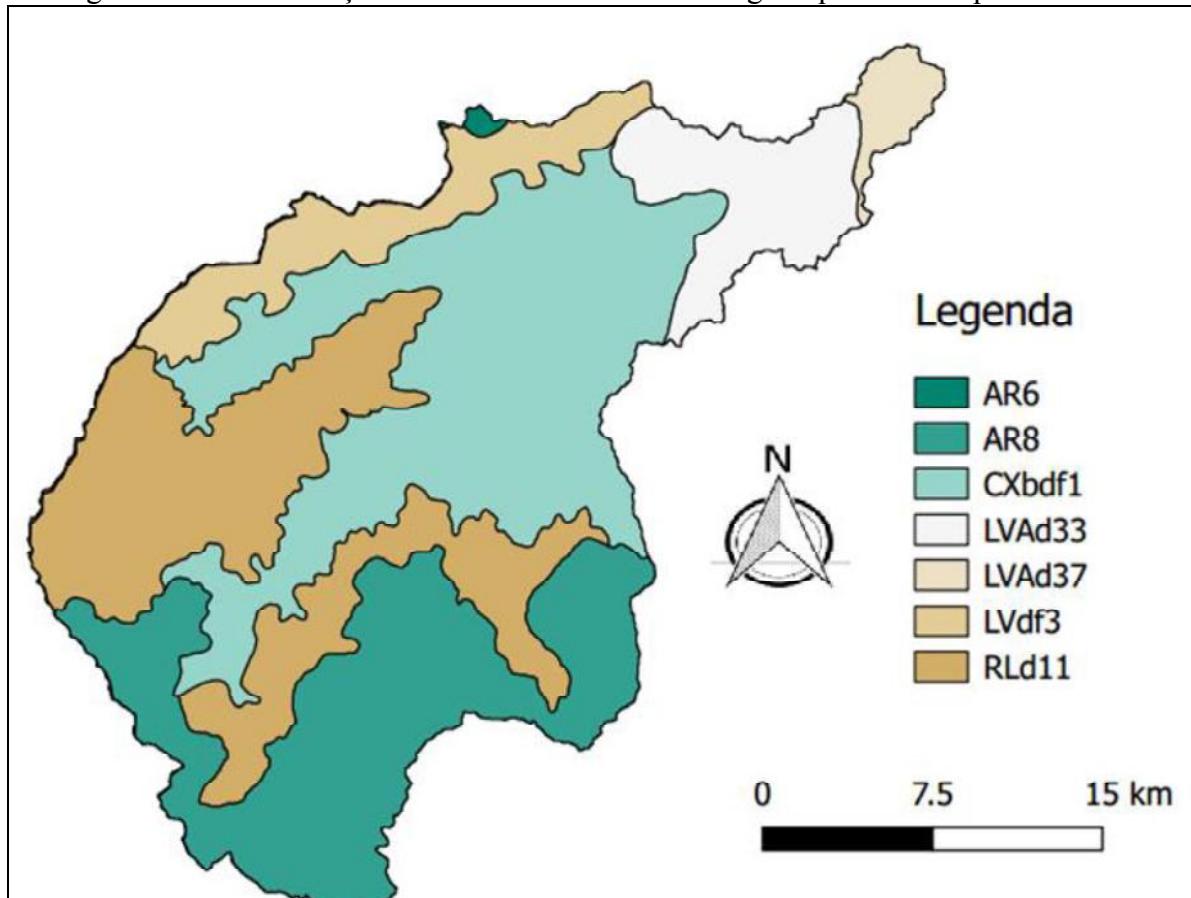


Fonte: Autor (2017).

Apenas uma pequena representação do rio não ficou nítida, pois os pixels do mesmo se confundiram com outros pixels. Isso pode ser observado, pois a Microbacia do Rio Santa Bárbara foi a única que apresentou melhor a delimitação do corpo d’água.

Na sequência, utilizando o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais confeccionado pela Universidade Federal de Viçosa et al. (2010), foram obtidos os diferentes tipos de solo da região a montante da barragem de Peti, por meio de sobreposição de imagens, os quais são apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Classificação da área a montante da barragem quanto aos tipos de solo.



Fonte: Autor (2017).

Os códigos da legenda representam os seguintes tipos de solo:

- * Afloramento de Rocha (50%), Neossolo Litólico Distrófico típico, A moderado, textura arenosa, fase campo rupestre de quartizito, relevo montanhoso/escarpado (50%) – representado no mapa por AR6;
- * Afloramento de Rocha (50%), Neossolo Litólico Distrófico típico, A moderado, textura média, fase campo rupestre de quartizito, relevo montanhoso (30%) – representado no mapa por AR8;
- * Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado/montanhoso (20%) – representado no mapa por CXbdf1;
- * Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (50%) – representado no mapa por LVAd33;

- * Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, A proeminente, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (50%) – representado no mapa por LVAd37;
- * Latossolo Vermelho Distroférrico típico, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo montanhoso (55%) – representado no mapa por LVdf3;
- * Neossolo Litólico Distrófico típico, A moderado, textura média, fase campo rupestre ferruginoso, relevo montanhoso (40%) – representado no mapa por RLd11.

Por meio da tabela de atributos da imagem classificada quanto aos tipos de solo do QGIS, foi possível extrair os dados de área de cada tipo, transformados em quilômetros quadrados (km^2) e o percentual de cada um em relação ao total (Tabela 2).

Tabela 2 – Área dos tipos de solo a montante da barragem e composição percentual.

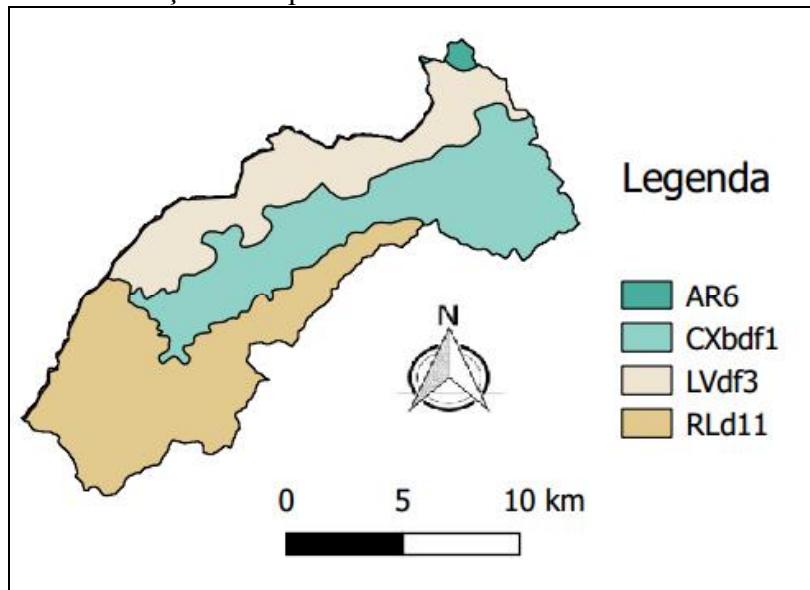
Tipo de Solo	Área (km^2)	Composição Percentual do Tipo de Solo
AR6	1,6524	0,23%
AR8	174,2466	24,06%
CXbdfl	235,5149	32,52%
LVAd33	57,791	7,98%
LVAd37	14,5745	2,01%
LVdf3	56,2513	7,77%
RLd11	184,1602	25,43%
Total	724,1909	100%

Fonte: Autor (2017).

Em seguida, classificou-se os tipos de solo de todas as microbacias individualmente. Para essa fase, abriu-se o shapefile de uma microbacia e o salvou no mesmo sistema UTM (Sirgas 2000), referenciando-se ao mapa do tipo de solo de toda a bacia a montante de Peti. Após, recortou-se o mapa do solo para a microbacia, utilizando a ferramenta de geoprocessamento Recortar do QGIS. Para isso, entrou-se com a camada vetorial da bacia a montante completa, cortando pela camada do shape da microbacia referenciada. Repetiu-se o procedimento para todas as outras.

A Figura 17 mostra a distribuição dos tipos de solo na microbacia do Rio Barão de Cocais / Rio São João.

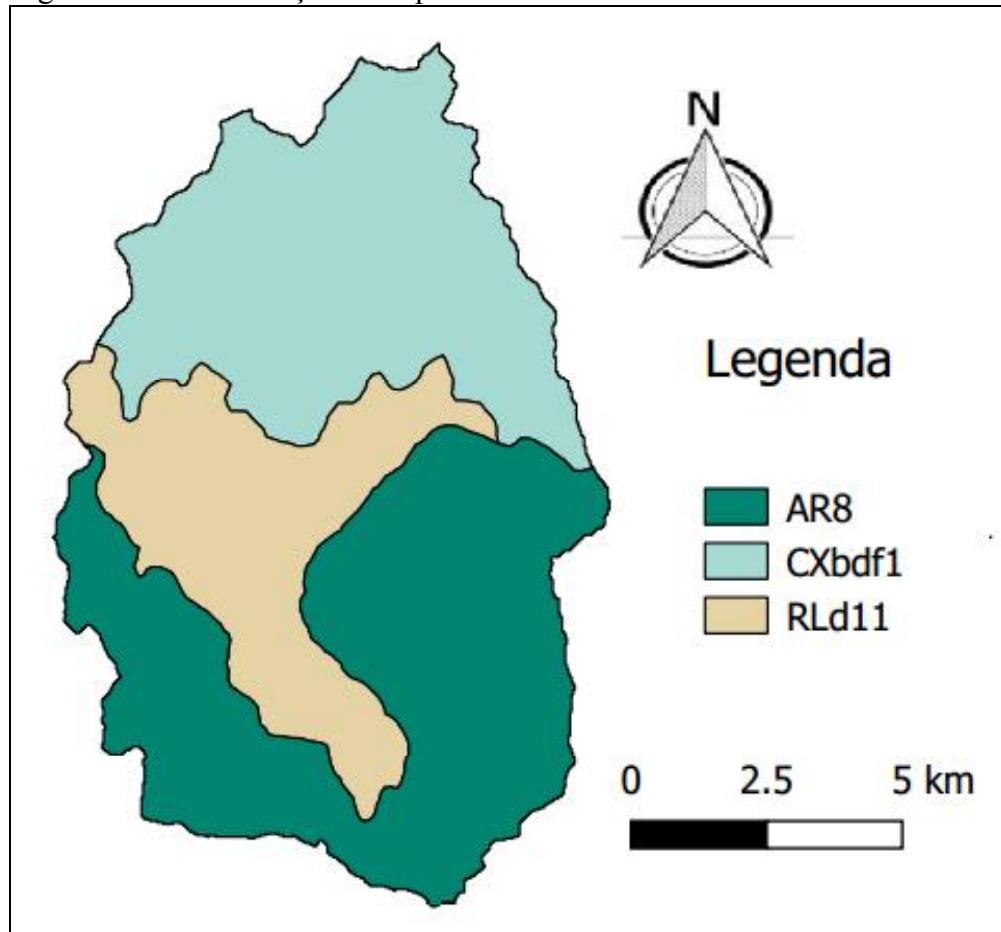
Figura 17 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Rio Barão de Cocais.



Fonte: Autor (2017).

Na Figura 18 são apresentados os tipos de solo na microbacia do Ribeirão Caraia.

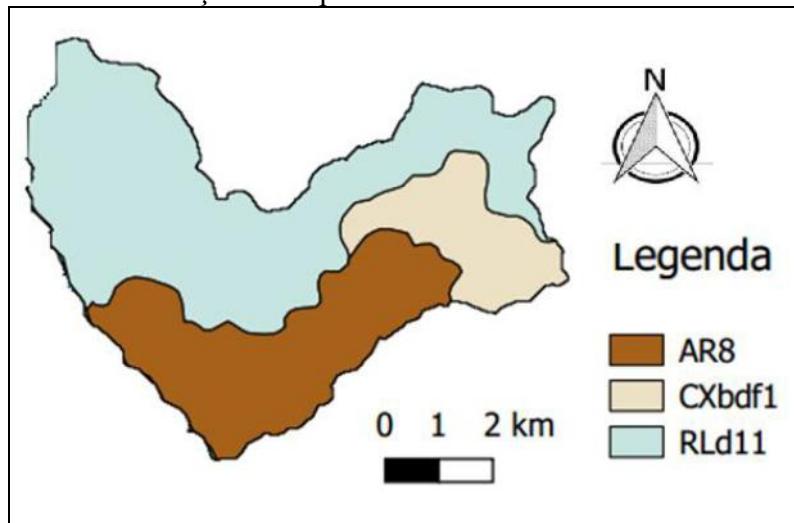
Figura 18 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Ribeirão Caraia.



Fonte: Autor (2017).

Já a Figura 19 indica os tipos de solo da microbacia do Ribeirão Preto.

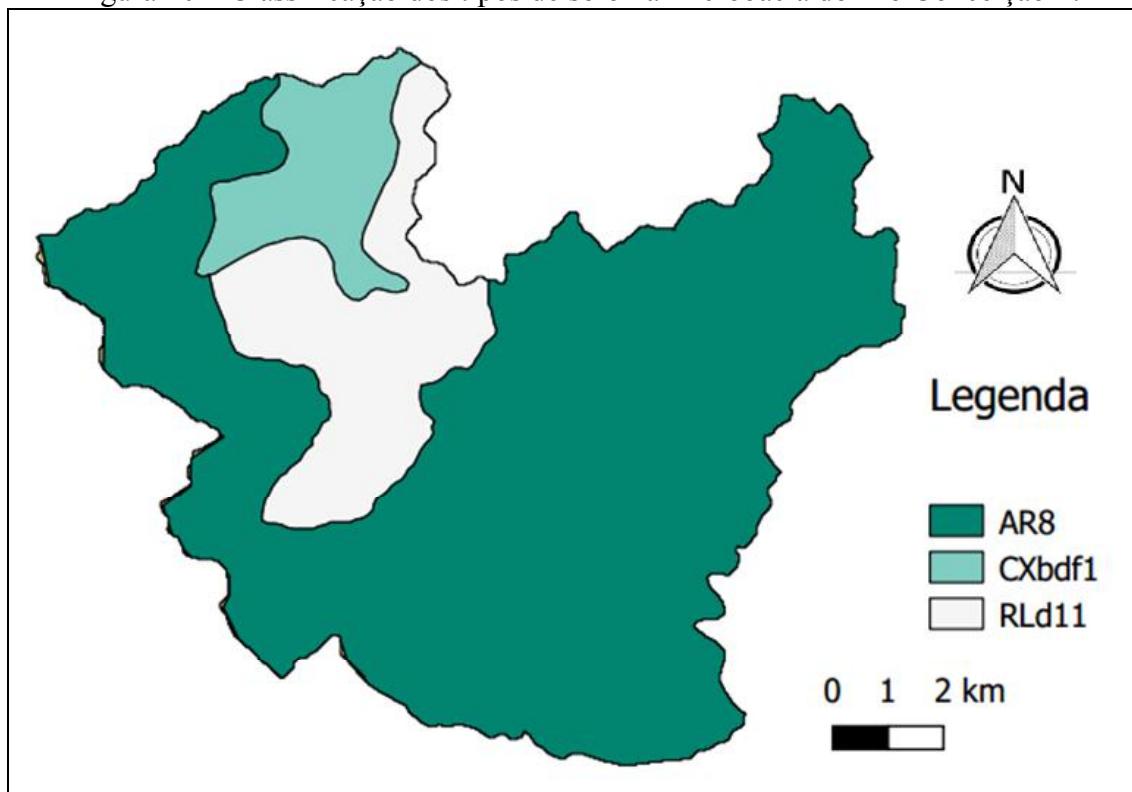
Figura 19 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Ribeirão Preto.



Fonte: Autor (2017).

Os tipos de solo da microbacia do Rio Conceição 1 são exibidos a seguir (Figura 20).

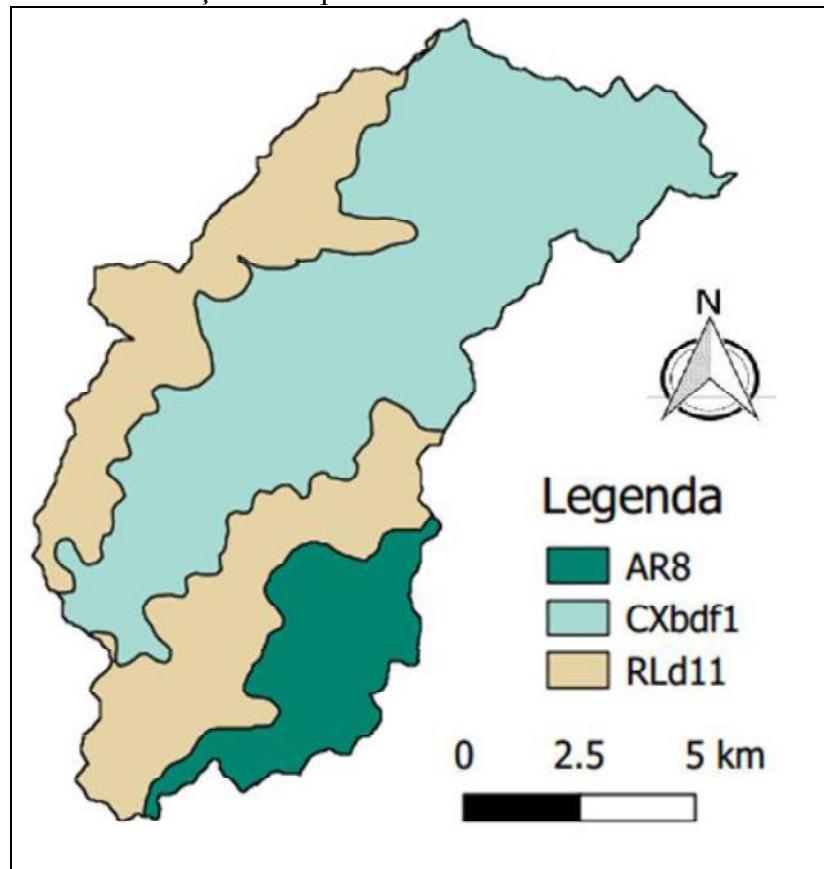
Figura 20 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Rio Conceição 1.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 21 reproduz os tipos de solo da microbacia do Rio Conceição 2.

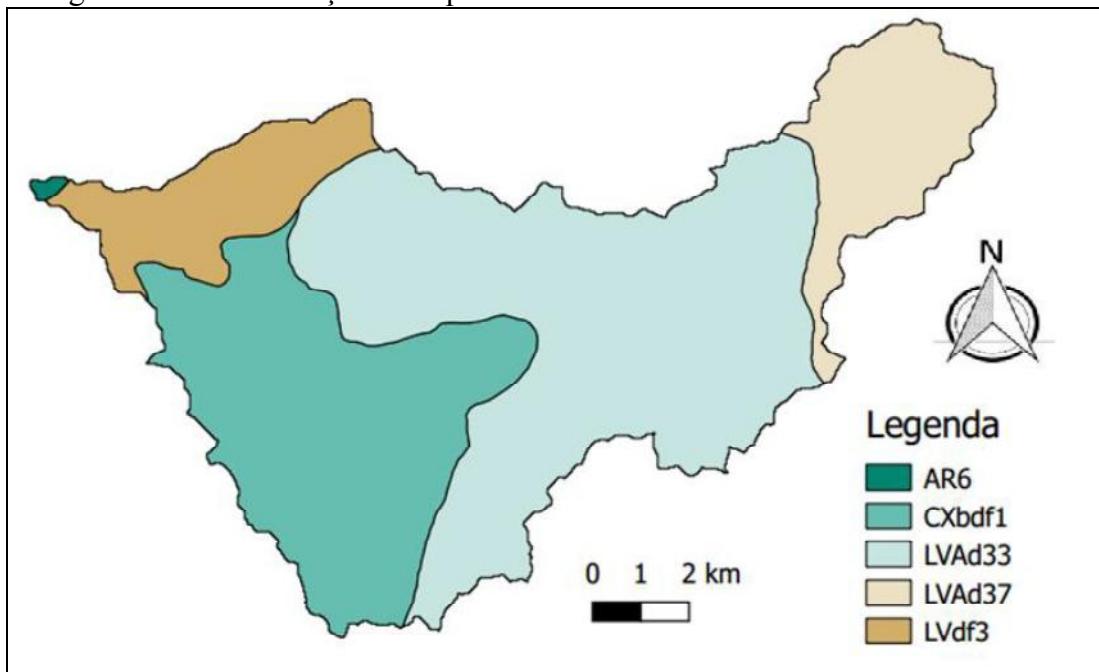
Figura 21 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Rio Conceição 2.



Fonte: Autor (2017).

Na Figura 22, os tipos de solo da microbacia do Rio Santa Bárbara são mostrados.

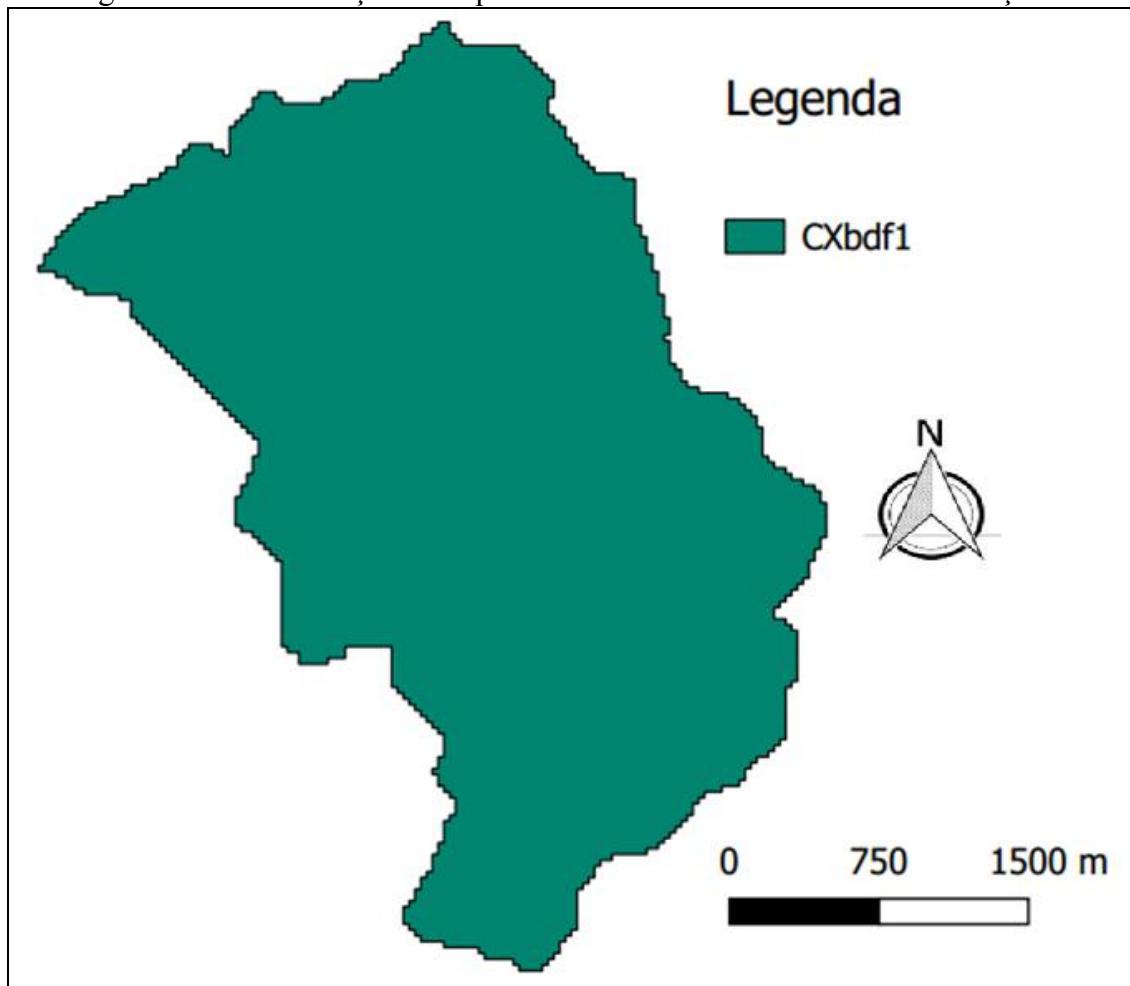
Figura 22 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Rio Santa Bárbara.



Fonte: Autor (2017).

E por último, é apresentada a área do Rio Conceição 3, a única que apresenta exclusivamente um tipo de solo (Figura 23).

Figura 23 – Classificação dos tipos de solo na microbacia do Rio Conceição 3.



Fonte: Autor (2017).

Dando continuidade, por meio da tabela de atributos, determinou-se a área de cada tipo de solo em cada microbacia a montagem da barragem estudada.

Como a área na tabela de atributos estava em m^2 , fez-se a transformação para km^2 (unidade de dados de entrada para o programa computacional da próxima fase da pesquisa).

A área de cada microbacia foi correspondente à área total da área a montante de Peti.

Os resultados são representados a seguir na Tabela 3, totalizando a área de cada tipo de solo e a área de cada microbacia.

Tabela 3 – Área dos tipos de solo de cada microbacia a montante de Peti.

Microbacia	AR6	AR8	CXbdf1	LVAd33	LVAd37	LVdf3	RLd11	Total (km ²)
Rio Barão de Cocais / São João	1,3877	0	64,2929	0	0	44,2034	68,6793	178,5633
Ribeirão Caraia	0	49,8407	41,0603	0	0	0	27,0034	117,9044
Ribeirão Preto	0	12,878	6,1192	0	0	0	24,5432	43,5404
Rio Conceição 1	0	95,1919	9,4886	0	0	0	18,0314	122,7119
Rio Conceição 2	0	16,336	68,227	0	0	0	45,9029	130,4659
Rio Conceição 3	0	0	9,9528	0	0	0	0	9,9528
Rio Santa Bárbara	0,2647	0	36,3741	57,791	14,5745	12,0479	0	121,0522
Total (km²)	1,6524	174,2466	235,5149	57,791	14,5745	56,2513	184,1602	724,1909

Fonte: Autor (2017).

4.2 Estudo das precipitações e vazões na bacia hidrográfica

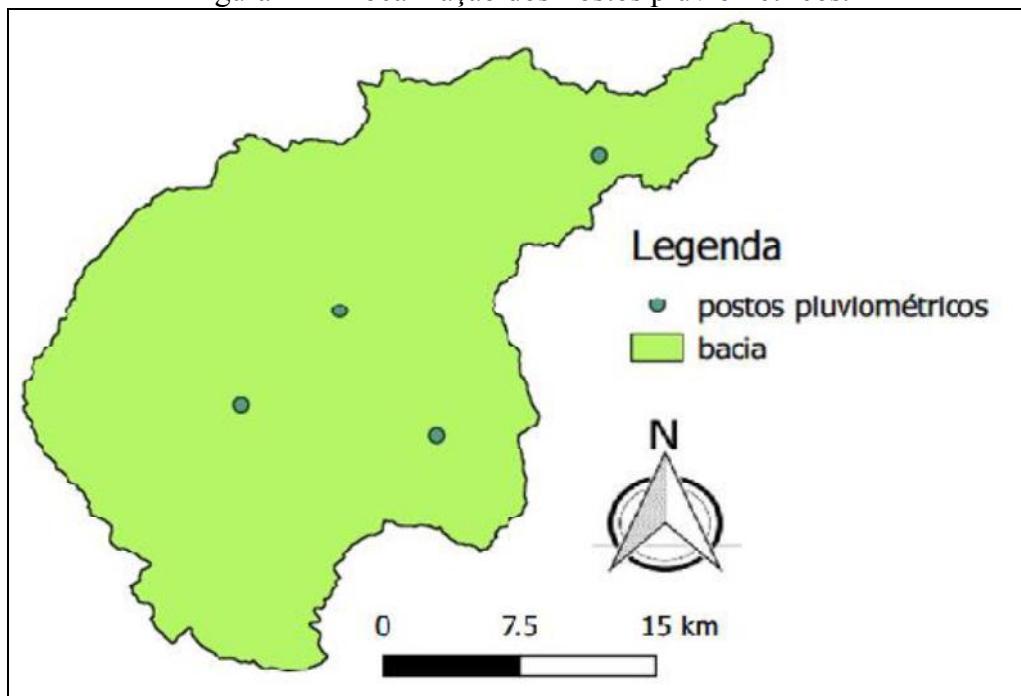
Através do processo de compatibilização entre o mapa da bacia e o mapa do Hidroweb da ANA, e identificou-se os quatro postos pluviométricos que abrangeriam toda a área a montante da barragem. A finalidade era calibrar os valores de Número de Curva (CN) da bacia hidrográfica estudada.

Estes postos pluviométricos foram identificados conforme numeração da ANA e são apresentados a seguir:

- * Posto pluviométrico 01943007 = latitude -19,9453° e longitude -43,4011°;
- * Posto pluviométrico 02043023 = latitude -20,0667 ° e longitude -43,5833°;
- * Posto pluviométrico 02043059 = latitude -20,0969° e longitude -43,4881°;
- * Posto pluviométrico 02043063 = latitude -20,0253° e longitude -43,5392°.

As coordenadas de cada posto foram indicadas na ferramenta instalada no QGIS e em um novo *shapefile* de pontos. Inseriram-se as coordenadas geográficas latitude e longitude de cada um, e gerou-se o mapa da bacia com os pontos das estações acima mencionadas, conforme Figura 24.

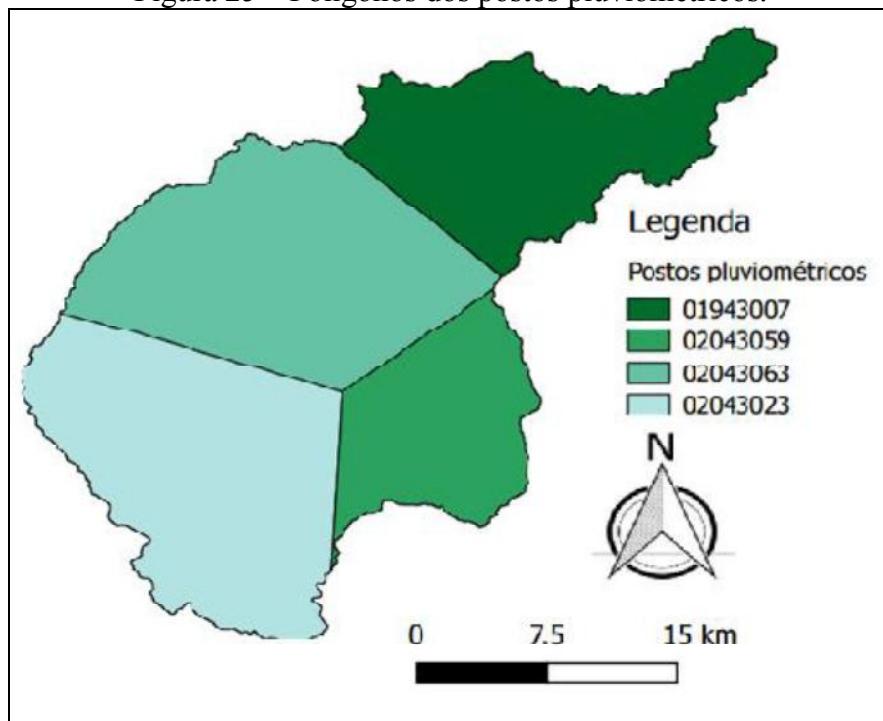
Figura 24 – Localização dos Postos pluviométricos.



Fonte: Autor (2017).

A determinação do polígono de Thiessen de cada posto pluviométrico corresponde à delimitação da área abrangida por cada estação de medição, a qual é apresentada na Figura 25.

Figura 25 – Polígonos dos postos pluviométricos.



Fonte: Autor (2017).

A área de cada polígono de posto pluviométrico foi obtida por meio da tabela de atributos do mapa gerado. Os dados foram tabelados e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Área dos polígonos e precipitação máxima dos postos pluviométricos.

Posto Pluviométrico	Área (km ²)
01943007	167,4764
02043023	221,7618
02043059	109,7259
02043063	225,2268
Total	724,1909

Fonte: Autor (2017).

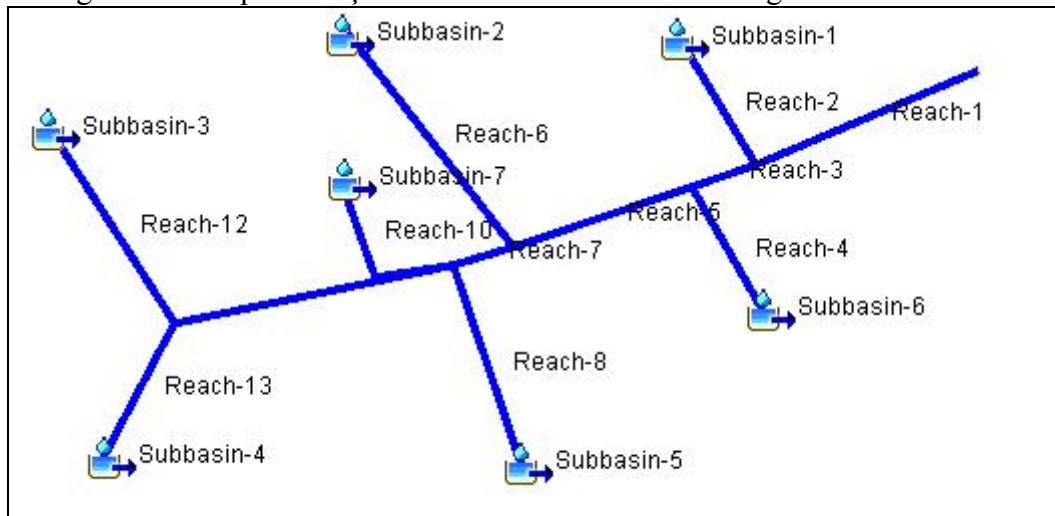
A maior precipitação histórica verificada foi em 15/12/2011 no posto pluviométrico 2043059, e correspondente à 204 mm, nesta estação pluviométrica em particular há dados desde 1941. Infelizmente, existe uma limitação de dados e somente no posto 1943007 existem informações de precipitações naquela mesma data, o que torna difícil encontrar a precipitação média utilizando-se dos polígonos de Thiessen. Tentando amenizar o problema, buscaram-se informações diretamente na ANA, que confirmou a informação que cada posto tem datas históricas divergentes.

Por isso, não foi possível calibrar os parâmetros hidrológicos na bacia hidrográfica de montante e optou-se por trabalhar com os valores de vazões encontrados nos postos fluviométricos.

4.2.1 Aplicação de modelo chuva-vazão na definição do hidrograma da onda de cheia a montante da barragem de Peti

A representação esquemática da bacia à montante de Peti foi desenvolvida no programa computacional HEC-HMS e é apresentada na Figura 26, sendo o sentido do escoamento dirigindo-se ao Rio 1 (Reach-1), onde se chega no reservatório da barragem.

Figura 26 – Representação da bacia à montante da barragem no HEC-HMS.



Fonte: Autor (2017).

O fluxo foi determinado quando escolhia qual era o corpo hídrico a jusante de cada um, fazendo a esquematização e sequência da vazão de água.

As áreas das microbacias foram obtidas por meio dos procedimentos anteriormente realizados no QGIS. Os valores foram lançados no programa em km^2 .

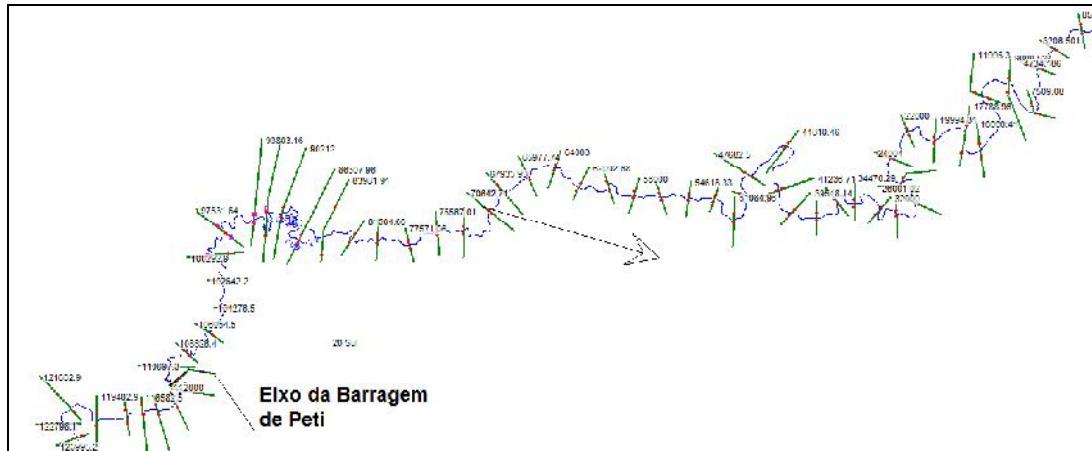
Inseriu-se também os tempos de retardo de cada microbacia, áreas impermeáveis, etc.

4.2.2 Uso de programa computacional na simulação do rompimento hipotético da barragem de Peti

Desta forma, os dados de hidrogramas de entrada do reservatório obtidos no hidroweb foram utilizados no programa computacional HEC-RAS, cujo objetivo é encontrar os níveis líquidos da onda de cheia induzida pelo rompimento hipotético da barragem a jusante da barragem.

As seções transversais ao longo do rio à jusante de Peti foram obtidas no programa QGIS e representadas no HEC-HAS para que a simulação efetivamente ocorresse e são apresentadas na Figura 27.

Figura 27 – Seções transversais ao longo do rio Santa Bárbara à jusante da barragem de Peti.



Fonte: Autor (2017).

Para definir a distância máxima para realizar as simulações a jusante, verificou-se à presença de cidades, indústrias, povoados, etc., definindo os possíveis impactos socioambientais à jusante de Peti e a distância de interesse para as simulações.

A PCH Peti encontra-se a aproximadamente 12km à montante da cidade de São Gonçalo do Rio Abaixo-MG, com população estimada de 9.777 habitantes. Caso viesse a ocorrer a ruptura dessa barragem a onda de cheia gerada alcançaria a cidade, com possível impacto socioeconômico e com perda de vidas humanas. Seguindo o vale do rio Santa Barbara à 29km à jusante da PCH Peti, encontra-se o remanso da PCH São Gonçalo, e que, possivelmente, seria atingida pela onda de cheia gerada, que por sua vez poderia causar seu rompimento hipotético por *overtopping*¹¹.

Verifica-se ainda, na continuidade do vale e à jusante daquela cidade que existem matas naturais densas e instalações do tipo residenciais e comerciais, e por isso, os impactos ambiental e socioeconômico neste trecho podem ser considerados muito significativos.

As simulações foram conduzidas até a distância à jusante da PCH Peti de 71km, devido à presença da cidade de Nova Era-MG, devido ao risco de perda de vidas humanas.

Após a análise dos impactos socioambientais, foram conduzidas algumas simulações para verificar o comportamento das características geométricas, e o tempo de formação da brecha de ruptura, aumentando a consistência dos resultados gerados.

Inicialmente, a análise dos parâmetros para essa PCH foi realizada, variando-se a largura e o tempo de abertura da brecha. Os resultados apresentam que a vazão de pico tem

¹¹ Rompimento provocado pelo aumento do nível de água que ultrapassa o topo da barragem.

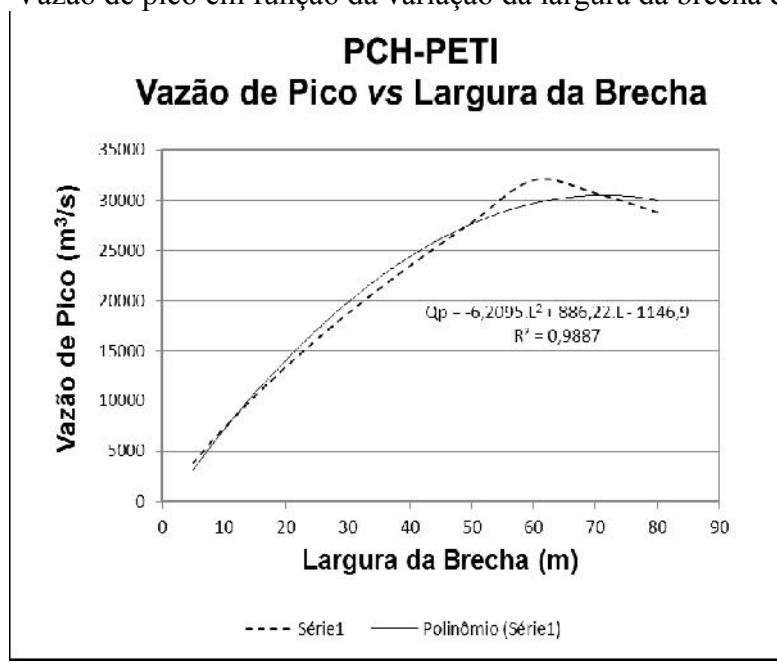
tendência de crescimento à medida que aumenta-se a largura da brecha até 60m, a partir desta largura observa-se decréscimo na vazão. O melhor ajuste para os resultados das simulações foi obtido com uma equação de segundo grau. Esta análise é válida para tempo de abertura da brecha de 1h, e os resultados são apresentados na Tabela 5 e no Gráfico 1. Com o aumento do tempo de abertura da brecha, observa-se um decaimento contínuo da vazão de pico, como esperado e com o ajuste da curva também polinomial. Em todos os casos até aqui analisados, sempre buscou-se o melhor ajuste para o coeficiente de determinação, e para essa PCH os resultados encontrados são mostrados na Tabela 6 e no Gráfico 2.

Tabela 5 – Resultados encontrados para a vazão de pico variando-se a largura da brecha-PCH Peti.

Largura (m)	Vazão de pico (m ³ /s)	Volume (hm ³)
80	28813,15	40,03
70	30724,69	42,29
60	32019,94	43,83
50	27823,11	42,10
40	23499,78	43,33
30	18792,93	42,82
20	13487,73	43,11
10	7325,98	43,12
5	3830,97	43,10

Fonte: Autor (2017).

Gráfico 2 – Vazão de pico em função da variação da largura da brecha da PCH Peti.



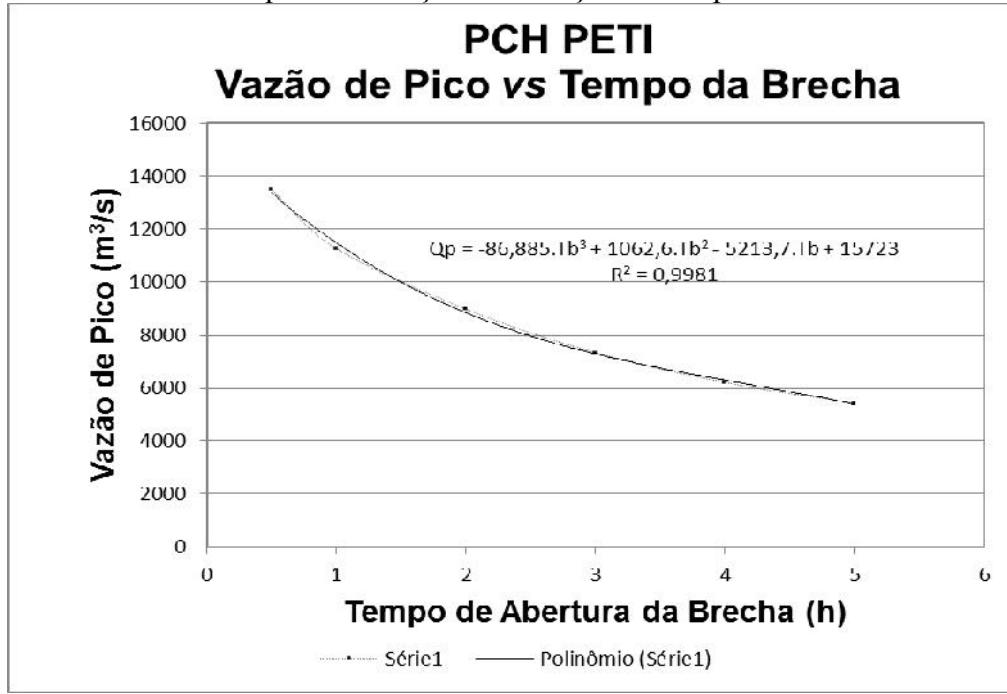
Fonte: Autor (2017).

Tabela 6 – Resultados encontrados para vazão de pico variando-se o tempo de abertura da brecha para a PCH Peti.

Tempo (h)	Vazão de pico (m ³ /s)	Volume (hm ³)
0,5	13487,73	43,11
1,0	11262,42	43,08
2,0	8980,41	42,94
3,0	7335,82	43,00
4,0	6220,85	43,05
5,0	5391,41	43,14

Fonte: Autor (2017).

Gráfico 8 – Vazão de pico em função da variação do tempo de abertura da brecha.



Fonte: Autor (2017).

4.2.2.1 Equacionamento das Vazões de Pico

Após a análise de sensibilidade feita no item anterior, buscou-se na literatura estudos realizados que pudessem respaldar uma única simulação com tempo de abertura, largura da brecha e vazão de pico. Durante a pesquisa bibliográfica realizada constatou-se que no decorrer do século XX ocorreram diversas situações de ruptura em barragens, que causaram impactos e perdas de vidas humanas. Por isso, este tema se tornou interessante para muitos pesquisadores, que com base em resultados reais de rompimento de barragens buscaram equacionar por meio de análise estatística a vazão de pico máxima na crista da barragem em função da altura da lâmina líquida da água e do volume do reservatório. Os resultados encontrados para a PCH Peti estão listados por autor no Quadro 1 e auxiliaram na definição das características da brecha escolhida para as simulação realizada.

Quadro 1 – Vazão de Pico estimada de acordo com a equação encontrada por cada autor.

Autor	Vazão de pico (m ³ /s)
USBR (1982)	22758,07
Mac Donald e Langridge-Monopolis (1984)	7846,00
Froehlich (1995b)	12548,68
Xu e Zhang (2009)	103797,74
Kirkpatrick (1977)	18495,74
SCS (1981)	19779,26
Hagen (1982)	24177,77
Singh e Snorrason (1984)	2238,29
Costa (1985)	32622,38

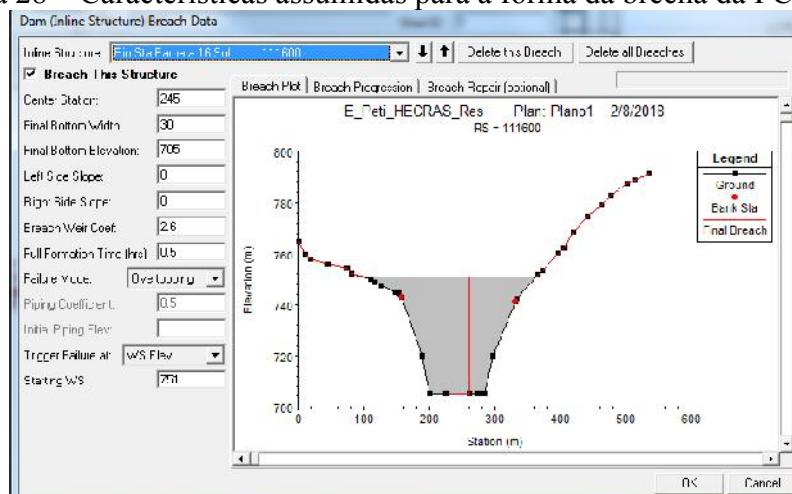
Fonte: Autor (2017).

O valor médio encontrado desprezando os valores extremos mínimo e máximo foi de 19.746,84m³/s, este valor é próximo aos de Kirkpatrick (1977) e SCS (1981). Assim, adotou-se largura da brecha de 30m e para o tempo de abertura considerou-se que a PCH Peti foi construída em concreto em forma de arco, e em relação ao tempo de formação da brecha, os valores recomendados na literatura devem variar entre 0,1 e 0,5 h. Algumas simulações com tempo de ruptura inferiores a 0,5h foram realizadas, contatando-se que a variação na vazão de pico na brecha não apresentava valores muito diferentes dos obtidos na Tabela 7, por isso optou-se por adotar o tempo de 0,5h como tempo de abertura da brecha.

4.2.2.2 Características da forma da brecha para as simulações realizadas

Após a análise de sensibilidade e o cálculo das vazões de pico mostradas no item anterior, buscou-se definir a forma da brecha de ruptura. Optou-se pelas características apresentadas na Figura 28.

Figura 28 – Características assumidas para a forma da brecha da PCH-Peti.



Fonte: Autor (2017).

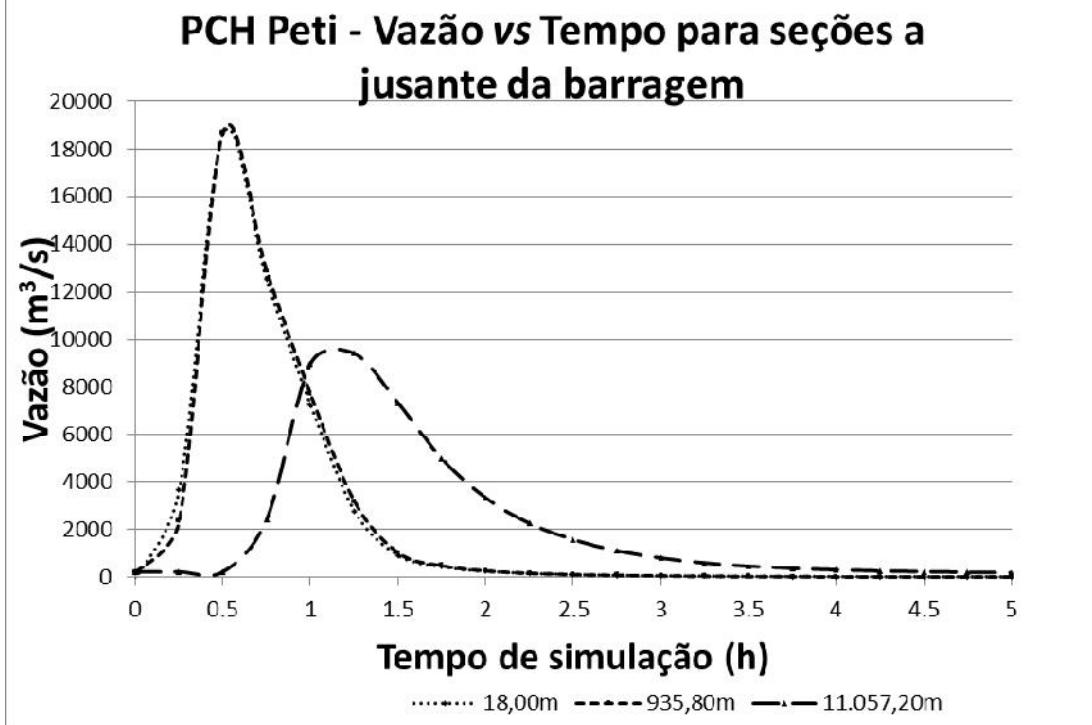
A cota da crista da barragem é 751 m e a cota de fundo da brecha é 705 m. A brecha apresentou, portanto, uma altura de 46 m, valor igual à altura da barragem.

4.2.2.3 Decaimento da Vazão de Pico no vale de jusante da barragem

Após realizar as simulações no programa computacional, criou-se os Gráficos 3 e 4, que mostram o amortecimento dos hidrogramas no vale de jusante do reservatório da PCH Peti. Assim, observa-se no Gráfico 3 as distâncias à jusante da barragem e os respectivos hidrogramas localizados a 18,00m, 935,80m e 11.057,20m, com a largura e tempo de abertura da brecha apresentados anteriormente.

Dessa forma, a seção transversal do primeiro hidrograma está localizado à 18 m da barragem, ou seja, representa a onda de cheia praticamente junto à barragem, e com vazão de pico igual a 18.638,01m³/s. O segundo hidrograma localizado a 935,80 m à jusante da barragem encontra-se sobreposto ao primeiro, o que representa que, nesse curto espaço de tempo, ainda não se iniciou o amortecimento da onda de cheia. O terceiro hidrograma se encontra à distância de 11,05 km à montante da barragem, com uma vazão de pico de 9.413,83 m³/s após 1,25 horas do rompimento hipotético da PCH Peti.

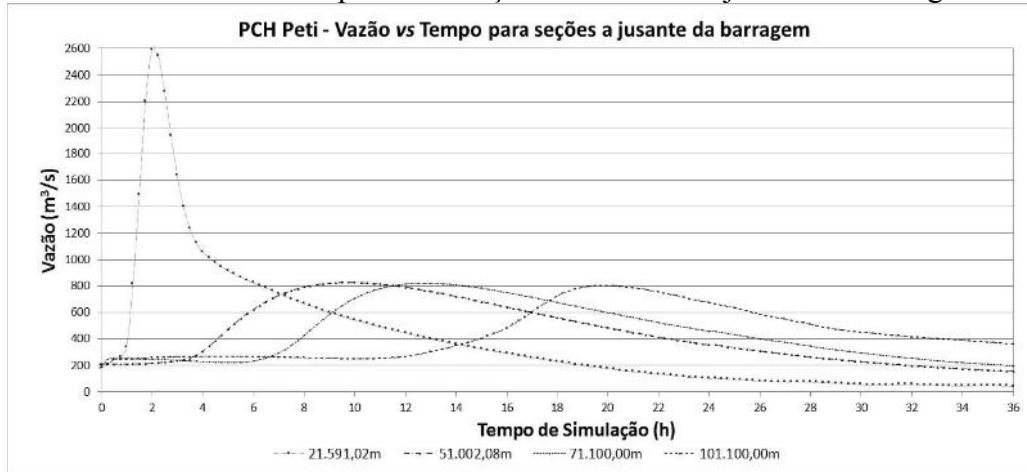
Gráfico 3 – Vazão de pico em função da distância a jusante da barragem.



Fonte: Autor (2017).

O Gráfico 10 mostra a continuidade no amortecimento dos hidrogramas no vale à jusante da barragem. Observa-se que a onda de cheia à 21,59 km à jusante da barragem apresenta vazão de pico de 2.588,71 m³/s, e à 51 km a vazão de pico é um pouco superior a 800 m³/s, e que a partir desse ponto passa a não ter amortecimento significativo, vindo a alcançar a cidade de Nova Era, localizada a 71,1 km à jusante da PCH Peti, após aproximadamente 12 horas do rompimento hipotético.

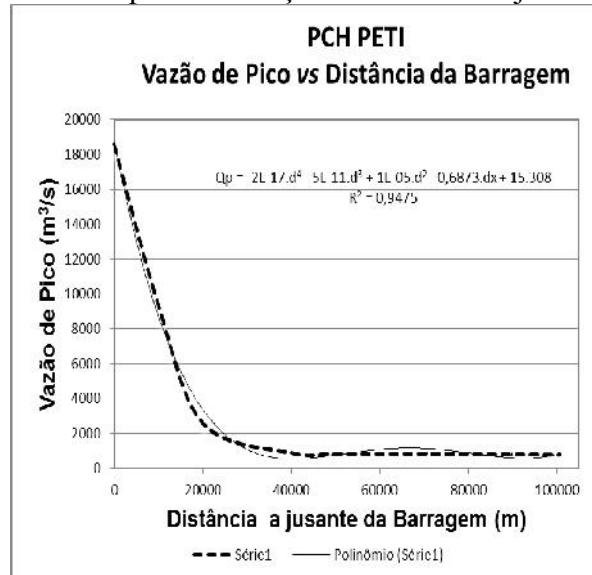
Gráfico 4 – Vazão de pico em função da distância à jusante da barragem.



Fonte: Autor (2017).

Construiu-se o Gráfico 5, que mostra o decaimento da vazão de pico dos hidrogramas obtidos à jusante da barragem em análise. Vê-se que o decaimento é acentuado nos primeiros 20km a jusante, vindo a ser praticamente constante apartir dos 40 km.

Gráfico 5 – Vazão de pico em função da distância a jusante da barragem.

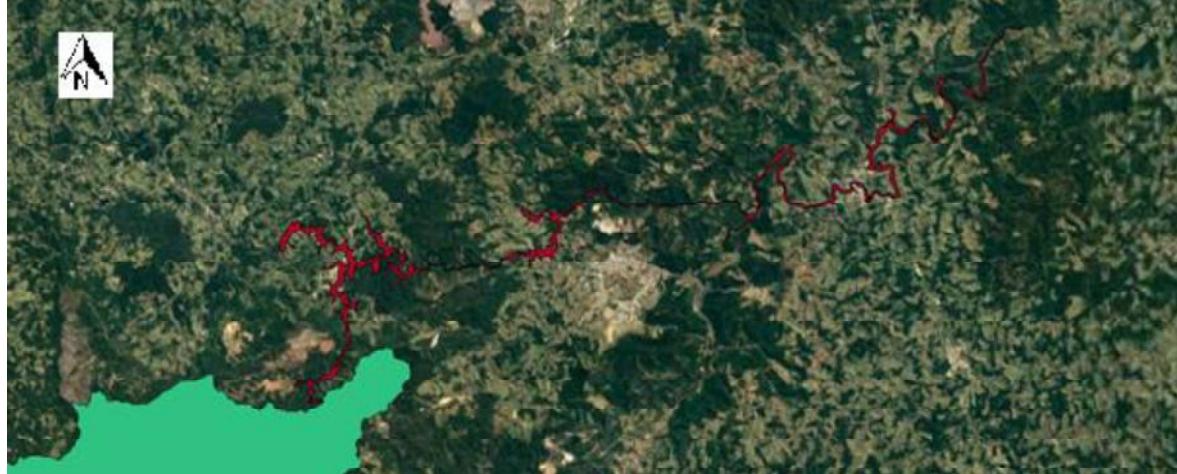


Fonte: Autor (2017).

4.3 Resultados encontrados nas simulações pelo programa computacional HEC-RAS para a área de inundação

Na Figura 29, observa-se, em vermelho, toda a área inundada à jusante de Peti. A área em verde mostra a delimitação da bacia hidrográfica à montante da barragem.

Figura 29 – Área inundada à jusante de Peti.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 30 mostra a área de inundação encontrada à jusante da barragem. Nesta região, observa-se a presença de área de mata densa, o que pode acarretar, com o rompimento hipotético da barragem, prejuízos ambientais consideráveis. Os mapas apresentados a seguir mostram uma linha vermelha, que demonstra a onda com vazão menor e a área em azul é correspondente à maior vazão.

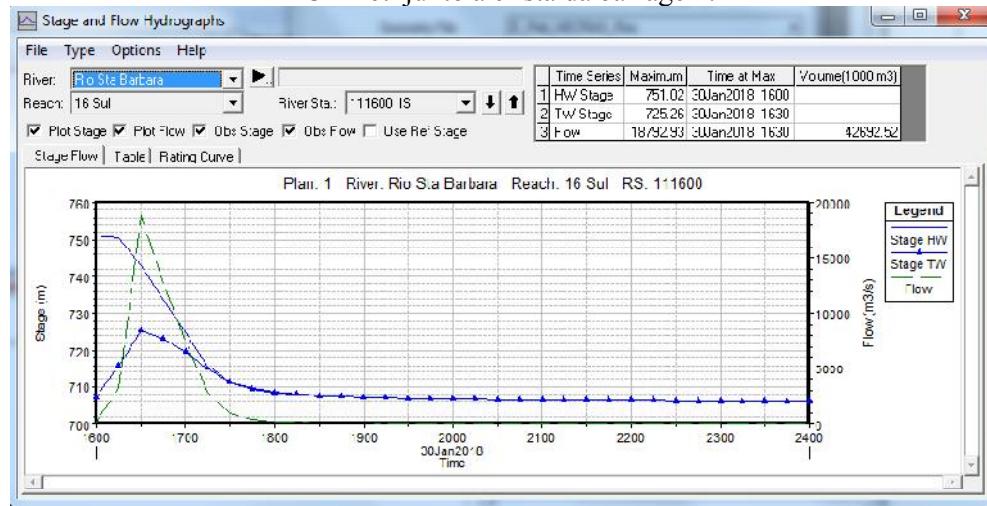
Figura 30 – Área de inundação à jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti - Trecho entre a barragem até 4,93Km jusante.



Fonte: Autor (2017).

Na Figura 31 observa-se o resultado encontrado pela simulação feita no HEC-RAS para o rompimento hipotético da PCH Peti, cuja vazão de pico do hidrograma é de 18.792,93 m³/s.

Figura 31 – Hidrograma gerado pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti junto à crista da barragem.

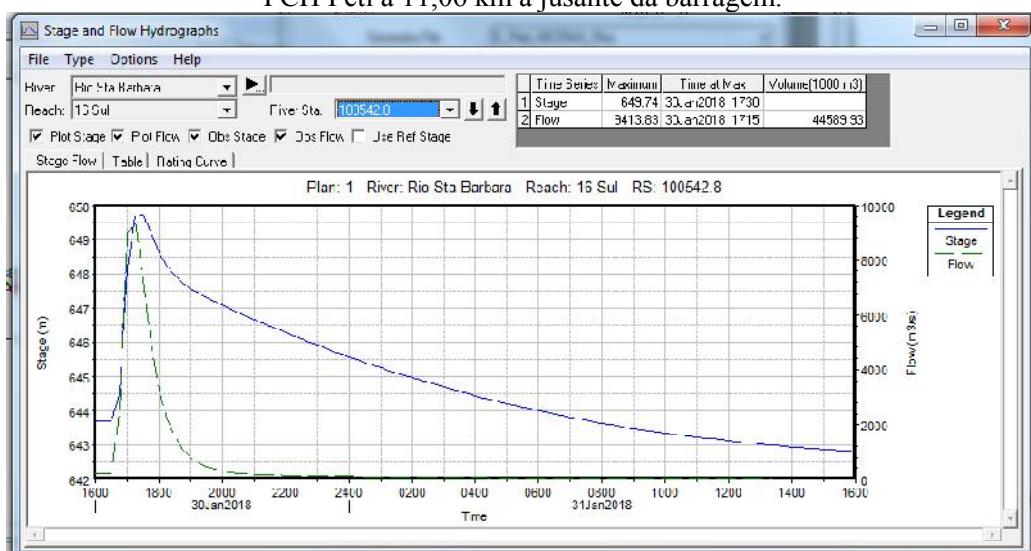


Fonte: Adaptado do programa HEC-RAS (2017).

O hidrograma mostrado na Figura 32 corresponde à uma seção localizada a 11,06 km da barragem e, nesta seção o nível de água atinge seu máximo em 7,03 m com vazão de pico de 9.413,83 m³/s.

A Figura 33 mostra o trecho entre as seções 4,93 km e 11,06 km à montante da cidade de São Gonçalo do Rio Abaixo-MG. Neste trecho existem matas fechadas no início e o vale é encaixado, enquanto que no final do trecho mostrado o vale é aberto e tem-se a parte inicial da cidade citada acima.

Figura 32 – Hidrograma gerado pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti à 11,06 km a jusante da barragem.



Fonte: Adaptado do programa HEC-RAS (2017).

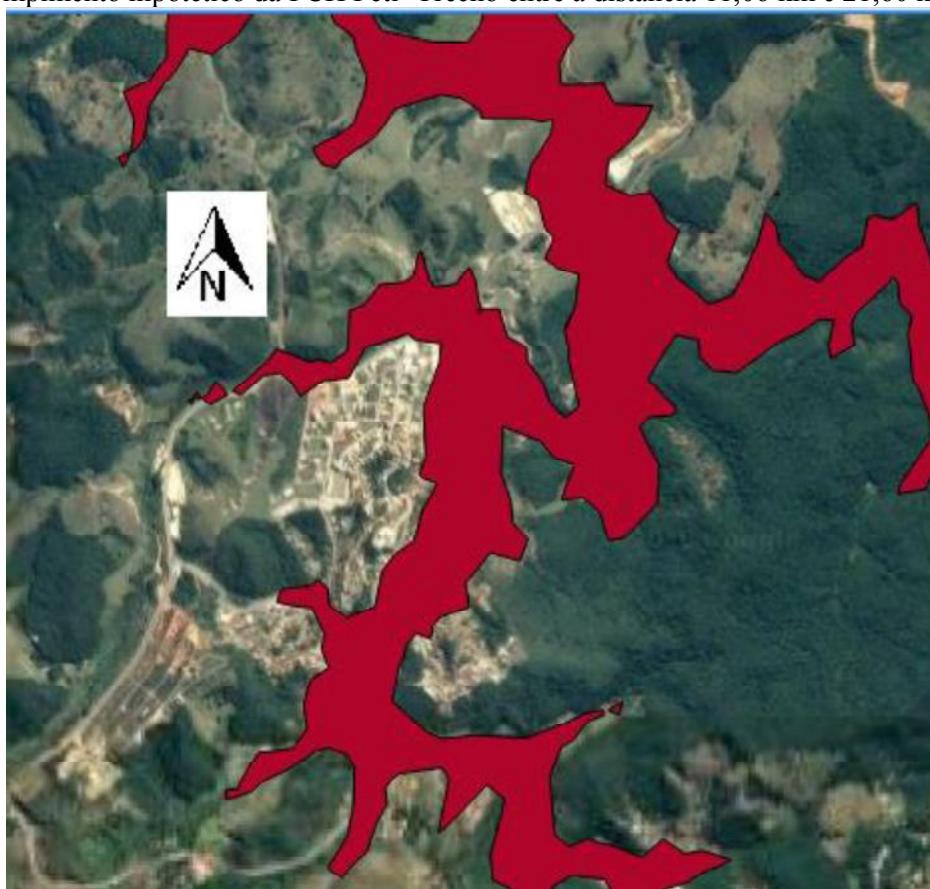
Figura 33 – Área de inundação a jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a distância 4,93Km e 11,06Km.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 34 mostra as áreas inundadas sobre a cidade de São Gonçalo do Rio Abaixo-MG, observa-se o limite da área calculada pelo HEC-RAS.

Figura 34 – Área de inundação a jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a distância 11,06 km e 21,60 km.



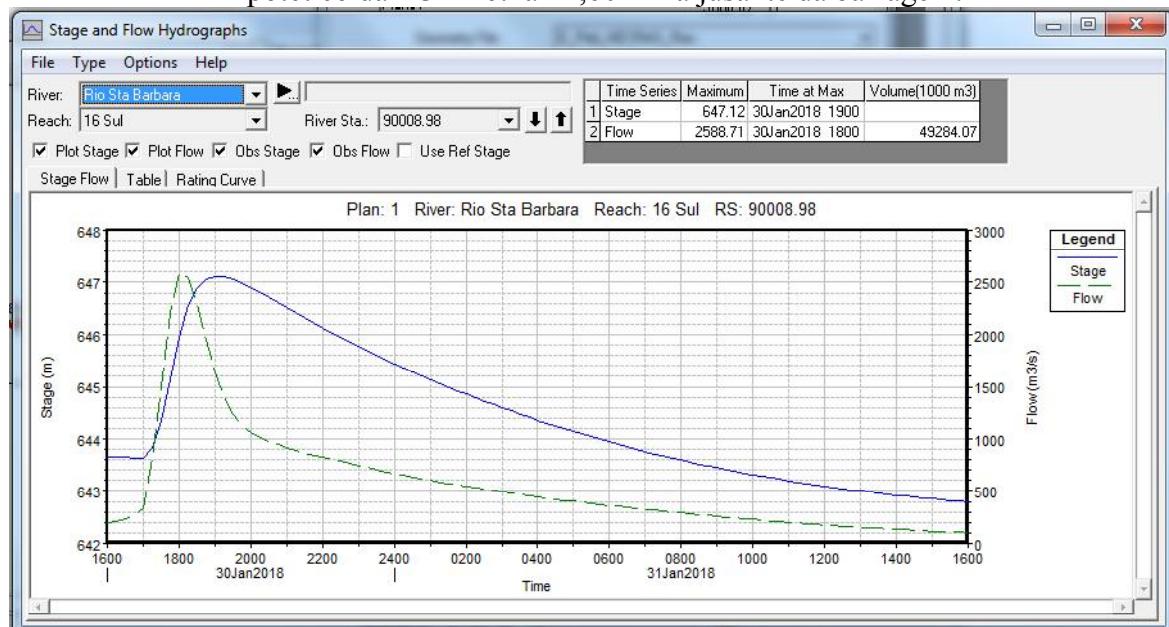
Fonte: Autor (2017).

A Figuras 32 e 35 mostram os hidrogramas e a variação do nível de água nas seções 100.542,80 e 90.008,98, no qual a altura da água varia de 7,03 m para 4,78 m. Observa-se nas mesmas figuras que o amortecimento da vazão é de praticamente 70%, tendo em vista que a vazão foi reduzida de $9.413,83\text{m}^3/\text{s}$ para $2.588,71\text{m}^3/\text{s}$. O amortecimento observado neste trecho pode ser justificado pela forma plana do terreno nesta localidade, junto à cidade de São Gonçalo do Rio Abaixo-MG.

A PCH Peti apresenta um volume relativamente alto e devido a topografia da região à jusante ser plana, faz com que a onda de cheia quando alcança essa cidade se espalhe horizontalmente atingindo uma área maior.

Ressalta-se que não foram realizados estudos relacionados a uso e ocupação do solo, e que foi fixado um valor único para o coeficiente de rugosidade de Manning em 0,067. Assim, para um estudo mais aprofundado é necessário que seja verificada a variação desse parâmetro à jusante ao vale.

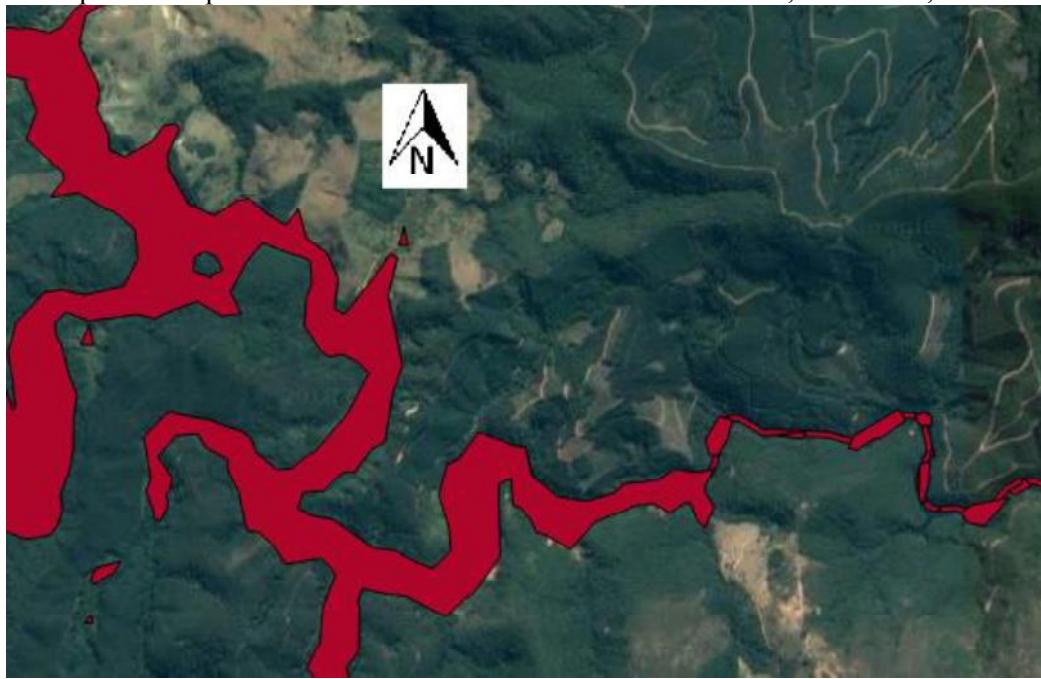
Figura 35 – Hidrograma gerado pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti a 21,60 km à jusante da barragem.



Fonte: Adaptado do programa HEC-RAS (2017).

A Figura 36 mostra o trecho a jusante do reservatório entre 21,60km e 35,10km. Na região desta figura, observa-se que a mata é densa e fechada e não existem edificações.

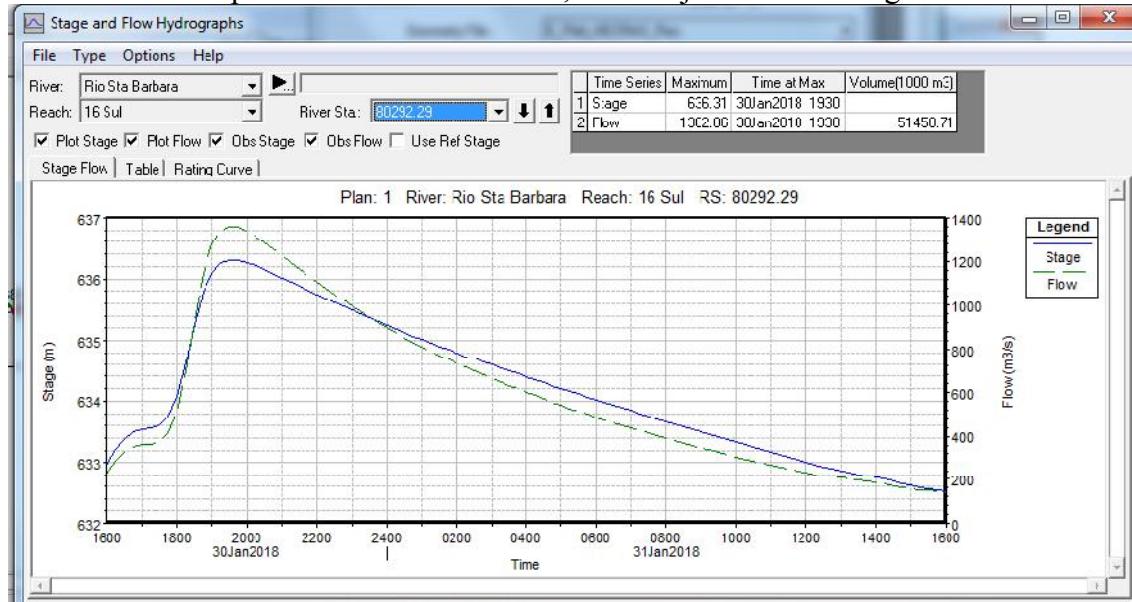
Figura 36 – Área de inundaçāo a jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a distância 21,60 km e 35,10 km.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 37 apresenta o hidrograma gerado a 31,31 km à jusante da PCH Peti. A vazāo nesse trecho é de 1.362,06 m³/s, que representa em torno de 9% da vazāo inicial, e com nível de água em 3,65 m.

Figura 37 – Hidrograma gerado pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti a 31,31 km à jusante da barragem.



Fonte: Adaptado do programa HEC-RAS (2017).

Visualiza-se na Figura 38 duas regiões, que apresentam localidades com algumas casas. A maioria dessas edificações é atingida pela onda de cheia que chega a 4,27m de altura na seção a 41,04Km à jusante da barragem.

Figura 38 – Área de inundação à jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a distância 31,31 km e 43,65 km.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 39 mostra o trecho da área de inundação entre as distâncias 43,65 km e 59,66 km.

Figura 39 – Área de inundação à jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a distância 43,65 km e 59,66 km.

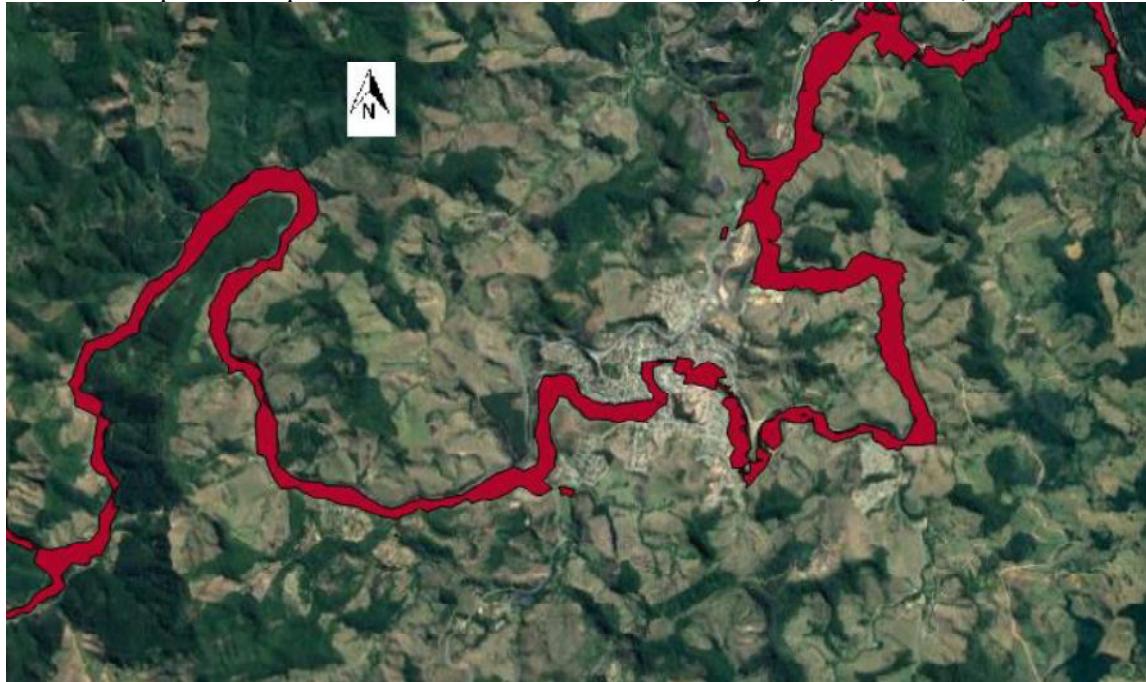


Fonte: Autor (2017).

A análise desta barragem foi estendida até a distância de 94,96 km, pois como mostra a Figura 40, a cidade de Nova Era-MG, com população de 17.528 habitantes, pode ser atingida pela onda de cheia. De acordo com a análise feita no programa HEC-RAS, em uma seção à montante dessa cidade, o nível de água é de 3,19 m com vazão de pico de 824,04m³/s e a jusante em outra seção a profundidade da água é de 1,91m com vazão de pico de 799,98 m³/s. O gráfico da Figura 41 mostra o hidrograma em uma seção

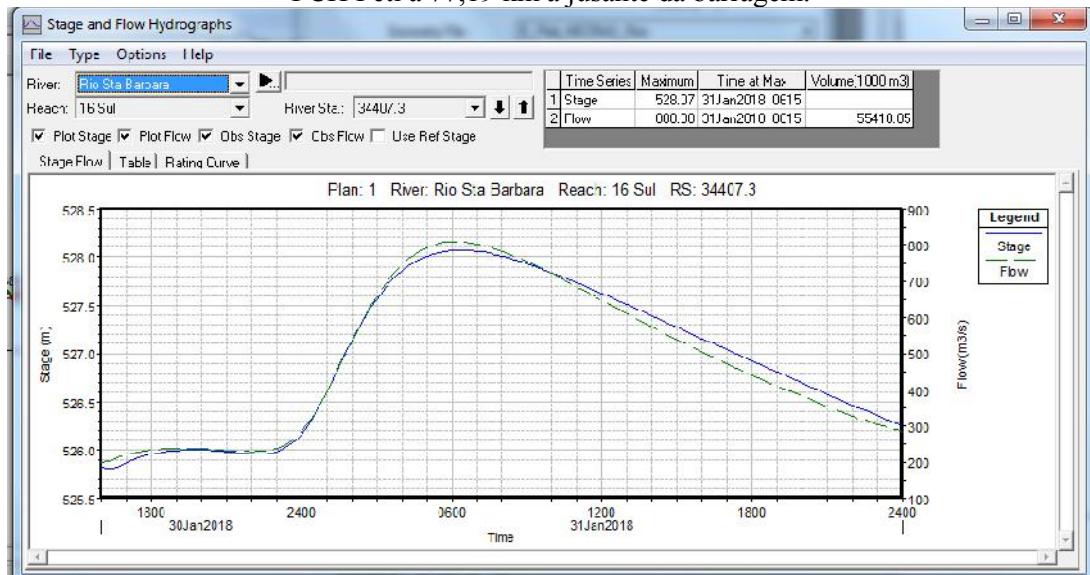
transversal traçada dentro dos limites da cidade, e cuja vazão máxima do hidrograma é de 808,38 m³/s com a altura de água chegando a 2,05m.

Figura 40 – Área de inundaçāo a jusante da barragem geradas pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti -Trecho entre a seção 59,66km e 94,96km.



Fonte: Autor (2017).

Figura 41 – Hidrograma gerado pelo programa HEC-RAS devido ao rompimento hipotético da PCH Peti a 77,19 km a jusante da barragem.



Fonte: Adaptado do programa HEC-RAS (2017).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

A análise do rompimento hipotético da barragem de Peti permitiu verificar a importância da fiscalização pelos órgãos competentes e a boa operacionalização de reservatórios para que minimizem a possibilidade de ocorrência desse evento, visto que as consequências são, muitas das vezes, irreversíveis.

Os modelos matemáticos e as ferramentas de geoprocessamento são indispensáveis para estudos semelhantes.

Nos estudos para definição da onda de cheia à montante da barragem de Peti, encontrou-se algumas dificuldades para definir o tempo de concentração nos córregos e rios pertencentes à bacia hidrográfica estudada. A estimativa foi feita com base na formulação proposta na bibliografia e os resultados encontrados mostram a necessidade da realização de estudos que possam auxiliar na definição deste parâmetro.

A variação das dimensões da brecha formada impacta na vazão de saída da barragem e consequentemente as áreas e populações atingidas.

Observou-se que o amortecimento da onda de cheia no vale a jusante da PCH Peti foi aproximadamente 50% em menos de 1,5 hora. A cidade de São Gonçalo do Rio Abaixo-MG se encontra em uma região plana, que facilita o amortecimento da onda de cheia e parte do volume do reservatório fica retido nessa região. Contudo, os impactos socioeconômicos e principalmente a perda de vidas humanas torna o prejuízo irreparável.

O amortecimento da onda de cheia alcança 5% da vazão de pico inicial e, ocorre 10 horas após o rompimento da barragem, de acordo com a simulação realizada.

Por fim, verificou-se que as possíveis consequências do rompimento hipotético da barragem de Peti são: atingir aproximadamente 30 mil pessoas e áreas rurais diversas, como lavouras, interferindo negativamente na economia regional.

REFERÊNCIAS

AGOSTINO, Rosane D'. Rompimento de barragem em Mariana: perguntas e respostas. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2015/11/rompimento-de-barragens-em-mariana-perguntas-e-respostas.html>>. 2015. nov. 2015. Acesso em: 03 jul. 2017.

ÁGUAS, Agência Nacional de. Transição Novo Hidroweb. Disponível em: <hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em: 13 jun. 2017.

BRASIL. Lei n. 12334, 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, Brasília, 2010.

Brasil, L. S. S. Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de ondas de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem. Estudo de caso: Barragem de Rio das Pedras – MG. 2005. 222 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

Brasil, L. S. S., Palmier, L. R., Nascimento, N. O., Botelho, L. C. M., Diniz, T. M. F. (2005). Inundation maps of urban areas due to floods caused dam failure: the case of Rio de Pedras Dam, Minas Gerais, Brazil. Fourth World Wide Workshop for Young Environmental Scientists, Paris, p. 33-43, maio 2005.

BROWN, D. et. al. 501 Desastres mais devastadores de todos os tempos. Trad. Catharina Pinheiro. 1ª edição brasileira. São Paulo: Editora Lafonte, 2012.

CAMPOS, Rubens. Curso Básico HEC RAS. 2011. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/118961357/Apostila-Curso-HEC-RAS>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

CENTER, Hydrologic Engineering. HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. v. 4.1. jan. 2010.

Collischonn, W.; Tucci, C. E. M. Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 191-206, jul./dez. 1997. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v2n2.p191-206>

Comissão Internacional De Grandes BARRAGENS (CIGB). As barragens & a água do mundo: um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. CIGB ICOLD, 2014.

COSTA, J. E. Floods from Dam Failures. United States Department of the Interior, Geological Survey, Open-File Report 85-560. Denver, CO, 1985.

Cruz, P. T. 100 Barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto.

São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 647p.

Eisenhardt, K.M. Building theories from case study research. *Academy of Management Review*. New York, New York, v. 14 n. 4. 1989.

FARIA, Marcelo. Barragens de rejeito já causaram diversas tragédias em Minas Gerais. Disponível em: <http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/11/05/interna_gerais,705019/barragens-de-rejeito-ja-causaram-diversas-tragedias-em-minas-gerais-r.shtml>. Nov. 2015. Acesso em: 03 jul. 2017.

FERREIRA, A. L. M.; ANDRZEJEWSKI, E. A. Comparação de Métodos de Cálculo da Ruptura de uma Barragem Hipotética. Comitê Brasileiro de Barragens, Foz do Iguaçu p. 1-12, maio 2015.

Froehlich, D. C. Embankment Dam Breach Parameters Revisited. First International Conference, Water Resources Engineering Environmental and Water Resources Institute (EWRI), 14-18 August 1995. ASCE Water Resources Engineering Proceeding, 1995, p. 887-891.

Froehlich, D. C. Peak Outflow from Breached Embankment Dam. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, Vol 121, Issue 1, January 1995, p.90-97.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1995\)121:1\(90\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1995)121:1(90))

GRAHAM, W. Channel and valley changes resulting from dam failure. 2nd CADAM meeting. Munich, Alemanha, outubro de 1998, 6 p.

Hagen, V.K. Re-evaluation of Design Floods and Dam Safety. Proceedings of 14th ICOLD Congress, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 1 p.475-491, 1982.

Kirkpatrick, G.W. Evaluation Guidelines for Spillway Adequacy, The Evaluation of Dam Safety. Engineering Foundation Conference, ASCE, New York, 1977. p. 395-414.

Mac Donald, T.C. and Langridge-Monopolis, J. Breaching Characteristics of Dam Failures, ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, nº 5, may 1984 p. 567-586.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:5\(567\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:5(567))

Mendonça, M. B. de. Notas de aula da disciplina Obras de Terra. UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro. 2012.

Menescal, R. A., Vieira, V. P. P. B., Oliveira, S. K. F. Terminologia para análise de risco e segurança de barragens. In: MENESCAL, R. A. (coord.) A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos. Ministério da Integração Nacional, Brasília, 2005a, p. 31-49.

Menescal, R. A., Miranda, N., Pitombeira, S., Perini, D. S. As barragens e as enchentes. In: MENESCAL, R. A. (coord.) A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos. Ministério da Integração Nacional, Brasília, 2005b, p. 289-299.

MOECKE, G. C. Análise do Rompimento Hipotético da Barragem Oeste do Vale do Rio Itajaí. 2014. 81 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MURTA, J. G. A. Estação Ambiental de Peti – Barragem. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/22225361>>. 2009. Acesso em: 15 ago. 2017.

Pereira, C. E.; Viseu, M. T.; Melo, J. F.; Martins, T.; Salla, M. R.; Mota, K. R. R. Comparação entre os modelos simplificados e o modelo HEC-RAS no estudo de áreas de inundação para o caso de Minas Gerais, Brasil. Recursos Hídricos (Lisboa), v. 38, p. 75-90, 2017.
<https://doi.org/10.5894/rh38n1-cti3>

Pereira, P. N.; Santos, R. P.; Ferreira, W. F. V.; Guimarães, R. D. S. Modelação da propagação de cheias ocasionadas por rompimento de barragens na cadeia de geração do rio Paranapanema. Comitê Brasileiro de Barragens, Salvador, p. 1-15, Out 2003.

Ribeiro, A. F.; Pereira A. G.; Pinese, J. F. VITA, E. F. A.; NETO, R. P. M. Relatório do monitoramento da Ictiofauna da PCH Peti. Patos de Minas. 2012.

Singh, K.P. and Snorrason, A. Sensitivity of Outflow Peaks and Flood Stages to the Selection of Dam Break Parameters and Simulation Models. Journal of Hydrology, Vol 68, Issues 1-4, February, 1984, p.295-310. Global Water: Science and Engineering the Ven Te Chow Memorial Volume.

[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90217-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90217-8)

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). Simplified Dam-Breach Routing Procedure. United States Departament of Agriculture, SCS, Technical Release Nº 66 (Rev.1), 39, 1981.

TOMAZ, Plínio. Capítulo 113- Método de Clark. In: TOMAZ, Plínio. Curso de Manejo de águas pluviais. Guarulhos: 2016. p. 1-26.

UNITED STATES DEPARTMENT OF INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION. Guidelines for Defining Imundated Areas Downstream from Bureau of Reclamation Dams. Reclamation Plannig Instruction, Nº82-11, 15. Denver, Colorado, 1982.

VIÇOSA, Universidade Federal de. Atlas Digital das Águas de Minas. Disponível em: <<http://www.atlasdasaguas.ufv.br>>. Acesso em: 20 fev 2017.

VIÇOSA, Universidade Federal de Viçosa; GERAIS, Fundação Centro Tecnológico de Minas; LAVRAS, Universidade Federal de; AMBIENTE, Fundação Estadual do Meio. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p.

Xu, Y. and Zhang, L.H. Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 135 Nº 12, p.1957-1970, December, 2009.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000162](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000162)

Yin, R.K. Case study research, design and methods (applied social research methods). Thousand Oaks. California: Sage Publications. 2009.

ZHAO, Xuanyu; LIANG, Dongfang; MARTINELLI, Mario. Numerical simulations of dam-break floods with MPM. In: 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE MATERIAL POINT METHOD, MPM 2017, 1., 2017, Boussinesqweg. Numerical simulations of dam-break floods with MPM. Boussinesqweg: Sciencedirect, 2017. p. 1-8.

Zingano, A. C. Barragens: geologia de Engenharia III. Porto Alegre. 2005.