

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

ANÁLISE DE METODOLOGIAS PARA CLASSIFICAÇÃO
QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO EM
BARRAGENS

REBECCA CAROLINE DOLFINI GONÇALVES

ORIENTADOR:
WAGNER SANTOS DE ALMEIDA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF, 09 DE JULHO DE 2018

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental**

**ANÁLISE DE METODOLOGIAS PARA CLASSIFICAÇÃO
QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO EM
BARRAGENS**

REBECCA CAROLINE DOLFINI GONÇALVES

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

APROVADA POR:

**WAGNER SANTOS DE ALMEIDA (ENC-UnB)
(ORIENTADOR)**

**RICARDO TEZINI MINOTI (ENC-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**IVO AUGUSTO LOPES MAGALHÃES
(EXAMINADOR EXTERNO)**

FICHA CATALOGRÁFICA

GONÇALVES, REBECCA CAROLINE DOLFINI

Análise de Metodologias para classificação quanto ao Dano Potencial Associado em Barragens [Distrito Federal] 2018.

xi, 70 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|------------------------|--|
| 1. Mancha de Inundação | 2. Política Nacional de Segurança de Barragens |
| 3. Geoprocessamento | 4. Sensoriamento Remoto |
| 5. Modelo hidrológico | |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GONÇALVES, R.C.D (2018). Análise de Metodologias para classificação quanto ao Dano Potencial Associado em Barragens. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rebecca Caroline Dolfini Gonçalves

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise de Metodologias para classificação quanto ao Dano Potencial Associado em Barragens

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Rebecca Caroline Dolfini Gonçalves

Av. Das Araucárias, 4530, Bloco C, apt 2702

71936-250 - Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as oportunidades que colocou em minha vida, pela sabedoria, por minha saúde e por todas pessoas que passaram por minha vida.

Agradeço ao melhor presente que Deus me deu, a minha família maravilhosa. Ao meu pai, Ricardo e minha mãe Gilsia, por tudo que batalharam para dar oportunidade de estudo para nós. Obrigada por toda a confiança que me deram, por todo apoio e carinho. Tudo que conquistei e aonde cheguei eu dedico a vocês, meus pais! Agradeço aos meus irmãos, Gui, Laurete e Gu, por todo companheirismo, bons momentos, risadas, brigas e carinhos. Obrigada por serem amigos para a vida toda. Aos meus avós Olimpia e José por todo exemplo de batalha. A meu avô João e minha avó Melena, em memória, por todo carinho em minha infância e adolescência. Aos meus tios, primos e padrinhos.

Ao meu namorado, Rangell, agradeço por sempre estar ao meu lado nos momentos difíceis de UnB e se esforçar, mesmo na distância, me apoiando em situações delicadas e por todo incentivo em meu desenvolvimento profissional. Obrigada por todos os conselhos e por ser meu porto seguro. Agradeço também, a Família Guerra, por tudo que fazem por mim.

Agradeço ao meu orientador, Professor Wagner, por todos ensinamentos e conselhos. Obrigada por sempre estar próximo e por acreditar em mim. Agradeço, também, a todos os professores da Universidade de Brasília.

Obrigada a minhas amigas de longa data, especialmente a Amanda, Luciana, Luigia, Rafa, Bruna e Muniky, pela compreensão em meus momentos distante e por sempre estarem ao meu lado. Agradeço, também, a minhas amigas de caminhada universitária, Gabi, Anne, Caló, Carol e Lorryne, com vocês tudo ficou mais leve e mais gostoso. Obrigada pelos conhecimentos trocados e por todas as risadas. A minha amiga Marianna Campos, pela amizade e companheirismos e principalmente por me apoiar neste projeto final e por emprestar o computador para a conclusão do PF, sem sua ajuda isso não seria possível.

Aos meus colegas da Empresa Júnior Concreta e amigos para a vida, por tudo que me ensinaram. Agradeço especialmente a Vic, Gabriel, Bellão, Van, Sil, Duda e ao Carlinhos, Maurício, Thiago, Carol, Babi, Egídio, Iza e Bruna. Vocês fizeram história para mim.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal pelo apoio ao trabalho desta monografia, acordo Processo Nº 0193-001.362/2016

RESUMO

As barragens foram desenvolvidas para combater o problema de escassez de água no período da seca e devido à necessidade de armazenar água para consumo humano, e por conter uma grande quantidade de água, as barragens acumulam uma alta quantidade de energia. Assim, a ruptura de uma barragem pode liberar, em um curto período, uma enorme massa de água acarretando extensos prejuízos materiais, sociais, econômicos, ambientais e, principalmente, humanos. Visando regular e fiscalizar esse tipo de empreendimento, no ano de 2010, foi aprovado no Brasil a Política Nacional de Segurança de Barragens estabelecida pela Lei nº 12.334/2010, no qual discorre sobre a classificação de barragens quanto ao Dano Potencial Associado (DPA). Na avaliação do DPA, o sensoriamento remoto, aéreo e orbital, tornou-se, para a segurança de barragens, uma tecnologia essencial para classificação desses danos, auxiliando na geração da mancha de inundação, instrumento básico para sua classificação. Este Projeto Final tem como objetivo avaliar duas metodologias de produção de mancha de inundação, a do Banco Mundial e a do HEC-RAS para geração da área de inundação na Barragem Nº 5 Fazenda Manga (DF). A partir das duas diferentes manchas de inundação simuladas para a área de estudo, foi possível avaliar as diferenças entre as manchas, classificá-las em DPA médio e concluir que apesar de a metodologia utilizada pela ANA ser simplificada, foram obtidos resultados satisfatórios, sendo menos robusto que a metodologia hidrológica do HEC-RAS, facilitando a capacitação dos órgãos gestores do Brasil, apresentando, dessa forma, classificação coerente.

Palavras-chave: Mancha de inundação, Política Nacional de Segurança de Barragens, geoprocessamento, sensoriamento remoto, modelagem hidrológica.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	4
2.1. OBJETIVO GERAL	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. BARRAGEM.....	5
3.2. ROMPIMENTO DE BARRAGEM.....	5
3.3. OUTORGA DE DIREITO DO USO DA ÁGUA.....	6
3.4. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS	6
3.5. DANO POTENCIAL ASSOCIADO	7
3.6. MANCHA DE INUNDAÇÃO	9
3.7. ONDA DE CHEIA	10
3.8. MODELAGEM HIDRODINÂMICA	10
3.9. SENSORIAMENTO REMOTO	13
3.10. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	14
3.11. MODELO DIGITAL DE TERRENO.....	15
3.12. METODOLOGIA DA MANCHA DE DANO POTENCIAL ASSOCIADO UTILIZADO PELA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS	16
3.12.1. Premissas.....	16
3.12.2. Cálculo da Extensão da Área Inundada a Jusante.....	18
3.12.3. Pico de Vazão no Rompimento da Barragem	20
3.12.4. Cálculo da Vazão Máxima nas Seções Transversais	22
3.12.5. Área inundada a jusante	24
3.12.6. Altimetria de seções perpendiculares ao canal principal onde se propaga a onda de Inundação.....	24
3.12.7. Cálculo do Nível Máximo da Onda de Cheia em cada uma das Seções....	26

3.12.8.	Superfície Máxima de Inundação	27
3.12.9.	Delimitação da Zona de Inundação.....	29
3.12.10.	Existência de Barragens em Cascata.....	32
3.13.	CRITÉRIOS SUBSTITUTOS INSTITUÍDOS PELA ANA NA CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO.....	33
3.13.1.	Quanto às imagens de satélites	33
3.13.2.	Potencial de perdas de vidas humanas	34
3.13.3.	Impacto ambiental.....	34
3.13.4.	Impacto socioeconômico	35
3.14.	USO E COBERTURA DO SOLO	36
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1.	ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.1.1.	Características Fisiográficas	39
4.2.	MATERIAIS.....	40
4.2.1.	Softwares	40
4.3.	BASE DE DADOS	41
4.3.1.	Dados de sensores remotos orbitais.....	41
4.3.4.	Dados utilizados no <i>HEC-RAS</i>	42
4.4.	METODOLOGIA	43
4.4.1.	Mapa de Uso e Cobertura do Solo.....	44
4.4.2.	Aplicação do Modelo Simplificado.....	45
4.4.3.	Aplicação do Modelo <i>HEC-RAS</i>	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1.	MAPAS TEMÁTICOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	49
5.2.	OUTORGAS CONCEDIDAS	51
5.3.	MANCHA DPA.....	52
5.4.	MAPA DE INUNDAÇÃO	58

5.5. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO.....	62
6. CONCLUSÃO	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Tabela auxiliar para classificação quanto ao Dano Potencial Associado.	8
Tabela 3-2– Relação entre a capacidade de armazenamento do reservatório e distância até onde a onda de cheia afetou a área a jusante da barragem.	18
Tabela 3-3 – Relação entre a capacidade de armazenamento do reservatório e distância total recomendada para a análise a jusante da barragem.	18
Tabela 3-4 - Fórmulas empíricas para estimar a vazão máxima por ruptura de barragens.	21
Tabela 3-5 - Níveis máximos atingidos pela onda de inundação em cada uma das seções transversais (S = seção), resultante da aplicação do método simplificado.	27
Tabela 3-6 - Estimativa do volume armazenável na faixa da borda livre em função da altura da barragem.	33
Tabela 3-7 - Níveis de Informação fornecidos pelo IBGE para as zonas protegidas.	35
Tabela 3-8: Grupo de solos e características do solo.....	37
Tabela 3-9: Valores dos números CN da curva de <i>Runoff</i> para bacias rurais.	38
Tabela 4-1 – Informações das imagens de satélites.....	41
Tabela 4-2 – Dados utilizados na simulação com o software HEC-RAS	42
Tabela 5-1 – Ocupação percentual da Unidade Hidrográfica do Rio São Bernardo para cada classe temática nos anos de 2000 e 2017.....	49
Tabela 5-2 – Quantidade de outorgas por usos primários da água.....	51
Tabela 5-3 - Síntese de resultados para os perfis transversais de cálculo.	57
Tabela 5-4 – Dados referente a barragem.....	59
Tabela 5-5 – Dano Potencial Associado para a Barragem N° 5 Fazenda Manga, considerando a área de inundação a Mancha DPA.	62
Tabela 5-6 - Dano Potencial Associado para a Barragem N° 5 Fazenda Manga, considerando a área de inundação para o ano de 2000.	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 – Elementos do SIG.	14
Figura 3-2 - Programas desenvolvidos para automatização do processo.	20
Figura 3-3 – Atenuação da vazão máxima com a distância para jusante da barragem.	23
Figura 3-4 - Seções transversais por onde são extraídas as cotas do terreno.	26
Figura 3-5 - Altura de Inundação em cada seção transversal.	28
Figura 3-6 - Cálculo da superfície de máxima inundação a partir de um MDT em formato TIN.	29
Figura 3-7 - TIN de altitude do terreno.	30
Figura 3-8 - Área de Inundação resultante da diferença de altitudes.	30
Figura 3-9 - Representação das seções originais e da mancha de inundação.	31
Figura 4-1 – Localização da área de estudo	40
Figura 4-2 - Outorgas na Unidade Hidrográfica do Rio São Bernardo.	42
Figura 4-3 - Fluxograma metodológico geral.	43
Figura 4-4 - Representação esquemática da metodologia proposta.	44
Figura 4-5 – Fluxograma metodológico simplificada para produção da Mancha DPA.	45
Figura 4-6 – Fluxograma metodológico utilizado para a produção da mancha de inundação pela simulação no <i>HEC-RAS</i>	47
Figura 5-1 - Mapa temático de uso e ocupação do solo da UH do rio São Bernardo.	50
Figura 5-2 – Representação gráfica da distribuição de outorgas por finalidade primária. ...	52
Figura 5-3 – Traçado da parte do Rio São Bernardo, em azul, a jusante da Barragem N° 5 Fazenda Manga, em que a análise foi realizada.	53
Figura 5-4 – Traçado do rio e linearização do rio.	54
Figura 5-5 – Criação das seções transversais.	55
Figura 5-6 – Mancha DPA da Barragem N° 5 Fazenda Manga.	56
Figura 5-7 – Representação gráfica da evolução das cotas a medida que se distância da Barragem N° 5 Fazenda Manga.	58
Figura 5-8 – Mapa da geometria gerada pelo <i>HEC-GeoRAS</i>	59
Figura 5-9 – Hidrograma da Bacia Hidrográfica do Rio São Bernardo pelo método SCS.	60
Figura 5-10 - Área alagada, em azul, devido à chuva de projeto, para o ano de 2000.	61
Figura 5-11 – Área alagada, em azul, devido à chuva de projeto, para o ano de 2017.	61

Lista de Siglas

ANA – Agência Nacional de Águas

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

DPA – Dano Potencial Associado

DF – Distrito Federal

ESRI – *Environmental Systemes Research Institute*

EUA – Estados Unidos da América

FERC – Federal Guidelines dor Dam Safety

GRID – Rede Irregular Retangular

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

MDT – Modelo Digital de Terreno

MG – Minas Gerais

NASA - Agência do Governo Federal dos Estados Unidos

PAE – Plano de Ação de Emergência

PSB – Plano de Segurança de Barragem

PNSB – Plano Nacional sobre Segurança de Barragens

RJ – Rio de Janeiro

SP – São Paulo

SRTM - Missão Topográfica Radar Shuttle

TIN – Rede Irregular Triangular

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

UH – Unidade Hidrográfica

USACE - Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos

1. INTRODUÇÃO

As barragens artificiais construídas nos canais fluviais foram criadas inicialmente para resolver o problema de escassez de água no período seco e a necessidade de armazenar água para consumo da população. Com o passar do tempo, os reservatórios de água assim criados possibilitaram uma melhor qualidade de vida e condições para o crescimento das cidades, aprimorando o desenvolvimento de atividades essenciais como a agricultura e a pecuária.

No Brasil, as primeiras barragens surgiram em apoio à SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – que visava diminuir o êxodo para o Sudeste do País devido às longas secas que abarcavam a população.

Desta forma, é notório a importância que as barragens fluviais possuem no aproveitamento e na gestão dos recursos hídricos já que possibilita o uso múltiplo dos recursos hídricos. Entretanto, outros usos foram sendo atribuídos aos reservatórios como o abastecimento industrial, a contenção de resíduos industriais e de rejeitos de mineração, a geração de energia elétrica e o controle de enchentes.

Por conter um volume considerável, as barragens acumulam uma alta quantidade de energia. Assim, a ruptura de uma barragem pode liberar, em um curto período, uma enorme massa de fluido acarretando extensos prejuízos materiais, sociais, econômicos, ambientais e, principalmente, humanos.

Os impactos gerados relacionados a existência de uma barragem fluvial podem ser definidos em três ordens. O impacto de primeira ordem está relacionado à inundação do vale a montante devido à construção do barramento, para a existência do reservatório, o que acarreta consequências ambientais e na realocação da população ribeirinha. O impacto de segunda ordem está relacionado à variação no regime natural de cheias e da variação de vazão resultante da operação das barragens. O de terceira ordem é caracterizado pelas consequências decorrentes de uma situação de falha ou ruptura na barragem, ameaçando de inundação o vale a jusante do canal fluvial (Almeida, 2001).

Os impactos de primeira e segunda ordem são de considerável importância, uma vez que a barragem fluvial está construída e regulariza o regime de vazão nas regiões a jusante de forma a reduzir impactos de inundação, por trazer um conceito de segurança acarreta um aumento populacional na região. Além disso, essa ocupação, muitas vezes irregular é

estabelecida nas planícies de inundação, pode gerar danos consideráveis na liberação de grandes vazões ou na ruptura da barragem (Macedo, 2013).

Nesse sentido, para que as barragens sejam seguras é primordial regular e fiscalizar esse tipo de empreendimento, sendo realizadas pelos empreendedores ações preventivas de acidentes. Visando mitigar esses impactos, no ano de 2010, foi aprovado no Brasil a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) estabelecida pela Lei no 12.334/2010 (Brasil, 2010), no qual se aplica a barragens destinadas a acumulação de água para quaisquer usos, a disposição final ou temporária de rejeitos e a acumulação de resíduos industriais que apresentam algumas características descritas. Segundo essa Lei, a segurança de barragem visa manter a sua integridade estrutural e operacional, de forma a garantir a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente.

Diante do exposto, de acordo com a PNSB, a classificação de barragens no Brasil é realizada por meio da categorização quanto ao risco, quanto ao dano potencial associado e por volume. Assim, essa classificação é o dosador das medidas e procedimentos de monitoramento a serem adotados, de forma a tornar mais seguras as barragens, determinando a periodicidade e o conteúdo mínimo das inspeções regulares e especiais e da revisão periódica, e a obrigatoriedade ou não de elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE) da barragem, segundo regulamentos a serem publicados pelos agentes fiscalizadores da segurança de barragens (Brasil, 2012).

Inserido neste contexto da segurança de barragens, atualmente existem diversos métodos para a delimitação da mancha de inundação como referência para a classificação quanto ao DPA, como a metodologia desenvolvida, em 2014, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) e pela COBA Consultoria de Engenharia e Ambiente, como resultado do Contrato 051/2012 da Agência Nacional de Águas com o Banco Mundial. (Banco Mundial, 2014).

Essa metodologia, o sensoriamento remoto, aéreo e orbital, é uma ferramenta utilizada na segurança de barragens, uma tecnologia essencial tanto para a classificação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA), em que essa delimitação ocorre por meio da geração de mancha de inundação, desenvolvendo um polígono de referência para a estimativa desse dano. A função desse polígono é delimitar a área de análise para a classificação do DPA, a qual servirá de referência para o órgão de fiscalização de segurança de barragens priorizar sua atuação. Além disso, vale destacar que o polígono para delimitação do DPA ser uma

aproximação inicial de uma área de inundação, sua precisão será função da resolução espacial do Modelo Digital de Terreno (MDT) (Banco Mundial, 2014). O MDT descreve a variabilidade do relevo terrestre em uma área de interesse e os dados gerados são importantes em aplicações de geoprocessamento desenvolvidas em um ambiente de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Para gerar esses modelos é necessário adquirir amostragens das alturas do relevo dentro dessa região, resultando em uma representação sobre a variabilidade altimétrica na região de interesse. Os MDT são obtidos por modelos fotogramétricos ou por interferometria por radar em sensores remotos embarcados em aeronaves e/ou satélites. Os Modelos Digitais de Terreno são utilizados em procedimentos de análises espaciais em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (Felgueiras, 1997).

O SIG, por sua vez, é um conjunto de ferramentas computacionais com algoritmos de geoprocessamento no qual devem adquirir, armazenar, recuperar, transformar e analisar informações espaciais, de forma a descrever objetos do mundo real com a variável de posicionamento.

Ademais, na simulação de rompimento de barragens para a produção de mancha de inundação é frequentemente utilizando o modelo hidrodinâmico computacional HEC-RAS apoiado a dados hidrológicos e topográficos oriundos de MDT em um ambiente computacional de um SIG.

Após a determinação do polígono do DPA, o mesmo é sobreposto a imagem de satélite para análise e classificação em categorias de DPA, que são baixo, médio ou alto dano (Brasil, Lei 12.334/2010).

Diante do exposto, objetivou-se neste trabalho de projeto final analisar a classificação da barragem quanto ao seu Dano Potencial Associado, utilizando como ferramenta as duas manchas de inundação produzidas pela metodologia simplificada utilizada pela Agência Nacional de Águas e pelo modelo HEC-RAS, ambas frequentemente utilizadas em análises de rompimento de barragem. Além disso, o estudo de DPA para a Barragem N°5 Fazenda Manga ainda não havia sido estudada, com isso, os dados gerados são novos e de grande importância para o estudo de segurança de barragens e para a região.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

Este projeto tem como objetivo principal classificar a Barragem N°5 Fazenda Manga (DF) quanto ao Dano Potencial Associado (DPA), utilizando metodologias com critérios gerais para a classificação quanto ao DPA em atendimento ao Plano Nacional sobre Segurança de Barragens.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Desejando alcançar o objetivo geral neste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram elencados para a área de estudo:

- Simular, por meio da metodologia da ANA, a onda de cheia devido ao rompimento da barragem;
- Desenvolver a mancha DPA por meio da metodologia utilizada pela Agência Nacional de Águas;
- Desenvolver a mancha de inundação utilizando o modelo hidrológico do *software* HEC-RAS;
- Comparar os diferentes resultados gráficos de amortização da onda de cheia e analisar as diferenças entre as metodologias aplicadas na obtenção das manchas de inundação;
- Analisar o uso e ocupação do solo entre os anos de 2000 e 2017;
- Analisar o avanço da irrigação na Unidade Hidrográfica do rio São Bernardo por meio da tecnologia de geoprocessamento.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. BARRAGEM

No Brasil, o avanço na construção de grandes barragens ocorreu com a seca do ano de 1877 que trouxe consequências devastadoras para o Nordeste brasileiro (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1982), e, desde então, a existência de barramentos vem se tornando mais comum principalmente pela grande quantidade de recursos hídricos disponíveis no País. (MI, 2002).

Segundo Maragon (2004), as barragens fluviais são empreendimentos construídos com intuito de criar um reservatório artificial para a acumulação de água, podendo ser definidas como uma estrutura construída perpendicularmente a direção de escoamento de um curso d'água.

Desta forma, tem como finalidade básica a construção de barragens quando se deseja retirar de um curso d'água uma quantidade de vazão maior do que a vazão mínima de estiagem que este curso d'água tem capacidade de oferecer (Garcez, 1962).

Neste sentido, outros objetivos regem a existência de barragens para fins econômicos, no qual os principais são o aproveitamento hidrelétrico, a regularização de vazão no curso d'água para a navegação, o abastecimento de água, fornecimento de água a indústrias, o controle de inundações e a irrigação (Maragon, 2004).

3.2. ROMPIMENTO DE BARRAGEM

Por outro lado, impactos negativos também estão associados à construção de barragens, sendo de natureza social, econômica e ambiental. Além disso, a possibilidade de ocorrer falha na estrutura da barragem e ocorrer sua ruptura é um risco potencial para a população que ocupa o vale a jusante (Lauriano, 2009).

Neste sentido, os danos causados como consequência de um evento de ruptura de barragem trazem, geralmente, consequências catastróficas, principalmente quando à jusante possui regiões urbanizadas (Lauriano, 2009). No Brasil e em outros países, é exigido, por meio de legislação específica, que algumas barragens, de acordo com a sua classificação, possuam estudos para elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE). Este documento tem como função atenuar as consequências caso a barragem sofra ruptura, estabelecendo ações a serem executadas pelo empreendedor em caso de situação emergencial (Brasil, 2010).

Desta forma, a importância no estudo sobre riscos de barragens vem sendo cada vez mais significativa devido à crescente quantificação das consequências de seu rompimento, principalmente em relação ao risco a vida humana, podendo causar desabrigados e mortos. Tal fato disso foi levantado pela *Federal Guidelines for Dam Safety* (FERC) em 2004 que no século 20 ocorreram aproximadamente 200 rompimentos notáveis de barragens, o que acarretou a mais de 8.000 mortes.

Em 2015, a ruptura da Barragem de Fundão (MG) de rejeito de mineração da mineradora Samarco, foi responsável por destruir o município de Bento Rodrigues, seguindo ainda por pelo menos outros 70 km até atingir a calha principal do rio Doce, atingindo uma série de cidades, causando a morte de pelo menos 17 pessoas e prejuízos ambientais inestimáveis (Pinto-Coelho, 2015). Assim, é inviável a análise sobre rompimento e segurança de barragens sem um estudo sobre a legislação nacional que institui a Política Nacional sobre Segurança de Barragens, promulgada em 20 de setembro de 2010.

3.3. OUTORGA DE DIREITO DO USO DA ÁGUA

O uso da água, sendo ela essencial para o desenvolvimento das atividades humanas, é permitido por meio de outorga de direito do uso da água que independe do domínio, podendo ser concedido pela União, pelos Estados ou pelo Distrito Federal (Brasil, 1997).

A outorga é um instrumento de comando e controle na qual o Poder Público exerce seu poder de polícia, que ocorre como uma autorização em condições e prazos, sendo sujeita à fiscalização, podendo ocorrer suspensão temporária ou definitiva. Além disso, por ocorrer os usos múltiplos na maioria das bacias hidrográficas, a outorga pode ser considerada uma solução de conflitos e mitigação dos mesmos (Brasil, 1997).

Assim, ainda sobre a Lei Nº 9.433/1997, a outorga deve assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água, afim de possibilitar o acesso à água como um direito a todos, considerando ao presente e às futuras gerações (Brasil, 1997).

3.4. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS

Os critérios para a classificação de barragens foram estabelecidos a partir da regulamentação do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) pela Lei nº 12.334/2010 com base em categorias de risco, dano potencial associado e volume do reservatório (Brasil, 2010). Ademais, a Resolução Nº 143, de 10 de julho de 2012 em seu art. 3º determina para a classificação das barragens é necessário seguir critérios gerais estabelecidos no CNRH,

podendo, entretanto, a entidade fiscalizadora adotar critérios complementares desde que sejam tecnicamente justificados (Brasil, 2012).

O sistema de classificação proposto pelo CNRH descreve em seu art. 7º que cabe aos agentes fiscalizadores classificar as barragens destinadas a quaisquer usos, tanto pela acumulação de água, como pela destinação final ou temporária de rejeitos e resíduos industriais. Entretanto, para o universo de barragens existentes atualmente no País, são contempladas pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) aquelas que possuem pelo menos uma das seguintes características (Brasil, 2012):

- Altura igual ou superior a 15 m;
- Volume não inferior a 3.000.000 m³;
- Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- Dano potencial associado médio ou alto.

Para a avaliação quanto ao Dano Potencial Associado devem ser considerados fatores como: o volume do reservatório, o potencial de perdas de vidas humanas e os impactos ambientais e socioeconômicos. Por outro lado, para a classificação do risco inerente à barragem considera-se as características técnicas, estado de conservação e implementação do Plano de Segurança de Barragem, podendo ambos ser enquadrados em riscos baixo, médio ou alto (Brasil,2012).

3.5. DANO POTENCIAL ASSOCIADO

De acordo com a Resolução nº 143/2012, a forma de classificação do Dano Potencial Associado (DPA) consiste em analisar e pontuar quatro descritores, da seguinte maneira (Brasil, 2012):

- Volume do reservatório;
- Potencial de perdas de vidas humanas;
- Impactos ambientais;
- Impactos socioeconômicos.

Cada um deles, de acordo com alguns fatores de subclassificação, soma uma pontuação de no máximo 30 pontos. Esses fatores, para cada descritor, estão apresentados na Tabela 3-1 a seguir.

O valor máximo na pontuação do Dano Potencial Associado de uma barragem é atingido quando há volumes muito grandes do reservatório e a área possível de ser afetada a jusante possua ocupação permanente de pessoas, sendo uma área de interesse ambiental relevante ou protegida e de alto interesse socioeconômico. Por outro lado, o valor mínimo, igual a quatro (4) pontos, ocorre quando o reservatório possui baixo volume, tendo área a jusante sem ocupação, de interesse ambiental não relevante ou não protegida e de sem qualquer instalação ou serviço de navegação (Banco Mundial, 2014).

Tabela 3-1 - Tabela auxiliar para classificação quanto ao Dano Potencial Associado.

Volume total do reservatório (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
PEQUENO <= 5 milhões m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0)
MÉDIO 5 milhões a 75 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)
GRANDE 75 milhões a 200 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (8)	-----	ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)
MUITO GRANDE > 200 milhões m ³ (5)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (12)	-----	-----

Fonte: Brasil (2012).

O descritor com maior relevância é o de potencial de perdas de vidas humanas, seguido do impacto socioeconômico e por último, com o mesmo valor, o volume do reservatório e o impacto ambiental.

Ainda de acordo com o Brasil (2012), as classes de Dano Potencial Associado (DPA) são:

- Baixo, com DPA menor ou igual a 10;
- Médio, com pontuação de DPA entre 10 e 16;
- Alto, com DPA maior do que 16 pontos.

3.6. MANCHA DE INUNDAÇÃO

A mancha de inundação constitui um dos principais produtos de um estudo sobre inundação de barragens, e auxilia na classificação da barragem quanto ao Dano Potencial Associado e também para a produção do Plano de Ação de Emergência (PAE). Além do polígono da mancha de inundação, podem ser obtidos outros resultados, como a elevação da onda, o tempo de propagação da onda de cheia e a sua velocidade. Porém, o principal objetivo da mancha de inundação é concluir qual a extensão e o tempo esperado de uma cheia resultante da ruptura de uma barragem (Balbi, 2008).

Entretanto, a importância da análise da velocidade das inundações é notória, já que os danos tendem a aumentar com acréscimos de velocidade, podendo arrastar edificações e outras estruturas reforçadas de construção. Assim, é importante serem definidas para a produção da mancha de inundação a velocidade da cheia e as elevações do nível de água a jusante do reservatório.

A Agência Nacional de Águas desejando auxílio na construção da segurança de barragens, para o desenvolvimento do processo de produção de mancha DPA e de classificação quanto ao Dano Potencial Associado, contratou o Banco Mundial.

Com a formação legal e institucional da segurança de barragens no Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) solicitou ao Banco Mundial assistência técnica voltada a auxiliar os seguintes objetivos:

- Auxiliar a ANA a revisar e detalhar normas, padrões, regulamentos, diretrizes e manuais;
- Auxiliar no monitoramento e na revisão de atividades sobre segurança de barragens;

- Auxiliar na formação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens;
- Auxiliar na capacitação da ANA e demais órgão responsáveis pela gestão da segurança de barragens.

Os resultados deste projeto foram disponibilizados entregues para a ANA em 15 documentos intitulados pelo Banco Mundial como produtos. Os produtos que descrevem a produção da mancha DPA e a classificação quanto ao Dano Potencial Associado são:

- Produto 4 – Proposta dos critérios de classificação de barragens (potencial e risco);
- Produto 6 – Proposta de Classificação de Barragens

3.7. ONDA DE CHEIA

A onda de cheia de um corpo hídrico ocorre de forma natural quando há precipitação na bacia hidrográfica e as águas precipitadas encaminham-se naturalmente para o ponto mais baixo do terreno – o exutório – chegam aos rios ou riachos que as conduzem para esse ponto final. Assim, as precipitações causam variações naturais na vazão ao longo do tempo em diferentes seções do curso hídrico e esta variação da vazão é conhecida como onda de cheia (Porto *et al.* 1998).

Entretanto, a onda de cheia também ocorre com o rompimento de uma barragem, já que esse acontecimento gera a variação da vazão do corpo hídrico a jusante da barragem. Neste sentido, a onda de cheia ao percorrer o curso do rio sofre um amortecimento, ou seja, a vazão de pico em uma seção é menor do que a da seção anterior.

Por sua vez, os MDT fornecem os subsídios para delimitação das bacias hidrográficas e são a base para estudos hidrológicos, podendo ser obtidos por meio das redes triangulares irregulares (TIN) a partir das altitudes de pontos do relevo terrestre ou curvas de nível.

3.8. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Os modelos hidrológicos são usados e necessários para estudos, projetos e no auxílio à gestão ambiental, devido à grande complexidade dos corpos hídricos. Esses modelos são ferramentas que permitem integrar informações sem as quais seria difícil adquirir uma visão dinâmica dos fenômenos observados nos sistemas hídricos. Os modelos também possibilitam prever situações a partir de cenários futuros (Holanda, 2010).

Desta forma, os modelos hidrológicos são considerados representações simplificadas da realidade, de forma a auxiliar no entendimento de diversos processos. Assim, a modelagem hidrológica pode ser uma construção teórica, no qual procura descrever e explicar como é o funcionamento de um sistema fluvial, por meio da representação de um fenômeno ou conjunto de fenômenos observados e realizar uma previsão de novos fenômenos, tendo como base certas hipóteses (Holanda, 2010).

A forma como a água escoar pode ser representado quantitativamente por variáveis relacionadas à velocidade, à profundidade e à vazão. Além disso, a análise desses estudos, realizada por meio de equações diferenciais (Equações de Saint-Venant), representam a conservação de massa e a quantidade de movimento do escoamento para simular a movimentação das águas em rios e canais (Barth *et al.* 1987). Assim, a modelagem dos sistemas hídricos pode ser utilizada de forma a fornecer subsídio técnico a tomadas de decisões referentes ao planejamento (Magalhães, 2005).

Os modelos hidrodinâmicos podem determinar a corrente em corpos hídricos e diversos comportamentos em corpos de água em superfície livre, variando sua complexidade, desde unidimensionais, bidimensionais, até modelos tridimensionais. Estes modelos hidrodinâmicos são frequentemente utilizados a fim de simular a variação da velocidade em função do tempo e espaço (Holanda, 2010).

O modelo hidrodinâmico HEC-RAS, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), possui diversas finalidades de aplicação e é conhecido para calcular inundação de bacia hidrográfica, mas também pode ser aplicado na modelação de temperatura de água e transporte de sedimentos, além, da simulação de ruptura de barragens. (Macedo, 2013).

O modelo resolve as Equações de *Saint-Venant* (Equações 1 e 2), descrita a seguir, no qual se busca por meio dela identificar a vazão e a profundidade em função do tempo e do espaço, devido a um escoamento variado e em um regime não-permanente, e desconsidera-se os efeitos do vento, o termo de expansão/contração (S_c) e o termo de viscosidade do fluido (S_i). Além disso, usa o método de diferenças finitas de quatro pontos ponderados, por meio da linearização e solucionador algébrico de matrizes lineares esparsas, para gerar um conjunto de equações de diferenças finitas.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S_c(A + A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad \text{Equação (1)}$$

$$\frac{\partial(S_m Q)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e + S_i \right) + L' + W_f B = 0 \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo,

Q = vazão, em m³/s;

h = elevação da superfície livre na calha fluvial, em m;

A = área ativa de escoamento no canal, em m²;

A₀ = área inativa de escoamento no canal (área de armazenamento onde a velocidade é desprezível), em m²;

Sc = coeficiente de sinuosidade que varia com h;

Sm = coeficiente de sinuosidade que varia com h;

x = variável independente relativa à direção da distância longitudinal do escoamento, em m;

t = variável independente relativa ao tempo, em s;

q = vazão específica lateral, em m/s.m;

β = coeficiente de Boussinesq, que corrige a distribuição não-uniforme da velocidade;

g = aceleração da gravidade, em m/s²;

S_f = declividade da linha de energia, em m/m, que equivale ao termo perda de carga unitária por atrito;

S_e = coeficiente de perda de carga localizada por expansão ou contração;

S_i = coeficiente de perda de carga associado à dissipação de viscosidade interna de fluidos não-Newtonianos;

L' = contribuição de momento da vazão afluyente lateral, em m³/s;

W_f = coeficiente de resistência do vento na superfície do escoamento, em m²/s²; e

B = largura superficial ativa da seção transversal, em m.

O modelo hidrológico implantado no software HEC-RAS possibilita a utilização de informações geográficas georreferenciadas em sua simulação, trazendo resultados úteis para a elaboração de mapas de inundação e de risco. Além disso, o *HEC-GeoRAS* é formado por um conjunto de procedimentos, ferramentas e utilidades para realizar o processamento geoespacial no *ArcGIS 10.5*, que prepara a geometria para ser importada para o HEC-RAS e, então, a simulação a ser processada neste software e manipulada no SIG ArcGIS. Utiliza-se para isto um modelo digital de terreno (MDT) do rio em formato TIN ou GRID. O usuário, então, cria uma série de pontos, linhas e polígonos, em extensão .shp, pertinentes na criação da geometria, pelo HEC-GeoRAS, a ser utilizada no HEC-RAS.

3.9.SENSORIAMENTO REMOTO

Segundo Meneses *et al.* (2012), o sensoriamento remoto é uma técnica de obtenção de imagens dos objetos presentes na superfície da Terra sem que haja contato físico entre o sensor e o objeto presente, ou seja, o sensor deve estar a uma distância remota do objeto. Além disso, os seguintes pontos devem ser considerados:

- Deve existir entre o objeto e o sensor ausência de matéria no espaço;
- As informações do objeto são transportadas pelo espaço vazio;
- A informação que chega até o sensor é por meio da radiação eletromagnética, a única forma de energia capaz de transportar pelo espaço.

Desta forma, o sensoriamento remoto é capaz de produzir imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações entre a radiação eletromagnética e os materiais terrestres (Meneses, *et al.* 2012). Ademais, segundo Santos (2013), o sensoriamento remoto é uma tecnologia que utiliza sensores para extrair informações ou fenômenos, sem que haja contato direto entre eles, e sem que o homem seja parte essencial do processo de aquisição de dados.

Com isso, o sensoriamento remoto é essencial para a Segurança de Barragem pois permite análises a uma distância do barramento em estudo, desde a classificação da barragem até a produção de Planos de Ação de Emergência (PAE), necessário para a evacuação das populações ribeirinhas.

3.10. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) é composto pela Informação Geográfica (IG) no qual descreve informações sobre locais na superfície da Terra, conhecimento sobre onde está situado algum objeto. Assim, um SIG é um sistema para entrada, manipulação e exibição de informações geográficas armazenadas em um banco de dados. Para isso é necessário possuir programas computacionais, equipamentos e recursos humanos que serão responsáveis por utilizar métodos para a aplicação do SIG, como pode ser observado na Figura 3-1, a seguir.



Figura 3-1 – Elementos do SIG.
Fonte: Ferreira (2006).

O SIG *ArcGIS* é formado por um conjunto de ferramentas em diferentes aplicativos computacionais de Sistema de Informações Geográficas (SIG), desenvolvido pela empresa ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) no qual possui caracteres avançados para a análise espacial, manipulação de dados e de cartografia (Santos, *et al.* 2014).

Segundo Alves (2017), este software possui três importantes componentes que serão descritos a seguir.

O *ArcCatalog* é o componente responsável por manipular todos os dados presentes no SIG, em operações, como copiar, renomear e apagar. O *ArcMap* disponibiliza funções de apresentação e visualização de planos de informações, enquanto que o *ArcToolBox* possui as ferramentas (algoritmos de geoprocessamento) para serem utilizadas no *ArcMap*. No ArcGIS é possível trabalhar com tipos de dados com variados formatos. Os arquivos que possuem dados vetoriais são os shapefile e é o formato desenvolvido apenas pelo ArcGIS (Alves, 2017).

Neste software, o armazenamento de dados espaciais é de dois formatos: vetorial e raster que são formas de representação do espaço por meio de estruturas geométricas. No formato vetorial, os dados são representados por pontos, linhas e polígonos. Por outro lado, o raster armazena informações em matrizes ou grades formadas por pixel – menor elemento da imagem – de resolução igual.

3.11. MODELO DIGITAL DE TERRENO

O MDT é uma representação matemática da variação altimétrica do relevo terrestre no qual possui um conjunto infinito de pontos com coordenadas (X, Y e Z). Os valores dos pontos são fornecidos a partir de uma superfície no qual os dados de x e y representam a posição na superfície terrestre e os dados de z equivale a cota do terreno (Holanda, 2010).

Deste modo, o MDT é uma ferramenta computacional no qual gera uma superfície representativa da distribuição espacial de uma determinada característica, possibilitando análise, manipulação e avaliação espacial contínua (Holanda, 2010).

Segundo Firkowski H. (2002), a Rede Triangular Irregular (TIN) é uma representação contínua do relevo utilizada na geração de MDT, de forma a organizar triângulos planos de forma que se aproximem de triângulos equiláteros, ou seja, que possuam seus lados com medidas aproximadamente iguais. O processo de interpretação da visualização de triângulos de um TIN permite perceber regiões mais e menos acidentadas a partir da dimensão relativa e da densidade de triângulos. Quando o relevo é acidentado, os triângulos são pequenos e presentes em maior densidade, entretanto, quando é menos acidentado, os triângulos são maiores e em menor densidade.

Os MDT são formados a partir dos TIN por meio de algoritmos inseridos em ambientes computacionais de SIG como o sistema *ArcGIS*.

3.12. METODOLOGIA DA MANCHA DE DANO POTENCIAL ASSOCIADO UTILIZADO PELA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

3.12.1. Premissas

A metodologia que será descrita a seguir foi introduzida pelo Banco Mundial, no ano de 2012, em contrato com a Agência Nacional de Águas (ANA), com intuito de definir os limites da área que potencialmente poderia ser comprometida pela ruptura de uma barragem. Esta metodologia foi desenvolvida de forma a atender ao disposto no art. 2, alínea VI, da Resolução Nº 143, de 10 de julho de 2012, do CNRH no qual descreve que o órgão fiscalizador deve determinar uma maneira no qual utilizará para classificar as barragens sob seu domínio quanto ao dano potencial associado (DPA).

Essa metodologia simplificada utilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA) foi baseada em subsídios fornecidos pelo Departamento de Segurança Interna dos EUA (2011). Por outro lado, a metodologia usa os mesmos valores obtidos na modelagem dos rompimentos de barragens, porém os valores são obtidos por correlações e suposições empíricas. Dessa forma, a metodologia, por ser simplificada, deve ser utilizada exclusivamente para a classificação do DPA, não devendo ser utilizadas nos Planos de Ação de Emergência (PAE) quando for exigido (Brasil, 2012).

De forma resumida, a metodologia após estimar o pico de vazão na seção da barragem (ponto inicial), deve ser determinada a atenuação da vazão de pico enquanto avança para jusante. Além disso, para calcular a velocidade da água deve ser identificado o tempo de deslocamento do pico da cheia entre a seção da barragem e a seção de interesse, e por fim calcular a cota máxima da água (profundidade de cheia) entre os mesmos pontos.

Esses parâmetros são controlados pela declividade do leito do canal, largura da seção transversal e confinamento do canal, pela rugosidade do canal e das margens e pela presença de água armazenada por outros reservatórios a jusante ou pela existência, quando houver, pelo deságue do mar.

A metodologia foi, então, desenvolvida em função de 2 fatores:

- Localização da barragem, dos cursos de água e da altimetria;
- Fórmulas empíricas utilizadas para a determinação da vazão máxima da onda de cheia, do amortecimento dessa onda de cheia com a sua propagação para jusante

e da extensão total da área de inundação, apresentadas mais adiante na Figura 3-4.

Além disso, foram consideradas algumas simplificações:

- Como consequência de uma ruptura, consideraram-se apenas os efeitos a jusante da barragem;
- Considera-se que não há possibilidade de desenvolver ações de emergência, inclusive de evacuar pessoas;
- Vazão máxima na seção da barragem: estimada utilizando expressões empíricas recomendadas na literatura para abordagens simplificadas, considerando que no momento de ruptura o reservatório encontra-se em seu volume máximo;
- Atenuação do pico de vazão máxima da onda de cheia: estimada de forma simplificada considerando a distância da barragem a seção e o volume do reservatório.

Mesmo a metodologia sendo simplificada, a mesma possui fundamentação técnica, baseada em fórmulas empíricas desenvolvidas em estudos de casos reais sobre ruptura de barragens e em modelos matemáticos de simulação de ruptura barragens.

Por este ser um método simplificado, a metodologia não é capaz de simular alguns aspectos hidrodinâmicos da onda de inundação, como por exemplo (Banco Mundial, 2012):

- Por admitir que o regime é permanente em cada uma das seções, considera-se que a vazão em cada uma delas é a vazão de pico estimada descrita anteriormente;
- Considerando que o nível de água no reservatório é constante e o mesmo do coroamento da barragem, está sendo ignorado que durante a ruptura da barragem o nível d'água é rebaixado progressivamente, dissipando energia;
- Admitindo um regime não variável, o modelo não é capaz de calcular, para cada uma das seções, a evolução temporal da velocidade de escoamento e o nível da água. Estes parâmetros são importantes na elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE), porém são dispensáveis para a realização da classificação quanto ao Dano Potencial Associado.

A seguir são descritas as etapas da metodologia simplificada desenvolvida pelo Banco Mundial em contrato com a ANA.

3.12.2. Cálculo da Extensão da Área Inundada a Jusante

Os pesquisadores Graham (1999) e Queensland (2012) fizeram análises em casos reais de rupturas de barragens e recomendaram que fosse considerado o volume máximo armazenado no reservatório como fator de maior relevância na determinação da distância a jusante até onde se fazer sentir os efeitos da onda de ruptura. Alguns resultados de estudos realizados com rompimentos de barragens nos Estados Unidos, entre os anos de 1960 e 1998 relataram que 50% das mortes ocorreram até 5 km a partir do ponto de rompimento da barragem, além disso, 99% dos acidentes com fatalidades ocorrem até 25 km da barragem (Graham, 1999).

Foram publicados no ano de 2010 estudos sobre rompimentos de barragens desenvolvidos no estado de Queensland, na Austrália, em que concluíram que a distância a jusante, onde os efeitos incrementados pelo rompimento da barragem causado pela chegada da onda de cheia ficam relativamente pequenos, é proporcional a capacidade de armazenamento, como pode ser observado na Tabela 3-2 a seguir (Banco Mundial, 2014).

Tabela 3-2– Relação entre a capacidade de armazenamento do reservatório e distância até onde a onda de cheia afetou a área a jusante da barragem.

Capacidade de Armazenamento (hm³)	Distância total a jusante (km)
20	Até 60
2	Entre 5 e 20
0,2	Entre 0 e 5

Fonte: Banco Mundial, 2014.

Assim, sugere-se que as distâncias inundadas a jusante sejam estimadas até o ponto onde se presume que os efeitos incrementais da cheia do rompimento da barragem não sejam percebidos por se confundir com a cheia natural. Desta forma, o intervalo de valores sugerido nesta metodologia está apresentado na Tabela 3-3 a seguir.

Tabela 3-3 – Relação entre a capacidade de armazenamento do reservatório e distância total recomendada para a análise a jusante da barragem.

Capacidade de Armazenamento (hm³)	Distância total a jusante (km)
≤ 5	Até 10
5 - 75	Entre 10 e 25
75 – 200	Entre 25 e 50
≥ 200	Entre 50 e 100

Fonte: Banco Mundial, 2014.

Entretanto, desejando-se automatizar os procedimentos de cálculos, os valores anteriormente citados foram adaptados ao se definir uma equação contínua no qual relaciona o volume armazenado e a distância máxima para jusante da zona que potencialmente será afetada com o rompimento da barragem. Para tal procedimento foram estabelecidos os limites inferiores (6,7 km) e superiores (100,4 km) de distância, para reservatórios entre 0 e 1.000 hm³, chegando a Equação 3 a seguir:

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

$$\text{Se } V_{max} \leq 1.000 \text{ hm}^3$$

Em que,

V_{max} : Volume máximo do reservatório, em hm³;

D_{max} : Distância máxima a jusante do reservatório, em km;

Por outro lado, quando o reservatório for maior que 1.000 hm³ não deve ser aplicada a Equação 3.3 e sim considerar o valor de 100 km para a distância máxima do reservatório, valor definido por meio de uma regressão utilizando o volume da barragem e distância para jusante.

Esta última etapa e algumas próximas foram automatizadas, por meio de programação, para utilização no *ArcGIS 10.5*, pela ANA denominada de *Etapa 0 – Prepara Ambiente* (Brasil, 2017). Algumas próximas etapas também foram automatizadas e podem ser visualizadas na Figura 3-2 a seguir, além de estarem descritas no decorrer desse trabalho.

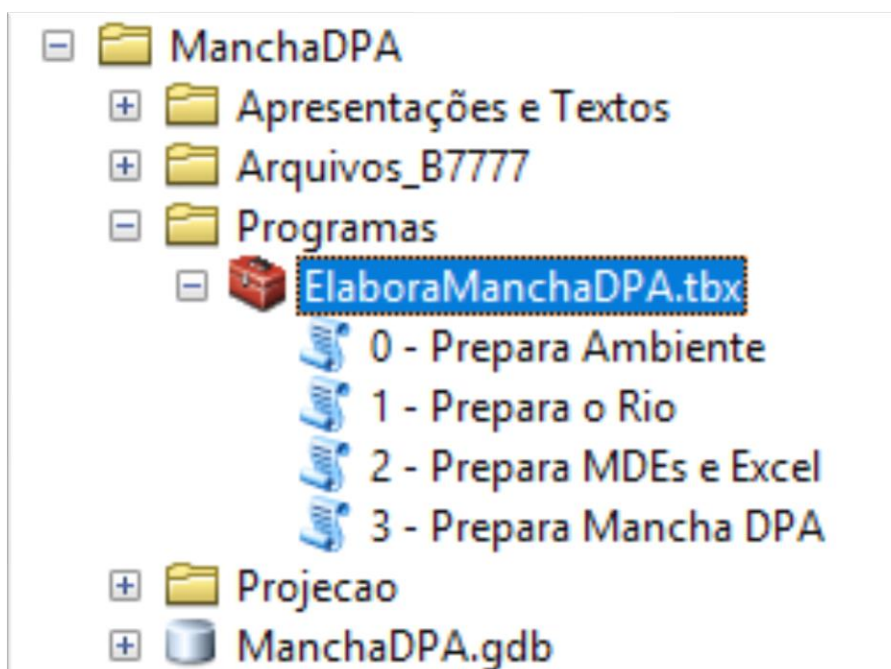


Figura 3-2 - Programas desenvolvidos para automatização do processo.
Fonte: ANA, 2017

3.12.3. Pico de Vazão no Rompimento da Barragem

Pierce *et al.* (2010) fizeram uma análise de diversas fórmulas empíricas que podem ser utilizadas no cálculo da vazão máxima associada a ruptura de barragens. No universo de fórmulas, parte delas depende apenas do volume do reservatório (V_{max}), outras apenas da altura máxima (H_{max}) e as demais de V_{max} e H_{max} .

Em outro estudo, Wahl (1998) analisou diversas equações para 145 casos reais de rompimento de barragens, de forma a realizar uma comparação entre o pico de descarga previsto por cada equação e o que efetivamente foi observado a partir dos dados coletados dos rompimentos dessas barragens. Ademais, Froehlich (1995) desenvolveu a Equação 4 empírica que apresentou resultados positivos dentre os resultados de outras pesquisas para o cálculo direto do pico de descarga do rompimento de uma barragem:

$$Q_p = 0,607 \times V_w^{0,295} \times H_w^{1,24} \quad \text{Equação (4)}$$

Em que:

Q_p : Vazão de Pico do rompimento de barragens (m^3/s);

V_w : Volume de água acima da base da brecha na hora do rompimento (m^3);

H_w : Altura da água acima da elevação na base do rompimento (m).

Desejando simplificar a metodologia, admite-se que o rompimento ocorre na crista da barragem e, também, com o reservatório cheio até a crista da barragem e sem fluxo adicional afluente ao reservatório. Assim, considera-se, para a Equação 4, que a altura máxima da barragem (H_{max}) equivale a H_w e o volume do reservatório a V_w .

Além da Equação 4 desenvolvida por Froehlich (1995), Pierce *et al.*, (2010) analisaram outros métodos e as fórmulas empíricas estão demonstradas na Tabela 4, a seguir.

Algumas conclusões foram geradas por Pierce *et al.* (2010) após a análise de dados disponíveis e das fórmulas monoparamétricas e multiparamétricas apresentadas acima, como o fato de as primeiras terem a tendência de conduzir a uma estimativa superior ao real, principalmente com barragens pequenas.

Tabela 3-4 - Fórmulas empíricas para estimar a vazão máxima por ruptura de barragens (adaptado de Pierce *et al.* 2010).

Tipo de Fórmula	Autor	Fórmula	Método
$Q_{max} = f(H_{max})$	Kirkpatrick (1977)	$Q_{max} = 1,268(H_{max} + 0,3)^{2,5}$	Melhor ajustamento
	SCS (1981)	$Q_{max} = 16,6(H_{max})^{1,85}$	Envolvente
	USBR (1982)	$Q_{max} = 19,1(H_{max})^{1,85}$	Envolvente
	Singh e Snorrason (1982)	$Q_{max} = 16,6(H_{max})^{1,85}$	Melhor ajustamento
$Q_{max} = f(V_{max})$	Singh e Snorason (1984)	$Q_{max} = 1,776(V_{max})^{0,47}$	Melhor ajustamento
	Evans (1986)	$Q_{max} = 0,72(V_{max})^{0,53}$	Melhor ajustamento
	MMC ¹	$Q_{max} = 0,0039(V_{max})^{0,8122}$	Ajustamento
$Q_{max} = f(V_{max}, H_{max})$	Hagen (1982)	$Q_{max} = 1,205(V_{max} \times H_{max})^{0,48}$	Envolvente
	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	$Q_{max} = 1,154(V_{max} \times H_{max})^{0,412}$	
	MacDonald e Langridge-Monopolis (1984)	$Q_{max} = 3,85(V_{max} \times H_{max})^{0,411}$	Envolvente
	Costa (1985)	$Q_{max} = 0,763(V_{max} \times H_{max})^{0,42}$	Melhor ajustamento
	Froehlich (1995)	$Q_{max} = 0,607(V_{max}^{0,295} \times H_{max}^{1,24})$	Melhor ajustamento

Fonte: Banco Mundial, 2014.

Além disso, as monoparamétricas, que utilizam como base o volume, são mais confiáveis do que as que utilizam a altura, devendo esta última ser utilizada apenas quando não se conhece as características de armazenamento do reservatório.

¹ Equação que resulta dos trabalhos conduzidos pelo USACE – Mapping, Modeling, and Consequences Production Center com base em estudos de 145 rupturas de barragens do USACE. (Relatório do Produto 4)

As multiparamétricas apresentaram previsões mais confiáveis que as monoparamétricas e, por fim, a de Froehlich (1995), descrita anteriormente, foi a que apresentou melhor correlação aos dados disponíveis. Desta forma, o Banco Mundial (2012) recomendou assim a sua utilização.

3.12.4. Cálculo da Vazão Máxima nas Seções Transversais

Com a propagação de montante para jusante da onda de ruptura da barragem ocorre uma atenuação do pico de vazão com o amortecimento do hidrograma unitário – gráfico que descreve, para o ponto de controle, o comportamento da vazão do curso d’água em função do tempo. Isto ocorre como consequência do volume de água armazenado, da geometria do vale a jusante, da capacidade de retenção de água pelo leito de cheia, da rugosidade e inclinação dos leitos e da presença de obstruções transversais e da erosão produzida pela ruptura.

Nas definições das abordagens simplificadas, deseja-se calcular o amortecimento da vazão máxima a partir do volume armazenado pelo reservatório e da distância em relação a barragem em análise. EUA (2011) definiu ábacos que descrevem a relação entre a razão da vazão máxima em uma certa distância a jusante e a vazão máxima na barragem com a distância a jusante, descrevendo, assim, a atenuação da vazão máxima a medida em que se distancia da barragem. A maior barragem utilizada pelo pesquisador para produção do ábaco possui vazão igual a 6.165.500 m³/s, aproximadamente 6,2 hm³. A Figura 3-3 descreve a atenuação descrita.

Assim, para reservatórios como volume inferior a 6,2 hm³ deduziu-se uma expressão de acordo com o proposto por EUA (2011):

$$\frac{Q_x}{Q_{max}} = a \times e^{b \cdot x} \quad \text{Equação (5)}$$

$$a = 0,002 \ln(V_{max}) + 0,9626 \quad \text{Equação (6)}$$

$$b = -0,20047(V_{max} + 25000)^{-0,5979} \quad \text{Equação (7)}$$

Em que:

Q_x – Vazão máxima em (m³/s) a distância x (km) da barragem;

Q_{max} – Vazão máxima na primeira seção, a da barragem (m³/s);

x – Distância em relação a barragem (m);

V_{max} – Volume do reservatório (m³).

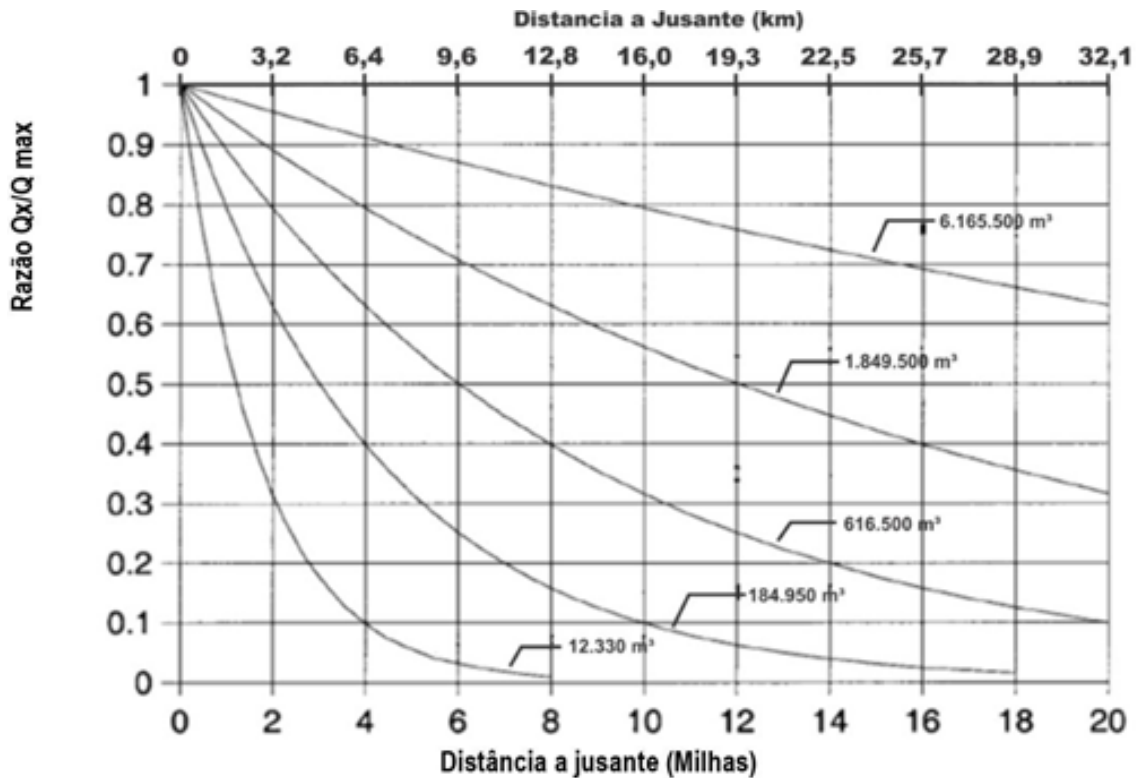


Figura 3-3 – Atenuação da vazão máxima com a distância para jusante da barragem.
Fonte: EUA (2011).

Por outro lado, quando o volume é superior a 6,2 hm³, a metodologia utiliza a expressão USBR (1986), descrita na Equação 8, a seguir.

$$Q_x = Q_{max} 10^{-0,01243x} \quad \text{Equação (8)}$$

Em que:

Q_x – Vazão máxima em (m³/s) a distância x (km) da barragem;

Q_{max} – Vazão máxima na primeira seção, a da barragem (m³/s);

x – Distância em relação a barragem (m).

3.12.5. Área inundada a jusante

Para esta etapa é necessário obter dados altimétricos do relevo. No período em que a metodologia foi proposta, os dados de melhor qualidade disponível eram os oriundos do Modelo Digital de Terreno (MDT) da Missão Topográfica com Radar Altimétrico (*Shuttle Radar Topography Mission - SRTM*), com resolução espacial igual a 90m x 90m. Entretanto, ultimamente já foi disponibilizado MDT com resolução melhor pela Administração Nacional Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos da América (*National Aeronautics and Space Administration – NASA*), de 30m x 30m, também do SRTM, sendo usadas desde então.

Além disso, após calcular a distância percorrida pela onda de cheia, utiliza-se o volume máximo da barragem e a topografia do terreno como insumo para obter as variações de largura do canal ao longo do vale e delimitar a largura da área inundada até a distância estimada.

3.12.6. Altimetria de seções perpendiculares ao canal principal onde se propaga a onda de Inundação

Na análise simplificada para classificação de barragem quanto ao DPA deve ser feito um estudo considerando um escoamento unidimensional no qual se utiliza de um conjunto de seções transversais ao longo do vale à jusante do reservatório para, assim, caracterizar sua capacidade de transporte. Deve-se possuir informações altimétricas sobre os talwegues e da altimetria por meio de um modelo digital de terreno.

Como primeira etapa, é necessário possuir um traçado do talvegue do curso d'água a jusante da barragem em base digital. O traçado do canal fluvial é feito com as ferramentas de edição vetorial do ArcMap sobre o MDT.

É interessante observar que a imagem possui um erro associado no qual o traçado da hidrografia não está posicionado da forma correta pois ele deveria estar sobre a hipsometria de 0 a 200 metros. Porém, este mapa visa demonstrar como o SRTM é utilizado para a composição do traçado do canal fluvial.

Caso essa informação não seja possível, pode-se realizar, por meio das imagens de satélite inserida no ArcMap ou *Google Earth*, calcular uma aproximação da linha do talvegue.

A seguir, como frequentemente o traçado do talvegue do rio é muito irregular as seções perpendiculares em relação ao escoamento se cruzariam em muitos pontos não trazendo um

resultado satisfatório para a mancha DPA. Assim, é necessário, a partir do *ArcMap*, seguir com a suavização do talvegue para que sejam estabelecidas as seções perpendiculares ao escoamento com ângulos menos acentuados entre si.

A última etapa é a de suavização do traçado do talvegue do rio, e para que as seções perpendiculares a serem utilizadas na análise sejam adicionadas, deve ser verificado o comprimento total do talvegue suavizado para então calcular a distância entre as seções, de acordo com a Equação 9 a seguir:

$$D_s = \frac{D_{max}}{n} \quad \text{Equação (9)}$$

Em que:

D_{max} : Distância Máxima do Reservatório, em km;

n: número de seções desejadas na análise.

Segundo a metodologia descrita pelo Banco Mundial (2014), o número de seções sugerido pela metodologia é vinte (20), pois este valor gera quantidade significativa de pontos de análise. Além disso, é necessário a partir da análise do MDT, um comprimento da seção transversal de forma que a área em torno do curso d'água seja suficientemente abrangente, a fim de que a análise abranja toda a área provável inundável.

As seções geradas em relação ao talvegue do rio suavizado, como exemplo, podem ser visualizadas na Figura 3-4, a seguir.

Em seguir, deve ser feita a interpolação da cota altimétrica de cada ponto da seção utilizando as cotas no MDT. Esta tarefa é realizada pela etapa 02 – *Prepara MDEs e Excel*, apresentada na Figura 3-2.

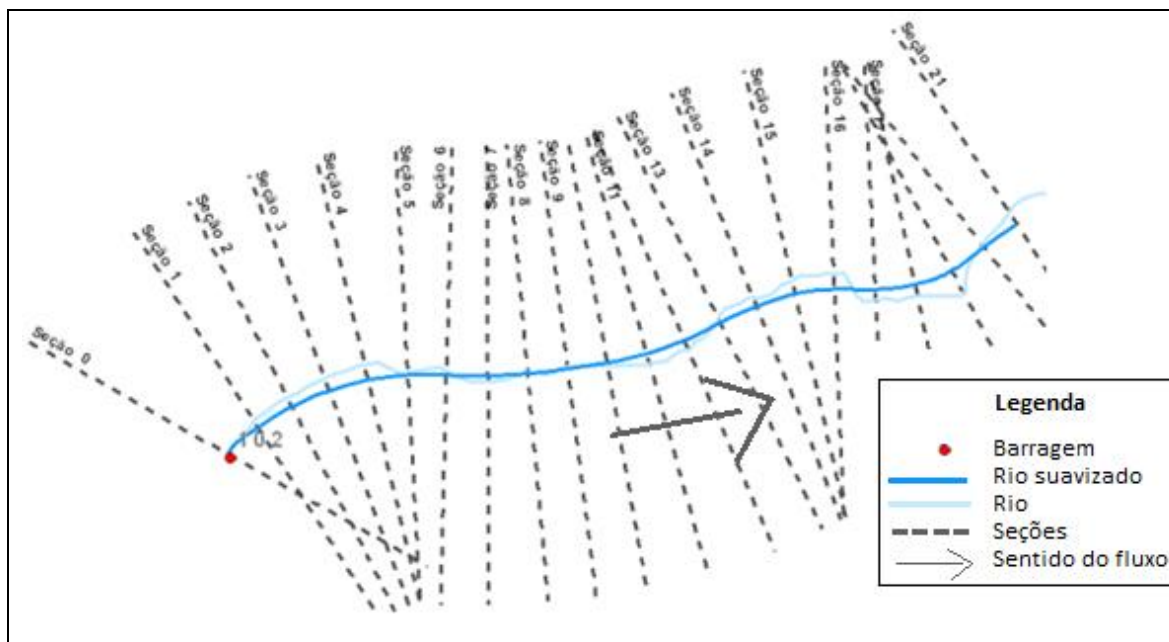


Figura 3-4 - Seções transversais por onde são extraídas as cotas do terreno.

Fonte: Modificado de Banco Mundial (2014).

3.12.7. Cálculo do Nível Máximo da Onda de Cheia em cada uma das Seções

Para facilitar e automatizar o cálculo do nível máximo da onda de cheia em cada seção transversal, a metodologia simplificada desenvolvida pelo Banco Mundial entregou como resultado uma planilha do Excel no qual carrega os dados altimétricos referentes a cada seção transversal utilizando o MDT do SRTM. Essa etapa também é gerada no *ArcGIS 10.5* pelo programa 2 – *Prepara MDEs e Excel*, conforme consta na Figura 3-2.

A planilha é estruturada de forma a designar a seção S0 para a seção da barragem e as seções seguintes separadas de forma a totalizar 20 seções no decorrer da linha do talvegue do rio. Além disso, existe a seção 21 que serve de auxílio permitindo estabelecer a condição de fronteira à jusante, admitindo-se um escoamento de regime permanente e altura uniforme.

Ademais, a planilha gera resultados da capacidade de transporte de cada seção transversal com base na *equação de Manning-Strickler* (Equação 10):

$$\frac{Q_x}{\sqrt{j}} = K_s \cdot A \cdot R^{2/3} \quad \text{Equação (10)}$$

Em que:

Q_x - a vazão máxima à distância x da seção da barragem (m³/s);

j - a inclinação da linha de energia;

K_s - o coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler, valor admitido de $K_s=15$ $m^{1/3}s^{-1}$;

A - a área da seção de escoamento (m^2);

R - o raio hidráulico da seção de escoamento (m).

Os resultados gerados pela planilha resultante dos cálculos hidráulicos estão apresentados na Tabela 3-5 a qual apresenta os níveis de água máximos em cada uma das seções transversais.

Tabela 3-5 - Níveis máximos atingidos pela onda de inundação em cada uma das seções transversais (S = seção), resultante da aplicação do método simplificado.

Perfil	Cota máxima da Superfície Livre (m)
S0	665,05
S1	660,99
S2	655,64
S3	646,88
S4	642,35
S5	639,59
S6	636,26
S7	635,08
S8	632,24
S9	618,34
S10	609,08
S11	596,21
S12	588,91
S13	581,43
S14	568,81
S15	553,92
S16	499,96
S17	445,51
S18	409,77
S19	381,19
S20	369,25

Fonte: Banco Mundial (2014).

3.12.8. Superfície Máxima de Inundação

Após o cálculo das alturas máximas de inundação em cada uma das seções, adiciona-se o resultado ao *ArcMap* e as associa ao shapefile de linhas da seção gerando em cada uma das linhas um nível máximo de inundação, conforme apresentado na Figura 3-5.

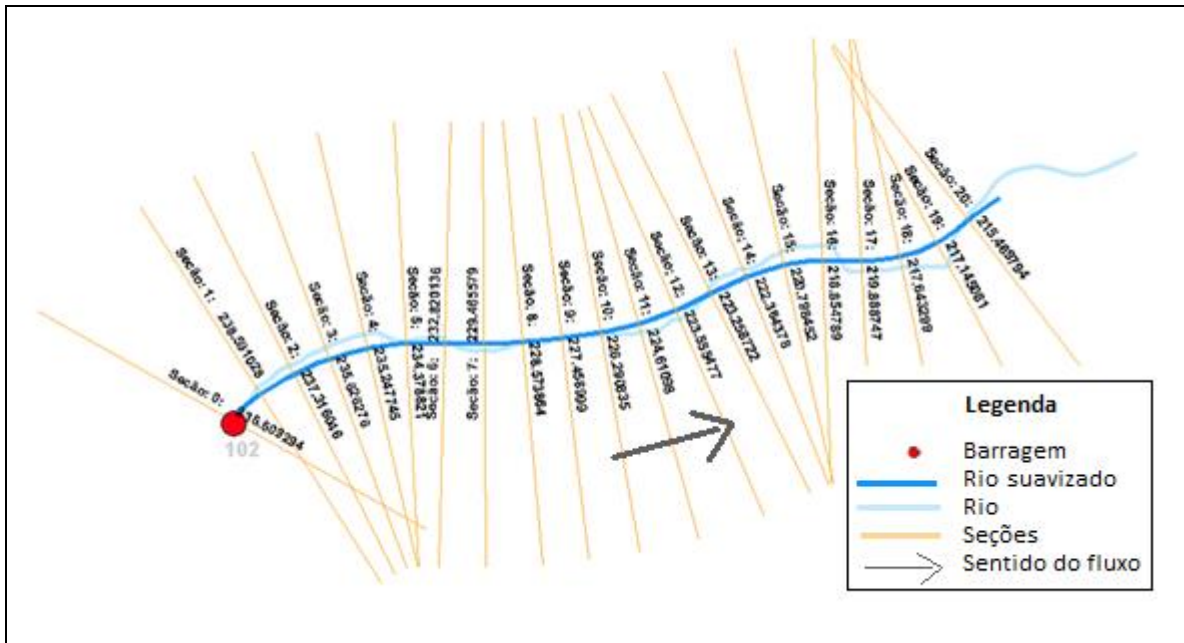


Figura 3-5 - Altura de Inundação em cada seção transversal.
 Fonte: Modificado de Banco Mundial (2014).

Após essa etapa, o software gera uma superfície de máxima inundação a partir do MDT que está em formato de grade, em formato TIN, rede triangular irregular. Na Figura 3-6, a seguir, pode ser observado um exemplo do MDT da superfície de máxima inundação em formato TIN. Esses dois processos ocorrem no programa de Etapa 3 – *Prepara ManchaDPA*, apresentados na Figura 3-1.

A geração de um modelo de rede, podendo ser regular ou irregular, compreende a formação de uma malha e a definição de funções locais de interpolação, nos quais são definidas para cada elemento da malha. De forma prática, o TIN pode ser criado em campo por meio de um levantamento altimétrico (Felgueiras, 1998).

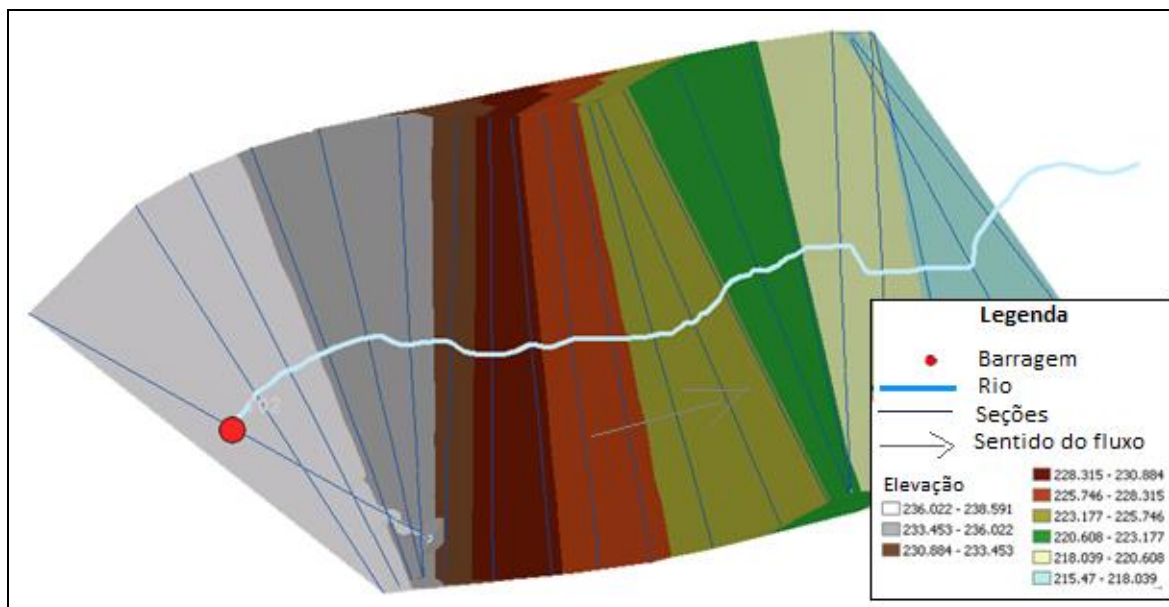


Figura 3-6 - Cálculo da superfície de máxima inundação a partir de um MDT em formato TIN.

Fonte: Modificado de Banco Mundial (2014).

3.12.9. Delimitação da Zona de Inundação

A metodologia utiliza novamente o MDT da superfície de máxima inundação em formato TIN para criar uma rede de pontos irregularmente distribuídos da altura do terreno, limitando uma variação altimétrica superior a 1 m em relação ao valor médio do MDT, ou seja, ao analisar a altitude de qualquer local essa diferença não seja superior a 1 m em relação à altitude gerada no modelo digital de terreno. O resultado dessa etapa pode ser visualizado, como exemplo, na Figura 3-7, a seguir.

Também, por meio do *programa 3 – Prepara ManchaDPA* apresentado na Figura 3.1 e implantado no ArcMap e possuindo a delimitação da zona de inundação da altura de inundação máxima gerada anteriormente, descrita no item 3.3.8, com o MDT em formato TIN, o programa gera automaticamente as diferenças positivas de altitude. As diferenças que derem valor negativo conservam-se o valor 0 pois essas áreas possuem altitude superior a altura máxima de inundação, ou seja, constituem áreas não inundadas, situando-se o terreno acima da superfície máxima de inundação.

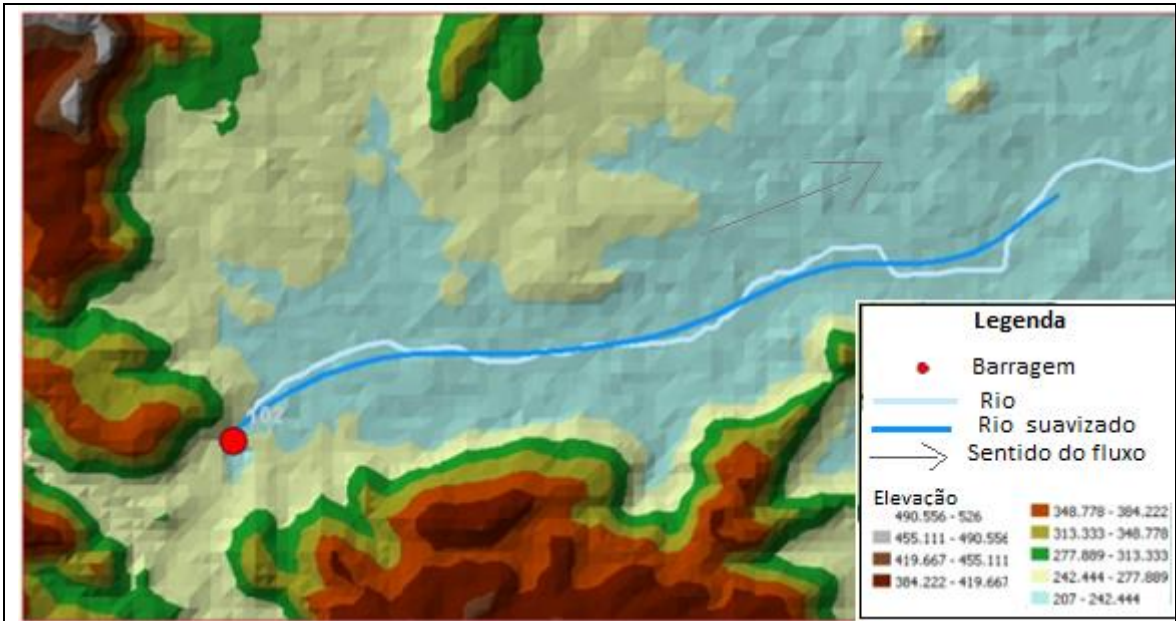


Figura 3-7 - TIN de altitude do terreno.
 Fonte: Modificado de Banco Mundial (2014).

A área resultante desse processo forma a superfície de inundação pode ser visualizada, como exemplo, na Figura 3-8, a seguir.

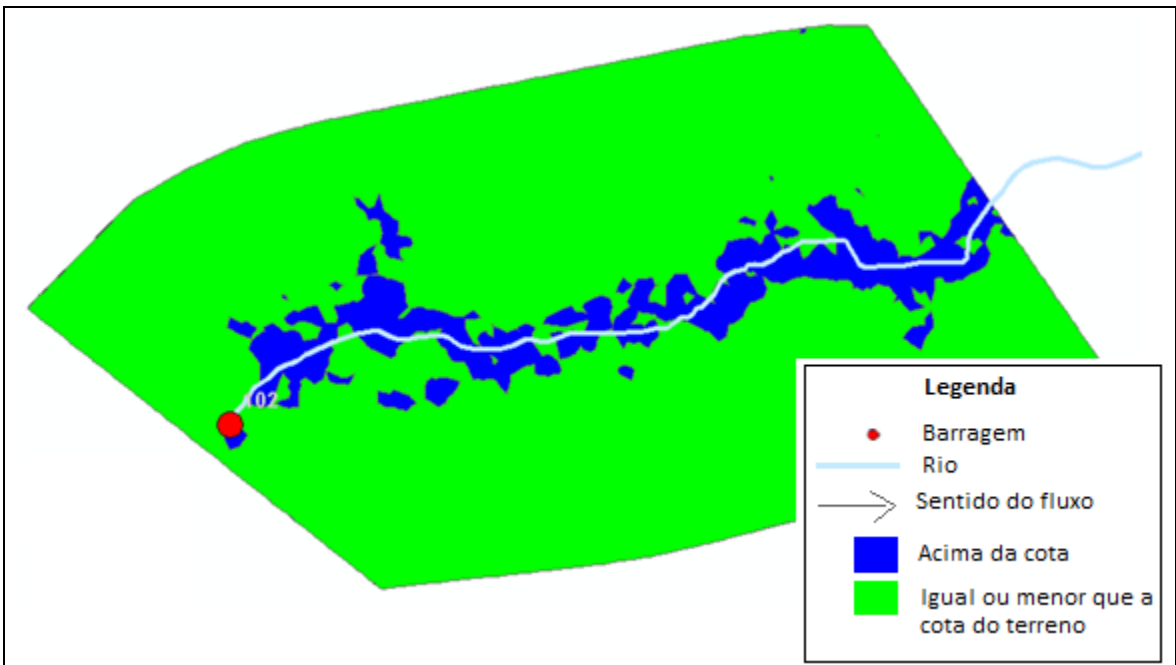


Figura 3-8 - Área de Inundação resultante da diferença de altitudes.
 Fonte: Modificada de Banco Mundial (2014).

Ao observar a Figura 3-8 ao longo do canal principal, percebe-se a existências de discontinuidades na área inundável e a existência de áreas inundadas a montante da

barragem. Além disso, outras vezes acontece de apresentar uma área inundada muito distante do corpo principal.

Nesses casos é necessário fazer a correção por meio de edição manual. Isto ocorre com maior frequência quanto menor for a resolução espacial do modelo digital de terreno utilizado, com isso, é importante levar em consideração esse aspecto nas etapas seguintes.

Em algumas situações observa-se que ao calcular a mancha DPA pela metodologia simplificada e utilizando as seções que foram geradas automaticamente pelo *software ArcMAP*, a área de inundação ocupa também as áreas ao longo de dois afluentes, conforme apresentado no exemplo da Figura 3-9 a seguir.

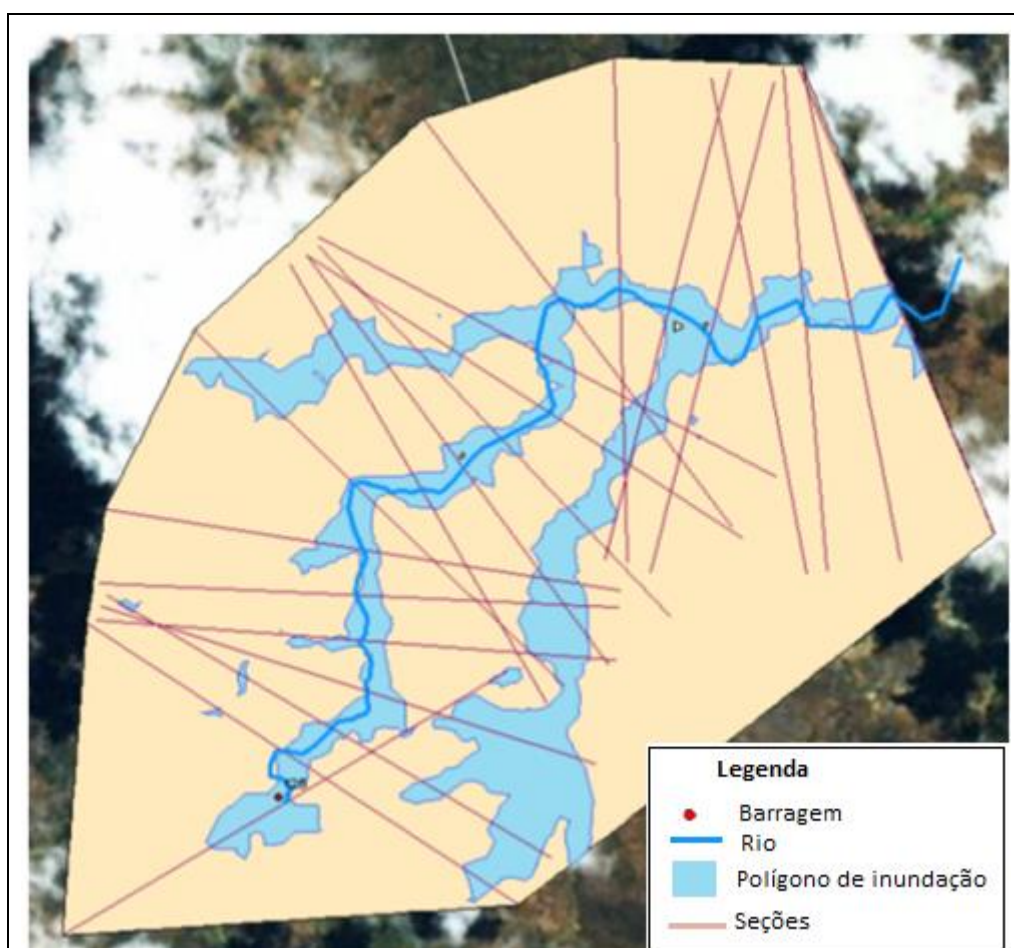


Figura 3-9 - Representação das seções originais e da mancha de inundação.
Fonte: Banco Mundial (2014).

Assim, as alturas máximas de inundação nessa superfície crescem à medida que se evolui para montante no afluente esses pontos estão com cotas inferiores à de inundação gerando como resultado valores positivos no MDT em formato TIN. Mas na realidade, esta área já

tem uma altura menor e não é influenciada pela inundação gerada pela barragem. Desta forma, procede-se uma edição com ferramentas de edição vetorial do ArcMap as alterações da direção nas extremidades das seções, considerando o terreno. Após a fase de edição, deve ser repetida a etapa para determinação da área de inundação no MDT em formato TIN, porém com a nova superfície máxima de inundação e, em seguida, subtrair os valores originais do MDT.

3.12.10. Existência de Barragens em Cascata

Para fazer a análise e a classificação de barragem em cascata, ou seja, quando há uma barragem seguida de outra em um mesmo canal fluvial, deve-se primeiramente realizar a classificação das barragens de forma isolada seguindo com a verificação da ruptura em cascata. Assim, quando a ruptura isolada leva a uma classificação de DPA baixo ou médio, deverá ser considerado procedimentos adicionais em termos da classificação de forma a analisar se, a jusante, existem barragens com classificação de DPA maior que a barragem em estudo.

Na hipótese de ocorrer DPA maior que a barragem em estudo, devem ser analisados os volumes do reservatório e altura da barragem de forma a aferir, mesmo que de forma simplificada, se uma barragem que rompa possa vir a induzir a ruptura da barragem seguinte. Caso isto seja possível, deve transmitir a classificação mais gravosa das barragens em cascata a jusante.

As considerações feitas nessa análise são:

- A barragem a jusante não descarrega o volume afluente em resultado da ruptura a montante, admitindo que o seu vertedouro esteja obstruído, a soleira livre deste foi alterada irregularmente para aumento da capacidade de armazenamento e as comportas, caso houver, estão inoperacionais;
- A barragem a jusante, caso a capacidade de armazenamento permitir encaixar o volume afluente da barragem a montante totalmente na faixa da soleira livre, quando receber a onda de ruptura não rompe. Caso contrário, rompe.

Desejando determinar o volume disponível na barragem a jusante que seria capaz de receber o efluente de outra barragem em cascata, calcula a borda livre. Caso haja falta de dados referentes ao volume da barragem, e tornar a reclassificação possível, a metodologia sugere

que sigam os valores da Tabela 3-6 a seguir como base de referência para estimar o volume armazenado entre o nível máximo e o do coroamento da barragem, ou seja, a borda livre.

Tabela 3-6 - Estimativa do volume armazenável na faixa da borda livre em função da altura da barragem.

Altura da barragem de jusante	Porcentagem do volume do reservatório na faixa da borda livre
$0 \text{ m} \leq H < 3 \text{ m}$	20%
$3 \text{ m} \leq H < 15 \text{ m}$	10%
$15 \text{ m} \leq H < 60 \text{ m}$	5%
$60 \text{ m} \leq H$	3%

Fonte: Banco Mundial (2014).

Segundo o Banco Mundial (2014), estes valores foram obtidos baseando-se em dois conjuntos de barragem, são eles:

- Oito barragens com alturas de até 7 m (Poty, Bom Sucesso, Direito, Maria Paes, Martelo, Água Azul, Trincheiras, José Líbano);
- Oito barragens portuguesas com altura entre 70 e 140 m, indicadas em Coba e Procesi (2007), são elas: Pinhosão, Padroselos, Daivões, Fridão, Girabolhos, Alvito, Foz Tua e Alqueva.

3.13. CRITÉRIOS SUBSTITUTOS INSTITUÍDOS PELA ANA NA CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO

São apresentados a seguir os critérios que foram modificados pela Agência Nacional de Águas, mantendo-se em acordo com a Resolução N° 143.

3.13.1. Quanto às imagens de satélites

Quando as imagens de satélites disponíveis no Google Earth ou no ArcMap não apresentarem resolução espacial suficiente ou estiverem com nuvens deve ser realizada a classificação do DPA sempre pelo lado da segurança, considerando os descritores de “potencial de perdas de vida humana” e impacto socioeconômico” com o valor máximo.

3.13.2. Potencial de perdas de vidas humanas

Para este descritor que possui um peso muito alto na classificação quanto ao dano potencial associado, a Agência Nacional de Águas considera os seguintes critérios na observação das imagens de satélite:

- Quando não há edificações, atividade agrícola ou industrial e vias de comunicação, considera-se a pontuação da categoria “inexistente”;
- Quando há estradas de terra, considera-se a pontuação em relação à categoria “pouco frequente”;
- Quando se observa atividade agrícola, industrial ou vias de comunicação asfaltada, a pontuação equivalente é a de “frequente”;
- Caso haja indícios de edificações, admite-se, com postura conservadora, que sejam ocupações permanentes e que existe risco de vida, considerando a pontuação do critério “existente”.

3.13.3. Impacto ambiental

A fim de classificar o DPA quanto ao impacto ambiental associado à ruptura de uma barragem, utiliza-se o arquivo de zonas protegidas (produzida e vinculada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE) em formato *shapefile*. Então, observa-se se houve sobreposição da zona de inundação com a zona protegida. Caso não tenha sido observada sobreposição, a pontuação para a classificação quanto a este critério é mais baixa.

A Tabela 3-7 a seguir descreve os níveis de informação presentes nos arquivos digitais em formato *shp* das zonas protegidas brasileiras fornecidos pelo IBGE.

Tabela 3-7 - Níveis de Informação fornecidos pelo IBGE para as zonas protegidas.

Ambientais	Subconjunto Unidade de Conservação	Culturais
LM_AREA_DE_PRESERVACAO_PERMANENTE LM_RESERVA_ECOLOGICA LM_RESERVA_FLORESTAL LM_AREA_HISTORICA LM_AREA_MILITAR LM_MONUMENTO	LM_UC_AREA_DE_PROTECAO_AMBIENTAL LM_UC_AREA_DE_RELEVANTE_INTERESSE_ECOLOGICO LM_UC_ESTACAO_ECOLOGICA LM_UC_FLORESTA LM_UC_PARQUE LM_UC_REFUGIO_DE_VIDA_SILVESTRE LM_UC_RESERVA_BIOLOGICA LM_UC_RESERVA_DE_DESENVOLVIMENTO_SUSTENTÁVEL LM_UC_RESERVA_EXTRATIVISTA	LM_TERRA_INDIGENA

Fonte: Banco Mundial (2012).

3.13.4. Impacto socioeconômico

Os critérios definidos para classificar o DPA quanto ao impacto socioeconômico pela ANA são:

- A existência de povoados ou grandes concentrações de edificações (maior que 30) resulta automaticamente em impacto alto;
- Quando existem mais de 5 até 30 instalações residenciais, comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem considera-se como a pontuação do critério médio;
- Caso haja entre 1 e 5 instalações residenciais, comerciais, agrícolas, industriais ou infraestrutura na área afetada da barragem o critério deve ser classificado como baixo;
- Por outro lado, não havendo quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem, considera-se para fins de classificação como inexistente.

Os mapas de uso e cobertura do solo são importantes para ao analisar uma região identificar o que a área possui e observar a modificação do solo na região, por exemplo, com o

crescimento da área urbana ao longo dos anos pode ser identificada ao comparar mapas de uso e cobertura do solo de épocas distintas.

3.14. USO E COBERTURA DO SOLO

O uso e cobertura da terra são dois conceitos constantemente confundidos, mas se diferem entre si. O primeiro refere-se às atividades humanas desenvolvidas na paisagem natural, ou seja, a finalidade que aquele solo tem para a atividade humana, que frequentemente altera as condições de equilíbrio natural. (Turner *et al.* 1994) A primeira consequência da intervenção humana é a alteração da cobertura vegetal (Crepani *et al.* 2001). Por outro lado, a cobertura do solo corresponde à caracterização da superfície quando relacionado aos meios físicos, biológicos e químicos.

É importante realizar a análise do uso e cobertura do solo, pois desta forma é possível conhecer o ambiente, podendo monitorar o local utilizando-o como instrumento para o planejamento da utilização do solo (Venturieri e Santos, 1998).

O sensoriamento remoto e o geoprocessamento, por possuir uma frequência de atualização de dados, agilidade no processo e por ser viável economicamente, estão sendo amplamente utilizadas para monitorar a dinâmica de uso e cobertura do solo. Este processo de produção de mapas de uso e cobertura do solo é realizado utilizando algoritmos de SIG que realizam o processamento de imagens do tipo registro, filtragem, pré-processamento e classificação temática. A classificação temática ocorre a partir da classificação em sete classes temáticas de uso e ocupação do solo.

Por conseguinte, a partir do mapa de uso e ocupação do solo da bacia foi possível determinar o coeficiente de escoamento superficial ou número de flúvio (CN) médio da bacia.

Sartori *et al.* (2005) realizaram um estudo no qual foi possível enquadrar diversos tipos de solo em quatro grupos, identificadas com as letras A, B, C e D, como pode ser visualizada na Tabela 3-8, a seguir.

Desta forma, o coeficiente CN é um parâmetro utilizado em hidrologia que relaciona os grupos hidrológicos do solo a partir do uso da terra com a defesa contra erosão e a condição hidrológica de infiltração, auxiliando na estimativa do escoamento superficial do solo (Tucci *et al.* 1993). De acordo com Tucci et al (1993), foram identificados os valores para bacias rurais e urbanos, como na Tabela 3-9, a seguir.

Tabela 3-8: Grupo de solos e características do solo

Grupo de solo	Características do solo
A	Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%. Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila.
B	Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada que a camada superficial. Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média
C	Solos barrentos com teor total de argila de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidade de 1,2m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5m. Nota-se a cerca de 60cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade. Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo
D	Solos argilosos (30% a 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50cm de profundidade. Ou solos arenosos como do grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados. Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial

Fonte: Tucci *et al.* (1993).

Assim, é possível calcular o CN médio por meio da Equação 3.11, a seguir.

$$CN_{méd} = \sum \frac{A \times CN}{A_{total}} \quad \text{Equação (3.11)}$$

Em que:

CNméd – Coeficiente da curva de *runoff* médio;

CN – Coeficiente da curva de *runoff*;

A – Área de cada amostra;

ATotal – Área total.

Tabela 3-9: Valores dos números CN da curva de *Runoff* para bacias rurais.

Uso do solo	Superfície do solo	Grupo do Solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curva de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras Estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: Tucci *et al.* (1993)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo será o barramento com nome de Barragem N° 5 Fazenda Manga, localizada no Distrito Federal, na Unidade Hidrográfica do Rio São Bernardo, na Bacia Hidrográfica do Rio Preto.

A Barragem N° 5 Fazenda Manga localiza-se nas coordenadas geográficas de latitude sul de 16° 1' 54.30" e longitude oeste de 47° 27' 39.60", como pode ser visualizada a seguir, na Figura 4-1. O empreendimento está em operação, possuindo 0,871 hm³ de volume, altura acima da fundação de 15 m e, além disso, o seu uso principal é a irrigação agrícola.

Além disso, a barragem escolhida para este trabalho baseou-se no fato de estar situada no Distrito Federal e por ser uma barragem regulada e fiscalizada pela Agência Nacional de Águas, ou seja, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) esta é uma entre as 136 barragens que estão situadas em rios de domínio da União, em que apenas 11 situam-se no Distrito Federal.

A atividade econômica de maior importância para a região é a agricultura seguida da pecuária, possuindo atividades secundárias de menor importância para a UH do Rio São Bernardo.

4.1.1. Características Fisiográficas

A vegetação predominante na UH é o Cerrado, possuindo todos os tipos de vegetação, desde vegetação de porte elevado até ervas esparsas, formando um mosaico de mata de galerias e ciliares em torno da drenagem de rios (Eiten, 1994).

O clima enquadra-se no do Distrito Federal, do tipo tropical de savana e temperado chuvoso de inverso seco, possuindo duas estações típicas: inverso seco e verão chuvoso.

Localização da Área de Estudo

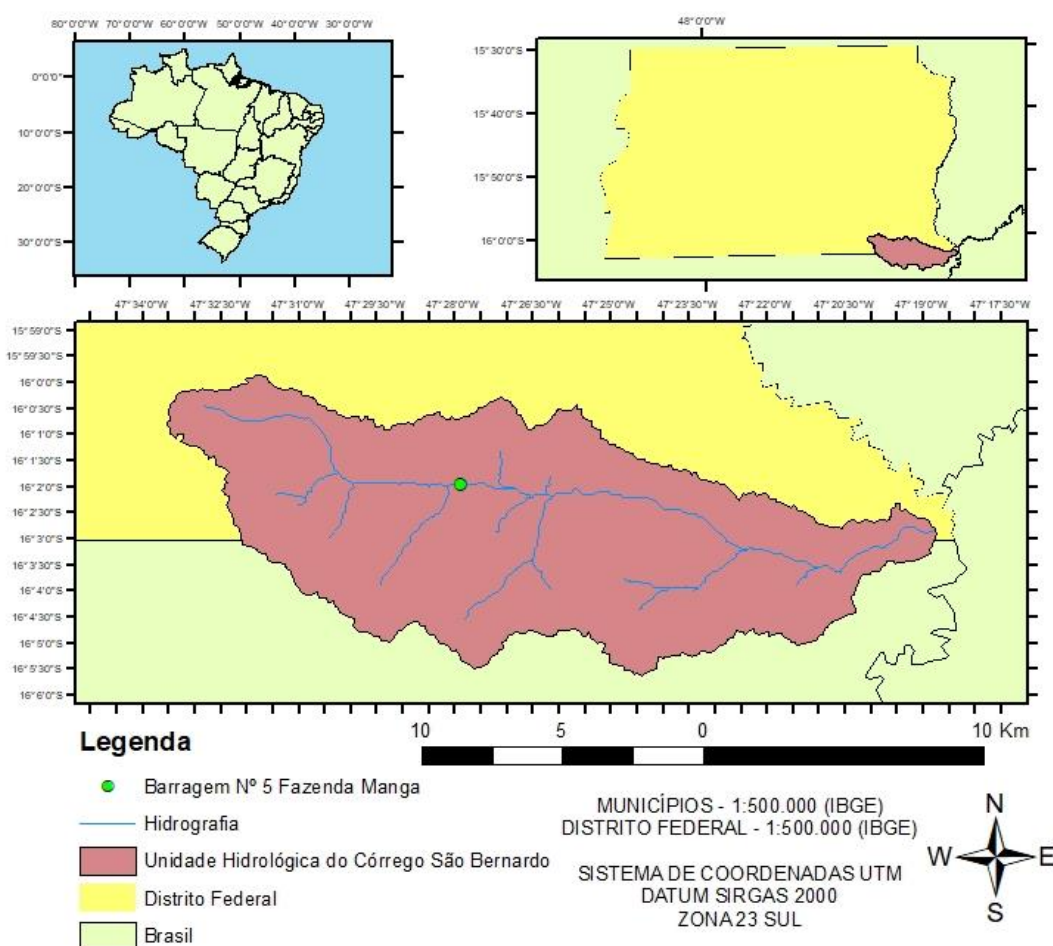


Figura 4-1 – Localização da área de estudo

4.2. MATERIAIS

4.2.1. Softwares

Para o presente estudo foram utilizados, como principais instrumentos, os aplicativos computacionais *ArcGIS* 10.5 e *SPRING* 5.5.1 que são *softwares* de SIG utilizados para classificação temática de imagens de sensores remotos, a fim de produzir dados georreferenciados, processar imagens e gerar mapas, como o mapa de uso e ocupação do solo e o mapa de mancha DPA.

Além desses softwares, utilizou-se o sistema *HEC-RAS* 5.0.3, desenvolvido pelo USACE, a fim de simular a ruptura da barragem e analisar as consequências da onda de ruptura.

4.3.BASE DE DADOS

4.3.1. Dados de sensores remotos orbitais

Para a produção de mancha DPA e análise da classificação quanto ao Dano Potencial Associado foram utilizadas imagens do satélite *LandSat* 8, do ano de 2017 e obtidas gratuitamente pelo site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), além de Modelos Digitais de Terreno (SRTM) fornecido pela NASA, com resolução espacial de 30 metros (INPE, 2017 e EUA, 2017).

Por outro lado, para a produção dos mapas de uso e ocupação do solo foram considerados os anos de 2000 (Landsat 5, Sensor TM) e 2017 (Landsat 8, Sensor OLI). As imagens de satélite e os MDT utilizados estão na Tabela 4-1, a seguir, além das respectivas datas de obtenção, resoluções espaciais e fontes.

As imagens foram escolhidas nesse período por ser tempo seco, facilitando a obtenção de imagens sem a presença de nuvens.

Tabela 4-1 – Informações das imagens de satélites.

Tipo de Dado	Data	Resolução Espacial	Fonte
Imagem (LandSat 5, sensor TM)	26/06/2000	30	United States Geological Survey (USGS)/EUA
Imagem (LandSat 8,sensor OLI)	26/06/2017	30	United States Geological Survey (USGS)/EUA

4.3.2. Dados de outorgas

Para a análise do consumo de água na bacia, assim como, para determinação de qual o uso mais amplamente utilizado foi concedido pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA) os dados referentes as outorgas autorizadas na região da Unidade Hidrográfica do Rio São Bernardo representada na Figura 4-2, pertencente ao território do Distrito Federal.

4.3.3. Dados Meteorológicos

Ademais, foram obtidos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), dados diários de precipitação (mm) da Estação Brasília, estão mais próxima da área de estudos, correspondentes a um período de vinte anos (1997 a 2017).

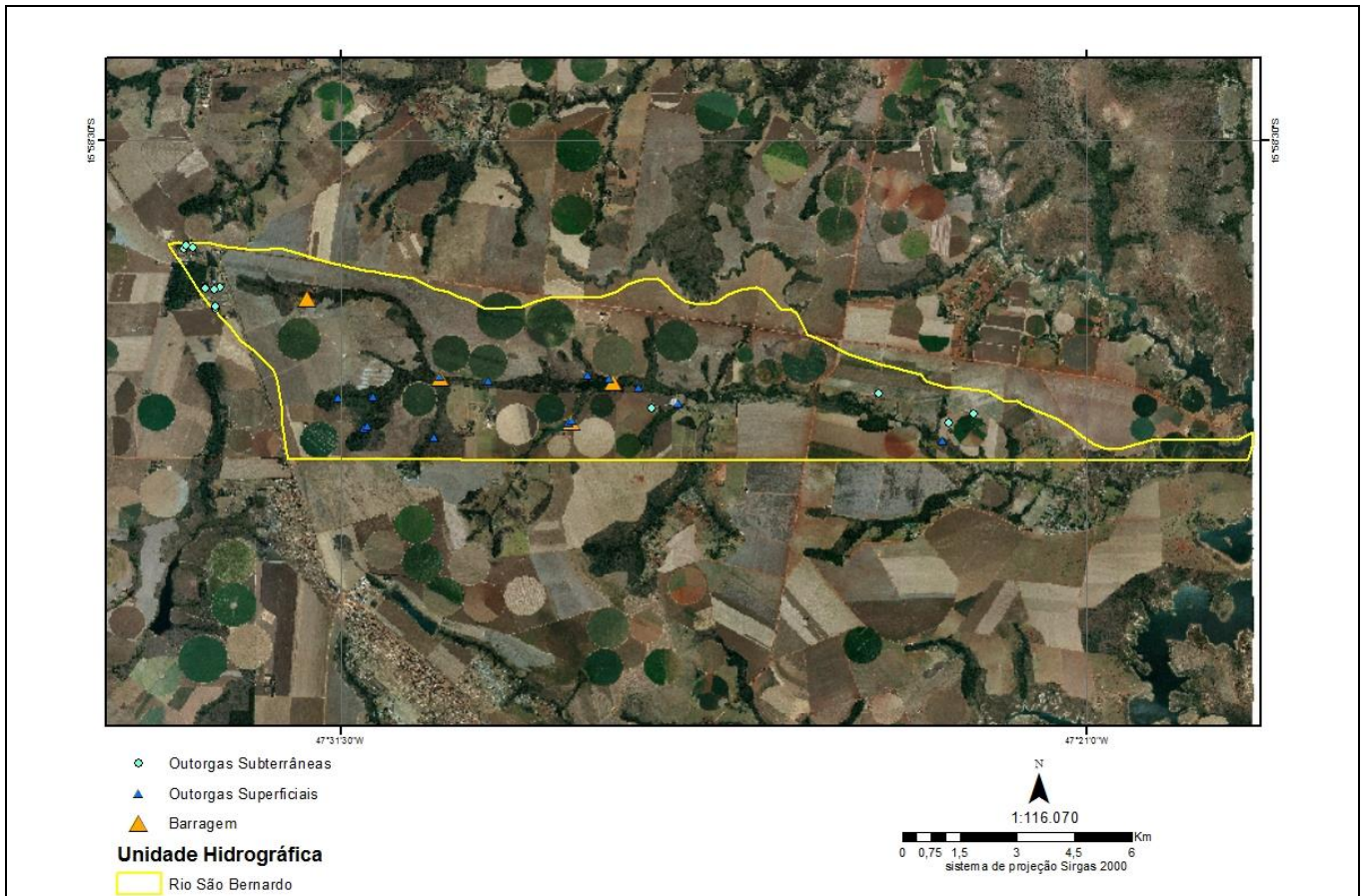


Figura 4-2 - Outorgas na Unidade Hidrográfica do Rio São Bernardo.

4.3.4. Dados utilizados no *HEC-RAS*

A Tabela a seguir apresenta todas os dados obtidos nesse estudo e utilizados para a simulação do modelo hidrológico do *HEC-RAS*.

Tabela 4-2 – Dado sutilizados na simulação com o software *HEC-RAS*

Dados	Valores
Seção da Barragem	16200,10
Centro da Brecha (m)	2565,54
Cota máxima (m)	891
Tempo de formação da brecha (h)	0,1
Profundidade normal (inclinação)	0,007
Elevação do reservatório (m)	891
coeficiente de manning (2000)	0,02 (canal principal e secundário)
coeficiente de manning (2017)	0,02 (canal principal) e 0,35 (Canal secundário)

4.4. METODOLOGIA

O fluxograma da Figura 4-3 descreve a metodologia utilizada neste projeto final.

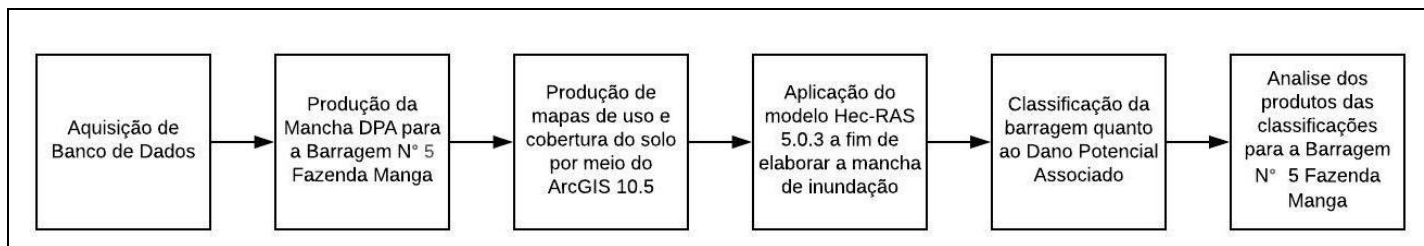


Figura 4-3 - Fluxograma metodológico geral.

Essa metodologia é descrita nas etapas listadas a seguir:

1. Aquisição do banco de dados necessário para a execução do projeto;
2. Produção da mancha DPA para a barragem N° 5 Fazenda Manga;
3. Produção de mapas de uso e cobertura do solo por algoritmos de processamento e classificação temática utilizando os Sistemas de Informações Geográficas SPRING 5.5.1 e ArcGIS 10.5;
4. Aplicação do modelo HEC-RAS 5.0 para a elaboração da mancha de inundação para a barragem N° 5 Fazenda Manga;
5. Classificação da barragem quanto ao Dano Potencial Associado utilizando como ferramenta as duas manchas resultantes dos métodos que serão desenvolvidos na etapa 1 e na etapa 2;
6. Analisar os produtos das classificações realizadas para a barragem N° 5 Fazenda Manga das duas metodologias.

Em relação aos produtos metodológicos realizados para esse projeto final, a Figura 4-4 a seguir os descreve.

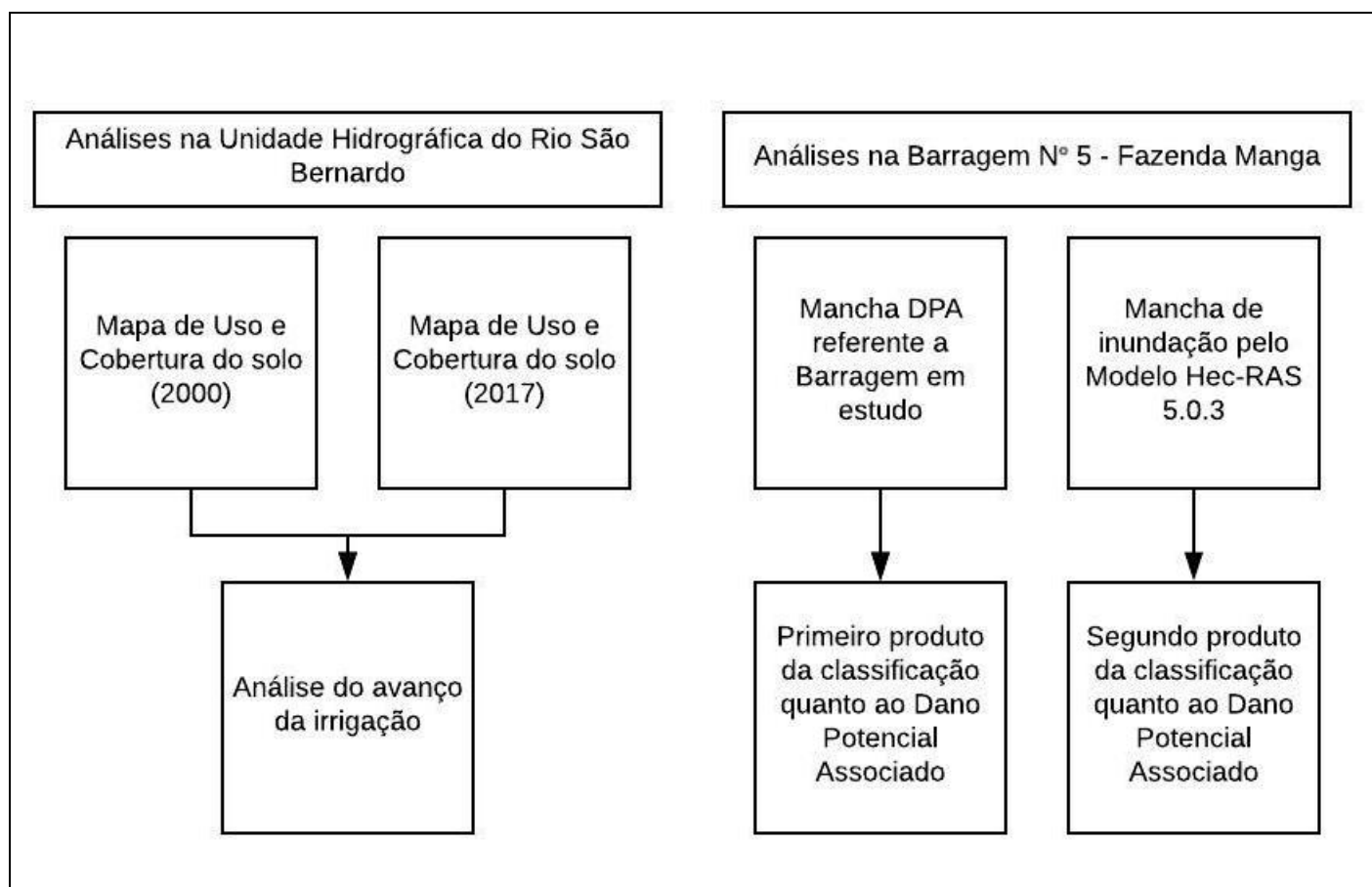


Figura 4-4 - Representação esquemática da metodologia proposta.

4.4.1. Mapa de Uso e Cobertura do Solo

A produção dos mapas de uso e cobertura do solo, para os anos de 2000 e 2017, foi realizada nos sistemas de informação geográfica Spring e ArcGIS a partir das imagens do Landsat 5, referente ao ano de 2000, e para o ano 2017 o Landsat 8. Os passos metodológicos estão descritos a seguir.

- Registro de Imagens: etapa no qual desenvolve a transformação geométrica que relacionam as coordenadas geográficas com as coordenadas da imagem utilizando pontos de controle para que seja possível georreferenciar a imagem a uma base cartográfica. As imagens foram reprojctadas para o sistema SIRGAS 2000 UTM Zona 23S com Datum SIRGAS 2000.
- Composição Falsa-cor: para visualizar as imagens de forma mais realista ao olho humano devem ser relacionadas as bandas espectrais aos canais coloridos do sistema SPRING – vermelho, verde e azul.

- **Realce de Contraste:** para melhorar a qualidade visual das imagens, também desejando facilitar a visualização para o olho humano, deverá ser realizado o realce, sendo possível distinguir os objetos com maior facilidade.
- **Segmentação:** a imagem deverá ser dividida em regiões que correspondem a áreas temáticas distintas, estas serão utilizadas para realizar o treinamento da classificação temática por regiões.
- **Classificação Temática:** este processo consiste em observar padrões e objetos homogêneos. Foi utilizado o método de Maxver.

4.4.2. Aplicação do Modelo Simplificado

No decorrer deste trabalho foi desenvolvido o modelo simplificado utilizado pela Agência Nacional de Águas para a produção, por meio do *software* ArcGIS 10.5, da mancha de dano potencial associado para a Barragem nº 5 Fazenda Manga, conforme fluxograma apresentado na Figura 4-5, a seguir.

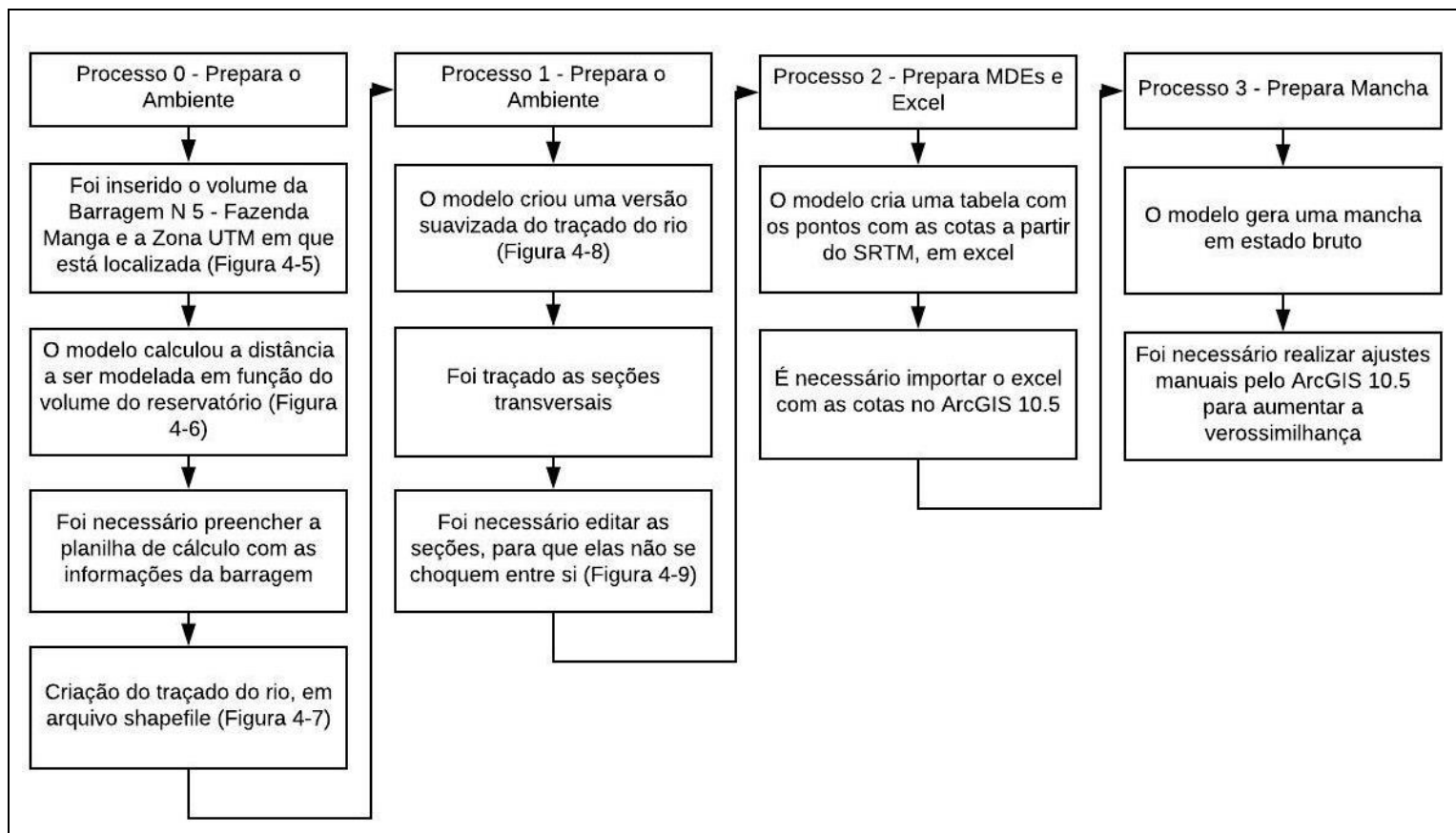


Figura 4-5 – Fluxograma metodológico simplificado para produção da Mancha DPA.

Fonte: Adaptado de ANA (2017).

4.4.3. Aplicação do Modelo HEC-RAS

Desejando-se conhecer um cenário de inundação que seja considerado mais catastrófico para aplicar a classificação quanto ao dano potencial associado, decidiu-se pelo modelo numérico unidimensional HEC-RAS desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) e é, provavelmente, um dos modelos unidimensionais com maior uso no mundo.

Para avaliar as diferentes respostas da área a jusante à ruptura da barragem, desejou-se determinar dois cenários, um considerando as condições de uso e ocupação do solo no ano de 2000 e outro no ano de 2017. Em ambos a ruptura é considerada total e instantânea, ocorrendo a formação completa da brecha em um minuto.

O procedimento metodológico utilizado desde a produção da geometria no HEC-RAS até a simulação está descrito na Figura 4-6, a seguir.

O MDT utilizado no *HEC-geoRAS* foi gerado a partir do *ArcGIS* 10.5 utilizando as curvas nível de 5 m do DF. Assim, foi gerado o TIN e em seguida o MDT final, em RASTER.

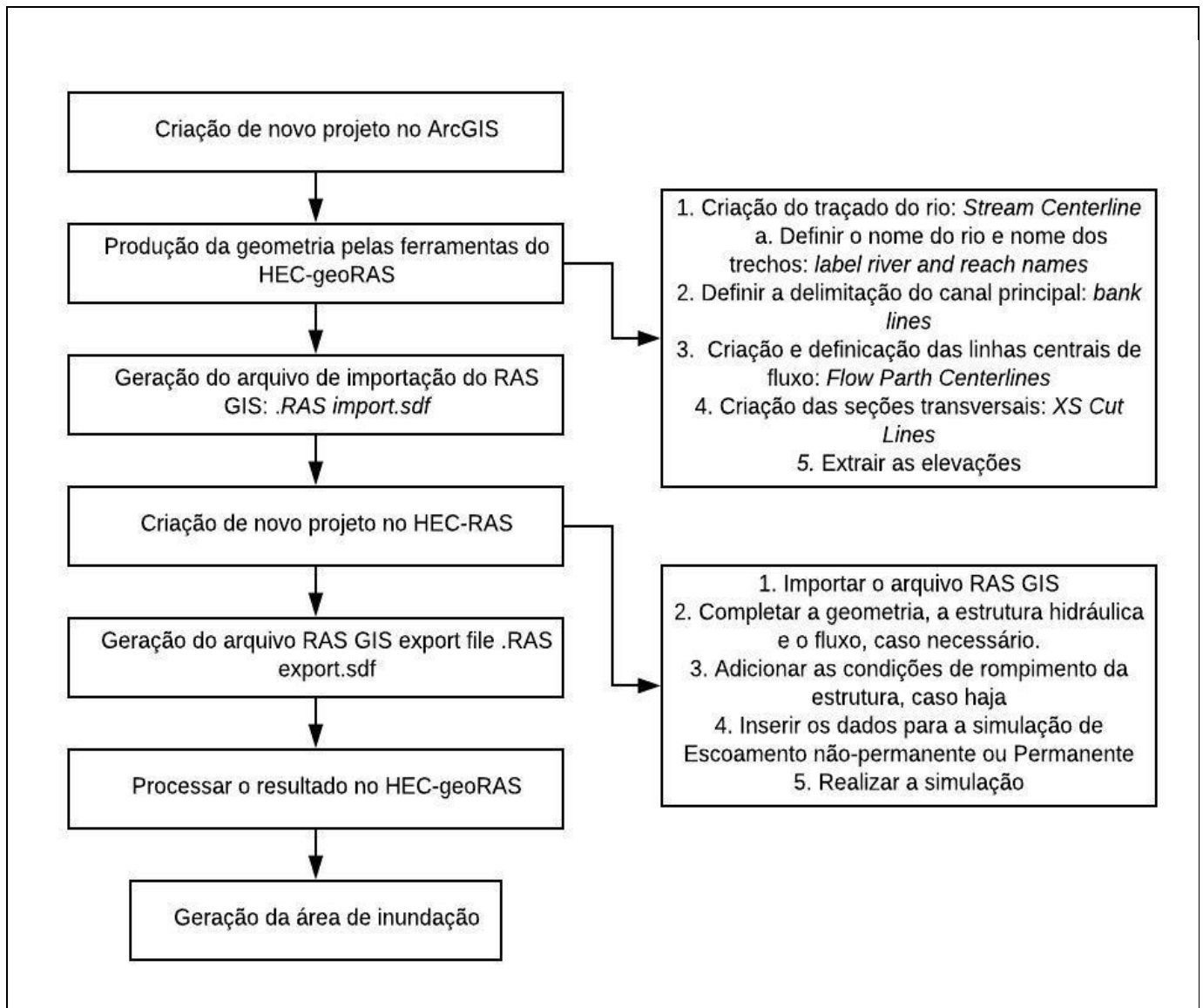


Figura 4-6 – Fluxograma metodológico utilizado para a produção da mancha de inundação pela simulação no *HEC-RAS*.

4.4.4. Classificação quanto ao Dano Potencial Associado

A classificação quanto ao Dano Potencial Associado foi realizada seguindo o descrito na Resolução No 132, de 22 de fevereiro de 2016 da ANA e utilizando como referência a Figura 3-1, no qual o procedimento metodológico realizado é tal qual o realizado e sugerido pela ANA.

Tendo os produtos das metodologias analisadas finalizados e possuindo, assim, as manchas, foi necessário importar para o *Google Earth*, o arquivo *shapefile* desse produto e foram feitas marcações considerando os 3 critérios com auxílio das imagens de satélite. Os resultados

gerados são utilizados para o preenchimento da planilha base da classificação quanto ao DPA.

Na análise dos critérios de Impacto Ambiental e Volume do reservatório foram feitas por meio de observações qualitativas, sendo o primeiro critério realizado com auxílio das imagens de satélites e do documento que fornece as unidades de conservação existentes no Brasil, descritos na Tabela 3-7, apresentada anteriormente. Já o segundo critério foi classificado de acordo com as classes apresentadas na Figura 3-1.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. MAPAS TEMÁTICOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

As classificações temáticas obtidas pelo processamento das imagens Landsat 5 TM, do ano de 2000, e Landsat 8 OLI, do ano de 2017, ambas do mês de junho, possibilitaram a obtenção dos mapas de uso e cobertura do solo, como na Figura 5-1 abaixo, assim como a avaliação quantitativa das alterações ocorridas no uso e ocupação do solo entre os anos de 2000 e 2017. As cores utilizadas nesse mapa são as recomendadas pelo Embrapa (2006). Na Tabela 5-1 pode ser observada os valores percentuais para as áreas das classes temáticas consideradas.

Os mapas de uso e cobertura do solo referentes aos anos de 2000 e 2017 (Figura 5-1) evidenciam o expressivo avanço dos pivôs centrais presentes na UH do Rio São Bernardo, com crescimento percentual de 18,2%, o que caracteriza um aumento na irrigação desta sub-bacia, descrevendo o crescimento da agricultura e evolução no desmatamento na vegetação campestre. Este segundo ponto é confirmado a partir do decréscimo da vegetação, apesar de possuir um crescimento percentual de 1,2% na vegetação florestal, observa-se uma diminuição de 27% na vegetação campestre.

Essas duas consequências decorrentes da evolução dos pivôs alertaram para a mais fácil propagação da onda de cheia de inundação do rio, decorrente de uma cheia natural ou de uma cheia provocada pelo rompimento de uma ou mais barragens.

Tabela 5-1 – Ocupação percentual da Unidade Hidrográfica do Rio São Bernardo para cada classe temática nos anos de 2000 e 2017.

Classes Temáticas	Mensuração de Ocupação as Classe (%)	
	2000	2017
Corpo d'água	0,1%	0,5%
Solos Agricultáveis	53,0%	60,7%
Vegetação Florestal	6,6%	7,4%
Vegetação Campestre	38,1%	11,0%
Pivôs	2,2%	20,4%

Mapa de Uso e Ocupação do Solo

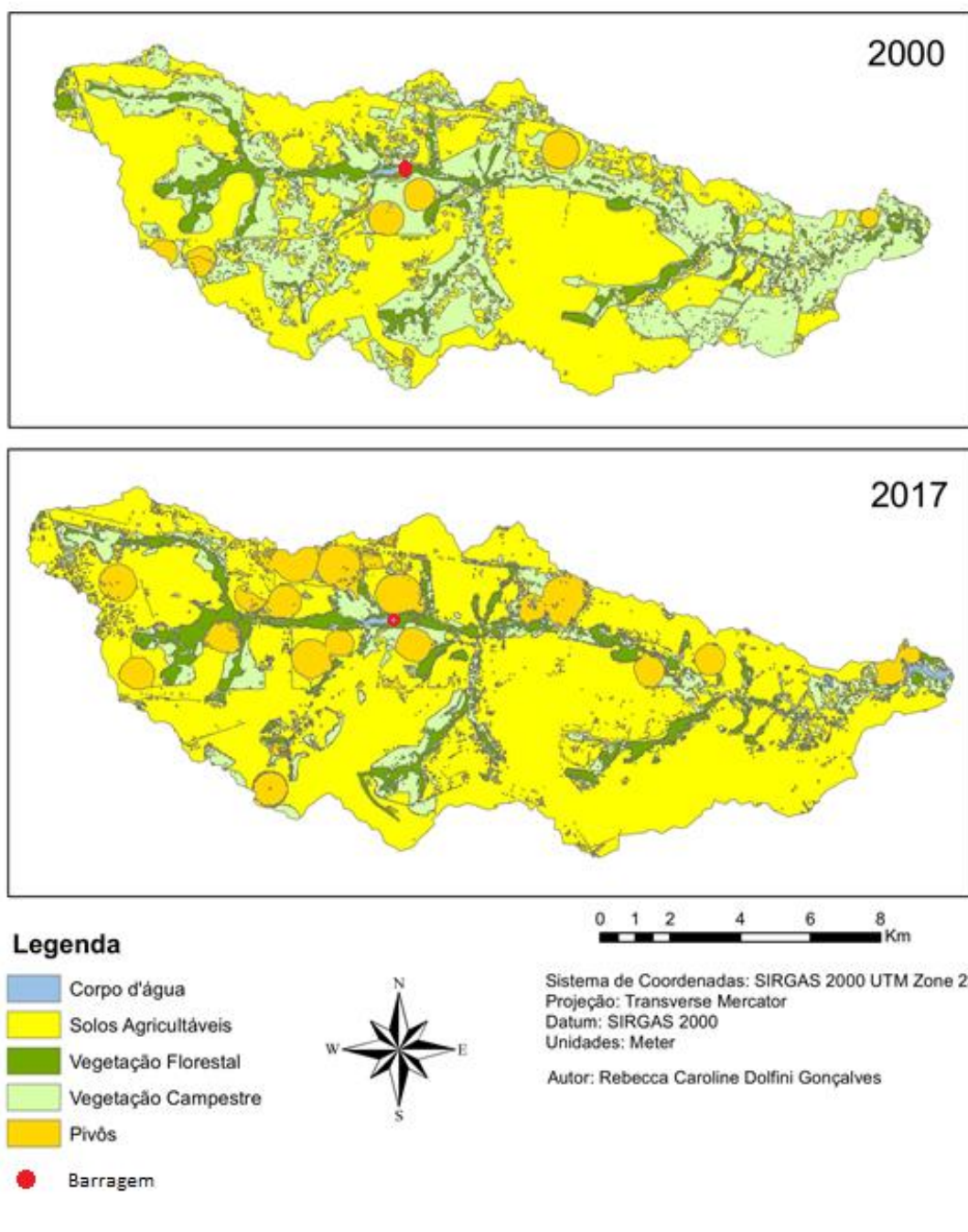


Figura 5-1 - Mapa temático de uso e ocupação do solo da UH do rio São Bernardo.

A partir dos mapas de uso e ocupação do solo para os anos de 2000 e 2017 e as Tabelas 3-8 e 3-9, apresentadas anteriormente, foi possível calcular o valor do CN igual a 83,2 e 83,7, respectivamente.

Além disso, os mapas de uso e ocupação do solo possibilitaram a identificação dos coeficientes de *Manning* necessários a simulação do HEC-RAS. Para o ano de 2000 foram utilizados o valor de 0.02 para o canal do rio e 0.35 nos leitos, direito e esquerdo. Já no ano de 2017, apesar do desmatamento ter avançado, constatou-se o aumento da vegetação ciliar, de 6,6% para 7,4%. Assim, os coeficientes de *Manning* utilizados para a simulação, nas condições do ano de 2017, foi 0,02 tanto para o canal do rio quanto para os leitos do rio, direito e esquerdo.

5.2. OUTORGAS CONCEDIDAS

Os resultados apresentados pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA), quanto as outorgas concedidas no DF para irrigação evidenciam que das 31 outorgas, 22 possuem como principal finalidade a irrigação agrícola, como pode ser visto na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Quantidade de outorgas por usos primários da água.

Usos Primários	Quantidades
Abastecimento Humano	8
Uso Industrial	1
Irrigação	22
Total de outorgas concedidas	31

FONTE: adaptado de ADASA (2018).

A Figura 5-2, abaixo, representa graficamente as outorgas segregadas por finalidade primária descrevendo que 71% das outorgas concedidas dentro da UH do Rio São Bernardo são destinadas a irrigação.

As outorgas apresentadas pela ADASA não possuíam as datas em que foram concedidas, dessa forma, não foi possível identificar se ocorreu aumento de outorgas fornecidas após o ano 2000.

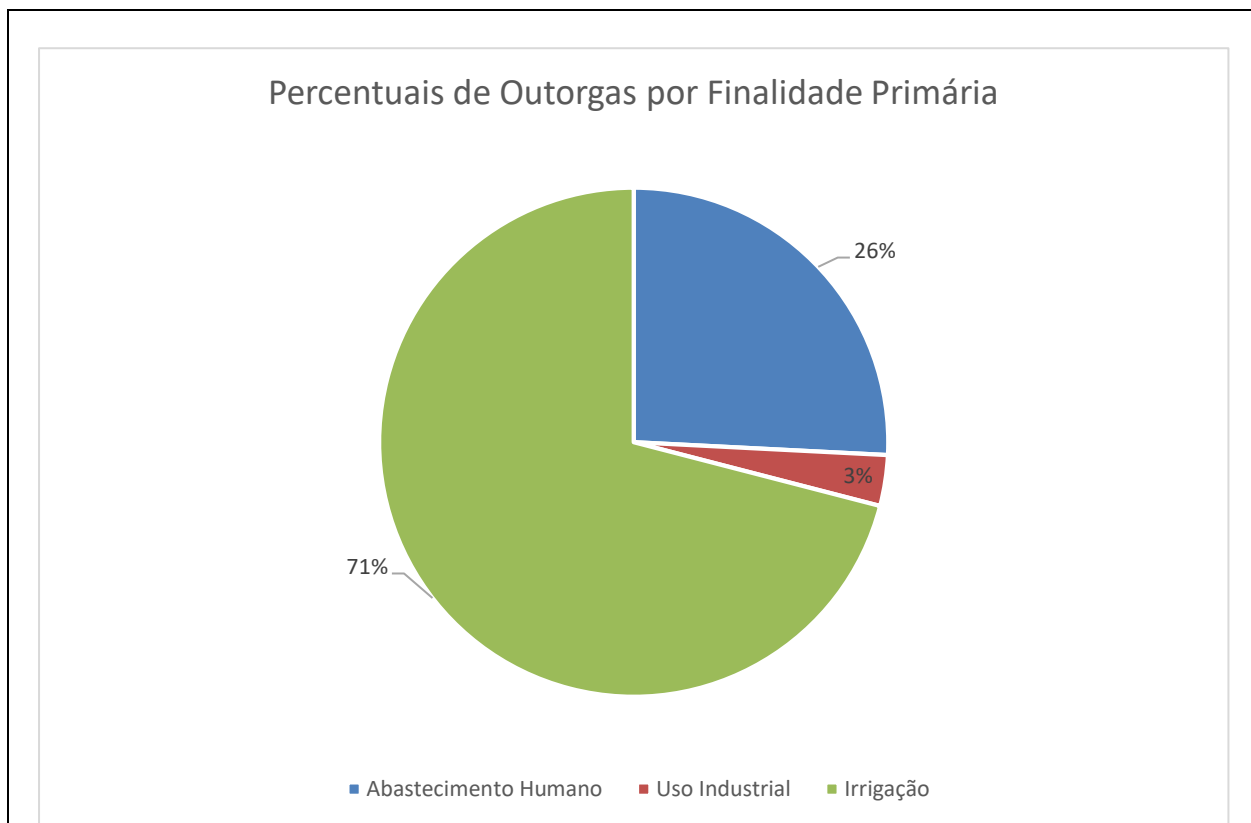


Figura 5-2 – Representação gráfica da distribuição de outorgas por finalidade primária.

5.3. MANCHA DPA

A primeira etapa da metodologia simplificada para produção da Mancha DPA consistiu em modelar, a partir do volume da Barragem N° 5 Fazenda Manga, o comprimento mínimo de análise da inundação. Assim, a partir desse comprimento, gerado como a distância mínima do rio, e igual a 6,97 km, resultou-se o traçado do rio por meio da ferramenta de edição do ArcGIS 10.5. Ademais, a análise do rio percorreu o comprimento total de, aproximadamente, 6.954 km, de montante a jusante, a partir da Barragem N° 5 Fazenda Manga. Essa etapa pode ser visualizada na Figura 5-3, adiante.

Procedimento para produção da Mancha DPA

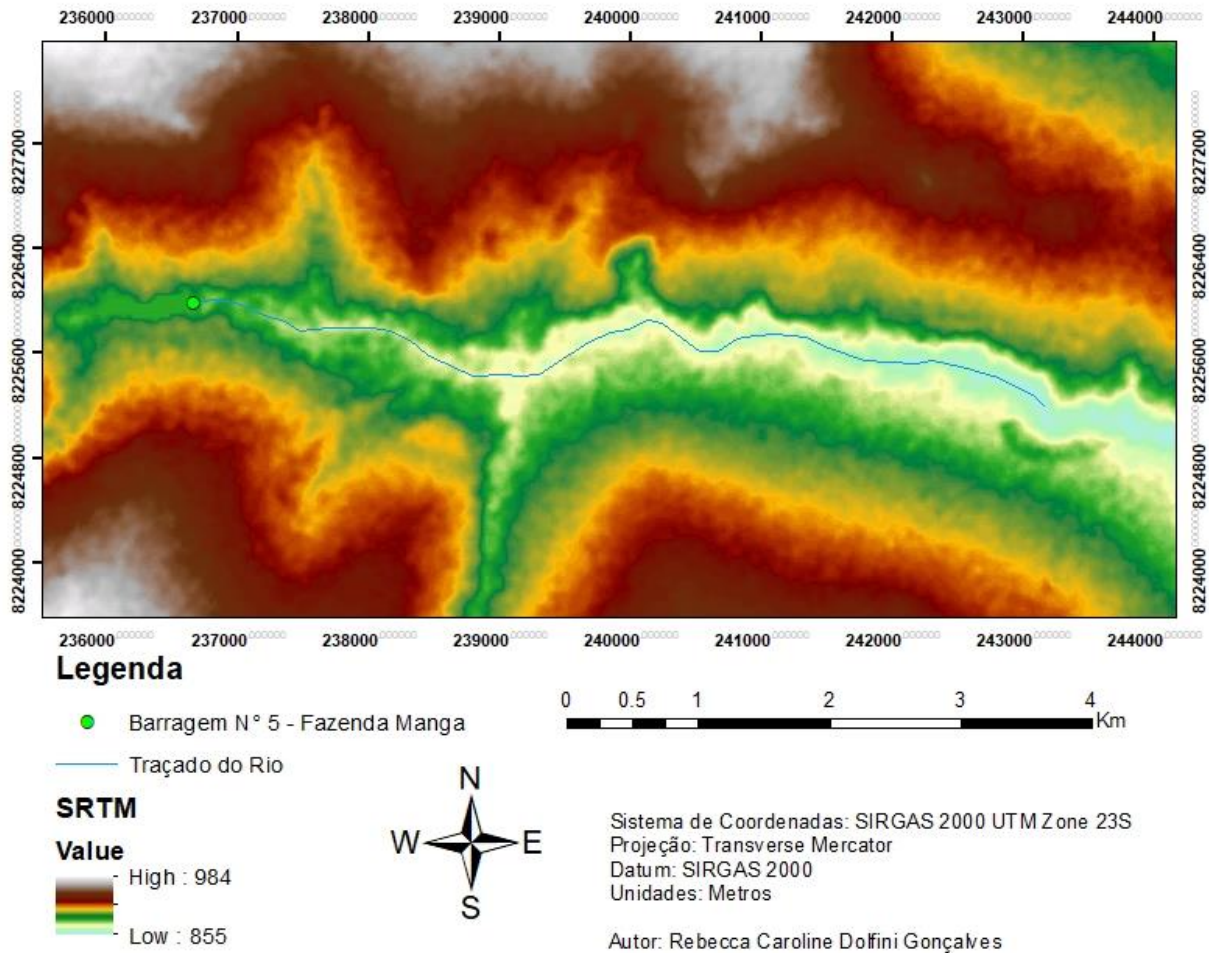


Figura 5-3 – Traçado da parte do Rio São Bernardo, em azul, a jusante da Barragem N° 5 Fazenda Manga, em que a análise foi realizada.

Finalizada a etapa anterior, foi possível realizar a segunda etapa do processo, no qual ocorre a linearização do rio, gerando um traçado mais retilíneo, como pode ser visualizado na Figura 5-4, a seguir. Esse procedimento é necessário já que as seções devem estar distanciadas entre si de forma a evitar que se choquem. Assim, quanto mais meandros possuir o rio maior a chance de as seções se cruzarem.

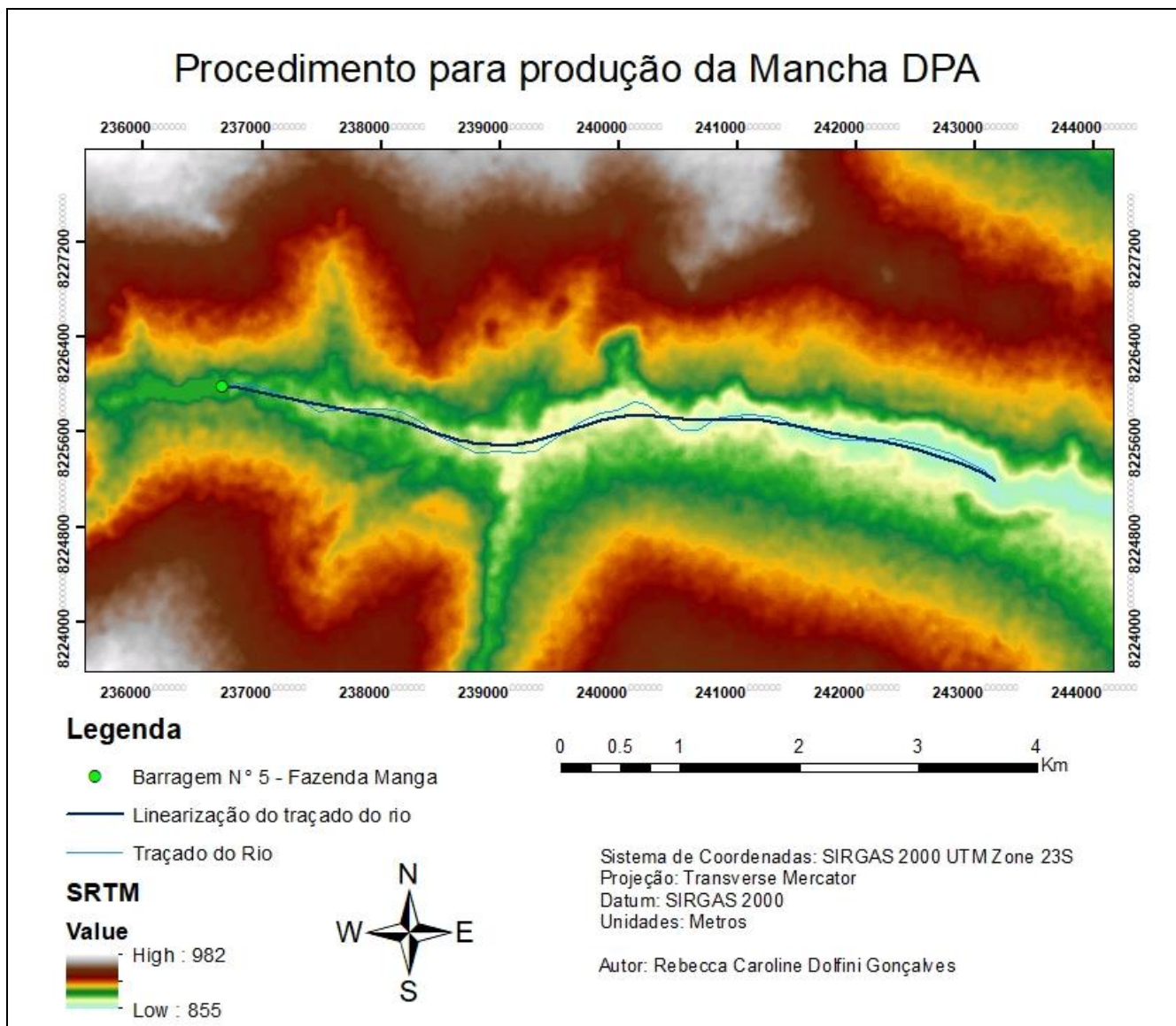


Figura 5-4 – Traçado do rio e linearização do rio.

Dando continuidade ao procedimento metodológico, o modelo criou as seções transversais. Entretanto, as mesmas, por se chocarem, tiveram que ser editadas manualmente de forma a manter a perpendicularidade aproximada entre as seções e o traçado do rio linearizado. O resultado dessa etapa pode ser observado na Figura 5-5.

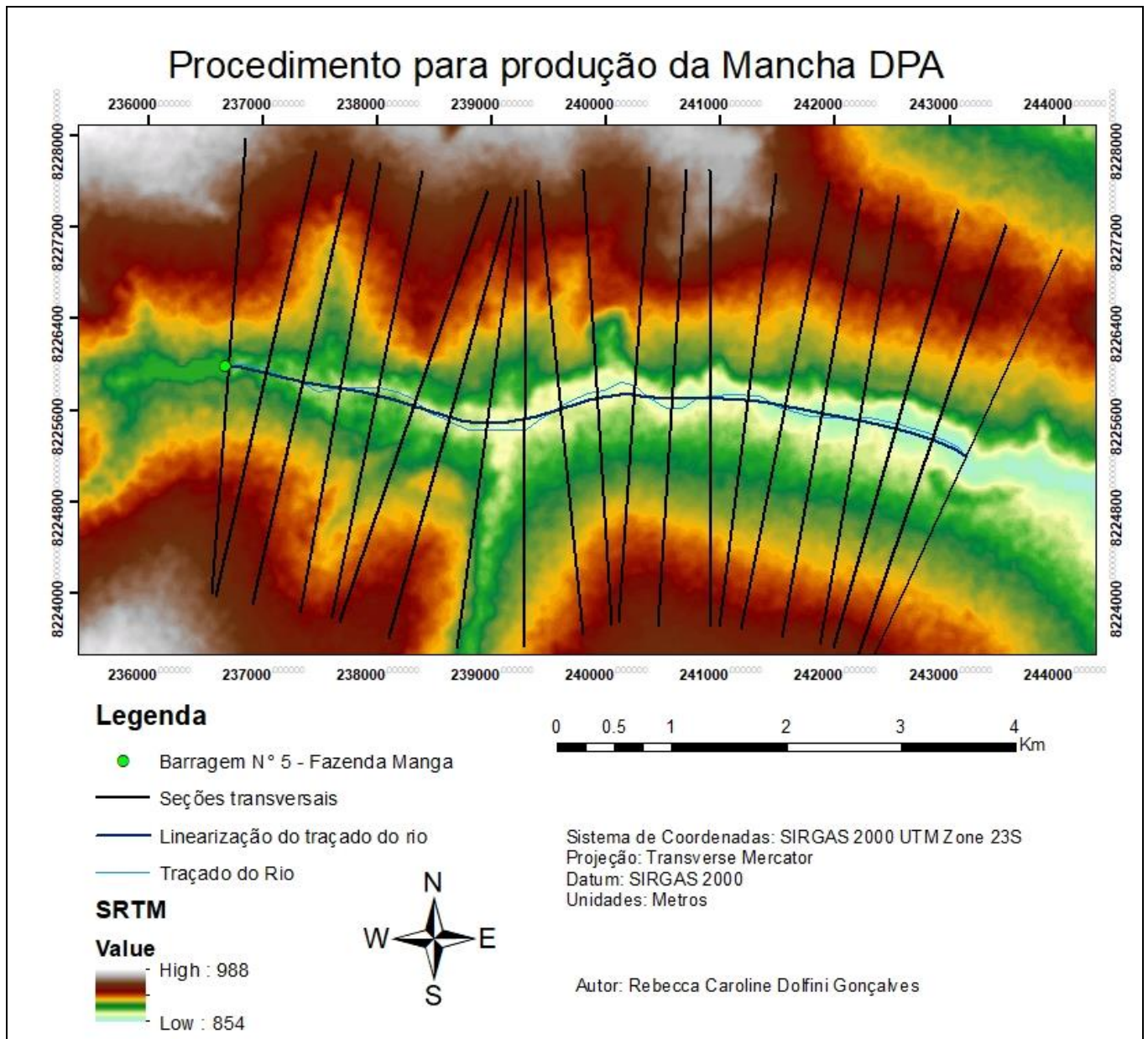


Figura 5-5 – Criação das seções transversais.

Com a execução do procedimento metodológico e com as devidas correções manuais desejando aumentar a verossimilhança, a Mancha DPA da Barragem N° 5 Fazenda Manga pode ser visualizada na Figura 5-6 apresentada a seguir, em que a região dentro do polígono formado representa a área que possivelmente será inundado em caso de ruptura dessa barragem, segundo a metodologia simplificada utilizada pela ANA.

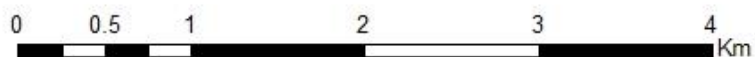
Além disso, podemos observar na Tabela 5-3 apresentada a seguir, algumas informações para cada um dos 21 perfis geradas pelo modelo de grande importância para o conhecimento e facilitadoras na análise do DPA.

Barragem N° 5 Fazenda Manga



Legenda

- Barragem N° 5 - Fazenda Manga
- Mancha DPA



Sistema de Coordenadas: SIRGAS 2000 UTM Zone 23S
Projeção: Transverse Mercator
Datum: SIRGAS 2000
Unidades: Metros
Autor: Rebecca Caroline Dolfini Gonçalves

Figura 5-6 – Mancha DPA da Barragem N° 5 Fazenda Manga.

Tabela 5-3 - Síntese de resultados para os perfis transversais de cálculo.

Perfil	Distância à Barragem (m)	Vazão máxima Q (m ³ /s)	Altura de Escoamento h (m)	Cota do Talvegue Ntv (m)	Cota máxima da Sup. Livre Nsl(m)	Velocidade média U (m/s)
S0	0	986	3.88	886.04	889.92	2.0
S1	349	960	3.82	883.61	887.43	1.9
S2	697	942	3.91	880.34	884.25	1.8
S3	1046	924	4.24	877.27	881.51	1.7
S4	1394	906	4.81	877.48	882.29	2.1
S5	1743	889	3.59	878.32	881.91	1.8
S6	2091	872	4.34	875.53	879.87	2.0
S7	2440	855	3.03	874.37	877.40	1.7
S8	2788	839	3.14	872.92	876.05	1.7
S9	3137	823	3.77	870.47	874.24	1.8
S10	3485	807	3.28	870.89	874.16	1.7
S11	3834	792	4.07	871.47	875.53	1.9
S12	4182	776	3.86	869.65	873.51	1.9
S13	4531	762	3.71	868.28	871.99	1.8
S14	4879	747	3.98	869.79	873.77	1.9
S15	5228	733	3.81	864.40	868.20	1.9
S16	5576	719	4.17	862.74	866.91	1.9
S17	5925	705	3.28	861.13	864.41	1.8
S18	6274	692	3.55	861.49	865.04	1.6
S19	6622	678	4.01	859.82	863.84	1.9
S20	6971	665	3.95	857.97	861.92	1.7

Em consequência dos dados de cota máxima gerados por seção, a Figura 5-7 representa graficamente essa informação.

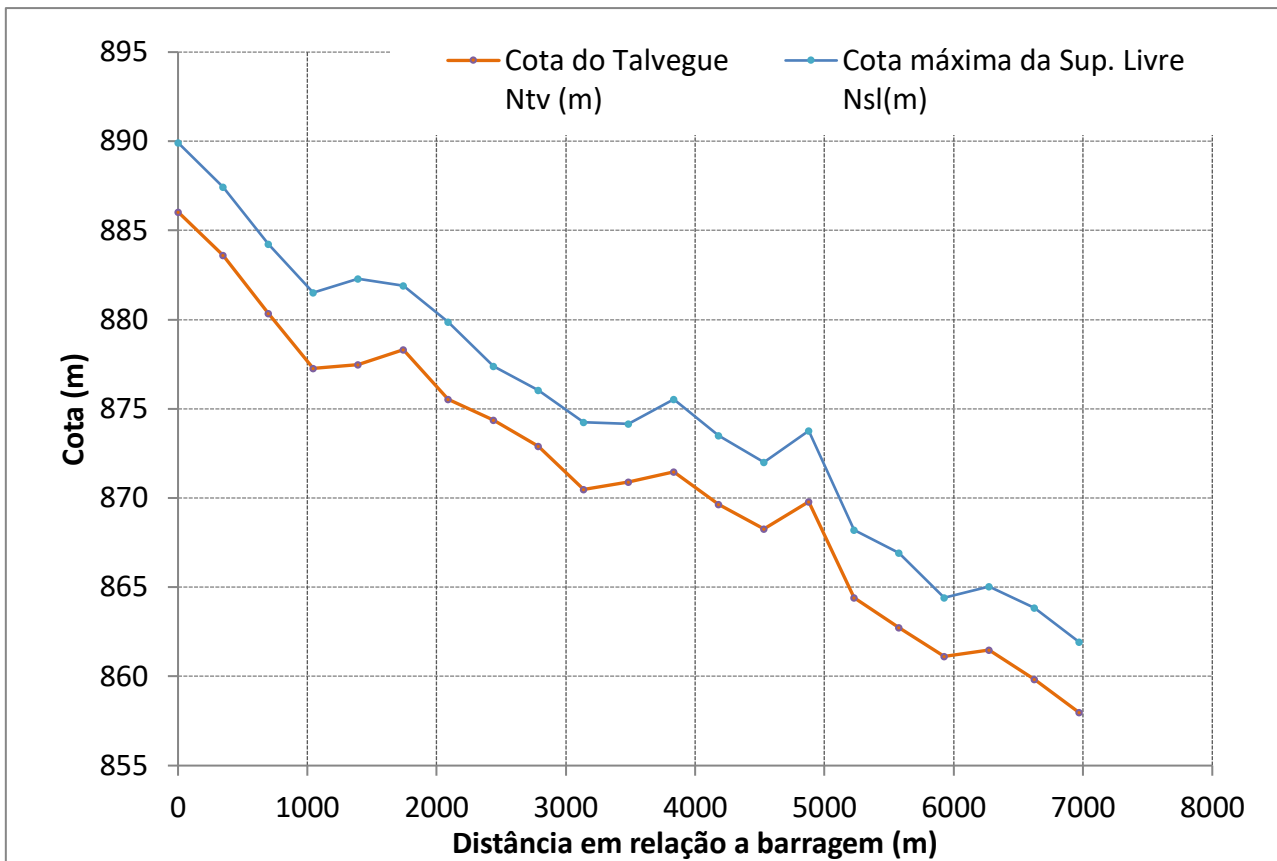


Figura 5-7 – Representação gráfica da evolução das cotas a medida que se distância da Barragem N° 5 Fazenda Manga.

5.4.MAPA DE INUNDAÇÃO

Para a modelagem no *HEC-RAS*, considerou-se o comprimento do rio como a distância entre o barramento e exutório da Unidade Hidrográfica (UH) do Rio São Bernardo, totalizando uma distância total de 26,85 km. Além disso, a área total da UH é 152 km².

A fim de avaliar a resposta da área a jusante da barragem foi considerada uma ruptura total e instantânea, com a formação completa da brecha. Para tanto, também se considerou o tempo de retorno igual a 500 anos, valor alto devido a necessidade de considerar eventos extremos em estudos que envolvem rompimento de barragens.

Após a geração da geometria no *HEC-GeoRAS* e a sua importação para *HEC-RAS* foi necessário selecionar a seção em que a barragem está presente e inserir as informações referente a ela, assim como, as características de rompimento da estrutura. Esses dados estão descritos na Tabela 5-4 a seguir.

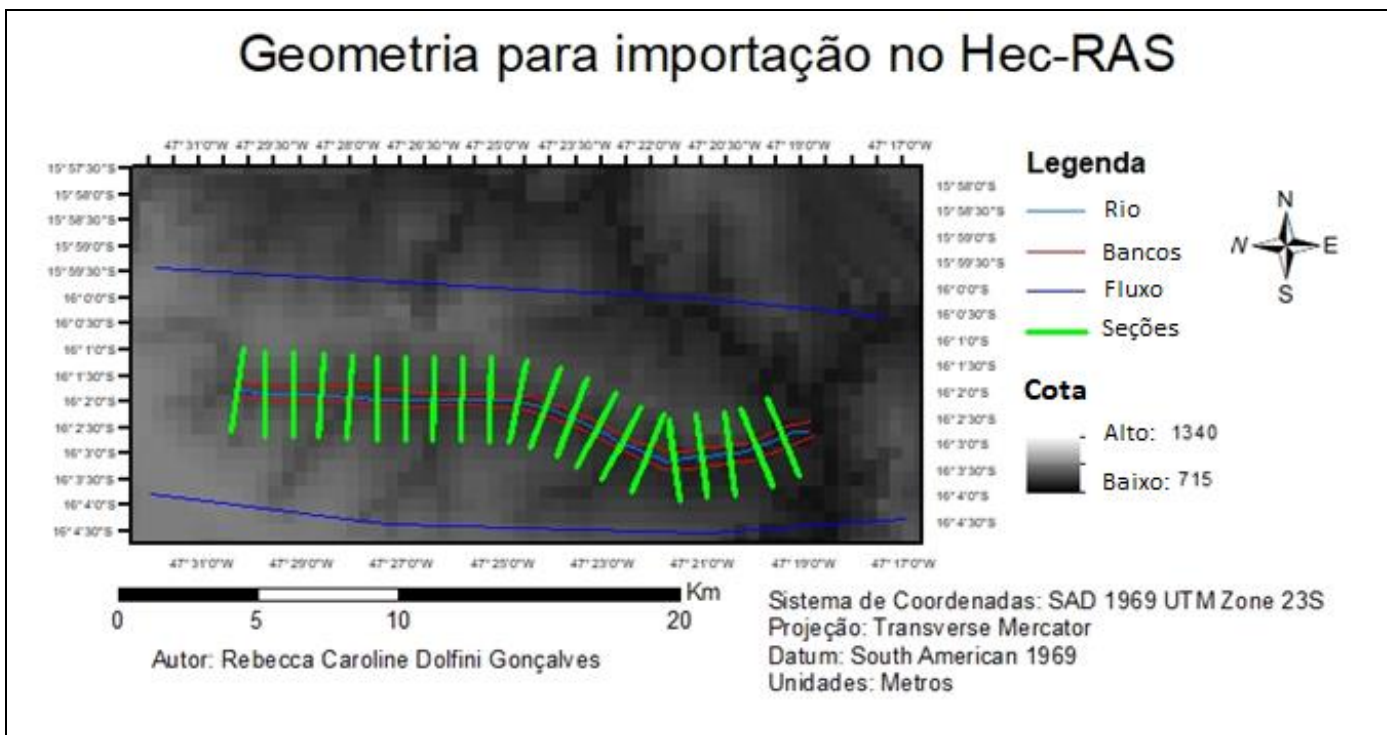


Figura 5-8 – Mapa da geometria gerada pelo *HEC-GeoRAS*.

Assim, dando continuidade a metodologia executada, foi necessário inserir os dados para a simulação do escoamento, sendo elas a vazão de simulação, igual a chuva de pico, e as condições de contorno.

Tabela 5-4 – Dados referente a barragem.

Dados	Valores Utilizados
Altura da barragem (m)	15
Largura da estrutura do barramento (m)	10
Área do reservatório (m ²)	174,25
Cota máxima do reservatório (m)	891
Tempo de formação da brecha (h)	0,1

A partir do Método *Soil Conservation Service* (SCS) foi calculado o hidrograma, para o tempo de concentração da UH igual a 3,8 horas, necessário para a simulação do rompimento da barragem no *HEC-RAS*. Assim, a vazão de pico, com 3.800 m³/s, acontece com 14 horas do início da chuva de projeto, como pode ser visualizado graficamente pela Figura 5-9, a seguir.

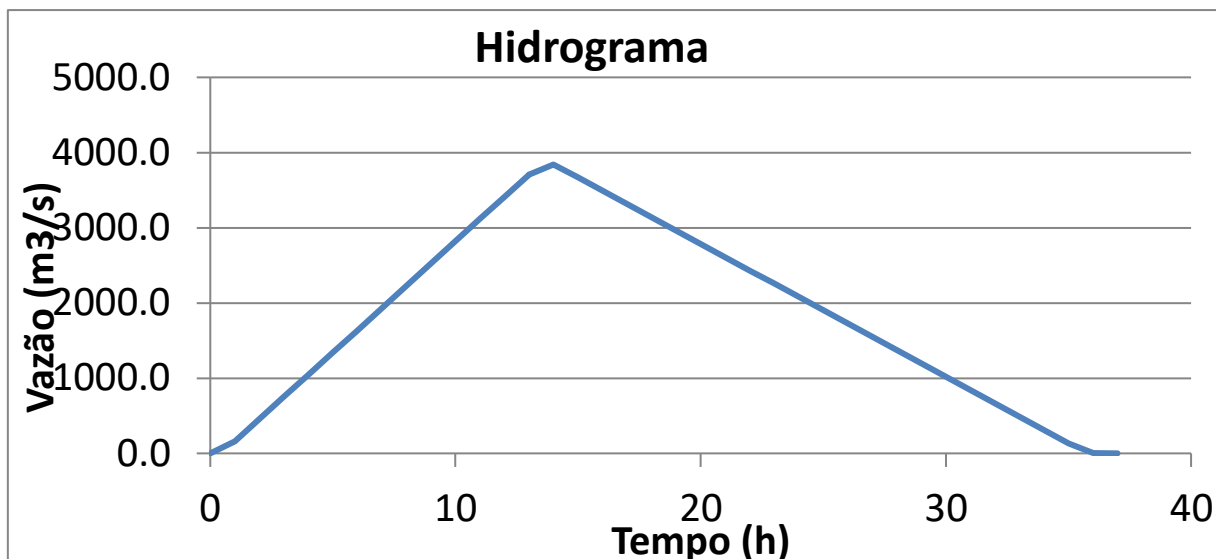


Figura 5-9 – Hidrograma da Bacia Hidrográfica do Rio São Bernardo pelo método SCS.

No caso de uma simulação com escoamento não-permanente, para as condições de contorno, utiliza-se para a primeira seção os dados do hidrograma da Figura 4-12 e para a última seção a inclinação normal do rio, igual a 0,007 m/m. Ademais, para uma simulação de escoamento permanente as condições de contorno utilizadas referem-se apenas a inclinação normal do rio, também igual a 0,007 m/m.

Com todos os dados inseridos no HEC-RAS é possível iniciar a simulação do escoamento não-permanente. Para isso, devem ser escolhidos e testados intervalos de simulação para o processamento acontecer.

Entretanto, nessa etapa surgiram instabilidades na simulação para todos os intervalos de simulação disponíveis no sistema e o problema não foi solucionado, não conseguindo, dessa forma, finalizar a simulação. Foi então realizado a simulação de uma inundação natural do rio com as condições mantidas, entretanto, desconsiderando a existência de rompimento de uma barragem.

Para o cenário do ano de 2000 e considerando a chuva de pico de 4000 m³/s o resultado gerado pode ser visualizado na Figura 5-10 a seguir, em que os traçados pretos perpendiculares ao percurso do rio são as seções transversais e a região azul representa a área alagada, devido a essa chuva de projeto.

Além disso, vale ressaltar que o traçado vermelho representa o curso natural do rio, onde normalmente já se encontra inundado sem interferência de cheias.

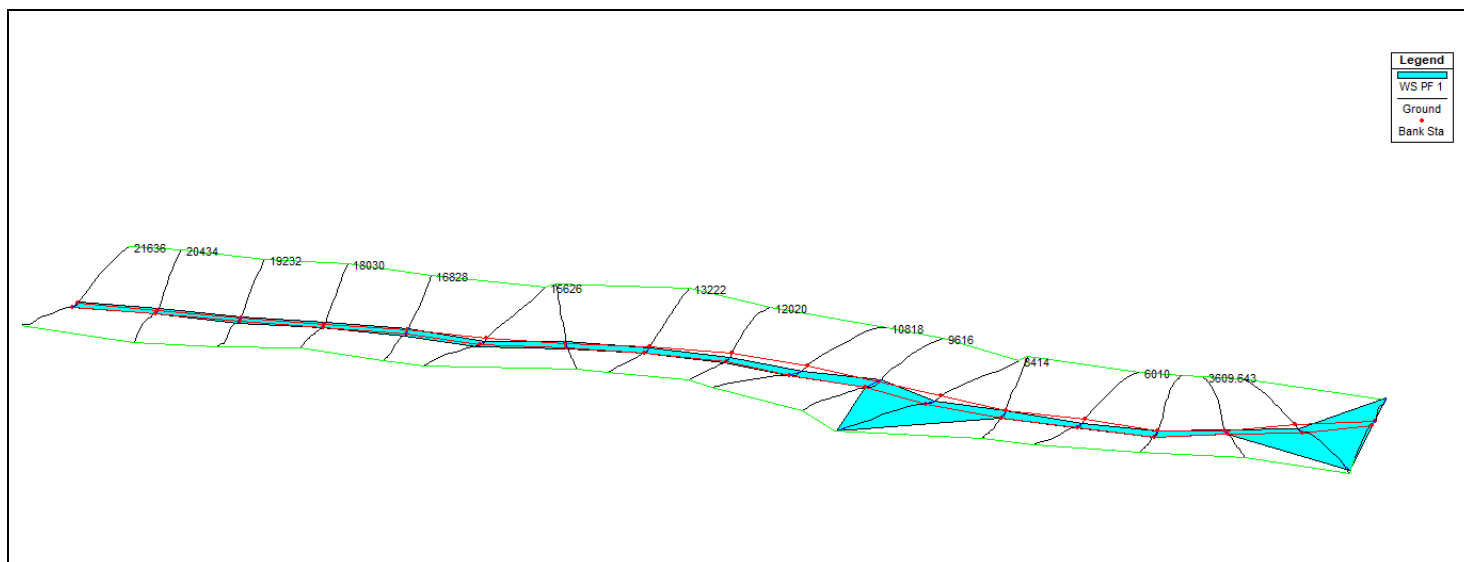


Figura 5-10 - Área alagada, em azul, devido à chuva de projeto, para o ano de 2000.

Observa-se, dessa forma, que existem duas regiões em que a inundação está mais expressiva.

Para a simulação realizada com dados e informações do ano de 2017, no qual foi observado a regeneração da vegetação ciliar, e considerando a mesma chuva de pico de 4000 m³/s, o resultado gerado pode ser visualizado na Figura 5-11 a seguir, no qual observa-se um avanço menos significativo da área inundada.

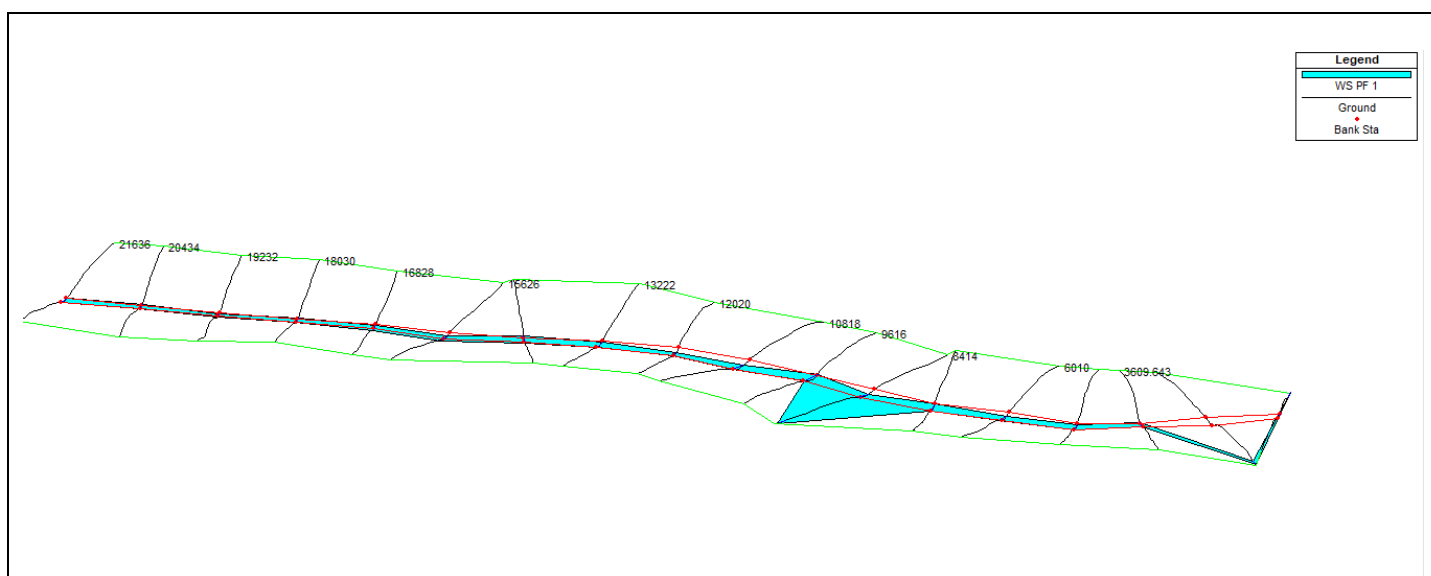


Figura 5-11 – Área alagada, em azul, devido à chuva de projeto, para o ano de 2017.

Infer-se, dessa forma, que o avanço da cobertura florestal nas margens do rio influenciou em uma menor área de inundação.

5.5. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO

O resultado apresentado na conferência de todas as ocorrências existentes dentro do polígono da Mancha DPA, podem ser observados na Tabela 5-5, em que o DPA da Barragem N° 5 Fazenda Manga considerando a mancha DPA produzida e apresentada na Tabela 5-5 é DPA Médio.

Tabela 5-5 – Dano Potencial Associado para a Barragem N° 5 Fazenda Manga, considerando a área de inundação a Mancha DPA.

DANO POTENCIAL ASSOCIADO				
Critério	Tipo de Ocorrência	Número de Ocorrências	Impacto	Coeficiente
Volume total do Reservatório (hm³)	0.871	-	Pequeno (menor que 5.000 m³)	1
Potencial perda de vidas	Casas Isoladas	3	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas)	12
	Povoados, aglomerado de casas	0		
	Estradas vicinais (pouco uso/rural)	1		
	Rodovias (municipais, estaduais e federais) ou Ferrovias	0		
	Construções de permanência temporária (escolas, indústrias, comerciais, infraestrutura, agrícolas, Serviços de lazer e turismo etc.)	1		
Impacto ambiental	-	Nenhuma Ocorrência	POUCO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais)	1
Impacto socioeconômico	Casas Isoladas	3	BAIXO (quando existem de 1 a 5 instalações residenciais, comerciais, agrícolas, industriais ou infraestrutura na área afetada da barragem)	1
	Construções de permanência ou temporária (escolas, indústrias, comerciais, infraestrutura, agrícolas, Serviços de lazer e turismo etc.)	1		
	Outra barragem, Instalações portuárias ou serviço de navegação	0		
DANO POTENCIAL ASSOCIADO (ANA)			MÉDIO	15

Como a mancha de inundação da metodologia com *HEC-RAS* não foi produzida devido aos problemas gerados pela simulação, a classificação quanto ao DPA foi realizada de forma aproximada, porém seguindo a mesma metodologia, como na Figura 5-5, a seguir.

Tabela 5-6 - Dano Potencial Associado para a Barragem Nº 5 Fazenda Manga, considerando a área de inundação para o ano de 2000.

DANO POTENCIAL ASSOCIADO				
Critério	Tipo de Ocorrência	Número de Ocorrências	Impacto	Coeficiente
Volume total do Reservatório (hm³)	0,871	-	Pequeno (menor que 5.000 m³)	1
Potencial perda de vidas	Casas Isoladas	2	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas)	12
	Povoados, aglomerado de casas	0		
	Estradas vicinais (pouco uso/rural)	1		
	Rodovias (municipais, estaduais e federais) ou Ferrovias	0		
	Construções de permanência temporária (escolas, indústrias, comerciais, infraestrutura, agrícolas, Serviços de lazer e turismo etc.)	1		
Impacto ambiental	-	Nenhuma Ocorrência	POUCO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais)	1
Impacto socioeconômico	Casas Isoladas	2	BAIXO (quando existem de 1 a 5 instalações residenciais, comerciais, agrícolas, industriais ou infraestrutura na área afetada da barragem)	1
	Construções de permanência ou temporária (escolas, indústrias, comerciais, infraestrutura, agrícolas, Serviços de lazer e turismo etc.)	1		
	Outra barragem, Instalações portuárias ou serviço de navegação	0		
DANO POTENCIAL ASSOCIADO (ANA)			MÉDIO	15

Considerou-se na classificação quanto ao DPA utilizando a mancha de inundação do *HEC-RAS* a condição mais extrema, sendo essa a referente ao ano de 2000, já que essa possui duas regiões inundadas que apresentaram áreas mais expressivas. A primeira foi entre as seções 9616 e 8414 e como cada uma das seções está a uma distância de 2.000 metros da seguinte, realizou-se a classificação DPA considerando essas duas regiões.

Entretanto, apesar de as manchas de inundação serem distintas entre si e a presença de vidas humanas estar presente em ambas, a classificação quanto ao DPA foi a mesma. Isso acontece, pois, o critério de potencial de perdas de vida possui um peso significativo na mensuração da DPA já incluindo 12 pontos na classificação da barragem.

6. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados descrevem a importância das metodologias para a área de Segurança de Barragens.

A metodologia simplificada utilizada pela ANA foi aplicada nesse Projeto Final e, sem apresentar dificuldades, foi simulado a onda de cheia devido ao rompimento da Barragem Nº 5 Fazenda Manga e como resultado foi produzida a mancha DPA. Entretanto, no processo de produção da mancha de inundação de rompimento da estrutura do barramento, descrita na metodologia do *HEC-RAS*, foi apresentado com dificuldades, não conseguindo concluir como proposto, devido aos problemas na simulação do escoamento não-permanente pelo *software*. Foi, assim, realizada a simulação por escoamento permanente, sendo a inundação normal do rio, desconsiderando o rompimento da Barragem Nº 5 Fazenda Manga.

Conclui-se que a mancha produzida pelo *HEC-RAS*, ao desconsiderar a existência da Barragem Nº 5 Fazenda Manga, é menos expressiva do que a produzida segundo a metodologia utilizada pela ANA, mesmo considerando as modificações do solo a partir dos coeficientes de *Manning*. Entretanto, essa classificação deve ser reanalisada utilizando a simulação do *HEC-RAS* com o escoamento não-permanente e considerando a ruptura da estrutura do barramento, pois nessa ocasião há liberação de uma quantidade expressiva de água, referente ao volume do reservatório, que não é considerado na primeira na simulação de escoamento permanente, devido a inundação normal do rio.

Outra conclusão importante desse Projeto Final é quanto a utilização do modelo *HEC-RAS* em órgãos ambientais para a classificação quanto ao DPA. Mesmo o modelo sendo mundialmente conhecido por sua qualidade, este ainda é muito robusto e de difícil simulação, ainda mais quando considera a presença de estruturas, como as de uma barragem.

Assim, como o modelo utilizado pela ANA apresentou resultados satisfatórios e considerando a maior simplicidade de utilização e por ser mais simples para capacitação dos técnicos dos órgãos ambientais, sugere-se a utilização dessa metodologia para fins de classificação quanto ao DPA das barragens existentes no Brasil, porém ainda não classificadas pelos órgãos fiscalizadores de segurança de barragens.

Entretanto, ressalta-se a importância do modelo do *HEC-RAS* para as barragens de DPA alto, já que nessas condições é obrigatório a elaboração do Plano de Ação e Emergência (PAE), assim como especificado na Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.

Sugere-se, em trabalhos futuros, a realização da mancha de inundação pela simulação de escoamento não-permanente para a análise devido ao rompimento da barragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADASA (2017). Dados de outorgas para a Bacia Rio São Bernardo (DF).

ANA. (2017). “Hidroweb.” Disponível em:

<<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 09 nov. 2017;

ANA (2017). “Geração de Manchas para a Classificação de Barragens quanto ao Dano Potencial Associado.” Brasília. 45 p.;

ANA (2017). “Mapas Temáticos e Relatórios.” Disponível em:

<<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/mapas-tematicos-e-relatorios/tema-1-1>>. Acesso em: 19 nov. 2017;

ALMEIDA, A. B (2001). Emergência e gestão do risco. In: Curso de Exploração e Segurança de Barragens. Capítulo 7. Lisboa: Instituto Nacional da Água (INAG), 104p.;

ALMEIDA, W.S., SOUZA, N. M. e CARVALHO, J.C. (2012) Produção de carta geotécnica preliminar da capacidade de infiltração de água no solo em uma área do entorno do reservatório da usina hidrelétrica de Corumbá IV (GO). In: José Camapum de Carvalho; Gilson de Farias Neves Gitirana Junior; Eufrosina Terezinha Leão Carvalho. (Org.). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. 1ed. Brasília: Universidade de Brasília, v. 4, p. 581-606;

ALVES, C.M. (2017). Aulas de Laboratório SIG – Exercício 1: Introdução ao ArcGIS”. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 18p.;

BALBI, D. A. F. (2008). “Metodologias para a elaboração de Planos de Ações Emergenciais para inundações induzidas por barragens. Estudo de caso: Barragem de Peti– MG.” 353 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte;

BANCO MUNDIAL. (2012). “Serviços Analíticos e Consultivos em Segurança de Barragens: Produto 1 – Plano de Trabalho.” Brasília: [s.n.], 176 p.;

BANCO MUNDIAL. (2014). “Serviços Analíticos e Consultivos em Segurança de Barragens: Produto 4 - Classificação de Barragens: Avaliação dos Critérios Gerais Atuais,

Metodologia Simplificada para Áreas Inundadas a Jusante e Diretrizes para a Classificação.” Brasília: [s.n.], 78 p.;

BANDO MUNDIAL. (2014) “Serviços Analíticos e Consultivos em Segurança de Barragens: Produto 6 - Classificação de Barragens Reguladas pela Agência Nacional de Águas (Contrato Nº 051/ANA/2012).” Brasília: [s.n.] 639 p.;

BRASIL. Lei Nº 9.433 (1997). “Política Nacional de Recursos Hídricos”. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/19433.htm>. Acesso em 29 de junho de 2018;

BRASIL. Lei Nº 12.334. (2010). “Política Nacional sobre Segurança de Barragens.” 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. [S.l.], set. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm>. Acesso em: 18 out. 2017;

BRASIL (2002). Ministério da Integração Nacional. Manual de Segurança e Inspeção de Barragens. Brasília: Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. Pro-Água / Semi-Árido – UGGO. Departamento de Projetos e Obras Hídricas – DPOH;

BRASIL (2012). “Resolução n. 143, de 10 de jul. de 2012.” Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. -. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Brasil, p. 1-16, set. 2012. Disponível em:<<http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/semarh/DOC/DOC000000000020854.PDF>> Acesso em: 25 out. 2017;

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (2017). “Introdução à Ciência da Geoinformação.” Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 29 set. 2017;

CAVARARO, R. (2013) “Manual Técnico de Uso da Terra.” 3. ed. 171 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2017;

COBA e PROCESL (2007). “Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH)”. Memória, Estudo desenvolvido para INAG, DGEG e REN;

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. (1982). “Barragens no Brasil.” São Paulo: Técnica Ltda. 279 p.;

CREPANI, E. *et al.* (2001). “Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico–econômico e ao ordenamento territorial.” INPE, São Jose dos Campos, SP. 103 p.;

EBBESEN, L. “Bacia Hidrográfica.” Disponível em: <<http://www.infoescola.com/hidrografia/bacia-hidrografica/>>. Acesso em: 29 set. 2017;

EMBRAPA (2006). Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). “Sistema brasileiro de classificação de solos.” 2. ed. Rio de Janeiro, RJ;

EITEN, G. “Vegetação do Cerrado. Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas”. Brasília, DF. p. 17-74.

FEDERAL GUIDELINES FOR DAM SAFETY (FERC). (2004) “Selecting and Accommodating Inflow Design Floods for Dams.” USA;

FELGUEIRAS, C. A. (1997). “Geoprocessamento para projetos ambientais”. São José dos Campos, São Paulo. P. 1-39.

FELGUEIRAS, C. A. (1997). “Generalização Cartográfica de Grades Retangulares baseada na Teoria Matemática da Comunicação” Análises sobre Modelos Digitais de Terreno em Ambiente de Sistemas de Informação Geográfica.” VIII Simpósio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial. Sesión Poster. Mérida, Venezuela, 2 a 7 de novembro de 1997;

FERREIRA, N. C. (2006). “Sistema de Informação Geográfica.” Goiânia, GO. 113 p.;

- FIRKOWSKI, H. (2002). “Generalização Cartográfica de Grades Retangulares baseada na Teoria Matemática da Comunicação.” Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná. 136 p.;
- FROEHLICH, D. C. (1995). “Peak Outflow from Breached Embankment Dam”. ASCE Journal of Water Resources, Planning, and Management. 1995. Vol. 121 No. 1. p. 90-97;
- GARCEZ, Lucas Nogueira. (1962). “Construções Hidráulicas.” São Paulo: Edgar Blücher. 276 p.
- GOMES, M. A. A “O que é e para que serve o Geoprocessamento?” Disponível em: <<http://www3.unifai.edu.br/pesquisa/publica%20A7%20B5es/artigos-cient%20ADficos/professores/sequenciais/o-que-%20A9-e-para-que-serve-o>>. Acesso em: 29 set. 2017;
- GRAHAM, W.J. (1999). “A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure. Bureau of Reclamation.” U.S. 1999. Department of Interior, Dam Safety Office, Denver, Colorado;
- HOLANDA, P. S. (2010). “Modelagem Hidrodinâmica e Estudo Morfológico do Lago Água Preta: um dos Mananciais da Grande Belém.” Belém, PA. 75p.;
- LAURIANO, A. W. (2009). “Estudo de ruptura da Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS”. Belo Horizonte, Minas Gerais. 251 p.;
- MACEDO, E. P. (2013). “Modelagem matemática como ferramenta para elaboração de planos de ação emergencial”. São Paulo, SP. 221 p.;
- MARALHÃES, L. P. C (2005). “Modelo Integrado para Simulação de Sistemas Hídricos”. Rio de Janeiro, RJ. 122 p.;
- MARAGON, M. “Barragens de Terra e Encoramento.” In: MARAGON, M. “Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra.” [S.l.: s.n.], 2004. unid. 5, p. 1-27. Disponível em: <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_unid05.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2017;
- MENESES, *et al.* (2012). “Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto”. Brasília, DF. 276 p.;

PIERCE, M.W; THORNTON, C. I. e ABT, S. R. (2010). “Predicting Peak Outflow from Breached Embankment Dams.” Colorado, State University, Engineering Research Center. Fort Collins;

PINTO-COELHO, R. M. (2015). “Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: O rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG).” Belo Horizonte, Minas Gerais. 27 p.

PORTO, Rubem de La Laina et al., (1998). “Amortecimento de Onda de Cheia em Reservatório.” São Paulo: [s.n.]. 16 p.

QUEENSLAND. (2012). “Guidelines for Failure Impact Assessment of Water Dams. Department of Energy and Water Supply.” State of Queensland. Australia.

SANTOS, A.R., *et al.* (2013). “Apostila de Sensoriamento Remoto”.Espírito Santos, v.1. 86 p.

SANTOS, A.R., *et al.* (2014). “Elaborando Meu Primeiro Mapeamento”. Alegre, Espírito Santos, v.1. 55 p.

SARTORI, A., *et al.* (2005). “Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação”. 14p.

SECTOR. D. (2012). “Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios.” US Department of Homeland Security.

SILVA. V.C.B. (2010). “Iniciando no ArcGIS”. Apostila elaborada durante o período de monitoria da disciplina de Sistemas de Informações Geográficas no 1º e 2º semestre de 2010. Departamento de Ciências Biológicas, Ambientais e da Saúde – DCBAS. Belo Horizonte, MG, 62p.

EUA (2011). “Dams Sector, Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios”. U.S. Department of Homeland Security.

EUA (2017). USGS. “Earth Explorer: Science for a Changing World.” Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 26 out. 2017.

TUCCI, C,E,M. *et. al.* (1993). Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Ed. UFRGS/.ABRH/ EDUSP, 1993. 943 p.

TURNER, B.L., MEYER, W. B., SKOLE, D. (1994). “Global land-use/land cover change: Towards an integrate study”. *Ambio*, 23(1), 91-95.

VALADARES, A. A. (2017). “Análise da dinâmica do uso e cobertura do solo sobre a vulnerabilidade ambiental em área do Distrito Federal.” Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM - 200/2017, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 197p.

VENTURIERI, A. e SANTOS, J.R. (1998). “Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal”. In: Assad. E.D.; Sano E.E. (eds.) *Sistemas de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura*. 2ª Ed., rev. e ampl. Embrapa - SPI, Brasília, DF, 351-371.

VERÓL, A. P. (2010). “Simulação da Propagação de Onda Decorrente de Ruptura de Barragem, considerando a Planície de Inundação Associada a partir da Utilização de um Modelo Pseudo-bidimensional.” 237 p. Dissertação (Engenharia Civil) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

WAHL, T. L., (1998). “Prediction of Embankment Dam Breach Parameters: A Literature Review and Needs Assessment.” U.S. Department of Interior, USBR.

WILLINGHOEFER, M. (2015). “Avaliação do Risco de Rompimento da Barragem de uma Pequena Central Hidrelétrica na Bacia do Rio do Peixe.” 86 p. Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (Engenharia Sanitária e Ambiental) - UFSC, Florianópolis.