UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DOS DANOS POTENCIAIS EM COMUNIDADES AFETADAS POR ROMPIMENTO DE BARRAGENS

LUCAS OLIVEIRA MENDES

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE GEOTECNIA

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2016

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

AVALIAÇÃO DOS DANOS POTENCIAIS EM COMUNIDADES AFETADAS POR ROMPIMENTO DE BARRAGENS

LUCAS OLIVEIRA MENDES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA 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 CIVIL.

APROVADA POR:

_____

ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (Universidade de Brasília)
(ORIENTADOR)

_____

MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, PhD (Universidade de Brasília)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

GABRIEL JAIME ZAPATA GUERRA, DSc (Universidade Católica de Brasília)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 1 de dezembro de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

MENDES, LUCAS OLIVEIRA.
Avaliação dos Danos Potenciais em Comunidades Afetadas por Rompimento de Barragens [Distrito Federal] 2016.
xiv, 79 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)
Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
1. Barragens de terra 2. Gestão de Riscos
3. *Dam Break* 4. Modelos Computacionais
I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MENDES, L.O. (2016). Avaliação dos Danos Potenciais em Comunidades Afetadas por Rompimento de Barragens. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-AA-003/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas Oliveira Mendes
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação dos Danos Potenciais em Comunidades Afetadas por Rompimento de Barragens.
GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

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.

Lucas Oliveira Mendes
SQ 16 Quadra 2 Casa 37
72880-590 – Cidade Ocidental/GO – Brasil

ALGUMAS PALAVRAS E AGRADECIMENTOS

Após seis anos de muita dedicação, algumas surpresas e várias noites mal dormidas, termino minha graduação com um projeto que acredito ter uma grande relevância para a engenharia e para a sociedade brasileira, apesar de sua aparente simplicidade. Creio que nós assumimos uma grande responsabilidade ao projetar as estruturas, visto que vidas estão em nossas mãos. E é com essa preocupação que me propus a desenvolver essa monografia.

Apesar do clichê, a vida é feita de momentos, todos únicos. E aqui começo meu agradecimento aos meus familiares, que estiveram de fato presente em todos os momentos da minha vida. Com especial carinho para meu irmão, Samuel, e meus pais, Maria e Ribamar. Eles são o inicio de tudo e os principais responsáveis pelo meu sucesso, e até hoje são os que mais incentivam meus estudos.

Dentro desses seis anos tive contato com várias pessoas, os quais colocaram um tijolo na escada que me conduziu até aqui, e agradeço a todos pelo aprendizado. De modo especial aos meus colegas da Universidade de Brasília que me acompanham desde o primeiro semestre de 2011 e meus colegas brasileiros com os quais convivi na University of Bath, na Inglaterra. Com eles compartilhei minhas qualidades e meus defeitos, minhas certezas e minhas dúvidas.

Com relação a este projeto quero agradecer, primeiramente, ao meu orientador André Assis, cujo sucesso e reconhecimento profissional condizem com sua simplicidade e caráter. Um exemplo de pessoa, com o qual tenho orgulho de ter desenvolvido esse projeto. Venho agradecer também ao Engenheiro Felipe Rocha por sua paciência com meus intermináveis questionamentos sobre o programa HEC-RAS®, sempre disposto a ajudar. Agradeço também ao doutorando Renato Raposo, que me ajudou com o programa GeoStudio®, e ao meu colega de graduação Gustavo Carvalho, com o qual pude discutir sobre a modelagem de *dam break*. Todos os três têm um longo caminho na engenharia e desejo a todos muito sucesso. Também venho expressar minha gratidão aos professores Luis Fernando, da Universidade de Brasília, e Kevin Briggs, da University of Bath, com os quais desenvolvi outros trabalhos dentro da geotecnia e que me incentivam, até hoje, na área.

Por último, porém mais importante, agradeço a Deus, pai todo poderoso, que me cobre com sua infinita misericórdia apesar de meus defeitos e erros. Sem seu apoio nada disso seria possível.

“No outro dia deixava
o Agreste, na Chã do Carpina.
Entrava por Paudalho,
terra já de cana e de usinas.
Via plantas de cana
com sua cabeleira, ou crina,
muita folha de cana
com sua lâmina fina,
muita soca de cana
com sua aparência franzina,
e canas com pendões
que são as canas maninhas.
Como terras de cana,
são muito mais brandas e femininas.
Foram terras de engenho,
agora são terras de usina.

Foram terras de engenho,
agora são terras de usina.
É o que contam os rios
que vou encontrando por aqui.
Rios bem diferentes
daqueles que já viajam comigo.
E estes também abraço
com abraço líquido e amigo.
Os primeiros, porém
nenhuma palavra respondiam.
Debaixo do silêncio
eu não sei o que traziam.
Nenhum deles também
antecipar sequer parecia
o ancho mar do Recife
que os estava aguardando um dia.”

trecho de “O Rio”, de João Cabral de Melo Neto (1953)

RESUMO – AVALIAÇÃO DOS DANOS POTENCIAIS EM COMUNIDADES AFETADAS POR ROMPIMENTO DE BARRAGENS

Assim como várias estruturas da construção civil, as barragens estão sujeitas a incertezas durante seu comissionamento. Contudo, o colapso de barragens pode ter consequências catastróficas, dizimando comunidades inteiras e a biodiversidade na região, além de afetar outras cidades localizadas na mesma bacia hidrográfica da barragem, mesmo estando a quilômetros de distância do barramento. Sendo assim, é necessário uma gestão eficiente dos riscos, levando em consideração a probabilidade de ocorrência dos mecanismos de ruptura e a quantificação das consequências potenciais, materiais e sociais, em caso de incidente. No caso brasileiro, frise-se que a Política Nacional de Segurança de Barragem constitui uma legislação arrojada como diretriz para regular a gestão de riscos de barragens no país. No processo da ruptura de barragens é necessário investigar as possíveis causas do incidente, como instabilidade de taludes, galgamento e *piping*. Além disso, as dimensões da brecha e a hidrograma de ruptura são parâmetros importantes na modelagem da inundação. Uma vez a inundação modelada cabe mapear as zonas de maior perigo a partir do risco hidrodinâmico, parâmetro este que é o produto entre a profundidade e a velocidade da cheia, além do tempo de chegada da onda; todo esse estudo é necessário para a elaboração do Plano de Ações Emergenciais, preconizada pela lei n° 12.334/2010 e que é de responsabilidade do empreendedor da barragem. Sendo assim foi executada a simulação da ruptura (*dam break*) da Barragem de Carpina, em Pernambuco, gerando uma mancha de inundação ao longo do Rio Capibaribe até a foz do rio, em Recife. A simulação foi executada a partir de um modelo 2D no programa HEC-RAS®, que utiliza as equações de Saint-Venant no cálculo dos fluxos permanente e transiente. Como resultado, notaram-se várias áreas sob alerta vermelho para o perigo, no qual pode haver o colapso de alguns edifícios. Além disso, verificou-se a influencia do Modelo Digital do Terreno nos resultados; de certa forma, um modelo de terreno menos preciso tende a aumentar o tamanho da mancha e distorcer os resultados na região aonde o escoamento é supercrítico, nas proximidades da face de jusante do maciço, gerando valores muito maiores em relação aos resultados gerados com modelos de terreno mais precisos. Com relação à formação da brecha adotou-se a formulação de Froehlich (2008) que gerou resultados mais realistas para a vazão de pico do hidrograma de ruptura e para o tempo de formação da brecha; contudo, verificou-se a necessidade da atualização das formulações para a brecha a partir da retroanálise de casos recentes de ruptura de barragens.

ABSTRACT – EVALUATION OF LIKELY DAMAGES IN VILLAGES AFFECTED BY DAM BREAK FLOODING

Similarly to other building structures, Dams are subject to uncertainties during their commissioning. Nevertheless, dam breaks are commonly catastrophic, destroying entire villages and devastating biodiversity in the region. Furthermore, cities which are in the same watershed of the dam can be also affected, even if they are kilometres far from it. Therefore, it is necessary an efficient risk management of dams, taking into consideration the probability of a collapse to occur and the probable consequences in case of a dam break. In Brazilian scenario, the Dam Safety Policy plays an important role as a guideline for risk management in dams. In a dam break process it is necessary to investigate the probable causes of the incident, such as slope instability, overtopping or piping. Also, the breach dimensions and the breach hydrograph are important inputs in the flooding modelling. Once having the inundation boundaries, one should map the most dangerous areas based on the product of depth and flood velocity, which represents the level of hazard of the flood, and indicate the arrival time of the flood. All this study is necessary for the elaboration of the Emergency Plan, which must be done by dam's owner, according to Brazilian law. So, it was conducted the dam break of Carpina Dam, located in the state of Pernambuco, Brazil, generating a flood in Capibaribe river until its mouth in the city of Recife. The flood was simulated in a full 2D model using the software HEC-RAS®. As a result, it can be noticed great areas with red alert, where buildings can collapse due to water power. Furthermore, the use of a less precise Digital Elevation Model (DEM) tends to increase flood area and distort results nearby the downstream face of the dam, in a region with a supercritical flow regime, producing higher results compared to other simulations with more precise DEMs. Regarding to the breach dimensions, the Froehlich (2008) equations were chosen, as long as they provided more realistic results for peak flow and breach development time. However, it is necessary to update such equations from the analysis of recent dam break cases.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. OBJETIVOS 2
1.2. ESCOPO DO PROJETO 3
2. GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS 4
2.1. CONCEITO DE RISCO EM BARRAGENS 4
2.2. GESTÃO DE RISCOS E SEUS COMPONENTES 5
2.2.1. Identificação dos riscos 5
2.2.2. Análise de riscos 6
2.2.3. Avaliação e apreciação dos riscos 7
2.3. INCERTEZAS ASSOCIADAS AOS RISCOS EM BARRAGENS 8
2.4. EXPERIÊNCIA E LEGISLAÇÃO BRASILEIRA NA GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS 9
3. RUPTURA DE BARRAGENS GEOTÉCNICAS 13
3.1. MODOS DE RUPTURA 13
3.1.1. Ruptura por Galgamento 13
3.1.2. Ruptura por *Piping* 15
3.1.3. Ruptura por instabilidade de taludes 16
3.2. ESTUDOS DE *DAM BREAK* 18
3.2.1. Formação da brecha 18
3.2.2. Propagação da onda de inundação 20
3.2.3. Estimativa dos danos e mapas de inundação 22
3.3. ESTATÍSTICAS E CASOS HISTÓRICOS DE INCIDENTES 27
3.3.1. Barragem de Teton - 1976 (Idaho, EUA) 29
3.3.2. Barragem do Fundão - 2015 (Minas Gerais, Brasil) 31
4. ASPECTOS DA BARRAGEM DE CARPINA 35
4.1. BACIA DO RIO CAPIBARIBE E OCUPAÇÃO ANTRÓPICA 37
4.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM 37
5. METODOLOGIA E AQUISIÇÃO DE DADOS 41
5.1. MODELO HEC-RAS® 41
5.2. DADOS REQUERIDOS PARA SIMULAÇÃO 42
5.2.1. Modelo Digital do Terreno 42
5.2.2. Seção transversal do rio e abertura da calha 43

5.2.3. Área de alagamento e intervalo de tempo para as iterações 44
5.2.4. Coeficiente de Manning 45
5.2.5. Forma do maciço 45
5.2.6. Curva cota-volume do reservatório 46
5.2.7. Dimensões da brecha 47
5.2.8. Hidrograma de ruptura 48
6. RESULTADOS E ANÁLISE 51
6.1. COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES SIMULAÇÕES 51
6.2. ESTUDOS DE CASO 55
6.2.1. Estudo de Caso: Recife-PE 55
6.2.2. Estudo de Caso: Paudalho-PE 56
7. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS 58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 61
APÊNDICE A – GLOSSÁRIO 65
APÊNDICE B – QUADROS DE CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS (MMA, 2012a) 67
APÊNDICE C – SEÇÃO TRANSVERSAL DA BARRAGEM DE TETON (SEED E DUNCAN, 1986). 71
APÊNDICE D – SEÇÃO TRANSVERSAL DA BARRAGEM DE CARPINA (AMARANTE, 1982) 72
APÊNDICE E – MAPAS DE INUNDAÇÃO 73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura da gestão de riscos em barragens (modificado - FEMA, 2015) 6
Figura 3.1 – Processo de rompimento por galgamento (USACE, 2014) 14
Figura 3.2 – Zonas de erosão (Powledge *et al.*, 1998, citado por Perini, 2009) 15
Figura 3.3 – Processo de rompimento por *piping* (USACE, 2014) 15
Figura 3.4 – Instabilidade de taludes em barragem (Assis, 2015) 16
Figura 3.5 – Geometria da brecha (USACE, 2014) 18
Figura 3.6 – Exemplo de hidrograma de ruptura (Perini, 2009) 21
Figura 3.7 – Propagação do hidrograma de ruptura (modificado - USACE, 2014) 21
Figura 3.8 – Mapa de inundação (FEMA, 2013b) 26
Figura 3.9 – Incidentes ocorridos em barragens entre 2011 e 2014 (ANA, 2015) 29
Figura 3.10 – Vítimas fatais em incidentes em barragens entre 2011 e 2014 (ANA, 2015) ... 29
Figura 3.11 – Barragem de Teton após o colapso (Seed e Duncan, 1986) 30
Figura 3.12 – Barragem de Fundão após o colapso (IBAMA, 2015) 32
Figura 4.1 – Localização da Barragem de Carpina no Estado de Pernambuco 35
Figura 4.2 – Barragem de Carpina e o Rio Capibaribe (em vermelho) 36
Figura 4.3 – Inundação em Recife – 1975 (Jornal do Comércio, 2015a) 36
Figura 4.4 – Gradientes de percolação 39
Figura 4.5 – Plano de ruptura do talude de montante 39
Figura 4.6 – Plano de ruptura do talude de jusante 39
Figura 4.7 – Distribuição normal para o FS do talude de montante 40
Figura 4.8 – Distribuição normal para o FS do talude de jusante 40
Figura 5.1 – Imagens SRTM com resolução de 90 m (esquerda) e 30 m (direita) 43
Figura 5.2 – Seção transversal do Rio Capibaribe (ANA, 2016) 43
Figura 5.3 – Seções transversais ao longo do Rio Capibaribe (áreas urbanas em rosa) 44
Figura 5.4 – Modelagem 2D da inundação (leito do rio em cinza) 45
Figura 5.5 – Modelagem do maciço 46
Figura 5.6 – Curva cota-volume do reservatório de Carpina 46
Figura 5.7 – Hidrogramas de ruptura para o galgamento 49
Figura 6.1 – Comparação entre os mapas gerados pelas Simulações 1 e 2 53
Figura 6.2 – Comparação entre os mapas gerados pelas Simulações 2 e 3 54
Figura 6.2 – Foz do Rio Capibaribe no centro de Recife 55
Figura 6.3 – Localização da cidade de Paudalho 56
Figura 6.4 – Topografia na cidade de Paudalho (curvas de nível a cada 5 m) 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Incertezas e possíveis tratamentos (Menescal, 2015) 8
Tabela 2.2 – Critérios de classificação das barragens (MMA, 2012a) 11
Tabela 2.3 – Faixas de classificação das barragens (MMA, 2012a) 11
Tabela 3.1 – Parâmetros de formação da brecha 19
Tabela 3.2 – Vazões de pico (USACE, 2014) 20
Tabela 3.3 – Taxas de mortes estimadas em rompimento de barragens (USBR, 1999) 23
Tabela 3.4 – Consequências em função do risco hidrodinâmico (modificado – SYNAVEN *et al*. 2000, citado por Balbi, 2008) 25
Tabela 3.5 – Graus de perigo para seres humanos (Viseu, 2006, citado por Balbi, 2008) 25
Tabela 3.6 – Graus de perigo para edificações (Viseu, 2006, citado por Balbi, 2008) 25
Tabela 3.7 – Estatísticas de rupturas de barragens até 1986, excluindo as construídas no Japão até 1930 e na China (modificado – Foster *et al.*, 2000, citado por Perini, 2009) 28
Tabela 3.8 – Lista de eventos em barragens em 2014 (modificado – ANA, 2015) 28
Tabela 4.1 – Especificações da Barragem de Carpina (Andrade, 2006; SRH, 2010) 35
Tabela 4.2 – Parâmetros para análise de estabilidade no GeoStudio® 38
Tabela 4.3 – Resultados para a estabilidade dos taludes 40
Tabela 5.1 – Formulações para o cálculo da brecha de ruptura (USACE, 2014) 47
Tabela 5.2 – Resultados para as brechas no evento de galgamento 48
Tabela 5.3 – Vazões de pico 50
Tabela 6.1 – Tempos de chegada da onda nas cidades atingidas 51
Tabela 6.2 – Simulações executadas 51
Tabela 6.3 – Valores máximas gerados e área das manchas de inundação 52

SIGLAS E ABREVIAÇÕES

ABNT – Agência Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas

ANCOLD – *Australian National Committee on Large Dams Incorporated*

AS/NZS – *Standards Australia/Standards New Zealand (joint standard)*

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

DNOS – Departamento Nacional de Obras e Saneamento

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

FEMA – *Federal Emergency Management Agency* (*USA*)

HEC – *Hydrologic Engineering Center* (orgão da *USACE – USA*)

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

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICOLD – *International Commission on Large Dams*

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPEA – Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas

ISO – *International Organization for Standardization*

MDT – Modelo Digital de Terreno

MI – Ministério da Integração Nacional

MMA – Ministério do Meio Ambiente

NASA – *National Aeronautics and Space Administraton* (*USA*)

NWS - *National Weather Service* (*USA*)

PAE – Plano de Ações Emergenciais

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

PR – Presidência da República

SNISB – Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

SRH - Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos do Estado de Pernambuco

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

UK HSE – *United Kingdom Health and Safety Executive*

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

USBR – *United States Bureau of Reclamation*

USGS – *United States Geological Survey*

UTM – Universal Transverse Mercator

1. INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas destinadas à retenção de líquidos e sólidos. Tais estruturas podem ser utilizadas para retenção de água em rios, a fim de propiciar abastecimento para cidades e comunidades, ou para geração de energia elétrica. Também podem ser projetadas para reter sólidos e rejeitos provenientes da atividade mineradora. De todo modo, as barragens são uma realidade e um elemento importante no contexto do desenvolvimento mundial, principalmente no Brasil. Por exemplo, a Agência Nacional de Águas (ANA), em 2014, reportou 14.966 barragens cadastradas no Brasil, sendo 13.366 (89%) para usos múltiplos da água, 663 (5%) para contenção de rejeitos de mineração, 642 (4%) para geração de energia elétrica e 295 (2%) para contenção de resíduos industriais (ANA, 2015).

A geotecnia e a construção civil dispõem de métodos e equipamentos que, ao longo dos tempos, têm melhorado o desempenho das barragens, não somente na construção em si mas também em seu monitoramento. Como qualquer outra estrutura, as barragens estão sujeitas a incertezas em sua concepção, principalmente considerando a alta variabilidade dos parâmetros geotécnicos envolvidos. Considerando que as consequências de uma provável ruptura podem ser catastróficas, visto o grande volume retido, devem-se considerar todos os eventos possíveis de ocorrência de falha, quantificando seu risco e seu dano potencial. No Brasil, o Relatório de Segurança de Barragens de 2014 (ANA, 2015) reportou 27,54% das barragens classificadas quanto ao risco como tendo alto risco, e 48,69% das barragens classificadas quanto ao dano potencial na categoria de alto dano. Já nos Estados Unidos, 17% das barragens registradas foram classificadas como tendo alto dano potencial (USACE, 2015, citado por Day, 2016).

Portanto, é necessário ir além da análise técnica tradicionalmente proposta pela engenharia, o qual quantifica a segurança deterministicamente, usando fatores de segurança provindos de relações matemáticas entre as forças envolvidas na ruptura. Mais que isso, faz-se necessário uma análise de riscos o qual envereda por duas vias: a probabilidade de ruptura e a quantificação das consequências, ou danos potenciais.

A probabilidade de ruptura quantifica a chance de colapso da estrutura, com base nos diversos eventos de falha considerados e lançando mão de distribuições de probabilidade consagradas.

Ao associar uma probabilidade de ocorrência a um evento de falha, a análise probabilística faz uma análise mais adequada e explícita das incertezas, possibilitando projetos mais viáveis economicamente. Já em relação às consequências, a literatura aborda o conceito de vulnerabilidade, que se refere ao nível de dano ou perda os quais a sociedade e o meio ambiente estão sujeitos. E, muitas vezes, quantificar esses danos envolve questões econômicas, sociais, culturais e legais.

Toda essa análise visa fornecer à sociedade medidas mais tangíveis sobre a ruptura de barragens, assim como balizar políticas de prevenção de incidentes. Mundialmente, normas e legislações tratam de cuidar da questão da segurança de barragens. Nos Estados Unidos, por exemplo, o documento FEMA P-1025, do *US Department of Homeland Security*, propõe as diretrizes para a análise de risco em barragens. Já no Brasil a principal diretriz na área é a lei 12.334/2010, ou Lei de Segurança de Barragens.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste projeto é o de abordar a questão da gestão de riscos em barragens e se aprofundar na mensuração do grau de perigo o qual as comunidade afetadas pela ruptura de barragens estão sujeitas. Para tanto, será necessário também lançar mão de elementos da hidráulica e de geoprocessamento.

Os objetivos específicos incluem:

- Abordar a questão da gestão de riscos e das incertezas associadas, além de mostrar a experiência e a legislação brasileira na gestão de riscos em barragens.
- Fazer uma breve revisão bibliográfica do processo de rompimento de barragens de terra e enrocamento, abordando os mecanismos geotécnicos e hidráulicos envolvidos (estudos de *Dam Break*), além de exemplificar casos históricos.
- Executar o *Dam Break* de uma barragem conhecida e analisar a mancha de inundação gerada, com foco na profundidade e na velocidade do fluxo, de modo a obter o risco hidrodinâmico. Para tanto, serão utilizados o modelo hidráulico HEC-RAS®, para simular o *dam break*, e o modelo hidrológico HEC-HMS®, para plotar o hidrograma de ruptura, além do programa ArcGIS®, para a montagem dos mapas de inundação, e do programa GeoStudio®, para uma análise preliminar da estabilidade dos taludes do maciço.

1.2. ESCOPO DO PROJETO

Esse projeto está dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo consiste em uma introdução do trabalho, no qual é apresentado, brevemente, o tema, bem como os objetivos a serem cumpridos no restante do projeto.

O segundo capítulo trata da questão da gestão de risco em barragens. Inicialmente é esclarecido o conceito de risco baseado na probabilidade de ocorrência e nas consequências potenciais. Ainda são apresentadas as etapas do gerenciamento de risco e as correspondentes incertezas associadas, além da legislação brasileira para segurança de barragens.

O terceiro capítulo trata do estudo da ruptura da barragem em si. Nessa parte são apresentados os modos de ruptura mais comuns em barragens de terra e enrocamento. Já no estudo de *dam break* é abordada a formação da brecha de ruptura, a propagação da inundação e os métodos de estimativa dos danos potenciais. Também são apresentadas estatísticas de incidentes em barragens, além de uma breve explanação de dois casos de grande repercussão.

O quarto capítulo aborda os principais aspectos da barragem escolhida, tais como suas dimensões, o volume do reservatório e a vazão vertida. Ainda é apresentada uma breve explicação sobre o rio barrado e sobre a ocupação humana nas margens do rio, de modo a situar o leitor sobre o que seria afetado caso haja um rompimento. Por fim, é feita uma análise preliminar da estabilidade dos taludes do maciço com o uso do programa GeoStudio®.

O quinto capítulo mostra a metodologia para a execução do estudo de *dam break*. Primeiramente é apresentado o programa HEC-RAS®, e, em seguida, são detalhados os parâmetros e dados de entrada necessários para a simulação, tais como modelo digital de terreno, curva cota-volume do reservatório, dimensões da brecha e hidrograma de ruptura.

O sexto capítulo mostra os resultados da simulação, que consistem nos mapas de inundação para a velocidade, profundidade, risco hidrodinâmico e tempo de chegada da cheia. Além disso, são feitas comparações com outras duas simulações e é feito o estudo de caso para duas cidades afetadas pela cheia. Por fim, o sétimo capítulo apresenta as conclusões, as limitações da metodologia e as sugestões para continuidade dos trabalhos.

2. GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS

2.1. CONCEITO DE RISCO EM BARRAGENS

Primeiramente, vale fazer uma reflexão sobre o conceito de risco, tal como apresentado por Melo (2014). Baseado em abordagens tradicionais, o risco pode ser entendido como a capacidade de gerar um dano ou uma condição perigosa. Já outra abordagem envolve o reconhecimento dos perigos aos quais a estrutura está sujeita, identificando os possíveis modos de falha e as consequências da ruptura.

A literatura apresenta uma variedade de classificações para os riscos, e muitas vezes não há um consenso sobre as terminologias e os conceitos adotados. O Comitê Internacional de Grandes Barragens – ICOLD (2005, citado por Melo, 2014), por exemplo, trabalha com eventos que podem gerar uma condição de perigo à barragem, e propõe sua classificação em riscos naturais e humanos. Os riscos naturais, como cheias e sismos, são considerados como inevitáveis, mas podem ser mensurados. Já os riscos tecnológicos estão associados aos processos construtivos e de monitoramento, inerentes ao comissionamento das barragens, como o uso inadequado de materiais, falhas de projeto e erros no monitoramento.

Outra abordagem é a de Hughes *et al*. (2000, citado por Melo, 2014), os quais identificam o que denominam de "mecanismos iniciadores", ou seja, eventos específicos que geram condições de perigo. Dentro desse rol há mecanismos geotécnicos, como instabilidade de taludes, erosão interna (*piping*), recalques, deformações excessivas e poropressões elevadas; mecanismos externos, como sismos e cheias; falhas de projeto e operacionais, além de falhas intencionais, como vandalismo.

Em termos de norma, adota-se no Brasil a NBR ISO 31000:2009, o qual apresenta várias definições para risco, dentre as quais cabe ressaltar duas:

- Efeito das incertezas nos objetivos;
- "O risco é muitas vezes expresso em termos de uma combinação de consequências de um evento (...) e a probabilidade de ocorrência associada." (ABNT, 2009).

Nota-se que dentro da concepção de risco também estão embutidas as consequências do evento de risco, ou incidente. Normalmente tais consequências são mensuradas em termos monetários, como indenizações e custos de reconstrução da área afetada. Associando com a probabilidade de ocorrência do evento, Wolff (2014) propõe a Equação 2.1 para o cálculo do risco:

$$R = P(A) \times C \tag{2.1}$$

Sendo:
R o risco associado ao perigo;
P(A) a probabilidade de ocorrência do evento de risco, ou incidente;
C é a consequência do evento em questão (em termos monetários).

A concepção do risco baseada nas consequências do incidente tem relevância na tomada de decisões em projetos de engenharia, principalmente nos estudos de viabilidade do empreendimento; por exemplo, em projetos que exijam alta confiabilidade, o projeto mais adequado pode ser aquele que ofereça o menor risco.

2.2. GESTÃO DE RISCOS E SEUS COMPONENTES

A prática da gestão de riscos é essencialmente gerencial, o qual envolve uma sequencia de procedimentos iterativos em um processo cíclico de melhoria contínua das tomadas de decisões, gerando um incremento de desempenho. A Figura 2.1 mostra uma esquematização desse ciclo gerencial (FEMA, 2015). A seguir serão descritas as principais etapas da gestão de riscos.

2.2.1. Identificação dos riscos

A NBR ISO 31000:2009, no item 5.4.2, estabelece que os entes identifiquem as fontes de risco, assim como suas causas e consequências potenciais, de modo a criar um rol de eventos que possam comprometer a segurança. É necessário ter cuidado na seleção dos eventos, já que um risco ignorado nesta etapa não será incluído nas etapas seguintes. Cabe ainda considerar as possíveis reações em cadeia provocadas por incidentes específicos, que podem gerar efeitos

cumulativos ou em cascata. Quanto às consequências, elas também devem ser listadas, mesmo que suas causas não estejam claras.

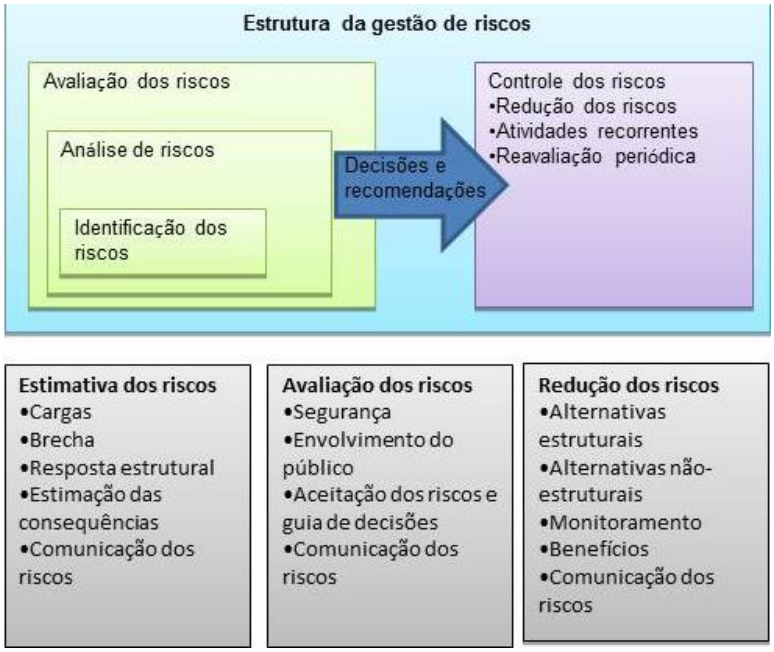


Figura 2.1 – Estrutura da gestão de riscos em barragens (modificado - FEMA, 2015)

2.2.2. Análise de riscos

Na fase de análise de riscos, além da identificação dos eventos de risco e das potenciais consequências, são feitas análises quantitativa, qualitativa e semiquantitativa dos riscos mais prováveis (FEMA, 2015). As análises qualitativas visam descrever a magnitude das potenciais consequências, sendo normalmente utilizadas em análises preliminares de forma a detectar os riscos que demandam um estudo mais detalhado. Já na análise semiquantitativa, números são associados às descrições qualitativas, de modo a produzir uma maior escala de classificação; nessa análise, é importante verificar a precisão dos valores utilizados, bem como a validade dos modelos adotados (Perini, 2009).

Além disso são estimadas as probabilidades de ocorrência dos eventos, lançando mão de métodos probabilísticos. A norma australiana, por exemplo (AS/NZS, 2004, citada por Perini, 2009), cita as possíveis fontes de informação para modelagem das estimativas:

- Registros anteriores;
- Prática e experiência relevantes;
- Literatura publicada;

- Pesquisa de mercado;
- Resultados de consulta pública;
- Experimentos e protótipos;
- Modelos econômicos e de engenharia;
- Julgamentos de especialistas.

Vale acrescentar que a análise de riscos tem a função de melhorar a percepção do avaliador sobre o risco, de modo a definir não somente se o risco deve ser tratado, com base na viabilidade do empreendimento, mas também definir a melhor estratégia de tratamento, de modo a obter a melhor relação custo-eficiência (AS/NZS, 2004, citada por Perini, 2009).

2.2.3. Avaliação e apreciação dos riscos

Na fase de avaliação de riscos, a segurança e os riscos são apreciados para uma estrutura específica, sendo feitas recomendações e decisões com base na identificação e na análise dos riscos, assim como em outras informações relevantes. Os agentes envolvidos nessa avaliação podem ser o proprietário da barragem, o projetista e até agentes de regulação (FEMA, 2015). Perini (2009) ressalta que muitas dessas decisões são, na verdade, julgamentos de valor, comumente baseadas em interesses de agentes locais e da comunidade, fortemente influenciados por processos políticos.

As avaliações são comumente feitas baseadas em critérios pré-estabelecidos, muitos deles presentes em consagrados catálogos e portfólios, sendo os mais utilizados em barragens o *UK HSE Tolerability of Risk Guidelines, ANCOLD Guidelines on Risk Assessment* e *USBR Public Protection Guideline*. Perini (2009) ainda afirma que, apesar de algumas diferenças nas diretrizes, os três catálogos são embasados nos chamados critérios puros de apreciação, os quais são:

- Equidade: todos os indivíduos têm direito a certos níveis de proteção;
- Utilidade: comparação entre os benefícios e os custos das medidas de prevenção dos riscos;
- Tecnologia: é atingido um nível satisfatório de prevenção do risco quando o estado da arte das medidas de controle corresponde efetivamente às medidas aplicadas para controlar os riscos.

2.3. INCERTEZAS ASSOCIADAS AOS RISCOS EM BARRAGENS

Tanto a concepção da barragem quanto seu gerenciamento de riscos estão sujeitos a incertezas. Essas incertezas são inerentes aos dados de entrada do sistema, como parâmetros de projeto (geotécnicos e hidráulicos), medidas de monitoramento (medições de piezômetros e demais instrumentações), identificação dos modos de falha, condições da provável ruptura (horário e condições do tempo) e parâmetros socioambientais, como o número de pessoas em risco no momento do incidente. Bowles (1997, citado por Perini, 2009) afirma que, apesar da metodologia tradicional considerar os riscos e as incertezas, somente na gestão de riscos é que eles são tratados de forma mais explícita, provendo ao gerenciador uma melhor compreensão dos riscos a serem avaliados. Portanto, é necessário também identificar as possíveis fontes de incertezas, as quais estão listadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Incertezas e possíveis tratamentos (Menescal, 2015)

Fonte/tipo	**Possíveis origens**	**Tratamento analítico**
Física	Conhecimento inadequado dos eventos naturais e do comportamento estrutural	Simulação de Monte-Carlo
Estatística	Erro de amostragem	Desvio padrão, limites de confiança.
Epistêmica	Simplificação de modelos matemáticos	Simulação de Monte-Carlo, Árvore de eventos.
Decisória	Subjetividade	Árvore de eventos
Predição	Eventos futuros incertos	Árvore de eventos
Reação pública	Falta de confiabilidade e de transparência	Comunicação
Erro humano	Ignorância, negligência, falta de experiência e de treinamento, etc.	Teoria do erro grosseiro

Na tentativa de estimar as consequências das incertezas no modelo de gestão adotado, lança-se mão de várias técnicas de minimização de erros, como as citadas na Tabela 2.1. Dentre elas, a análise estocástica é uma das mais utilizadas, no qual as incertezas, associadas aos dados de entrada e aos parâmetros adotados, são representadas por distribuições de probabilidade. Uma das análises estocásticas mais usuais é a Simulação de Monte Carlo.

A Simulação de Monte Carlo surgiu inspirada nos resultados das roletas de cassinos, e é bastante eficiente mesmo em processos não lineares ou com dados que possuem distribuições de probabilidades distintas. Nessa análise, os valores das variáveis são gerados

aleatoriamente, os quais servirão como dados de entrada para a solução do problema. Esse processo é repetido quantas vezes forem necessárias, de modo a formar uma população de soluções as quais podem ser ajustadas por uma distribuição de probabilidade própria, com média, variância e desvio padrão (Perini, 2009).

2.4. EXPERIÊNCIA E LEGISLAÇÃO BRASILEIRA NA GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS

O Brasil é um país de referência com relação à construção de barragens de terra e enrocamento, visto a grande quantidade de barragens construídas em território brasileiro, justificado pelo seu alto potencial hidrológico. Contudo, essa experiência contrasta com os vários incidentes em barragens já ocorridos, muitos deles de grande relevância. Nesse sentido, montou-se uma legislação para estabelecer as diretrizes para a segurança de barragens, como a Lei n° 12.334 de 2010 e a resolução n° 143 de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

A lei n° 12.334, criada em 20 de setembro de 2010, estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Para tanto a lei, no art. 1° Parágrafo Único, delimita sua aplicação a barragens destinadas à acumulação de água para diversos usos e à disposição de rejeitos industriais e de mineração que apresentem pelo menos uma das seguintes características (PR, 2010):

- Altura do maciço, do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 metros;
- Capacidade do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m^3;
- Reservatório que contenha resíduos perigosos;
- Categoria de dano potencial associado com base em critérios estabelecidos pelo CNRH, como preconizado pelo art. 7° da lei 12.334/2010.

No art. 4° a lei estabelece os fundamentos do PNSB, dentre os quais cabe destacar (PR, 2010):

- “a segurança de uma barragem deve ser considerada nas suas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento, primeiro vertimento, operação, desativação e usos futuros”;

- A população deve ser informada sobre as ações preventivas e emergenciais, bem como ser estimulada a participar das tomadas de decisão;
- O empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem.

Já o artigo 6° estabelece os instrumentos da PNSB, que inclui (PR, 2010):

- O sistema de classificação das barragens por categoria de risco e dano potencial associado;
- O Plano de Segurança de Barragem (PSB), de responsabilidade do empreendedor, que deve incluir, além de outros itens (MMA, 2012b):
  - Dados técnicos do empreendimento e de operação dos dispositivos de descarga da barragem;
  - Manuais dos procedimentos de inspeção e monitoramento, bem como os relatórios das inspeções de segurança;
  - Plano de ações emergenciais (PAE);
  - Revisões periódicas de segurança;
- O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), sob a coordenação da Agência Nacional de Águas (ANA), cujo objetivo é de coletar e gerir as informações sobre a segurança das barragens existentes no Brasil, além de divulgar as informações em plataforma informatizada aberta ao público (MMA, 2012b);
- O Relatório de Segurança de Barragens (RSB), elaborado e coordenado pela ANA, o qual deverá conter, além de outros itens (MMA, 2012b):
  - O cadastro das barragens mantidas pelos órgãos fiscalizadores, bem como a relação das que apresentam alto risco;
  - As ações para melhoria da segurança das barragens, de responsabilidade dos empreendedores;
  - A descrição dos principais incidentes durante o período base do relatório.

Ao longo do texto da lei n°12.334/2010, várias referências são feitas à necessidade de classificação das barragens quanto ao risco associado, como citado nos art. 1°, 6° e 7°, sendo que o art. 7° transfere ao CNRH a determinação dos critérios gerais. Sendo assim, o próprio CNRH publicou, em 2012, a resolução n° 143, estabelecendo os critérios de classificação das barragens por categoria de risco e pelo dano potencial associado. A resolução estabelece um sistema de pontos baseado em 4 “quadros” de critérios de classificação das barragens,

sintetizados na Tabela 2.2 a seguir, no qual é associado uma pontuação para cada critério; quanto maior a pontuação, maior o risco. As tabelas completas podem ser vistas no Apêndice B.

Tabela 2.2 – Critérios de classificação das barragens (MMA, 2012a)

Quadro de classificação	**N° de critérios**	**Descrição dos critérios**
CT – Características técnicas	3	Altura da crista; comprimento da crista; vazão de projeto.
EC – Estado de conservação	4	Confiabilidade das estruturas extravasoras; percolação; deformações e recalques; deterioração dos taludes.
PS – Plano de Segurança da Barragem	5	Documentação de projeto; estrutura organizacional e qualificação dos profissionais na equipe de segurança da barragem; manuais de procedimento para inspeções de segurança e monitoramento; plano de ação emergencial; relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação.
DPA – Dano potencial associado	4	Volume total do reservatório; existência de população à jusante; impacto ambiental; impacto socioeconômico.

Cabe destacar, baseado na definição de risco expresso pela Equação 2.1, que as classificações por CT, EC e PS referem-se aos eventos de risco, ao passo que a classificação por DPA refere-se às consequências. Logo, a classificação por DPA, associado a estudos de *dam break,* visa sintetizar os possíveis impactos nas comunidades que seriam afetadas por uma ruptura da barragem. Uma vez tendo as pontuações, elas serão somadas. A resolução define a Categoria de Risco (CRI) pela Equação 2.2.

$$CRI = \Sigma CT + \Sigma EC + \Sigma PS \tag{2.2}$$

Já o Dano Potencial Associado (DPA) tem um sistema de classificação independente e não entra no somatório do CRI. A seguir a Tabela 2.3 mostra as faixas de classificação para o CRI e para o DPA. Entretanto, uma pontuação 10 em qualquer critério de Estado de Conservação (EC) automaticamente implica categoria de risco alta, demandando providências imediatas.

Tabela 2.3 – Faixas de classificação das barragens (MMA, 2012a)

Faixas de classificação	**Categoria de risco**	**Dano Potencial Associado**
Alto	Maior ou igual a 60 ou EC = 10	Maior ou igual a 13
Médio	De 35 a 60	De 7 a 13
Baixo	Menor ou igual a 35	Menor ou igual a 7

Todo o esforço para promover a segurança em barragens no Brasil pode ser percebido no Relatório de Segurança de Barragens (RSB), elaborado pela ANA. Com relação ao relatório de 2014, cujo período de abrangência vai de 1 de outubro de 2013 a 30 de setembro de 2014, cabe destacar alguns pontos (ANA, 2015):

- Há 14.966 barragens cadastradas em todo o Brasil, incluindo barragens de usos múltiplos da água, para contenção de rejeitos de mineração, para geração de energia elétrica e para contenção de resíduos industriais. Dessas, 2.097 (14%) foram classificadas por categoria de risco (CRI) e 1.681 (11%) quanto ao dano potencial associado (DPA).
- A maioria das barragens com CRI alto destinam-se ao uso múltiplo da água, destacando as localizadas no Nordeste, as quais carecem de recursos para sua manutenção. Já as que apresentam DPA alto são as de geração de energia e para contenção de rejeitos de mineração, muitas delas localizadas no Sudeste, região com alto adensamento populacional.
- Foram registradas 432 barragens vistoriadas em campanhas de fiscalização e 402 barragens com inspeções regulares. Além disso, 153 barragens possuem Plano de Ação Emergencial, e outros 97 PAEs estão em elaboração.
- Foram disponibilizados pela União R$ 23,5 milhões para serviços de operação, manutenção e recuperação de barragens, 60% a menos em relação aos recursos destinados em 2012.
- Até então, o ano de 2014 havia sido marcado como o de maior número de incidentes desde o inicio do acompanhamento pela ANA (em 2011), tendo cinco incidentes graves, com nove vítimas fatais, e outros nove incidentes menores.

Portanto, apesar do Brasil contar com uma legislação robusta com relação à segurança de barragens, o país ainda carece de mecanismos de implementação das ações propostas na lei, opinião esta reforçada pela ANA no RSB.

3. RUPTURA DE BARRAGENS GEOTÉCNICAS

O rompimento de uma barragem constitui um risco, não somente para a sobrevivência de comunidades vizinhas, mas também para os ecossistemas locais e para o aproveitamento hídrico a jusante. Vários são os fatores que podem levar ao colapso de barragens de terra e enrocamento, como cheias à montante, sismos, erros de projeto e de execução, e até mesmo sabotagens.

Para a melhor compreensão dos mecanismos que compõem o rompimento em si, devem ser analisados os modos de ruptura geotécnicos mais comuns. Posteriormente procede-se ao estudo de *dam break*, no qual é estudada a formação da brecha no corpo da barragem e a propagação da onda de inundação a jusante, de modo a estimar os danos potenciais nas áreas afetadas pela inundação.

3.1. MODOS DE RUPTURA

A seguir serão apresentados os modos de ruptura mais comuns para barragens de terra e enrocamento: galgamento, *piping* e instabilidade de taludes.

3.1.1. Ruptura por Galgamento

O galgamento da barragem ocorre quando a superfície d'água se eleva acima da altura da barragem, fluindo por cima da crista. Tal evento pode ocorrer caso a barragem não tenha capacidade para conter uma cheia, ou caso haja uma falha comprometendo o sistema de extravasamento, como a presença de detritos ou problemas na abertura das comportas. (FEMA, 2013b).

Durante o galgamento a barragem age como um vertedor de soleira espessa, e o rompimento ocorre com a erosão da face à jusante, iniciando geralmente no pé do maciço e se expandindo para montante e em direção às ombreiras. Quando a erosão atinge o topo da barragem, há o rompimento da crista e o início da formação da brecha (USACE, 2014). A Figura 3.1 ilustra o processo de rompimento por galgamento.

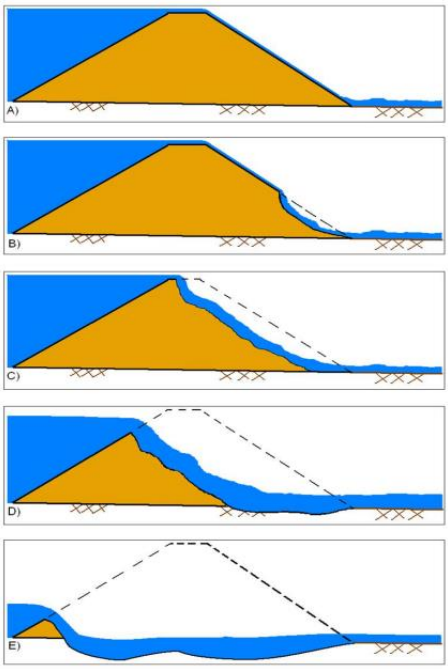


Figura 3.1 – Processo de rompimento por galgamento (USACE, 2014)

Vale destacar que a geometria da barragem influencia no processo de ruptura por galgamento. Caso a seção seja trapezoidal, as mudanças bruscas na angulosidade podem provocar a separação da lâmina d'água, criando zonas de alta turbulência associadas a zonas de sub-pressões (Porto, 2006). Com relação a isso, Powlegde *et al.* (1988, citado por Perini, 2009) propõe a divisão do escoamento devido ao galgamento em três zonas, ilustradas na Figura 3.2 e listadas a seguir:

- Zona 1: região sobre a crista da barragem no qual o escoamento é subcrítico, cujas velocidades são baixas, assim como os esforços de cisalhamento;
- Zona 2: região sobre a crista da barragem no qual há a transição do escoamento subcrítico (lento ou fluvial) para supercrítico (rápido ou torrencial), com o aumento dos esforços de cisalhamento. Nessa zona, pode ocorrer uma pequena erosão no fim da crista ou então o arrancamento de pavimentos sobre a mesma, devido às subpressões existentes;
- Zona 3: região sobre a face de jusante, no qual o escoamento é supercrítico e a velocidade de escoamento e os esforços de cisalhamento são elevados, gerando um grande potencial erosivo.

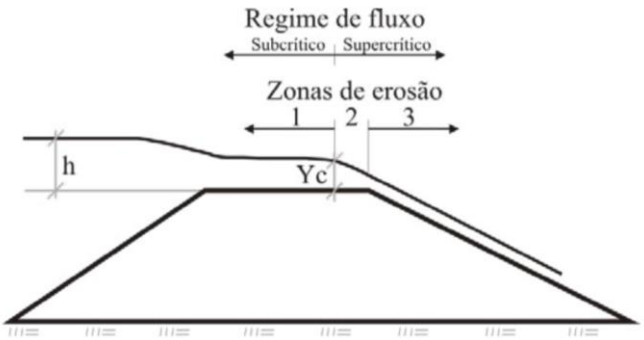


Figura 3.2 – Zonas de erosão (Powledge *et al.*, 1998, citado por Perini, 2009)

3.1.2. Ruptura por *Piping*

O processo de *piping* em barragens ocorre devido ao fluxo d'água por dentro do maciço a uma taxa significante, levando à erosão interna com carreamento de materiais. O fluxo de água progride em um formato tubular, de montante para jusante, seguindo um escoamento em conduto forçado. À medida que esse "tubo" é alargado, o solo logo acima do fluxo começa a se liquefazer, processo este que ocorre de jusante para montante, até um ponto em que começa a haver o desabamento do maciço logo acima do tubo. A partir desse ponto, há um aumento no fluxo d'água, cujo escoamento passa a ser em conduto aberto, e a brecha passa a se expandir (USACE, 2014). A Figura 3.3 mostra a evolução do processo de *piping*.

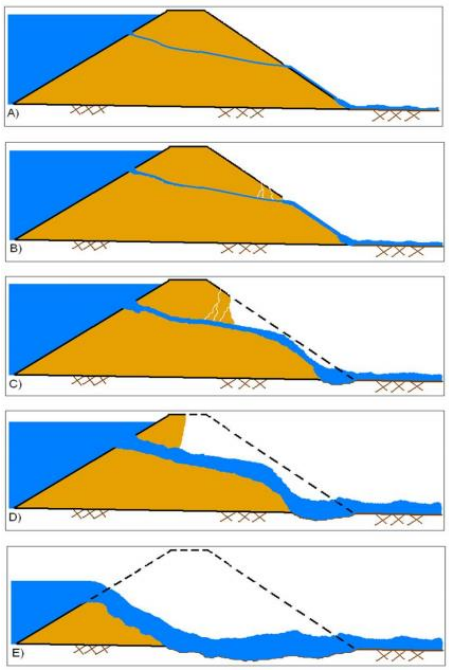


Figura 3.3 – Processo de rompimento por *piping* (USACE, 2014)

Além do desabamento do maciço pelo alargamento do tubo, Foster *et al.* (2000, citado por Perini, 2009) citam também os seguintes mecanismos para formação da brecha decorrentes do *piping*:

- Rebaixamento da crista ou formação de buracos nela, podendo levar ao galgamento;
- Escorregamento do talude de jusante decorrente da saturação do maciço ou do aumento de poropressão;
- Desagregação do pé da barragem.

Foster *et al.* (2000, citado por Perini, 2009) reforçam ainda que, independente dos mecanismos para formação da brecha devido ao *piping*, eles são altamente dependentes do nível d'água no reservatório, fator este determinante no fluxo no maciço. Portanto, análises de percolação são essenciais para estudo do processo de *piping*.

3.1.3. Ruptura por instabilidade de taludes

Além do *piping* e do galgamento, a instabilidade de taludes aparece como outro evento que pode levar ao colapso de uma barragem. A análise de instabilidade de taludes em barragens segue modelos consagrados, como Bishop e Morgenstern-Price, sendo o formato da superfície de ruptura dependente do tipo de material da fundação e do maciço. Em materiais mais coesivos, ela tende a ser mais circular, ao passo que em materiais com uma parcela de atrito mais significante ela tende a ser mais planar (Assis, 2015). Assis (2015) cita três modos de ruptura quando à abrangência da superfície, conforme mostrado na Figura 3.4:

- Ruptura local: a linha de ruptura inicia na crista e percorre parcialmente o talude;
- Ruptura de pé: a linha de ruptura inicia na crista e passa pelo pé do talude;
- Ruptura global: a linha de ruptura atravessa também o material de fundação.

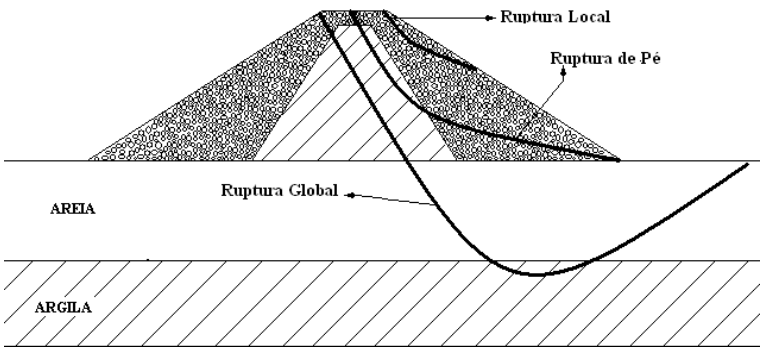


Figura 3.4 – Instabilidade de taludes em barragem (Assis, 2015)

Um fator determinante na ruptura por instabilidade de taludes é a variação de poropressão no interior do maciço durante a vida útil da barragem, sendo essa variação dependente do carregamento proporcionado pelo nível d'água no reservatório. A literatura cita alguns casos de carregamento, das quais cabe destacar:

- Carregamento de final de construção;
- Carregamento de enchimento;
- Carregamento de percolação estável (operação);
- Carregamento de rebaixamento rápido.

O carregamento de final de construção corresponde ao estágio logo após o término da construção do maciço, mas anterior ao enchimento do reservatório. Nessa fase, considera-se que não houve tempo suficiente para dissipação das pressões neutras devido à construção nem para o adensamento do material do maciço. Portanto, são utilizados parâmetros de ensaios não adensados e não drenados (ensaios UU) para a determinação da envoltória de resistência (ELETROBRÁS, 2003). Além disso, a estabilidade é aferida para ambos os taludes (de montante e de jusante).

No carregamento de enchimento também é considerado que o maciço não teve tempo de adensar, sendo utilizados também parâmetros não adensados e não drenados (UU). Contudo, a estabilidade é aferida somente para o talude de montante, visto que só esta face estará sujeita diretamente ao carregamento. Além do mais, esta análise está entrando em desuso, visto que a água atua como agente estabilizador do talude no inicio do enchimento (Assis, 2015).

Já o carregamento de operação, ou de percolação estável, ocorre sob o regime permanente de fluxo durante a operação da barragem, no qual o nível do reservatório permanece estável por um período longo o suficiente para saturação do maciço, assim como para o adensamento do mesmo. A análise é feita em termos de tensões efetivas, considerando parâmetros de ensaios adensados e drenados (ensaios CD) para a determinação da envoltória de resistência, no qual as pressões neutras são obtidas da rede de fluxo. A estabilidade é aferida somente para o talude de jusante (ELETROBRÁS, 2003).

Por fim, o carregamento por rebaixamento rápido ocorre também durante a operação da barragem, mas em condições de emergência que demandam um rebaixamento rápido do nível

d’água do reservatório. Esse processo envolve uma complexa combinação de carregamentos, como redução das tensões principais com aumento da tensão desviatória, e o estabelecimento de um fluxo transiente de água no maciço. O rebaixamento pode ser considerado drenado ou não dependendo da velocidade de descida do nível d’água e da permeabilidade do solo do barramento (ELETROBRÁS, 2003). Contudo, é comum adotar a condição adensada e não drenada, conforme preconizado por Assis (2015).

3.2. ESTUDOS DE *DAM BREAK*

3.2.1. Formação da brecha

Uma vez iniciado o processo de ruptura há a formação da brecha no corpo da barragem. A brecha é a “abertura formada pela falha da barragem no qual a água do reservatório passa, podendo alarga-la e aprofundá-la” (Collischonn e Tucci, 1997). Dentre os parâmetros mais importantes para caracterização da brecha há características geométricas (altura, largura e inclinação dos taludes laterais da brecha) e hidrológicas, como vazão de pico e tempo de desenvolvimento (Rocha, 2016). A Figura 3.5 mostra uma típica geometria da brecha.

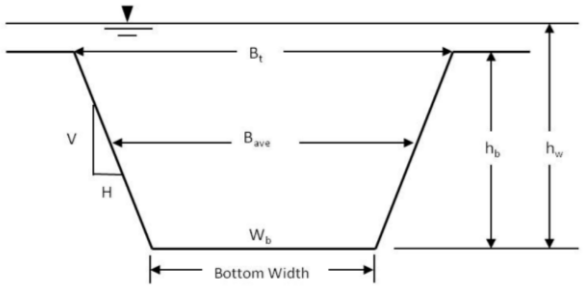


Figura 3.5 – Geometria da brecha (USACE, 2014)

Almeida e Franco (1994, citado por Collischonn e Tucci, 1997) listam os seguintes métodos para simular a formação da brecha:

- Hidrograma de ruptura estimado: é o método mais simples, no qual um hidrograma de ruptura é obtido a partir das estimativas de vazão de pico, tempo de esvaziamento e volume do reservatório.
- Evolução pré-determinada da brecha: nesse método uma brecha de formato pré-determinado cresce conforme o tempo, respeitando dimensões máximas pré-estabelecidas. É o método mais utilizado.

- Evolução por erosão simplificada: método especialmente feito para barragens de terra, considera a erosão do material da barragem por expressões de descarga solida, usando parâmetros hidráulicos simplificados.
- Evolução por erosão completa: este método combina as equações de descarga sólida com equações hidrodinâmicas completas.

A seguir são apresentadas formulações que podem ser utilizadas como referência para as simulações citadas. A Tabela 3.1 mostra os parâmetros de formação da brecha, como tempo de ruptura e dimensões, adotados pela ELETROBRÁS e pelo *US Army Corps of Engineers* (USACE). Já a Tabela 3.2 mostra as equaçõess para o cálculo da vazão de pico.

Tabela 3.1 – Parâmetros de formação da brecha

País	**Tipo de barragem**	**Tempo de ruptura - t_f**	**Declividade das laterais (H:V)**	**Largura média da brecha - B_m**
Brasil (ELETROBRÁS, 2003)	Arco	Menor que 0,1 h	Entre 0 e a declividade do vale	Igual a L
	Contraforte	Entre 0,1 e 0,3 h	Normalmente 0	Múltiplos trechos
	Gravidade	Entre 0,1 e 0,3 h	Normalmente 0	Menor que 0,5L (um ou mais trechos)
	Terra e enrocamento	Compactada – Entre 0,1 e 1h Não compactada – Entre 0,1 e 0,5 h	Entre 0,25:1 e 1:1	Entre $1H_d$ e $5H_d$ (normalmente entre $2H_d$ e $4H_d$)
USA (USACE, 2014)	Arco	Menor que 0,1 h (NWS/USACE)	Vertical (NWS/USACE)	Entre 0,8L e L (NWS/USACE)
	Rejeitos	Menor que 0,1 h (NWS)	-	Entre 0,8L e L (NWS)
	Gravidade	Entre 0,1 e 0,2 h (NWS); entre 0,1 e 0,5 h (USACE)	Vertical (NWS/USACE)	Menor que 0,5L (NWS); múltiplos trechos (USACE)
	Terra e enrocamento	Entre 0,1 e 1 h (NWS); entre 0,1 e 4 h (USACE)	Entre 0:1 e 1:1 (NWS/USACE)	Entre $2H_d$ e $5H_d$ (NWS); entre $0{,}5H_d$ e $5H_d$ (USACE)

Sendo: L: comprimento da crista da barragem; H_d: altura da barragem.

Tabela 3.2 – Vazões de pico (USACE, 2014)

Autor	Vazão de pico - Q_{max} (m^3/s)
USBR (1982)	$Q_{max} = 19{,}1.\, h_w^{1{,}85}$
MacDonald and Langridge-Monopolis (1984)	$Q_{max} = 1{,}154.\, (V_w.\, h_w)^{0{,}412}$
Soils Conservation Service (1981)	$Q_{max} = 16{,}6.\, h_w^{1{,}85}$
Singh & Snorrason (1984)	$Q_{max} = 1{,}776.\, S^{0{,}47}$
Costa (1985)	$Q_{max} = 0{,}981.\, (S.\, h_d)^{0{,}42}$
Froelich (1995)	$Q_{max} = 0{,}607.\, V_w^{0{,}295}.\, h_w^{1{,}24}$
Evans (1986)	$Q_{max} = 0{,}72.\, V_w^{0{,}53}$

Sendo: h_w: coluna d'água acima do fundo da brecha no momento da ruptura (m); V_w: volume de água acima da brecha no momento da ruptura (m^3); h_d: altura da barragem (m); S: volume do reservatório para o NA máximo (m^3);

Além das formulações apresentadas, modelos hidráulicos computacionais são comumente usados para estudar a formação da brecha. O programa HEC-RAS®, por exemplo, assume uma brecha trapezoidal, tendo como dados de entrada a largura de fundo da brecha (B_f), a altura da brecha (H), a declividade das laterais (H;V) e a vazão de pico (Q_{max}), parâmetros que podem ser estimados pelas Tabelas 3.1 e 3.2. Comparando com os métodos apresentados por Almeida e Franco (1994, citado por Collischonn e Tucci, 1997), pode-se afirmar que o HEC-RAS® usa uma metodologia similar à "Evolução pré-determinada da brecha".

3.2.2. Propagação da onda de inundação

Uma vez formada a brecha, ocorre a propagação da onda de inundação. Seu estudo é crucial para a obtenção das cotas de inundação, do tempo de chegada e das velocidades alcançadas pela onda. Segundo Martins e Viseu (1997, citado por Balbi, 2008), as características dinâmicas da onda de inundação dependem:

- Das condições da brecha de ruptura;
- Das condições hidrodinâmicas iniciais no reservatório e nos trechos do rio a jusante;
- Da morfologia e da rugosidade do vale à jusante.

Os dois primeiros fatores citados também são determinantes na formação do hidrograma de ruptura. O hidrograma, que representa a relação entre a vazão e o tempo, tem representado, na

área sob a curva, o volume total escoado na ruptura. A Figura 3.6 mostra um exemplo de hidrograma de ruptura, sendo Q_p a vazão de pico e t_p o tempo correspondente a Q_p.

Figura 3.6 – Exemplo de hidrograma de ruptura (Perini, 2009)

De acordo com Collischon e Tucci (1997), a propagação do hidrograma de ruptura pode ser analisada de maneira similar à propagação de cheias em rios, sendo que a cheia devido ao rompimento de barragens é maior e mais rápida que a cheia natural.

Uma vez obtido o hidrograma de ruptura, é necessário estudar a frente de onda desenvolvida para jusante que, caso disponha de suficiente energia, pode resultar em um forte ressalto móvel, denominado onda de choque. Na onda de choque as equações de Saint-Venant não se aplicam, visto que as acelerações verticais da onda não podem ser desprezadas (Basco, 1989, Cunge *et al.*, 1980, citados por Collischon e Tucci, 1997). Perini (2009) mostra que a propagação da onda pode ser monitorada pelo acompanhamento do hidrograma ao longo do vale à jusante. Segundo Fread (1984, citado por Perini, 2009), a forma do hidrograma é modificada ao longo do vale devido a fatores relacionados com a morfologia da região, refletindo na dispersão do volume escoado, na diminuição da altura da onda e no tempo de viagem da mesma. A Figura 3.7 mostra um exemplo da propagação do hidrograma.

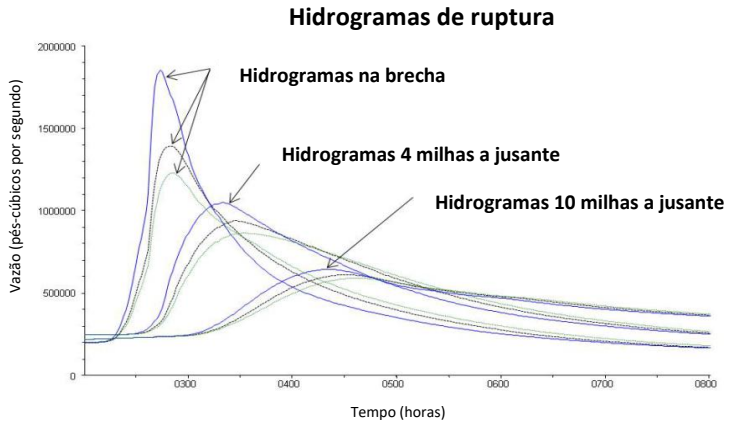


Figura 3.7 – Propagação do hidrograma de ruptura (modificado - USACE, 2014)

Já programas como DAMBRK® e HEC-RAS® lançam mão de modelos hidrodinâmicos baseados em adaptações das equações de Saint-Venant na simulação da onda de inundação, sendo os mais consagrados (Rubis, 2006, citado por Balbi, 2008):

- Modelos unidimensionais de regime variável: são adequados a vales com alta declividade e sem planícies de inundação. São divididos em modelos que resolvem as equações de Saint-Venant de maneira simplificada e em modelos que resolvem as equações completas.
- Modelos quase bidimensionais: nesse modelo, as equações de Saint-Venant unidimensionais são aplicadas no leito principal e a planície de inundação é considerada como um reservatório conectado ao leito.
- Modelos bidimensionais: são divididos em modelos clássicos, aplicados em fluxos gradualmente variados, e modelos de alta resolução, os quais exigem uma topografia bem detalhada.

3.2.3. Estimativa dos danos e mapas de inundação

Além da simulação da onda de inundação gerada, cabe também estimar as mortes e os danos provocados pela inundação. Nesse sentido, o USBR (1999) mostra os principais fatores que determinam o numero de mortes no rompimento de barragens, sendo os mais decisivos:

- Número de pessoas em risco;
- Tempo até a comunicação da ruptura nas comunidades à jusante e eficácia das informações;
- Intensidade da cheia (profundidade e velocidade).

Baseado nos estudos de Brown e Graham e DeKay e McClelland, e a partir de casos reais de ruptura de barragens, o USBR (1999) desenvolveu uma metodologia própria para estimar o número de vítimas em ruptura de barragens, estabelecendo três critérios: intensidade da inundação, tempo de alerta e compreensão do perigo. Quanto à intensidade de inundação, foram estabelecidas três categorias:

- Baixa intensidade: quando nenhuma construção é arrasada, nem suas fundações;
- Média intensidade: quando residências são destruídas, mas ainda restam algumas edificações que podem servir como abrigo;
- Alta intensidade: quando toda a região é arrasada, destruindo todas as construções.

Quanto ao tempo de alerta, definido como o intervalo de tempo entre a emissão do alerta oficial e a chegada da inundação, também são estabelecidas três categorias:

- Sem alerta: nenhum alerta oficial é emitido antes da chegada da onda;
- Algum alerta: o alerta oficial é emitido de 15 a 60 minutos antes da chegada da onda;
- Alerta adequado: o alerta oficial é emitido uma hora ou mais antes da chegada da onda.

Já a compreensão do perigo diz respeito à noção por parte dos moradores dos danos que podem ser causados pela inundação, que é função direta da distância e do tempo até a chegada da onda. Nesse aspecto, a divulgação dos estragos ocorridos à montante serve como um forte alerta para a população sobre os perigos os quais estará sujeita. Por outro lado, uma má ou vaga compreensão do problema pode provocar até mesmo resistência à evacuação, resultando em mais mortes. Vale acrescentar que não é possível uma compreensão do perigo se não há alerta algum. Sendo assim, esse parâmetro pode ser dividido em duas categorias:

- Vaga compreensão: a população não tem a real dimensão da inundação ao qual estará sujeita, assim como dos perigos envolvidos;
- Compreensão precisa: a população tem conhecimento preciso da intensidade da inundação e dos possíveis danos;

A seguir, a Tabela 3.3 mostra a relação entre os critérios apresentados e a taxa de mortos, que é a proporção entre o número de mortos e o total da população sujeita à inundação.

Tabela 3.3 – Taxas de mortes estimadas em rompimento de barragens (USBR, 1999)

<table>
<tr><th rowspan="2">Intensidade da inundação</th><th rowspan="2">Tempo de alerta (min)</th><th rowspan="2">Compreensão do perigo</th><th colspan="2">Taxa de mortos (%)</th></tr>
<tr><th>Valor estimado</th><th>Variação</th></tr>
<tr><td rowspan="5">Alta</td><td>Sem alerta</td><td>Não se aplica</td><td>75%</td><td>30%-100%</td></tr>
<tr><td rowspan="2">15 a 60</td><td>Vaga</td><td colspan="2" rowspan="3">Não há estudos sobre quantas pessoas sobreviveriam nessas condições. Recomenda-se usar as mesmas taxas do caso acima</td></tr>
<tr><td>Precisa</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mais de 60</td><td>Vaga</td></tr>
<tr><td>Precisa</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="5">Média</td><td>Sem alerta</td><td>Não se aplica</td><td>15%</td><td>3%-35%</td></tr>
<tr><td rowspan="2">15 a 60</td><td>Vaga</td><td>4%</td><td>1%-8%</td></tr>
<tr><td>Precisa</td><td>2%</td><td>0,5%-4%</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mais de 60</td><td>Vaga</td><td>3%</td><td>0,5%-6%</td></tr>
<tr><td>Precisa</td><td>1%</td><td>0,2%-2%</td></tr>
</table>

Intensidade da inundação	Tempo de alerta (min)	Compreensão do perigo	Taxa de mortos (%)	
			Valor estimado	Variação
Baixa	Sem alerta	Não se aplica	1%	0-2%
	15 a 60	Vaga	0,7%	0-1,5%
		Precisa	0,2%	0-0,4%
	Mais de 60	Vaga	0,03%	0-0,06%
		Precisa	0,02%	0-0,04%

Com relação à intensidade da inundação e sua capacidade de destruição, outro parâmetro a ser analisado é o denominado risco hidrodinâmico (R), o qual relaciona a profundidade da inundação (H) com a velocidade de propagação (V), conforme a Equação 3.1 (Balbi, 2008).

$$R = V \times H \tag{3.1}$$

Em termos gerais, o risco para pessoas é mais influenciado pela profundidade da inundação, enquanto que a velocidade é o fator mais crítico para as edificações. Além do mais, vários autores e agências governamentais usam critérios específicos para classificar o risco hidrodinâmico. Contudo, há um consenso ao estabelecer o valor de $1m^2/s$ como sendo o limite de segurança para o parâmetro em caso de inundação, visto que a partir desse valor pessoas adultas são facilmente arrastadas pela cheia. Viseu e Martins (1998, citado por Balbi, 2008), por exemplo, estabelecem zona de risco alta nas regiões cujo risco hidrodinâmico é a partir de $1m^2/s$. Já Almeida (1999, citado por Balbi, 2008), baseado em casos reais de inundação na Holanda e considerando valores menores que 1 m^2/s, afirma que para profundidades maiores que 3,5 m todas as pessoas atingidas não sobrevivem, e para profundidades maiores que 2m, 5% da população atingida não sobrevive. Existem ainda estudos com simulações que foram desenvolvidos para qualificar as consequências para diferentes valores de risco hidrodinâmico. Um deles é o RescDam, apresentado por SYNAVEN *et al.* (2000, citado por Balbi, 2000), cujos resultados estão na Tabela 3.4.

Já as Tabelas 3.5 e 3.6, elaboradas por Viseu (2006, citado por Balbi, 2008) mostram os graus de importância do risco para as pessoas e edificações em função do risco hidrodinâmico. Ambas as tabelas foram baseadas no principio da evacuação vertical, o qual considera a tendência das pessoas de fugirem para regiões ou pavimentos mais altos a fim de escapar da inundação.

Tabela 3.4 – Consequências em função do risco hidrodinâmico (modificado – SYNAVEN *et al*. 2000, citado por Balbi, 2008)

Risco hidrodinâmico (m^2/s)	**Consequências**
R < 0,5	Crianças e deficientes são arrastados
0,5 < R > 1	Adultos são arrastados
1 < R > 3	Danos estruturais em residências
3 < R > 7	Danos estruturais em edifícios e possível colapso
R > 7	Colapso de alguns edifícios

Tabela 3.5 – Graus de perigo para seres humanos (Viseu, 2006, citado por Balbi, 2008)

Grau de importância	**Classe**	**Profundidade da inundação (m)**	**Risco hidrodinâmico (m^2/s)**
Reduzido	Verde	H < 1	R < 0,5
Médio	Amarela	1 < H < 3	0,5 < R > 0,75
Importante	Laranja	3 < H < 6	0,75 < R > 1
Muito Importante	Vermelha	H > 6	R > 1

Tabela 3.6 – Graus de perigo para edificações (Viseu, 2006, citado por Balbi, 2008)

Grau de importância	**Classe**	**Velocidade (m/s)**	**Risco hidrodinâmico (m^2/s)**
Reduzido	Verde	V < 2	R < 3
Médio	Amarela	2 < V < 4	3 < R > 5
Importante	Laranja	4 < V < 5,5	5 < R > 7
Muito Importante	Vermelha	V > 5,5	R > 7

As informações sobre risco hidrodinâmico e áreas afetadas podem ser sintetizadas em mapas de inundação, os quais mostram as áreas sujeitas à inundação, o zoneamento de riscos, os picos de cheias nas regiões mais críticas e os tempos de viagem da onda, além das rotas de evacuação e dos abrigos de emergência. Os mapas de inundação, que devem ser desenvolvidos pelo proprietário da barragem em parceria com órgãos de gestão de emergências, constituem documento essencial (e, em alguns países, obrigatório) em Planos de Ação de Emergência, e contribuem para a elaboração do sistema de alerta e do plano de evacuação nas áreas afetadas pela mancha de inundação, além de balizar as ações de agentes governamentais, como a Defesa Civil (FEMA, 2013b; Balbi, 2008). De acordo com o FEMA (2013a), dois tipos de mapas devem ser elaborados, um para ruptura no caso de tempo bom (*i.e.*, sem chuvas), quando o reservatório esta em seu nível normal e o escoamento é laminar,

e outro para ruptura no caso de cheia de projeto, mostrando o nível máximo possível para a inundação. A Figura 3.8 mostra um exemplo de mapa de inundação.

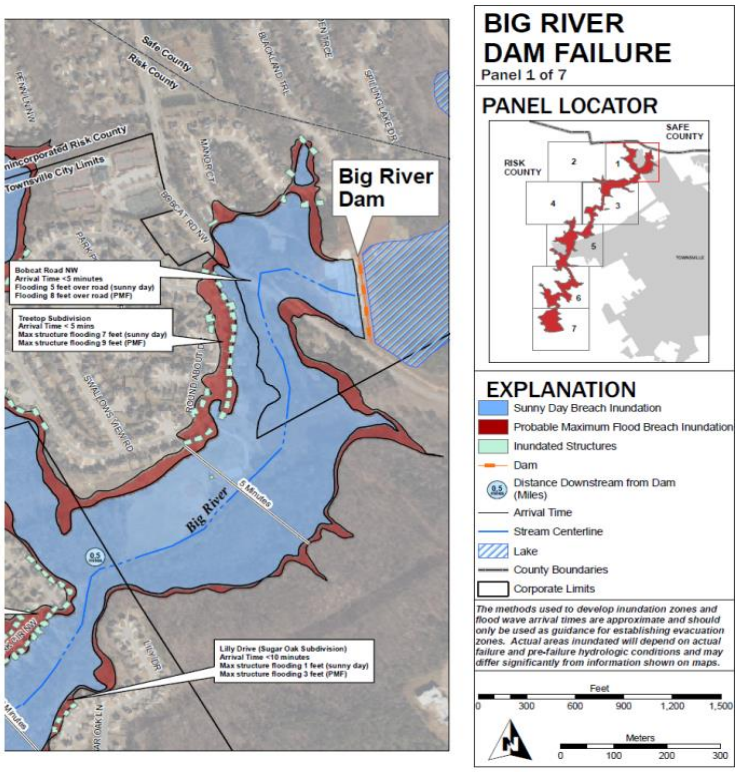


Figura 3.8 – Mapa de inundação (FEMA, 2013b)

Uma das principais características do mapa de inundação é o zoneamento de risco, cujo objetivo é o de classificar as áreas atingidas quanto ao grau de perigo e à vulnerabilidade. De acordo com Almeida (2001, citado por Balbi, 2008) e FLOODSITE (2007, citado por Balbi, 2008), os fatores que determinam o zoneamento são:

- O adensamento urbano das áreas atingidas;
- As cotas máximas dos níveis d'água;
- Instante de chegada da frente de onda de cheia;
- Instante de chegada da altura máxima;
- Valor máximo do risco hidrodinâmico;
- Velocidade máxima do escoamento;
- Duração das submersões, para estimar os custos materiais e tempo de recuperação.

Na elaboração dos mapas de inundação, faz-se necessário o uso de programas de geoprocessamento, como ArcGIS® ou AutoCAD Map®, sendo que alguns desses programas

são capazes de ler arquivos gerados por modelos hidráulicos, como HEC-RAS®, para elaborar os mapas de inundação. Day (2016), por exemplo, elaborou um estudo de *dam break* da barragem de *Valley Creek Mps* #4, localizada em Kentucky, EUA, avaliando também os possíveis impactos na cidade de *Elizabethtown*. Nesse estudo, o pesquisador modelou a inundação no modelo hidráulico SMPDBK® e elaborou o mapa de inundação no ArcGIS®, sobrepondo o resultado gerado pelo modelo com camadas representando a cobertura do terreno (vegetação e construções), topografia, ortoimagem, blocos populacionais e infraestrutura de transportes, destacando nessa última camada as principais rotas de evacuação. Como resultado, estimou-se uma descarga de 1.034 m^3/s e um tempo de alerta de 2,87 h, impactando cerca de 388 pessoas e 1.725 estruturas.

3.3. ESTATÍSTICAS E CASOS HISTÓRICOS DE INCIDENTES

No estudo da segurança e do rompimento de barragens, as estatísticas associadas e os casos históricos de incidentes são fundamentais para compreender o alcance social e econômico de tais eventos.

Foster *et al.* (2000, citado por Perini, 2009) fizeram uma análise estatística dos incidentes ocorridos em barragens ao redor do mundo, analisando 11.192 barragens, dos quais foram registrados 136 casos de ruptura. Desses dados, Perini (2009) calculou uma frequência média de ruptura de 1,2%, sendo este valor igual a 1,1% considerando somente as barragens em operação. Estatisticamente, pode-se dizer que a cada 100 barragens construídas, uma se rompe.

A Tabela 3.7 mostra a estatística global de incidentes para barragens geotécnicas da série histórica até 1986, formulada por Foster *et al.* (2000, citado por Perini, 2009). Nota-se que as rupturas por galgamento, *piping* e instabilidade de taludes correspondem a 95% dos casos totais de incidentes com barragens de terra, o que justifica a grande preocupação dos engenheiros com esses modos de ruptura.

Tabela 3.7 – Estatísticas de rupturas de barragens até 1986, excluindo as construídas no Japão até 1930 e na China (modificado – Foster *et al.*, 2000, citado por Perini, 2009)

Modo de ruptura	**N° de casos**		**Taxa de rupturas (%)**	
	Rupturas (total)	Rupturas em operação	Rupturas (total)	Rupturas em operação
Galgamento	62	55	45,59%	44,35%
Piping	60	57	44,12%	45,97%
Instabilidade de taludes	7	5	5,15%	4,03%
Terremoto/liquefação	2	2	1,47%	1,61%
Causas desconhecidas	8	7	5,88%	5,65%
N° total de rupturas	136	124		

Já no Brasil, o Relatório de Segurança de Barragens constitui a principal fonte de dados sobre incidentes em barragens. No ano de 2014 foram reportados cinco incidentes graves, com nove vítimas fatais, e outros nove incidentes menores, sendo considerado o ano com o maior número de incidentes e de vítimas desde o início da série histórica até então. A Tabela 3.8 lista os eventos em barragens ocorridos em 2014, enquanto que as Figuras 3.9 e 3.10 mostram, respectivamente, a quantidade de incidentes e de vítimas fatais entre 2011 e 2014.

Tabela 3.8 – Lista de eventos em barragens em 2014 (modificado – ANA, 2015)

Data	**Nome da barragem**	**UF**	**Causa provável**
21/04/2014	Gramame	PB	Percolação
01/02/2014	UHE Jirau	RO	Cheia
03/02/2014	Araçagi	PB	Obstrução do vertedouro
22/02/2014	Agropecuária Buritis	MT	Sem Informação
05/03/2014	Fazenda Boa Vista do Uru	GO	Galgamento
29/03/2014	UHE Santo Antônio do Jari	AP	Galgamento
27/06/2014	Vacaro	SC	Galgamento
02/07/2014	Jacarecica I	SE	Sem informação
25/07/2014	UHE Dona Francisca	RS	Cheia
10/09/2014	B1 e B2	MG	Erosão Interna
Sem informação	Duas Bocas	ES	Sem Informação

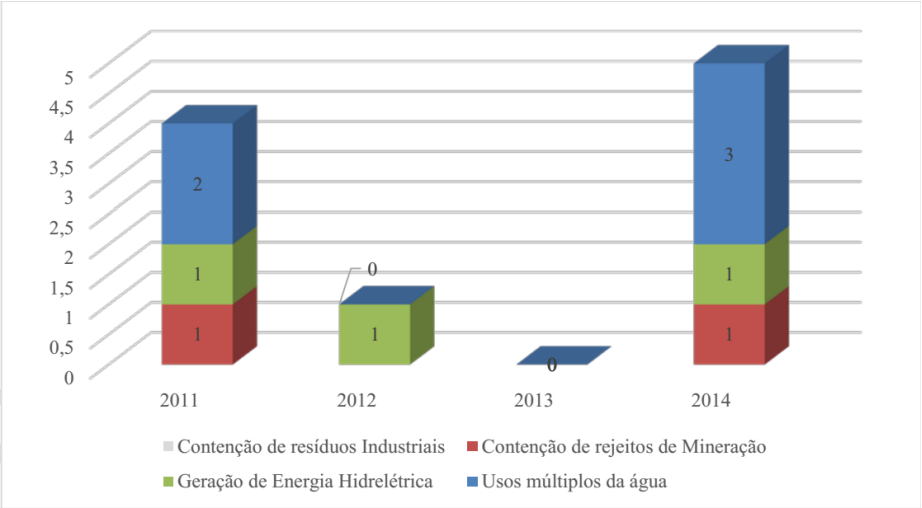


Figura 3.9 – Incidentes ocorridos em barragens entre 2011 e 2014 (ANA, 2015)

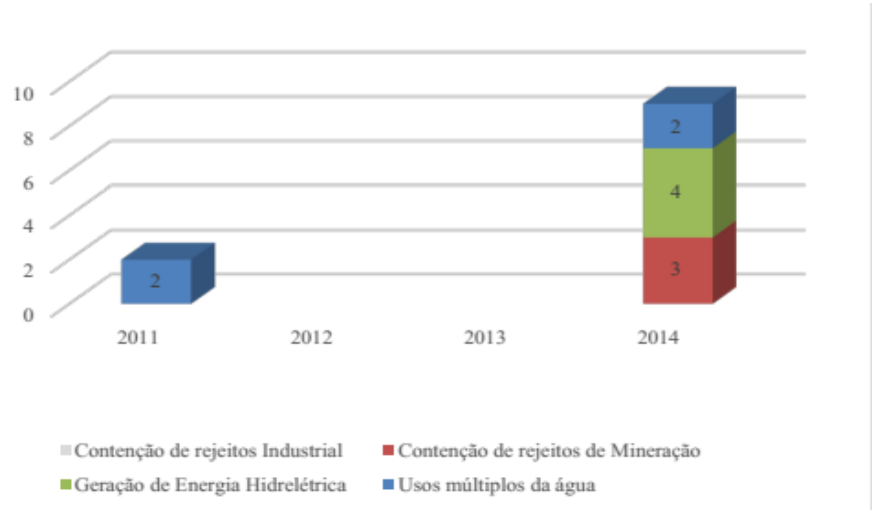


Figura 3.10 – Vítimas fatais em incidentes em barragens entre 2011 e 2014 (ANA, 2015)

A seguir, serão analisados os rompimentos de duas barragens geotécnicas, com grande repercussão: a barragem de Teton (Idaho, EUA) e a barragem do Fundão (Minas Gerais, Brasil).

3.3.1. Barragem de Teton - 1976 (Idaho, EUA)

A barragem de Teton estava localizada cerca de 19 km da cidade de Rexburg, no sudeste do estado de Idaho, Estados Unidos. Esta barragem foi concebida para usos múltiplos da água, dentre eles irrigação, geração de energia e recreação, e foi construída em um *canyon* do rio Teton. O reservatório estava dimensionado para uma capacidade máxima de 3,56 x 10^8 m³. Já o maciço tinha 93 m de altura a partir do leito do rio, 976 m de comprimento ao longo da

crista, e era constituído por cinco zonas, ilustradas no Apêndice C e listadas a seguir (Sylvester, 2015):

- Zona 1 – núcleo, constituído por silte compactado de baixa plasticidade;
- Zona 2 - recobre o núcleo, constituída por pedregulho arenoso;
- Zona 3 - random, localizado entre a Zona 2 e a cobertura de enrocamento, tem a mesma composição do núcleo;
- Zona 4 - servia de ensecadeira durante o desvio do rio, também formada por pedregulho arenoso;
- Zona 5 – cobertura de enrocamento.

A construção ocorreu entre fevereiro de 1972 e junho de 1976, e a ruptura ocorreu às 11:57 AM de 5 de junho de 1976, durante o enchimento, iniciado em 1 de março de 1976. Uma investigação conduzida pelo *Independent Panel* constatou que a ruptura foi provocada por um vazamento que se desenvolveu na trincheira de vedação, o que causou a erosão e o carreamento do material do núcleo (*piping*) por longas trincas ao longo do contato com a fundação rochosa. Verificou-se ainda que, apesar da rocha de fundação apresentar longas trincas, nenhum tratamento foi adotado para selá-las, nem se previu a construção de um filtro nas margens do núcleo e da rocha, resultando em um "design inaceitável" de acordo com o relatório do *Independent Panel* (Sherard, 1986). A Figura 3.11 mostra a barragem rompida.

Figura 3.11 – Barragem de Teton após o colapso (Seed e Duncan, 1986)

Assim como relatado por Stene (1996), a ruptura da barragem liberou 308,4 milhões de m^3 de água, provocou a morte de onze pessoas e deixou um rastro de destruição, incluindo danos em

construções e no sistema de irrigação, além da morte 13.000 cabeças de gado. A cheia também destruiu importantes ligações no sistema de transportes, como os acessos ao parque nacional *Yellowstone.* O dano monetário foi da ordem de dois bilhões de dólares, sendo que o Governo dos Estados Unidos pagou mais de 300 milhões de dólares em indenizações. A *Federal Disaser Asssistance Administration* (FDAA, hoje denominada *Federal Emergency Management Agency*, ou FEMA) assumiu os trabalhos de reconstrução das áreas atingidas pela inundação, contando com o esforço federal de desburocratização dos contratos e com a emissão de autorizações especiais para o pagamento dos acordos. Como resultado, dez dias após o desastre, três quartos do sistema de irrigação dos 1728 km² de fazendas afetadas pela cheia estavam recuperados, e até cinco de julho de 1976 o sistema de água potável estava reestabelecido em 98% da região.

O caso da barragem de Teton constituiu uma situação inédita para o Governo dos Estados Unidos, o qual não contava com precedentes nem com uma base legal para o processo de indenizações em casos de desastres. Nesse sentido, um grupo de trabalho formado por membros da Secretaria de Planejamento e Finanças, da Procuradoria do Departamento do Interior e da FDAA estabeleceram regras para a concessão de indenizações, buscando a agilidade nos pagamentos e resguardando o Governo de fraudes. A regulamentação foi publicada em 14 de Julho de 1976. Contudo, antes da aprovação da lei e mesmo sem o laudo conclusivo sobre as causas da ruptura, o Governo do Presidente Ford liberou 200 milhões de dólares iniciais para o pagamento dos danos uma semana após o incidente (Stene, 1996).

O caso de Teton revelou a necessidade de revisão dos projetos envolvidos por firmas independentes, até porque as possíveis soluções para o design já eram conhecidas na época. Além disso, cabe o reconhecimento aos agentes governamentais no esforço de reconstrução das áreas afetadas.

3.3.2. Barragem do Fundão - 2015 (Minas Gerais, Brasil)

A barragem do Fundão, pertencente ao complexo minerário de Germano, estava localizada no município de Mariana, Minas Gerais, e tinha como função a retenção de rejeitos de mineração de ferro. O reservatório continha 50 milhões de m³ de rejeitos no momento do colapso e está sob a administração da mineradora Samarco. Segundo relatório do Senado Federal (2015), este pode ser considerado o maior desastre ambiental do Brasil.

O rompimento ocorreu em 5 de novembro de 2015. Segundo o laudo técnico elaborado pelo IBAMA (2015), 34 milhões de m³ de lama foram lançados no ambiente no momento da ruptura (chegando a galgar a barragem de Santarém logo à jusante), e outros 16 milhões de m³ ainda foram carreados por 600 km ao longo dos rios Gualaxo do Norte, do Carmo, e Doce, até desaguar no oceano em Linhares, ES. A Figura 3.12 mostra a região do complexo de Germano após a ruptura.

Figura 3.12 – Barragem de Fundão após o colapso (IBAMA, 2015)

A investigação conduzida por Morgenstern *et al.* (2016), baseado em observações de testemunhas, informações geográficas, evidências de campo, ensaios laboratoriais e modelagem gráfica mostraram que a ruptura pode ter sido causada por uma sucessão de eventos que causaram um aumento de saturação no maciço, aumentando o potencial de liquefação. O relatório destaca que a barragem, construída pelo método de alteamento a montante, continha dois tipos de lama de rejeitos, uma arenosa (composta por partículas do tamanho de areia e silte; permitia drenagem, mas era suscetível a liquefação caso o rejeito estivesse saturado e solto) e outra em forma de lodo (composta por partículas de tamanho de argila, a qual tendia a impedir a drenagem) localizada logo a montante da lama arenosa; ambos os rejeitos estavam separados por um dique. Uma série de incidentes entre 2009 e 2012 causou a penetração do lodo no reservatório arenoso, com o nível d'água a 60 m da crista; além disso, houve um recuo da crista do maciço na ombreira esquerda, de modo a evitar a sobrecarga em um conduto de concreto danificado. Essas condições criaram uma situação na qual os rejeitos arenosos foram depositados diretamente sobre o lodo, provocando o processo de extrusão lateral do mesmo (neste caso, a compressão do lodo causou sua deformação lateral), com consequente diminuição nas tensões horizontais na lama arenosa ao

redor do lodo, iniciando o processo de liquefação. O relatório também aponta três pequenos sismos ocorridos 90 minutos antes da ruptura que podem ter acelerado a liquefação, desencadeando o colapso da barragem.

Os impactos iniciais se prolongaram ao longo dos primeiros dias após a tragédia, dentre os quais cabem destacar (Senado Federal, 2015):

- Destruição do povoado de Bento Rodrigues (Mariana, MG), que possuía cerca de 200 casas e 600 moradores. Outras sete comunidades de Mariana foram parcialmente encobertas pela lama, além do município de Barra Longa (MG);
- 16 mortos e três pessoas desaparecidas até dezembro de 2015, dentre moradores de Bento Rodrigues e trabalhadores da mineradora, além de 1.265 desabrigados;
- 35 cidades afetadas pelo carreamento da lama em Minas Gerais e no Espírito Santo, principalmente quanto ao abastecimento de água;
- 1.469 ha de mata ciliares destruídos e 11 toneladas de peixes mortos no rio Doce, além de 80 km² de área marítima e 663,2 km de corpos d'água poluídos pela lama;
- Queda de arrecadação em Mariana, MG, devido à interrupção da atividade mineraria;
- Interrupção da produção de energia nas usinas hidroelétricas de Cadonga, Baguari, Aimorés e Mascarenhas.

Após a tragédia várias ações por parte dos agentes governamentais foram adotadas visando auxiliar a população afetada e buscando responsabilizar a mineradora quanto ao dano causado. Por exemplo, o Governo Federal editou o decreto n° 8.572/2015, que visou facilitar a liberação do saque do FGTS às vítimas do desastre. Já as sanções contra a mineradora Samarco incluem (Senado Federal, 2015):

- Indenização de R$ 10 bilhões para reparação dos danos materiais e R$ 20 bilhões para reparação dos danos ambientais em um período de 10 anos, com exigência de apólice de seguro para cobrir os danos;
- Obrigação do resgate da fauna e da análise de espécies no rio Doce;
- Realização de intervenções de segurança na barragem de Germano, também localizada no mesmo complexo da barragem do Fundão;
- Lavratura de cinco autos de infração por parte do IBAMA, totalizando R$ 250 milhões (R$ 50 milhões cada), conforme a lei de crimes ambientais (lei 9.605/1998), devido à (IBAMA, 2015):

- Tornar área urbana imprópria para ocupação;
- Destruição da biodiversidade devido ao carreamento dos rejeitos;
- Poluição e lançamento de resíduos sólidos e líquidos do rio Doce;
- Interrupção de abastecimento público de água.

Vale acrescentar que, com relação à responsabilidade civil da mineradora, a Política Nacional do Meio Ambiente (lei 6.938/1981) afirma que, independente da culpabilidade, o agente poluidor (no caso, o empreendedor da barragem) é obrigado a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente ou a terceiros. Essa decisão baseia-se na responsabilidade objetiva, fundamentada na Teoria do Risco Integral (Duarte, 2015).

O caso do rompimento da barragem do Fundão mostra a coordenação dos agentes públicos no sentido de responsabilizar a mineradora quanto aos danos causados aos moradores e à biodiversidade.

4. ASPECTOS DA BARRAGEM DE CARPINA

Neste projeto será conduzida a simulação de *dam break* da Barragem de Carpina, que barra o Rio Capibaribe, em Pernambuco. A estrutura localiza-se nas coordenadas 7°53'41" S 35°20'14" W e está cerca de 77 km a montante da foz do Rio Capibaribe, que desagua em Recife. A Tabela 4.1 mostra as principais especificações do reservatório e do barramento, cujos dados foram extraídos da tese de Andrade (2006) e do relatório da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos do Estado de Pernambuco (SRH, 2010). A seção da barragem (Amarante, 1982) encontra-se no Apêndice D e sua localização pode ser conferida nas Figuras 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Especificações da Barragem de Carpina (Andrade, 2006; SRH, 2010)

BARRAGEM DE CARPINA - ESPECIFICAÇÕES	
Tipo de barragem	Terra e enrocamento
Extensão	1720 m (900 m de maciço e 730 m de diques)
Altura máxima	42 m
Cota de coroamento	124 m
Cota do sangradouro	118 m
Largura no coroamento	8 m
Largura na base maior	200 m
Volume máximo (cota 118 m)	270.000.000 m³
Volume para atenuação de enchentes	189.000.000 m³
Volume útil*	81.000.000 m³
Volume morto (cota 89 m)	1.190.000 m³
Vazão efluente máxima (comportas abertas)	400 m³/s

* Este volume útil é destinado para o abastecimento da Região Metropolitana do Recife.

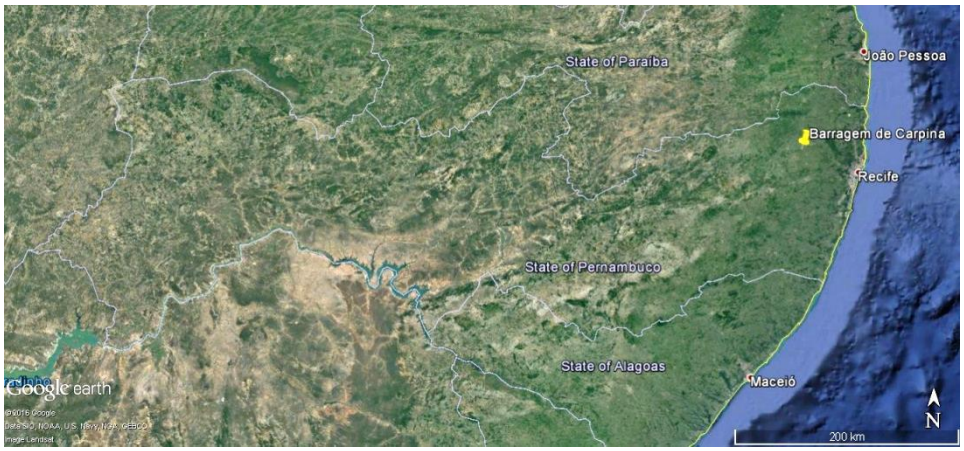


Figura 4.1 – Localização da Barragem de Carpina no Estado de Pernambuco

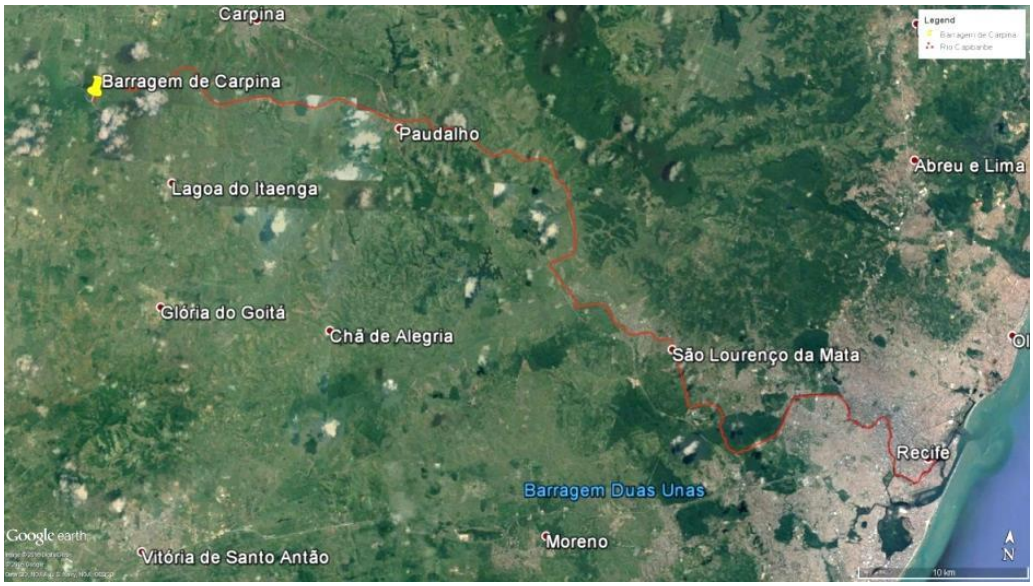


Figura 4.2 – Barragem de Carpina e o Rio Capibaribe (em vermelho)

A barragem de Carpina tem como principal função o controle de cheias no Rio Capibaribe. Ela foi construída em 1978 pelo extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento - DNOS (atual DNOCS) em resposta à enchente que inundou a Região Metropolitana do Recife em 1975. De acordo com o relatório do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (SRH, 1998), a vazão da enchente ao chegar a Recife foi estimada em 3400 m^3/s, ultrapassando o divisor de águas com a bacia do Rio Beberibe e inundando também a cidade de Olinda. Em todo o estado os prejuízos foram da ordem de 250 milhões de dólares, atingindo 24 municípios, destruindo 3.950 edifícios e danificando outros 130.700, além de causar 118 mortes. Já em Recife 80% da cidade foi inundada, afetando cerca de 650 mil pessoas. A Figura 4.3 mostra o cenário da inundação.

Figura 4.3 – Inundação em Recife – 1975 (Jornal do Comércio, 2015a)

4.1. BACIA DO RIO CAPIBARIBE E OCUPAÇÃO ANTRÓPICA

A barragem de Carpina está inserida na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe. A área da bacia é de 7.454,88 km², ocupando 7,58% da área do estado de Pernambuco. Além da barragem de Carpina outras barragens estão dispostas na bacia, como as barragens de Tapacurá e Goitá, ambas dentro da Região Metropolitana do Recife.

O crescimento da capital pernambucana está intrinsecamente ligado ao rio, ao longo do qual houve, no início da ocupação, o desenvolvimento da economia da cana de açúcar e que atualmente concentra um grande adensamento populacional. Segundo dados do Censo de 2010 (IBGE, 2010, citado por IPEA, 2014), a Região Metropolitana do Recife é composta por 14 municípios, com uma população de 3.690.547 habitantes, 41,7% do total estadual. Além disso, a Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco (2010) estima que 430 mil pessoas vivam em torno do rio Capibaribe.

Atualmente o rio Capibaribe encontra-se poluído por resíduos sólidos e líquidos, apresentando uma alta taxa de assoreamento, embora ainda tenha alto potencial para usos diversos, como agricultura, pesca e abastecimento de água. Além disso, atividades industriais e agropecuárias estão contribuindo no aumento da emissão de rejeitos e na erosão ao longo do leito do rio. Com relação às chuvas, a média anual de precipitação na bacia é de 1133,59 mm, sendo que no litoral a média aumenta para 2267,05 mm (SRH, 2010).

4.2. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM

A análise de estabilidade do maciço foi verificada no programa GeoStudio®. Neste caso, foi verificada a estabilidade dos taludes durante a operação da barragem. Para tanto, parâmetros de resistência (peso especifico – γ, coesão – c, ângulo de atrito – Φ) foram assumidos para os materiais do maciço de acordo com a literatura (Geotecdata, 2013; Geotechdata, 2014), assim como os valores de condutividade hidráulica (K) para a análise de percolação estável (Cruz, 1996). A análise da estabilidade foi executada por uma simulação probabilística, seguindo uma distribuição normal dos fatores de segurança, de modo a computar o índice de confiabilidade; sendo assim, valores dos desvios-padrão (σ) também foram assumidos, conforme a literatura, apenas para os parâmetros de resistência (Queiroz,2016). Outra consideração foi com relação à fundação: mesmo não estando explícito na seção da barragem

(vide Apêndice D), considerou-se que o maciço encontra-se assente em rocha e que logo abaixo do núcleo há uma cortina de 15 m de profundidade e 1,5 m de diâmetro. Além disso, considerou-se uma coluna d'água à montante de 36,6 m. A Tabela 4.2 mostra os valores adotados para cada zona do maciço.

Tabela 4.2 – Parâmetros para análise de estabilidade no GeoStudio®

Zona	**Material**	**γ (KN/m³)**	**σ (γ)**	**c (KPa)**	**σ (c)**	**Φ (graus)**	**σ (Φ)**	**K (m/s)**
Núcleo	Argila siltosa	26,2	0,8	20	8	18°	1,8°	10^{-8}
Transição 1	Areia (granulação variada)	20,5	0,6	0	0,1	33°	3,3°	10^{-6}
Transição 2	Areia (média a grossa)	19,5	0,6	0	0,1	30°	3°	5.35 x 10^{-4}
Transição 3	Areia (grossa)	21	0,6	0	0,1	35°	3,5°	0.05
Enrocamento	Enrocamento	26	0,8	0	0,1	40°	4°	0.1
Coroamento	Concreto	24	0,7	900	-	55°	5,5°	10^{-13}
Cortina	Argamassa injetada	-	-	-	-	-	-	4 x 10^{-9}

A seguir, a Figura 4.4 mostra os gradientes de percolação na seção da barragem, enquanto que as Figuras 4.5 e 4.6 mostram os planos de ruptura para os taludes de montante e de jusante, respectivamente. Já as Figuras 4.7 e 4.8 mostram os gráficos de distribuição normal para os fatores de segurança dos taludes de montante e de jusante, respectivamente, assim como na Tabela 4.3 são mostrados os resultados da estabilidade e do fator de segurança (FS) para os taludes de montante e de jusante segundo a formulação de Janbu, a qual forneceu os resultados mais conservadores. Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (MI, 2002), o fator de segurança mínimo na situação de percolação estável é de 1,5 para o talude de jusante. Em ambos os taludes o fator de segurança ficou acima de 1,7, com uma confiabilidade de 99,8%. Mesmo com valores satisfatórios de fatores de segurança e de índices de confiabilidade, a simulação apontou uma pequena, porém significativa, probabilidade de ruptura. Baseado na análise de estabilidade dos taludes e na análise da percolação no maciço decidiu-se em simular o *dam break* apenas para a situação de galgamento da barragem, considerando a probabilidade encontrada de ruptura.

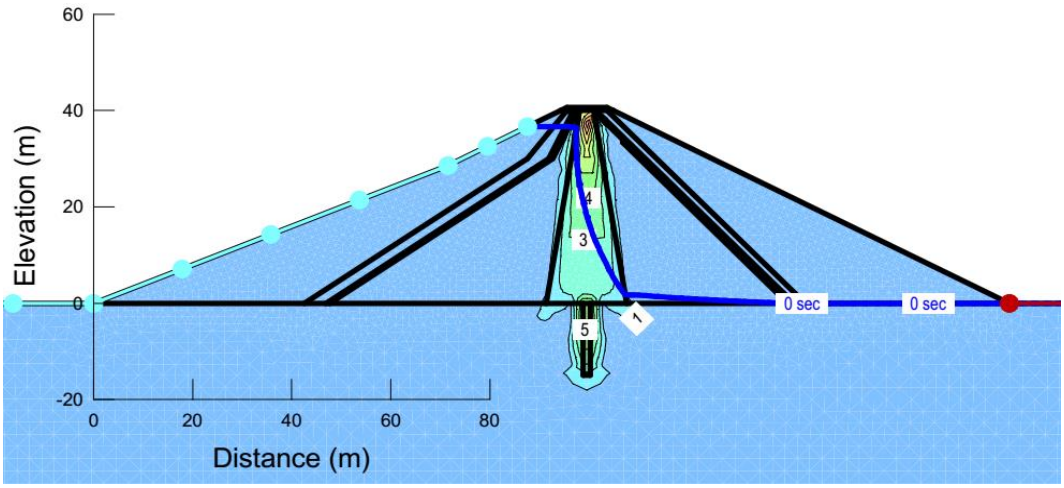


Figura 4.4 – Gradientes de percolação

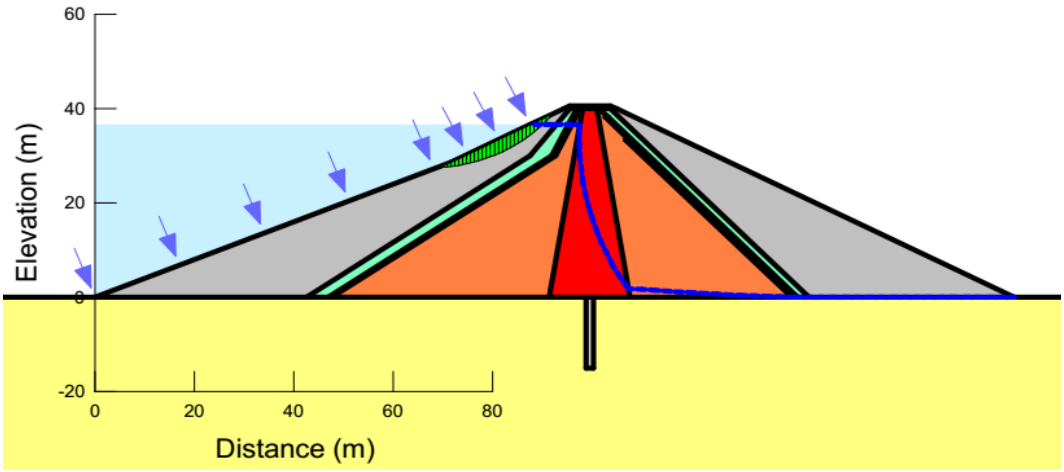


Figura 4.5 – Plano de ruptura do talude de montante

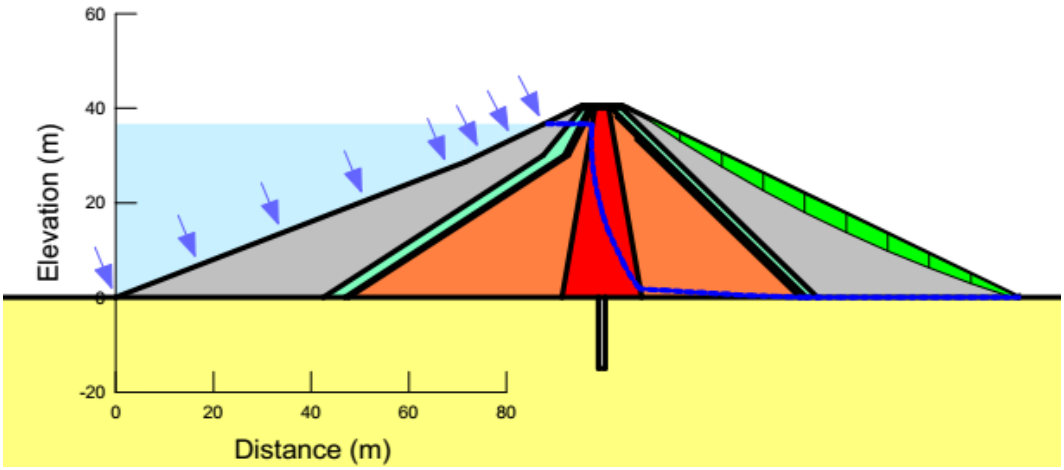


Figura 4.6 – Plano de ruptura do talude de jusante

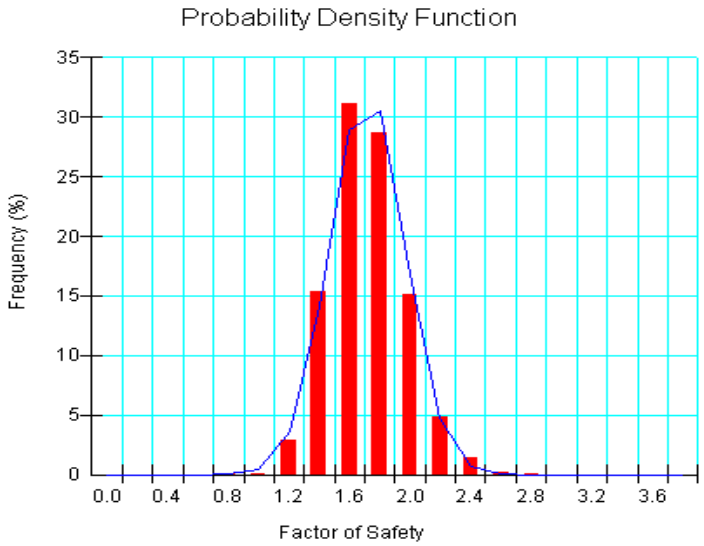


Figura 4.7 – Distribuição normal para o FS do talude de montante

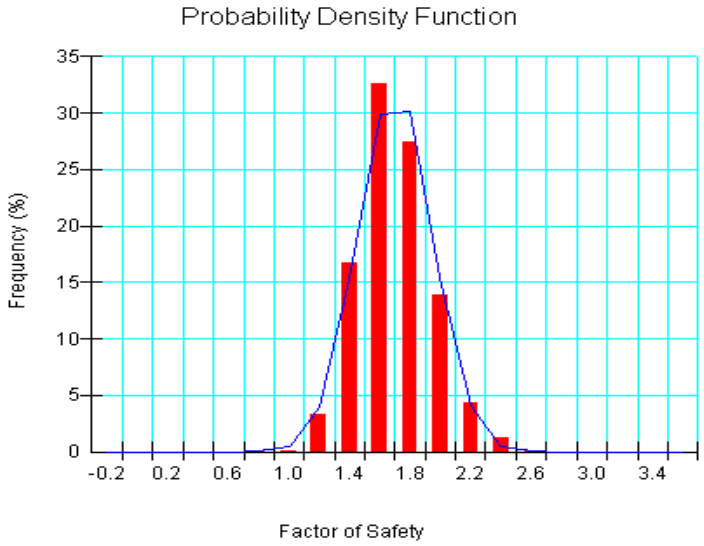


Figura 4.8 – Distribuição normal para o FS do talude de jusante

Tabela 4.3 – Resultados para a estabilidade dos taludes

Talude	**Montante**	**Jusante**
FS médio	1.7172	1.7014
Índice de confiabilidade	2.9	2.863
Probabilidade de ruptura (%)	0.2	0.2
Desvio Padrão	0.247	0.245
FS mínimo	0.78889	0.78476
FS máximo	3.3201	3.2895
N° de tentativas (Monte-Carlo)	5000	5000

5. METODOLOGIA E AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste capítulo serão descritos os recursos utilizados para a simulação de *dam break* da Barragem de Carpina, incluindo os modelos computacionais adotados e os dados requeridos. Vale destacar que muito dos dados colhidos para o estudo foram coletados na internet, e mesmo com a confiabilidade das fontes de informação verificada não houve a possibilidade de contato direto com agentes locais, como prefeituras ou até mesmo autarquias do Governo do Estado de Pernambuco. Tais limitações serão devidamente detalhadas no Capítulo 7.

5.1. MODELO HEC-RAS®

A simulação do *dam break* da Barragem de Carpina foi feita a partir da modelagem 2D no software HEC-RAS®. Este modelo hidráulico foi desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers* e é amplamente utilizado para simulação de fluxo em canais, baseando-se nas formulações de Saint-Venant para escoamentos não permanentes. As equações de Saint-Venant são expressas pelo sistema de derivadas parciais das equações 5.1 e 5.2.

$$A\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial A}{\partial x} + B\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \tag{5.1}$$

$$I_o - I_f = \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} \tag{5.2}$$

Sendo A a área da seção transversal do canal, B a maior largura do canal, V a velocidade média do fluxo, g a aceleração da gravidade, I_f a declividade da linha de energia e I_o a declividade do próprio canal. No caso da Equação 5.2, se o somatório dos termos com as derivadas parciais for igual a 0 (*i.e.*, $I_f = I_o$), tem-se um escoamento permanente uniforme; se a derivada da velocidade em função do tempo for igual a zero, tem-se um escoamento permanente não uniforme; já a equação completa indica o escoamento não permanente não uniforme (Porto, 2006).

O programa HEC-RAS® consiste em um pacote de análises hidráulicas organizadas em Interface Gráfica do Usuário. O programa é capaz de executar análise de fluxo permanente, fluxo transiente em 1D e 2D (ou uma combinação dos dois), análise de fluxo de sedimentos e de qualidade da água. Para o estudo de *dam break* é utilizada a análise de fluxo transiente,

preferencialmente de fluxo misto, englobando os regimes subcrítico e supercrítico, de modo a computar os efeitos da transição de regime no pé do maciço. Na análise de fluxo transiente as equações de Saint-Venant são utilizadas no transito de cheias pelo reservatório, capturando a declividade da superfície do reservatório à medida que a cheia avança no reservatório e as alterações na declividade durante a ruptura (USACE, 2014).

5.2. DADOS REQUERIDOS PARA SIMULAÇÃO

A simulação de um *dam break* exige determinados dados de entrada, além dos parâmetros do próprio reservatório e do maciço, para que seja devidamente executado a fim de gerar os mapas com as manchas de inundação, que é o objetivo final do estudo. É necessário que tais dados sejam colhidos de fontes confiáveis e que sua precisão seja verificada.

5.2.1. Modelo Digital do Terreno

A topografia da região foi obtida a partir do banco de dados *EarthExplorer*, do serviço geológico dos Estados Unidos (USGS), cujos Modelos Digitais de Terreno foram adquiridos da missão SRTM, da NASA, com precisão de 30 m (equivalente a um ângulo de 1 arco segundo). A adoção de um modelo com tal precisão possibilitou uma melhor modelagem dos mapas gerados, gerando manchas de inundação mais precisas. Além disso, a projeção adotada foi a SIRGAS 2000 para a zona 25 em coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*).

No Brasil, a principal fonte de dados topográficos é o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Seus Modelos Digitais de Terreno também foram obtidos da missão SRTM, da NASA, mas com precisão de 90 m (equivalente a um ângulo de 3 arco segundos), os quais passaram por refinamento, sofrendo interpolação para gerar uma precisão de 30 m. A Figura 5.1 mostra a diferença entre as resoluções de 90 m e a de 30 m.

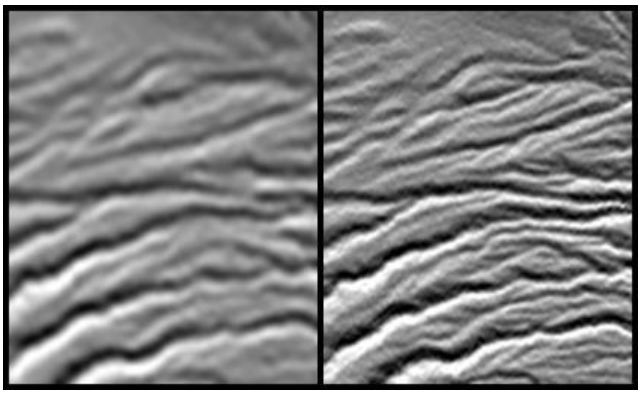


Figura 5.1 – Imagens SRTM com resolução de 90 m (esquerda) e 30 m (direita)

5.2.2. Seção transversal do rio e abertura da calha

Para a simulação, considerou-se a mesma seção transversal ao longo de todo o Rio Capibaribe. A seção foi obtida a partir de dados da Estação Fluviométrica de Paudalho (Estação 39150000 – Cadastro ANA), localizada na cidade de mesmo nome, localizada nas coordenadas 7°53’39” S 35°10’24” W. A batimetria foi executada no dia 20 de outubro de 2015, às 12:00 pm. Os dados da estação foram obtidos a partir do sistema HidroWeb (Sistema de Informações Hidrológicas), administrada pela ANA. A Figura 5.2 mostra a representação da seção transversal considerada.

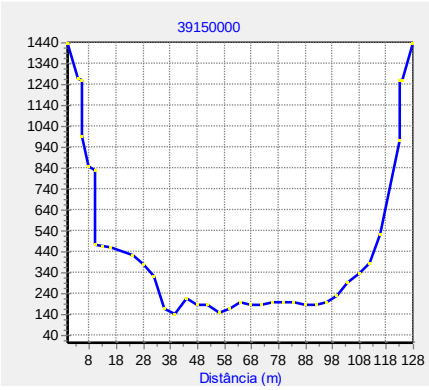


Figura 5.2 – Seção transversal do Rio Capibaribe (ANA, 2016)

A partir da seção considerada, a calha do rio foi aberta na topografia a partir do modelo 1D modelado no HEC-RAS®. Para tanto, seções transversais do rio foram estabelecidas ao longo de sua extensão, com espaçamento de 1 km entre elas, resultando na modelo mostrado na Figura 5.3. Em cada seção transversal a cota do fundo do rio foi corrigida manualmente.

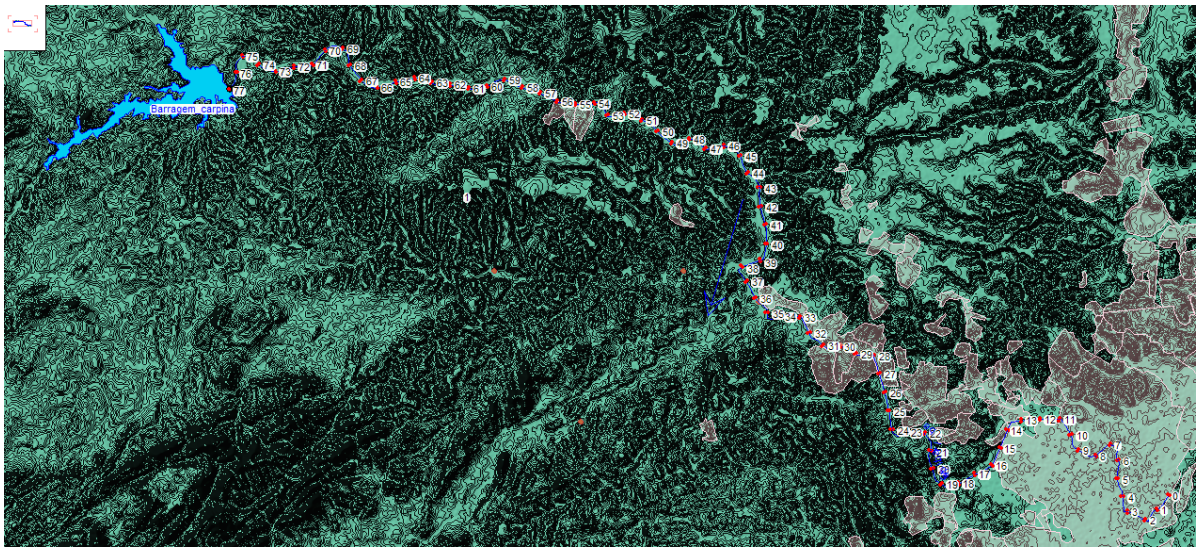


Figura 5.3 – Seções transversais ao longo do Rio Capibaribe (áreas urbanas em rosa)

A partir da modelagem da geometria, adotou-se o seguinte procedimento para abrir o canal na topografia:

1) Executa-se apenas o *Geometry Preprocessor* do módulo de análise de fluxo transiente (*Unsteady Flow Analysis*). Desse modo, a geometria será plotada no RAS *Mapper*.
2) Em seguida, no RAS *Mapper*, clica-se com o botão direito na geometria e seleciona-se *Create Terrain GeoTIFF from XS's* (*channel only*) do menu *Export Layer*. Com esse procedimento cria-se um MDE em formato ".TIFF" com a calha do rio, o qual é importado para o HEC-RAS®.

5.2.3. Área de alagamento e intervalo de tempo para as iterações

Apesar da calha ter sido aberta a partir de um modelo 1D, a simulação da mancha de inundação foi feita em um modelo totalmente 2D. Para tanto foi determinada, no programa, uma área ser alagada, o qual foi discretizada com uma malha regular, conforme mostrado na Figura 5.4.

Ao se fazer a simulação, a determinação da malha deve estar de acordo com a precisão do modelo digital do terreno, *i.e.*, não compensa adotar um tamanho de célula menor que a precisão do MDT. Além disso, uma discretização com células maiores pode mascarar possíveis erros do modelo. Outro ponto a ser considerado é o intervalo de tempo para as iterações, visto que discretizações com células menores tendem a exigir um intervalo menor. O manual de *dam break* do HEC-RAS®, por exemplo, recomenda um intervalo entre 1 e 60

segundos (USACE, 2014). Sendo assim, e após uma análise de sensibilidade, decidiu-se realizar duas simulações, uma com células de 80 m x 80 m e intervalo de 10 segundos, e outra com células de 60 m x 60 m e intervalo de 5 segundos, ambos para um período de 48 horas.

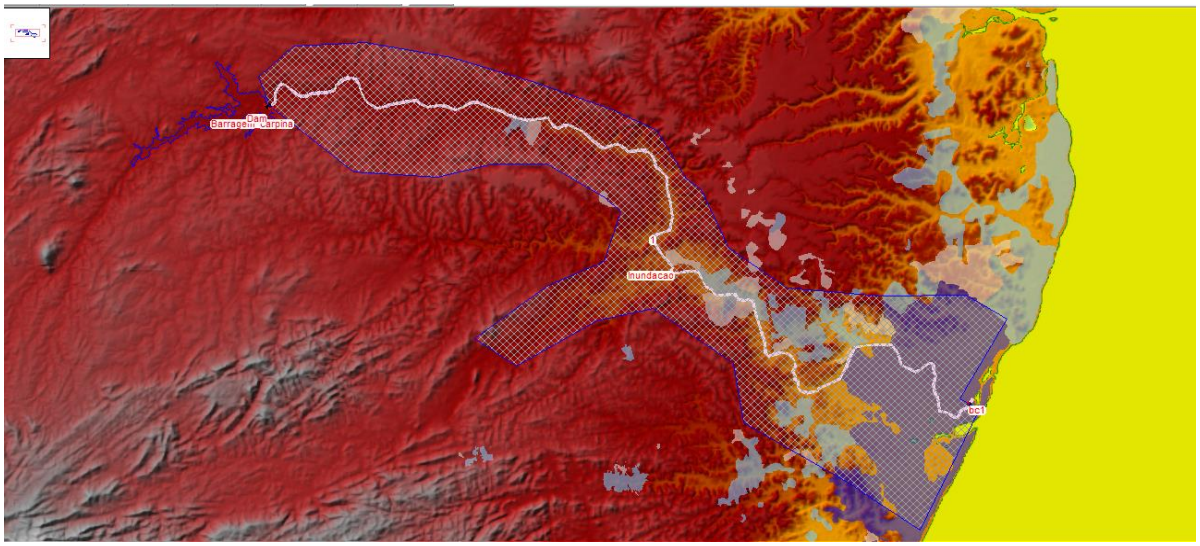


Figura 5.4 – Modelagem 2D da inundação (leito do rio em cinza)

5.2.4. Coeficiente de Manning

A determinação do coeficiente de Manning envolve várias incertezas, os quais são influenciados por fatores como vegetação, morfologia do vale e a presença de manchas urbanas. Além disso, os valores para o coeficiente disponibilizados na literatura dificilmente condizem com a cheia induzida pela ruptura de barragens, sendo necessário calibrar o valor. Na maioria dos casos, o valor do coeficiente é subestimado, podendo levar a instabilidades numéricas (Rocha, 2015). Após uma análise de sensibilidade, e baseado no *Reference Manual* do HEC-RAS® (USACE, 2016), foram adotados os valores de 0,075 no leito principal, de 0,1 na área de inundação e de 0,016 na área urbana (valor adotado para a superfície de asfalto), cuja região delimitada a partir de um *shapefile* disponibilizado pelo IBGE.

5.2.5. Forma do maciço

O maciço da barragem foi modelado conforme mostrado na Figura 5.5. A linha vermelha indica as elevações das células da área de inundação na interface com a barragem. Além disso, foram dimensionadas duas comportas, ambas com o fundo na cota 86 m e de dimensões 4,5 m x 4,5 m cada, que atravessam todo o maciço.

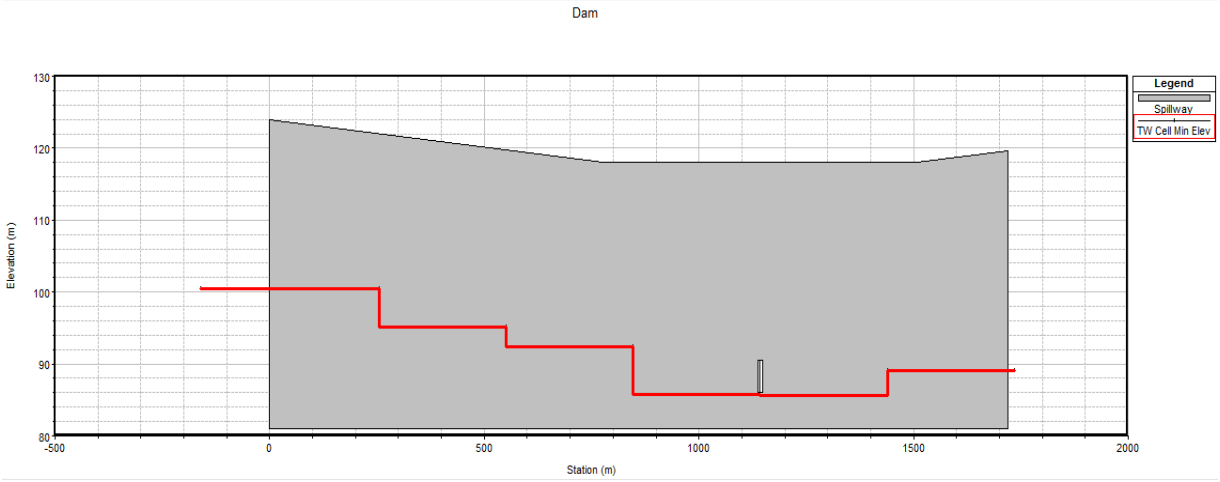


Figura 5.5 – Modelagem do maciço

5.2.6. Curva cota-volume do reservatório

A determinação da curva cota-volume do reservatório de Caprina foi feita a partir da Equação 5.3, apresentada na tese de Andrade (2006).

$$Vr_t = (a + b \times Hr_t^{0,5})^c \times 1000 \quad (5.3)$$

Sendo Vr_t o volume em m³ do reservatório, Hr_t a cota em metros do reservatório, "a" coeficiente de valor -147,4458075, "b" coeficiente de valor 16,42305315 e "c" coeficiente de valor 3,644354917. A figura 5.6 mostra o gráfico da curva cota-volume.

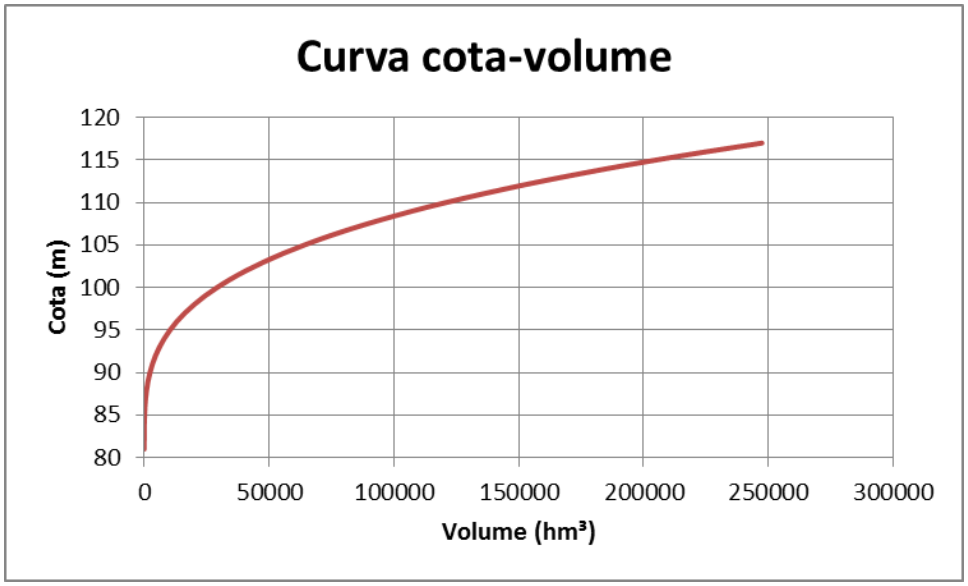


Figura 5.6 – Curva cota-volume do reservatório de Carpina

5.2.7. Dimensões da brecha

As dimensões da brecha de ruptura são calculadas pelo próprio HEC-RAS® a partir dos dados de geometria do maciço. O programa usa quatro formulações, a de MacDonald *et al.* (1984), de Froehlich (1995), de Froehlich (2008), de Von Thun & Gillete (1990) e de Xu & Zhang (2009), todas elaboradas a partir de casos reais de rupturas de barragens (USACE, 2014). O manual de *dam break* do HEC-RAS® desaconselha o uso da formulação de Xu & Zhang por produzir tempos de desenvolvimento da brecha bem maiores que os dos outros métodos, já que a formulação inclui períodos pré e pós-erosão. Além disso, o método de Froehlich de 2008 é uma atualização do método de Froehlich de 1995. Sendo assim, serão analisados os modelos de Froehlich (2008), de MacDonald *et al.* e de Von Thun & Gillete. A Tabela 5.1 mostra as expressões usadas por cada formulação para calcular a largura do fundo da brecha (metros), a declividade das laterais e o tempo de desenvolvimento da brecha (horas), valores a partir dos quais é possível calcular o hidrograma de ruptura. Além disso, foi considerado que a brecha se desenvolve seguindo uma progressão senoidal.

Tabela 5.1 – Formulações para o cálculo da brecha de ruptura (USACE, 2014)

Método	**Largura da brecha (metros)**	**Declividade das laterais da brecha**	**Tempo de ruptura – t_f (horas)**
MacDonald *et al.* (1984)	$B_b = \frac{V_{er} - h_1^2.\left(0{,}5.C + 0{,}5.h_1.\frac{Z_1+Z_2}{3}\right)}{h_1.\left(C + h_1.\frac{Z_1+Z_2}{2}\right)}$	0,5H:1V	$t_f = 0{,}0179.V_{er}^{0{,}364}$
Froehlich (2008)	$B_m = 0{,}27.K_o.V_w^{0{,}32}.\ h_b^{0{,}19}$	1H:1V (galgamento) 0,7H:1V (demais modos)	$t_f = 63{,}2\sqrt{\frac{V_w}{g.h_b^2}}$
Von Thun & Gillete (1990)	$B_m = 2{,}5.h_w + C_b$	1H:1V 0,5H:1V – 0,33H:1V (maciços com solos coesivos)	$t_f = 0{,}02.h_w + 0{,}025$ (resistente a erosão) $t_f = 0{,}015.h_w$ (facilmente erodível)
$V_{er} = 0{,}00348.(V_{out}.h_w)^{0{,}852}$ (para barragens de terra com núcleo de argila)			

Sendo: $B_{b:}$ largura do fundo da brecha (m); B_m: largura média da brecha (m); V_{er}: volume erodido do maciço (m³); h_1: altura do pé da barragem ao fundo da brecha (m); C: largura da crista da barragem (m); Z_1: declividade média da face de montante; Z_2: declividade média da face de jusante; K_o: constante (1,3 para galgamento e 1,0 para *piping*); V_w: volume do reservatório no momento da ruptura (m³); V_{out}: volume escoado através da brecha (m³); h_b: altura da brecha (m); g: aceleração da gravidade (9,81 m/s²); h_w: altura da coluna d'água em relação ao fundo da brecha (m); C_b: coeficiente em função do tamanho do reservatório.

Na simulação considerou-se que a brecha se alonga até a fundação, que é o caso observado em todas as rupturas de barragens. Além disso, o mecanismo de ruptura por galgamento, no qual a erosão se inicia do pé do maçico de jusante, impõe tal condição. A fundação da barragem de Carpina está na cota 82 m. Contudo, devido à elevação das células da malha na interface com a barragem, adotou-se que a brecha de estende até a cota 86 m. Além disso, foram estabelecidos os seguintes inputs para o cálculo da brecha:

- *Top of dam elevation* (cota do topo da barragem): 118 m (foi utilizada a cota do sangradouro)
- *Pool elevation at failure* (cota da superfície do reservatório na ruptura): 118 m
- *Breach botton elevation* (cota do fundo da brecha): 86 m
- *Pool volume at failure* (volume do reservatório na ruptura): 270 milhões de m³

A partir dos valores citados o programa calculou as dimensões da brecha, conforme mostrado na Tabela 5.3.

Tabela 5.2 – Resultados para as brechas no evento de galgamento

Método	**Largura do fundo da brecha (m)**	**Declividade das laterais (H:V)**	**Tempo de desenvolvimento (h)**
MacDonald *et al.* (1984)	386	0,5	2,75
Froehlich (2008)	169	1	2,88
Von Thun & Gillete (1990)	119	0,5	0,89

5.2.8. Hidrograma de ruptura

Uma vez obtidas as dimensões da brecha, o hidrograma de ruptura foi plotado a partir do módulo de *dam break* no programa HEC-HMS®. Este software, assim como o HEC-RAS®, foi desenvolvido pela USACE e destina-se a fazer modelagens hidrológicas. Para tanto, foram definidos os seguintes elementos no programa:

- *Basin model* (modelo de Bacia): dentro deste elemento é definida a barragem
    - *Resevoir* (reservatório): aqui são inseridos os parâmetros do maciço e do reservatório. Neste caso, o volume do reservatório foi estabelecido em função da curva cota-volume, com nível d'água inicial na cota 118 m e a vazão inicial de 300 m³/s. Além disso, foram estabelecidos os parâmetros do vertedouro, com crista na cota 118 m e com 730 m de largura. Neste ponto também é acionado o módulo de *dam break*,

dentro do qual são inseridos os dados da brecha, como a cota e a largura do fundo, a declividade das laterais e o tempo de desenvolvimento. Assim como no HEC-RAS®, foi considerada uma progressão senoidal da brecha.

- *Meteorologic model* (modelo meteorológico): neste caso, o modelo meteorológico é inserido apenas porque o programa exige para que a simulação seja feita. Sendo assim, os parâmetros meteorológicos não foram definidos.
- *Control* (controle): aqui são estabelecidos a duração da simulação e o intervalo de tempo para plotagem dos gráficos
- *Paired data* > *Elevation-storage function*: neste elemento são inseridos os dados para a plotagem da curva cota-volume.

A Figura 5.7 mostra os hidrogramas gerados para as três formulações, enquanto que a Tabela 5.3 mostra as vazões de pico para cada hidrograma. Em todos os casos foi considerada a hipótese de dia seco (ie, dia sem chuva); sendo assim, o gatilho para o início da formação da brecha foi fixado no tempo t = 0 no hidrograma. Além disso, recomenda-se adotar uma vazão inicial diferente de zero, de modo a não deixar o leito seco no inicio da simulação; neste caso, foi considerada uma vazão de base de 400 m³/s, por ser a vazão máxima com as comportas abertas.

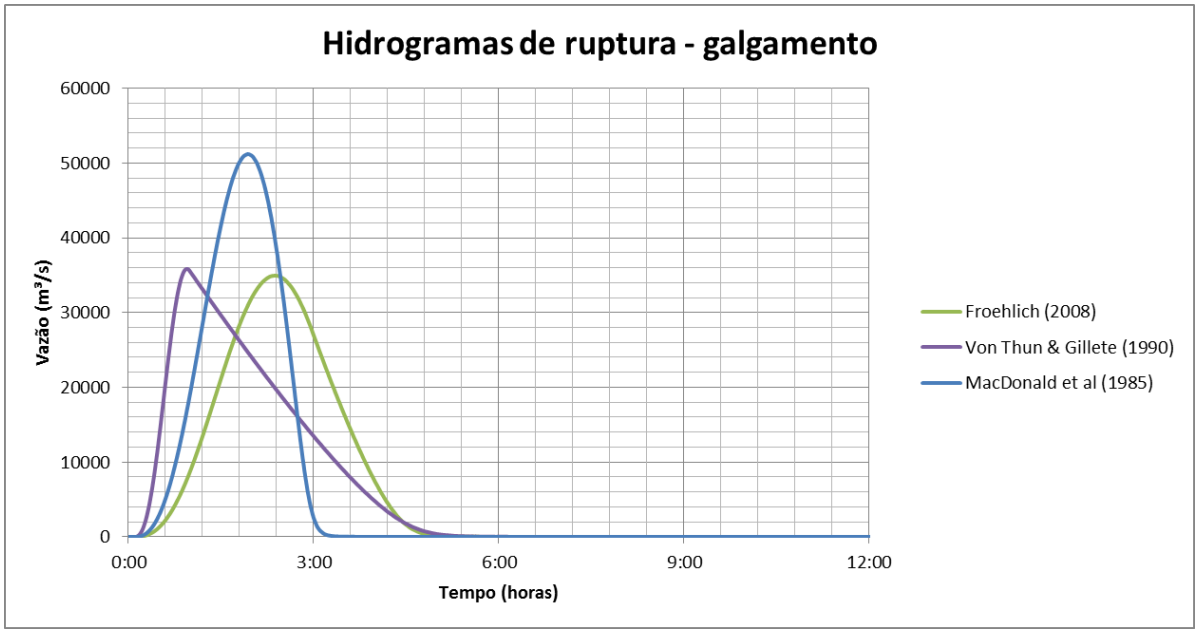


Figura 5.7 – Hidrogramas de ruptura para o galgamento

Tabela 5.3 – Vazões de pico

Formulação	**Vazão de pico (m^3/s)**
Froehlich (2008)	34944,4
Von Thun & Gillete (1990)	35858,8
MacDonald *et al.* (1985)	51208,4

O tempo de desenvolvimento da brecha no método de Von Thun & Gillete está bem abaixo em relação aos outros dois métodos. Já o método de MacDonald *et al.* gera uma vazão de pico muito alta em relação aos outros dois hidrogramas. Sendo assim, foi escolhido o método de Froehlich (2008) para modelar a mancha de inundação.

6. RESULTADOS E ANÁLISE

O resultado final da análise de *dam break* está expresso nos mapas de inundação, os quais podem ser conferidos no Apêndice E. Ao se fazer tal análise, não é suficiente apenas obter o desenho da mancha, mas também outros parâmetros que permitam uma tomada de decisão sobre a evacuação das áreas afetadas, os quais estão detalhados no Item 3.2.3. Basicamente esses parâmetros são o risco hidrodinâmico (produto entre a profundidade da cheia e sua velocidade), que expressa o nível de perigo da cheia, e o tempo de chegada da onda, que vai influenciar no tempo de alerta. Ambos os parâmetros estão representados nos Mapas 3 e 4 do Apêndice E, respectivamente. Além disso, os tempos de chegada da cheia nos municípios afetados estão expressos na Tabela 6.1. Já as profundidades e as velocidades da cheia estão representados nos Mapas 1 e 2 do Apêndice E, respectivamente. Nestes quatro mapas as manchas foram geradas a partir da simulação com células de 60 x 60 m e intervalo para as iterações de 5 segundos, e a tonalidade foi criada a partir da divisão dos dados em quantis.

Tabela 6.1 – Tempos de chegada da onda nas cidades atingidas

Cidade	Tempo de chegada da onda (horas)
Paudalho	2h 30 min – 2h 40 min
São Lourenço da Mata	5h 40 min – 5h 50 min
Camaragibe	7h 50 min – 8h
Recife	8h 10 min – 8h 20 min

Obs: os tempos indicam o momento em que a onda atravessa o limite municipal, e não necessariamente quando atinge a área urbana do município.

6.1. COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES SIMULAÇÕES

Antes da elaboração dos mapas de inundação, contudo, três simulações foram executadas variando-se o tamanho das células da malha 2D, o Modelo Digital do Terreno e o intervalo para as iterações, conforme mostrado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Simulações executadas

Simulação	MDT	Intervalo para as iterações	Tamanho das células
1	SRTM 30 m	5 segundos	60 m x 60 m
2	SRTM 30 m	10 segundos	80 m x 80 m
3	Topodata	10 segundos	80 m x 80 m

Notou-se, ao se executar as simulações, que o uso de um intervalo de 10 segundos para a malha com células de 60 m x 60 m gerava instabilidade numérica nos resultados; sendo assim, decidiu-se adotar um intervalo de 5 segundos apenas para a Simulação 1, mantendo-se 10 segundos para as demais simulações. Ao se escolher o tamanho da malha e o intervalo deve-se ponderar o tempo total de simulação com a precisão dos dados que se pretende obter.

A Figura 6.1 mostra os mapas para o risco hidrodinâmico na cidade de Paudalho geradas pelas Simulações 1 e 2; aqui pretende-se comparar os resultados para diferentes tamanhos de células da malha 2D. Visivelmente não é possível notar diferenças quanto ao formato das manchas, já que sofre mais influenciada do nível de refinamento da topografia. Contudo pequenas diferenças podem ser observadas no mapeamento das zonas de perigo, com uma tendência de diminuição das zonas de maior perigo com o maior refinamento da malha.

Já a Figura 6.2 mostra os mapas para o risco hidrodinâmico geradas pelas simulações 2 e 3; aqui pretende-se comparar os resultados para MDTs de diferentes precisões. Vale lembrar que o modelo Topodata, fornecido pelo INPE, tem precisão de 30 m gerada a partir de interpolações na topografia SRTM com precisão de 90 metros. Com o auxílio do ArcGIS® foram calculadas as áreas das manchas nas três simulações, mostradas na Tabela 6.3; como resultado, a simulação com o uso do modelo Topodata gerou a mancha com a maior área.

Devem-se considerar também possíveis distorções entre os resultados das simulações. Isso fica mais claro ao se comparar os valores máximos de risco hidrodinâmico, profundidade e velocidade da cheia. Em todos os casos os valores máximos estão localizados a poucos metros da face de jusante do maciço, região esta de regime de escoamento supercrítico. Neste caso, a topografia foi o fator que mais influenciou essa variação, conforme mostrado na Tabela 6.3. Os valores máximos obtidos pela simulação usando o modelo Topodata são bem maiores que os encontrados nas outras duas simulações.

Tabela 6.3 – Valores máximas gerados e área das manchas de inundação

Simulação	**Valores máximos**			**Área da mancha de inundação (km^2)**
	Velocidade (m/s)	**Profundidade (m)**	**Risco hidrodinâmico (m^2/s)**	
1	15,41	33,96	216,8	167,59
2	24,05	33,96	179,6	166,64
3	60,51	34,61	750,7	171,79

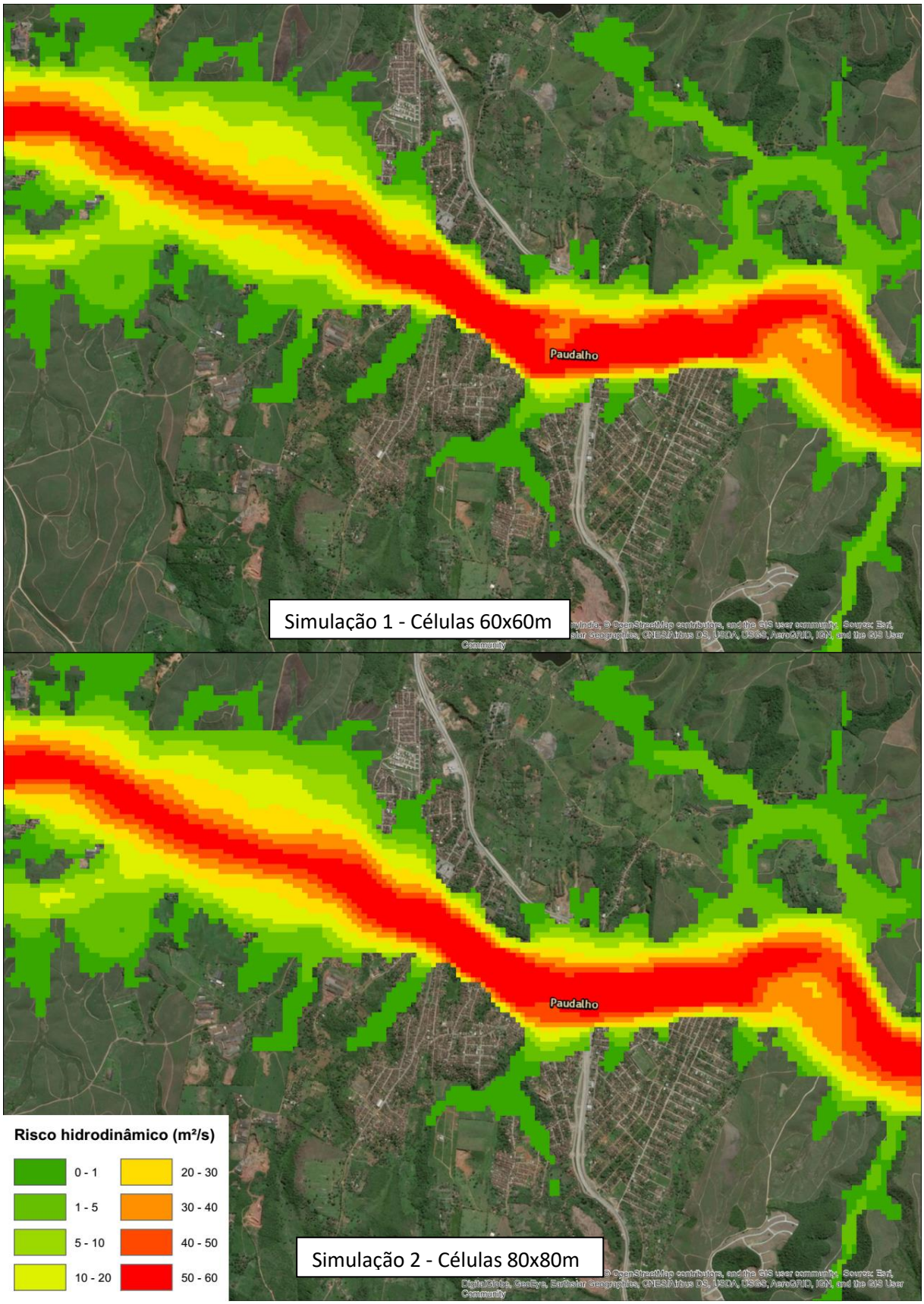


Figura 6.1 – Comparação entre os mapas gerados pelas Simulações 1 e 2

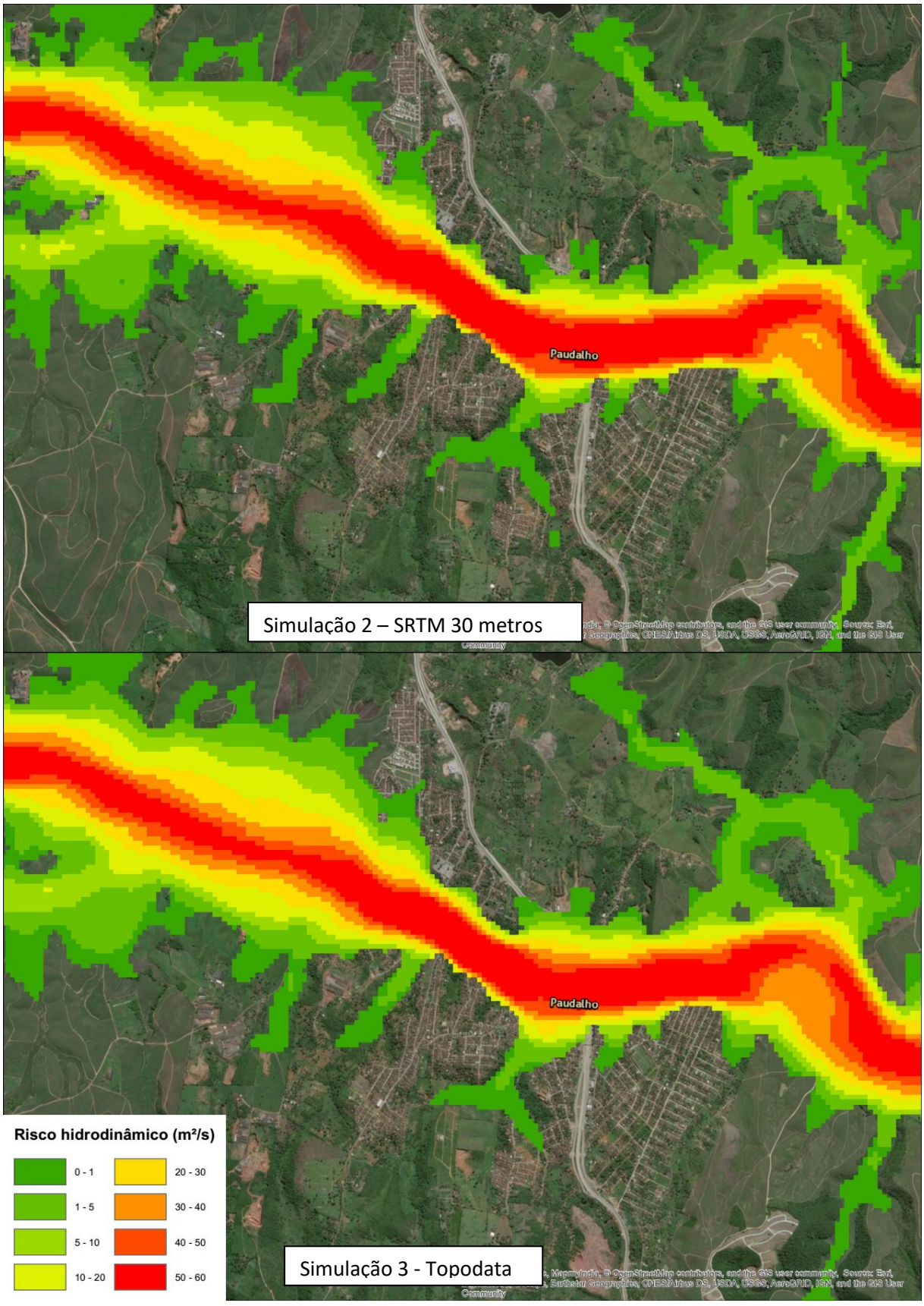


Figura 6.2 – Comparação entre os mapas gerados pelas Simulações 2 e 3

6.2. ESTUDOS DE CASO

A seguir serão feitos os estudos de caso das cidades de Paudalho e Recife, a primeira e a última cidades a serem atingidas pela cheia, respectivamente. Os mapas com as informações de risco hidrodinâmico, profundidade, velocidade e tempo de chegada da onda estão nos Mapas 5 e 6 do Apêndice E. Nesses mapas, as tonalidades foram adotadas de acordo com os critérios de perigo apresentados na Tabela 3.4, para o risco hidrodinâmico, na Tabela 3.5, para a profundidade da inundação, e na Tabela 3.6, para a velocidade da onda de cheia.

6.2.1. Estudo de Caso: Recife-PE

A cidade de Recife, capital do Estado de Pernambuco, foi escolhida para uma análise mais detalhada da cheia, visto a sua importância nacional, sua grande população, e pelo fato da inundação se espalhar por praticamente toda a área do município. Recife possui população de 1.625.583 habitantes, conforme projeção do IBGE (2016a), uma área territorial de 218,4 km² e teve um Produto Interno Bruto de R$ 46,5 bilhões em 2015, o maior do nordeste brasileiro (Jornal do Comércio, 2015b). É em Recife que fica a foz do Rio Capibaribe, representada na Figura 6.2, 76 km a jusante da Barragem de Carpina.

Figura 6.2 – Foz do Rio Capibaribe no centro de Recife

Conforme mostrado na Tabela 6.1, estimou-se que o tempo de chegada da cheia em Recife é por volta de 8 horas após o rompimento da barragem, inundando boa parte planície aonde se encontra a capital pernambucana. Nas regiões mais ao norte da cidade o tempo de chegada pode chegar a 19 horas. Com relação à velocidade, são poucas as regiões no nível de alerta vermelho (acima de 5,5 m/s), estando a maior parte da cidade no nível verde (abaixo de 2

m/s). Por outro lado, com relação à profundidade notam-se vastas áreas sob o nível vermelho de alerta (acima de 6 m), principalmente nas proximidades da foz e na região em que o Rio Capibaribe adentra a cidade, na divisa com o município de São Lourenço da Mata. Como resultado, boa parte da cidade está sob o alerta amarelo quanto ao risco hidrodinâmico (entre 1 m²/s e 3 m²/s), sendo os maiores valores encontrados no trecho do rio na divisa com o município de São Lourenço da Mata, chegando a atingir o valor de 105 m²/s; esse valor pode ser explicado pela topografia, já que o curso do rio passa por um vale encaixado, com declividades chegando a 16%. No Mapa 5 do Apêndice E estão representadas as informações de risco hidrodinâmico, profundidade, velocidade e tempo de chegada da cheia para a capital pernambucana.

6.2.2. Estudo de Caso: Paudalho-PE

Além de Recife, o município de Paudalho também foi escolhido para uma análise mais detalhada. Além da cidade ser a primeira a ser inundada, nela a cheia atinge valores bastante altos de risco hidrodinâmico, visto a combinação de alta velocidade da onda e da grande profundidade da inundação. No Mapa 6 do Apêndice E estão representadas as informações de risco hidrodinâmico, profundidade, velocidade e tempo de chegada da cheia para o município.

O município de Paudalho tem população de 55.493 habitantes, conforme projeção do IBGE (2016b). O centro da cidade está localizada nas coordenadas 7°53’49” S 35°10’48” W, na cota 101 m. Além disso, a cidade está distante 47 km do centro do Recife, cujo acesso se dá pela BR-408, e está 22 km a jusante da Barragem de Carpina, seguindo o leito do Rio Capibaribe. A Figura 6.3 mostra a localização da cidade no Estado de Pernambuco.

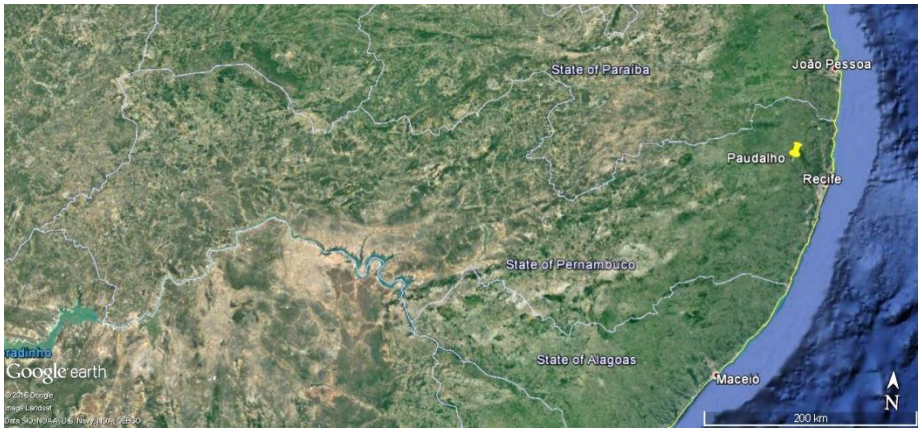


Figura 6.3 – Localização da cidade de Paudalho

Conforme mostrado na Tabela 6.1, a cheia adentra o município cerca de 2,5 horas após o rompimento da barragem. Com relação à velocidade da cheia, ela atinge valores bastante altos (acima de 5,5 m/s) apenas nas proximidades da ponte da BR-408, região esta de alerta vermelho. Já com relação à profundidade da inundação, a simulação revelou valores bastante altos em praticamente toda a mancha (acima de 6 m). Como resultado, o risco hidrodinâmico alcançou valores de alerta vermelho, acima de 7 m/s², em boa parte da mancha, valor a partir do qual pode ocorrer o colapso de alguns edifícios.

Esses resultados podem ser, de certa forma, explicados pela topografia da região. O centro de Paudalho está localizado no leito de inundação do Rio Capibaribe, região esta que se caracteriza por ser uma área de drenagem do rio com canais em vales profundos, com valores de declividade podendo chegar a 23%. A Figura 6.4 mostra o Modelo Digital de Terreno com a topografia na cidade de Paudalho.

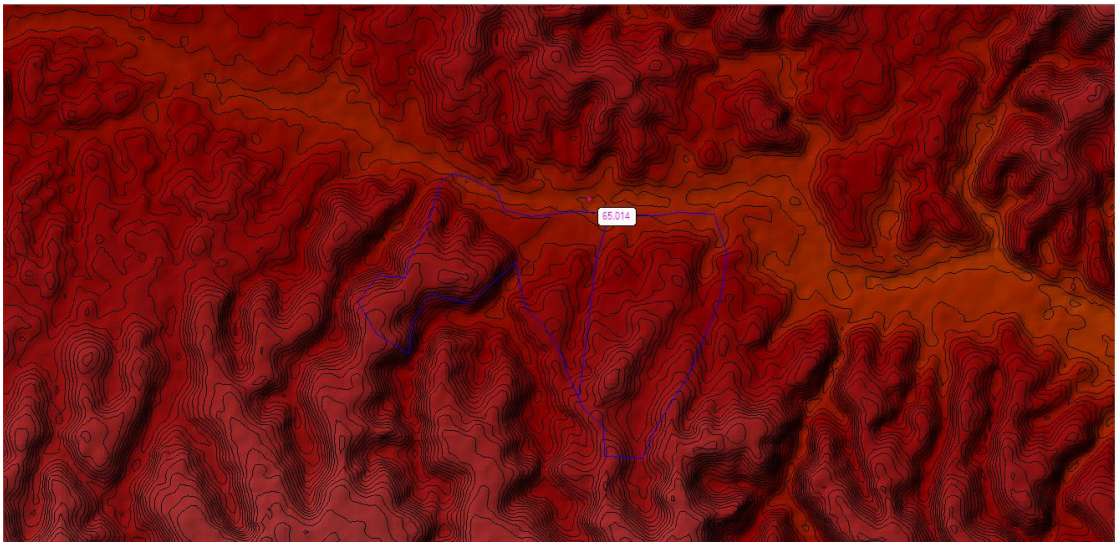


Figura 6.4 – Topografia na cidade de Paudalho (curvas de nível a cada 5 m)

Em posse dos resultados, percebe-se que a cidade de Paudalho seria gravemente afetada no caso da ruptura da Barragem de Carpina. A principal rota de fuga é a BR-408, que atualmente encontra-se duplicada e em boas condições de uso. Portanto, considerando o tempo estimado de 3 horas até a chegada da cheia, faz-se necessário treinar a população para que a evacuação se dê de forma expedita e autônoma, visto a intensidade da onda de cheia, sendo necessária também a elaboração de um Plano de Ação Emergencial para o centro do município.

7. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tratou dos aspectos que envolvem o estudo de *dam break* no contexto brasileiro e internacional. Foram abordados assuntos como a gestão de riscos em barragens, a legislação brasileira no âmbito da segurança de barragens com a lei n° 12.334/2010, que instituiu o Política Nacional de Segurança de Barragens, os modos de ruptura mais comuns, como galgamento, *piping* e instabilidade de taludes, além dos parâmetros a serem considerados na avaliação das consequências de uma provável ruptura, como velocidade e profundidade da cheia, o risco hidrodinâmico e o tempo de chegada da onda, parâmetros estes que são os balizadores na elaboração do Plano de Ação Emergenciais da barragem, cuja responsabilidade, segundo o PNSB, é de responsabilidade do empreendedor da barragem e que deve conter o plano de evacuação da área atingida.

Analisou-se ainda a ruptura hipotética da Barragem de Carpina, no estado de Pernambuco, cuja principal função é a de regularizar as vazões no Rio Capibaribe de modo a prevenir inundações, principalmente na região metropolitana do Recife. Durante esse estudo foram pormenorizados características do reservatório e do maciço, bem como características socioeconômicas da ocupação ao longo do curso do Rio Capibaribe. Uma análise preliminar com o uso do programa GeoStudio® revelou, para a fase de operação da barragem, um fator de segurança de 1,7 para ambos os taludes, com uma confiabilidade de 99,8%. Além disso, o estudo de *dam break* foi conduzido apenas para o caso de galgamento, visto a remota possibilidade de ruptura por *piping*. Dentro do estudo foram discutidos os principais dados de entrada para a simulação, executada no programa HEC-RAS®, como o Modelo Digital de Terreno, a calha do rio, a discretização da malha 2D adotada, o coeficiente de Manning, a curva cota-volume do reservatório, as dimensões da brecha e o hidrograma de ruptura. Como resultado, foram elaborados os mapas representando a mancha de inundação.

A partir dos mapas gerados notaram-se vastas áreas com alerta vermelho para o perigo, nos quais o valor risco hidrodinâmico é maior que 7 m²/s, podendo a causar o colapso de edifícios. Dentre as cidades atingidas, Paudalho é uma das mais afetadas pela inundação, localizada na área de drenagem do Rio Capibaribe e cujo centro está dentro da zona de alerta vermelho para o perigo. Além disso, boa parte de Recife é inundada; predominando o alerta amarelo para o perigo, com valores de risco hidrodinâmico entre 3 e 7 m²/s.

Em posse dos resultados, várias considerações e recomendações devem ser feitas, primeiramente em relação ao programa HEC-RAS®. O programa produz resultados consistentes, mesmo com poucos dados inseridos; contudo o programa não é de fácil familiarização, já que possui vários campos para inserção dos dados. Erros na inserção dos dados ou o uso de um intervalo de tempo para as iterações incompatível para o tamanho de célula adotada facilmente geram dados com instabilidades numéricas. Além disso, o uso de células de tamanhos maiores tende a mascarar possíveis erros do modelo. Portanto, recomenda-se usar células com dimensões mais próximas possíveis da precisão do MDT e um intervalo de pelo menos 10 segundos, sempre ponderando o tempo total de processamento e a precisão requerida. Para trabalhos futuros recomenda-se também associar o modelo 1D do rio com o modelo 2D da inundação. O uso do modelo 1D permite o estabelecimento das seções transversais do rio em distâncias regulares, e para cada seção é possível obter o hidrograma, permitindo assim a plotagem da propagação do hidrograma de ruptura, que não foi feito nesse trabalho.

Outro ponto a ser abordado é sobre o Modelo Digital de Terreno. A comparação entre os modelos Topodata (de precisão de 30 m obtida a partir de uma interpolação em um modelo SRTM de precisão de 90 m) e SRTM com precisão de 30 m, ambos gratuitos, mostrou que o uso de um modelo menos preciso resulta em uma maior mancha de inundação e em distorções nos valores de saída, principalmente na região onde o regime de escoamento é supercrítico, nas proximidades da face de jusante do maciço, no qual ocorrem os maiores valores de velocidade, profundidade e risco hidrodinâmico. O MDT também influencia na curva cota-volume do reservatório, que é calculado a partir das curvas de nível; felizmente a expressão da curva foi obtida a partir do trabalho de Andrade (2010), minimizando a influencia da topografia. Sendo assim, os mapas foram produzidos a partir do modelo SRTM de 30 m, gerando resultados satisfatórios para os resultados desse projeto, podendo ser utilizados para a elaboração de PAEs. Entretanto deve-se ter cuidado na utilização de MDEs gratuitos, visto que muitas vezes não conseguem reproduzir adequadamente a geometria do leito do rio. Caso seja necessário um modelo de precisão melhor uma alternativa é o uso do modelo LiDAR, comumente denominado de Sistema de Perfilamento a Laser, que é obtido a partir da emissão de feixes de laser em direção ao terreno.

A determinação do hidrograma de ruptura e das dimensões da brecha também deve ser tratada com cuidado. Como a ruptura analisada nesse projeto é hipotética, o hidrograma e a brecha

foram determinados a partir de formulações teóricas elaboradas a partir de casos reais de rupturas, como a de MacDonald *et al.* (1984), a de Von Thun & Gillete (1990) e a de Froehlich (2008) (USACE, 2014) . Nota-se uma necessidade de mais estudos de retroanálise de casos reais de modo a calibrar os modelos já existentes, como o realizado por Rocha (2015) sobre a ruptura da Barragem de Contenção de Rejeitos de São Francisco, na cidade de Miraí, MG, ocorrida em janeiro de 2007. Após uma análise de sensibilidade com o cenário real da ruptura, Rocha optou por utilizar o modelo de Froehlich (2008) para simular a inundação, tal como foi feito para a Barragem de Carpina. Se, por um lado, foram evidenciadas grandes diferenças entre as dimensões da brecha e as vazões de pico na comparação entre a simulação e o caso real, por outro lado Rocha notou uma aproximação entre os resultados do caso real e da simulação a media que ocorria o transito de cheias pelo vale a jusante. Além disso, diante das várias incertezas quanto ao processo físico do rompimento de barragens e da propagação da inundação, Rocha (2015) sugere o uso do método GLUE, elaborado por Beven & Binley, de modo a gerar mapas que representem a probabilidade de inundação em determinado lugar.

Para trabalhos futuros recomenda-se a modelagem das pontes do Rio Capibaribe, o que não foi feito neste projeto, principalmente para avaliar a possível influencia dessas obras na linha d'água da inundação, além da modelagem dos tributários. Recomenda-se também a elaboração do Plano de Ação de Emergências para as cidades afetadas pela cheia, sendo de grande serventia para a população que habita ao longo do curso do Rio Capibaribe. Esses mapas, além de indicar as zonas de risco, devem apontar as possíveis rotas de fuga, locais de abrigo e hospitais. Cabe também, para a quantificação do seguro e de possíveis indenizações, o cálculo monetário das consequências, o que pode exigir uma carga de trabalho maior que a da simulação da inundação em si. Nesse caso, faz-se necessário um banco de dados dos edifícios das cidades, associado a seu valor de mercado, juntamente com um mapa de ocupação territorial, classificando os bairros pela densidade demográfica. Nesse sentido, o programa HEC-FIA®, também desenvolvido pela USACE, é a uma das ferramentas consagradas para o cálculo das consequências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2009). NBR ISO 31000: Gestão de Riscos – Princípios e Diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 32p.

Agência Nacional de Águas – ANA (2015). *Relatório de Segurança de Barragens 2014.* Brasília: Agência Nacional de Águas, 150p.

Agência Nacional de Águas – ANA (2016). *HidroWeb – Estação Paudalho* [Online]. Disponível em: http://hidroweb.ana.gov.br/Estacao.asp?Codigo=39150000 [Acessado em 15 de outubro de 2016].

Amarante, C.A.P. (1982). *Barragens no Brasil*. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 279p.

Andrade, P.R.G.S. (2006). *Estudo para Alocação Ótima das Águas de um Sistema de Reservatórios em Série e em Paralelo, para Usos e Objetivos Múltiplos, na Bacia do Rio Capibaribe, PE*. Tese de Doutorado. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 248p.

Assis, A.P. (2015). *Apostila de Barragens de Terra e Enrocamento*. Brasília: Universidade de Brasília.

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.* Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 353p.

Brasil. Ministério da Integração Nacional - MI (2002). *Manual de Segurança e Inspeção de Barragens*. Brasília: Ministério da Integração Nacional

Brasil. Ministério do Meio Ambiente - MMA (2012). *Resolução n° 143, de 10 de Julho de 2012*. Brasília: Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

Brasil. Presidência da República – PR (2010). *Lei n° 12.334, de 20 de Setembro de 2010*. Brasília: Casa Civil – Subchefia para Assuntos Jurídicos.

Brasil. Senado Federal (2015). *Comissão Externa do Rompimento de Barragem na Região de Mariana-MG - Relatório Preliminar*. Brasília: Senado Federal, 92p.

Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – ELETROBRÁS (2003). Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Brasília: Eletrobrás, 279p.

Collischonn, W., Tucci, C.E.M. (1997). Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 2, pp. 191-206.

Cruz, P.T. (1996). *100 Barragens Brasileiras*. 2ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 648p.

Day, C.A. (2016). Modelling Potential Impacts of a Breach for a High Hazard Dam, Elizabethtown, Kentucky, USA. *Applied Geography*, 71 (2006), pp. 1-8.

Duarte, F.S. (2015). *O Caso Samarco e a Responsabilidade por Dano Ambiental* [Online]. Disponível em: https://jus.com.br/artigos/44561/o-caso-samarco-e-a-responsabilidade-por-dano-ambiental [Acessado em 12 de junho de 2016]

Geotechdata, 2013. *Dry Unit Weight* [Online]. Disponível em: http://www.geotechdata.info/parameter/soil-dry-unit-weight.html. [Acessado em 2 de outubro de 2016].

Geotechdata, 2013. *Soil Friction Angle* [Online]. Disponível em: http://www.geotechdata.info/parameter/angle-of-friction.html [Acessado em 2 de outubro de 2016].

Geotechdata, 2014. *Soil Cohesion* [Online]. Disponível em: http://www.geotechdata.info/parameter/cohesion.html.[Acessado em 2 de outubro de 2016].

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (2015). *Laudo Técnico Preliminar – Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais*. Brasília: IBAMA, 38p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2016. *IBGE Cidades – Paudalho* [Online]. Disponível em: http://cod.ibge.gov.br/25QJ. [Acessado em 10 de novembro de 2016]

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2016. *IBGE Cidades – Recife* [Online] Disponível em: http://cod.ibge.gov.br/BDM. [Acessado em 10 de novembro de 2016]

Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas – IPEA (2014). Região Metropolitana do Recife. In: *Atlas do Desenvolvimento Humano nas Regiões Metropolitanas Brasileiras*. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, pp. 77-82.

Jornal do Comércio, 2015. *O "tsunami" que Arrasou o Recife* [Online]. Disponível em: http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/cidades/geral/noticia/2015/04/18/o-tsunami-que-arrasou-o-recife-177239.php. [Acessado em 3 de novembro de 2016]

Jornal do Comércio, 2015. *Região Metropolitana do Recife Supera a de Salvador e Passa a Liderar o PIB no Nordeste* [Online]. Disponível em: https://goo.gl/v4Xdlc. [Acessado em 10 de novembro de 2016]

Melo, A.V. (2014). *Análises de Risco Aplicadas a Barragens de Terra e Enroncamento: Estudo de Caso de Barragens da CEMIG GT*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Escola de Engenharia, Universidade Federal de

Minas Gerais, 336p.

Menescal, R.A., ed. (2005). *A Segurança de Barragens e a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil.* Brasília: Ministério da Integração Nacional, 314p.

Morgenstern, N.R., Vick, S.G., Viotti, C.B., Watts, B.D. (2016). *Fundão Tailings Dam Review Panel – Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam*. Belo Horizonte: The Fundão Tailings Dam Investigation, 88p.

Perini, D.S. (2009). *Estudo dos Processos Envolvidos na Análise de Riscos de Barragens de Terra.* Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM-180/09. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p.

Porto, R.M. (2006). *Hidráulica Básica*, 4ª ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 540p.

Queiroz, I.M. (2016). Comparação entre Análises de Estabilidade Determinística e Probabilísticas, Apresentando uma Consequente Análise de Risco. *Procedimentos do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 18-22 de Outubro de 2016, Belo Horizonte. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 8p.

Rocha, F.F. (2015). *Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Miraí, Minas Gerais, Brasil*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 200p.

Rocha, F.F. (2016). Cenários de Formação e Evolução de Rupturas em Barragens de Rejeito. *V Simpósio sobre Segurança de Barragens e Riscos Associados* [Online]. Fortaleza: Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB. Disponível em: https://goo.gl/uHdALf [Acessado em 11 de abril de 2016].

Secretaria de Recursos Hídricos – SRH (1998). *Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco*, Vol.2. Recife: Governo de Pernambuco, 217p.

Secretaria de Recursos Hídricos – SRH (2010). Tomo I – Diagnóstico Hidroambiental, Vol. 1. In: *Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe.* Recife: Governo de Pernambuco, 394p.

Seed, H.B. e Duncan, J.M. (1987). The Failure of Teton Dam. *Engineering Geology*. 24 (1987), pp 173-205.

Sherard, J.L. (1987). Lessons from Teton Dam Failure. *Engineering Geology*. 24 (1987), pp.239-256.

Stene, E.A. (1996). *Teton Basin Project.* Washington, DC, USA: US Bureau of Reclamation,

32p.

Sylvester, A.G. (2015). *Teton Dam Failure Narrative*. Santa Barbara, CA, USA: University of California Santa Barbara [Online]. Disponível em: http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton_Dam/narrative.html [Acessado em 29 de maio de 2016]

US Army Corps of Engineers - USACE (2014). *Using HEC-HAS for Dam Break Studies*. Davis, CA, USA: US Army Corps of Engineers, 74p.

US Army Corps of Engineers - USACE (2016). *Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA, USA: US Army Corps of Engineers, 547p.

US Bureau of Reclamation – USBR (1999). *A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure*. Washington, DC, USA: USBR, (DSO-99-06), 46p.

US Department of Homeland Security: FEMA (2013). *Federal Guidelines for Dam Safety*. Washington, DC, USA: FEMA, (FEMA 64), 73p.

US Department of Homeland Security: FEMA (2013). *Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures*. Washington, DC, USA: FEMA, (FEMA P-946), 145p.

US Department of Homeland Security: FEMA (2015). *Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management*. Washington, DC, USA: FEMA, (FEMA P-1025), 49p.

US Geological Survey - USGS (2016). *EarthExplorer* [Online]. Disponível em: http://earthexplorer.usgs.gov/ [Acessado em 2 de novembro de 2016].

Wolff, E. (2014). *Gerenciamento de Risco Geotécnico Aplicado a Infraestruturas Portuárias.* Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM-248/2014. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90p.

APÊNDICE A – GLOSSÁRIO

Alteamento a montante: método de construção de barragens de rejeitos de mineração no qual o próprio rejeito adensado é utilizado como fundação para futuros diques de alteamento, os quais são executados com o próprio material de rejeito, sendo esse processo repetido até atingir a cota de coroamento prevista.

Arco segundo: ângulo cuja medida é de 1 segundo, ou 1/3600 graus. Com relação ao raio da Terra (~ 6371 km), equivale a uma distância de 30 m.

Árvore de eventos: diagrama o qual se inicia com um evento de falha e que prossegue seguindo todas as sequências de eventos possíveis resultantes do evento de falha.

Conduto forçado: túnel ou tubulação que conduz água sob pressão.

Contraforte: muro delgado em concreto, usado como reforço perpendicular a outro muro ou suportando uma laje de concreto em uma barragem.

Coroamento (ou crista): linha de topo de uma barragem.

Cortina: zona da fundação injetada ou preenchida com material impermeável para reduzir a percolação de água.

Ensecadeira: barragem temporária construída a montante e a jusante da barragem a fim de construir a obra em terreno seco.

Escoamento subcrítico (lento ou fluvial): escoamento cuja altura d'água é maior que a altura d'água crítica (no qual a energia específica é mínima). Neste escoamento, a energia especifica aumenta com o aumento da altura d'água.

Escoamento supercrítico (rápido ou torrencial): escoamento cuja altura d'água é menor que a altura d'água crítica. Neste escoamento, a energia especifica aumenta com a diminuição da altura d'água.

Índice de confiabilidade (*reliability index*): consiste no número de desvios padrão que separam o fator de segurança médio e o fator de segurança mínimo (FS = 1), para uma distribuição normal, ou o número de desvios padrão entre o fator de segurança médio e zero, para uma distribuição lognormal. Quanto maior o índice, mais confiável é o valor do fator de segurança.

Liquefação: processo no qual há a diminuição de tensões devido ao aumento de poropressão em materiais granulares, os quais passam a se comportar como um fluido.

Modelo Digital de Terreno (*Digital Elevation Model*): representação digital e cartográfica das elevações em coordenadas xyz.

Ombreira: trecho da fundação correspondente às encostas do vale, sobre o qual se assenta a barragem.

Quantil: divisão dos dados em subconjuntos de tamanho aproximadamente igual.

Sangradouro (ou vertedouro): estrutura através da qual escoa o fluxo excedente do reservatório.

Shapefile: formato de armazenagem de dados vetoriais relacionados à posição, formato e atributos de feições geográficas.

Teoria do risco integral: teoria jurídica o qual o ente administrativo de um empreendimento fica obrigado a indenizar todo e qualquer dano a terceiros, mesmo sem a culpabilidade do empreendedor ou se a culpa ou dolo for da vítima.

Trincheira de vedação (*cut-off*): prolongamento do núcleo dentro das fundações para reduzir a percolação da água das fundações.

Vulnerabilidade: se refere ao nível de dano ou perda os quais a sociedade e o meio ambiente estão sujeitos

APÊNDICE B – QUADROS DE CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS (MMA, 2012a)

Obs.: os valores entre parênteses indicam as pontuações em cada critério, os quais devem ser somados conforme explicado no item "2.4 - EXPERIÊNCIA E LEGISLAÇÃO BRASILEIRA NA GESTÃO DE RISCOS EM BARRAGENS".

a) Caraterísticas técnicas (CT):

Altura da barragem (a)	Comprimento da barragem (b)	Vazão de projeto (c)
altura ≤ 15 m (0)	comprimento ≤ 50 m (0)	CMP (cheia máxima provável) ou decamilenar (0)
15 m < altura < 30 m (1)	50 m < comprimento < 200 m (1)	Milenar (2)
15 m ≤ altura ≤ 30 m (4)	200 m ≤ comprimento ≤ 600 m (2)	Tempo de retorno (TR) = 500 anos (5)
altura > 60 m (7)	comprimento > 600 m (3)	TR inferior a 500 anos ou desconhecida/estudo não confiável (10)

b) Estado de conservação (EC):

Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (d)	Percolação (e)	Deformações e Recalques (f)	Deterioração dos Taludes/Paramentos (g)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal/barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias. (6)

Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (d)	Percolação (e)	Deformações e Recalques (f)	Deterioração dos Taludes/Paramentos (g)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)

c) Plano de segurança da barragem (PS):

Documentação de Projeto (h)	Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (i)	Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (j)	Plano de Ação Emergencial - PAE (quando exigido pelo órgão fiscalizador) (k)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (l)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Análise de Segurança (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1)	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2)	Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2)	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança (2)

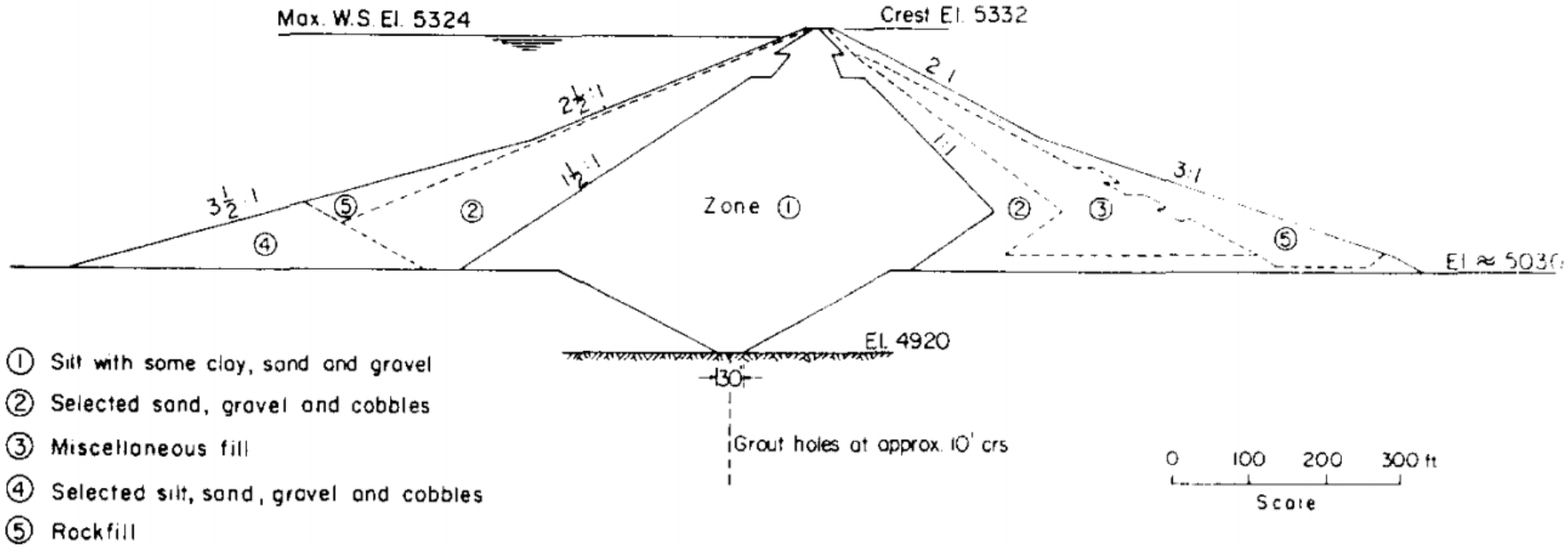
Documentação de Projeto (h)	Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (i)	Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (j)	Plano de Ação Emergencial - PAE (quando exigido pelo órgão fiscalizador) (k)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (l)
Projeto básico (5)	Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3)	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção (4)	PAE em elaboração (4)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento (4)
Projeto conceitual (8)	Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6)	Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8)	Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8)	Emite regularmente apenas relatório de inspeção visual (6)

d) Dano potencial associado (DPA):

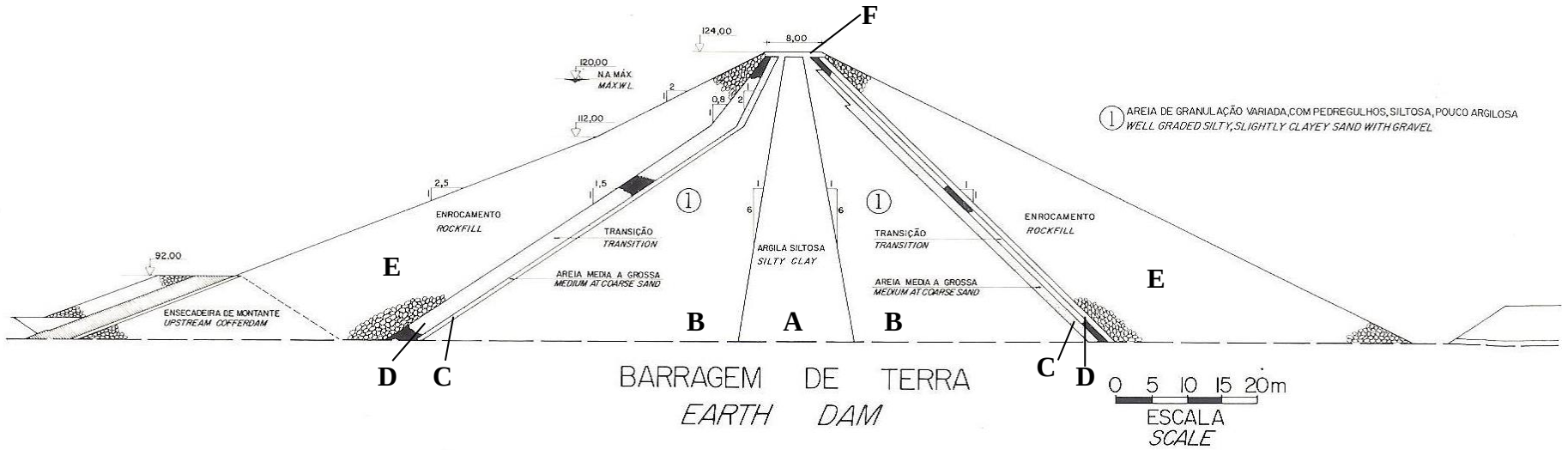
Volume Total do Reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
Muito Pequeno: $V \leq 500$ mil m^3 (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	INSIGNIFICANTE (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (0)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)

Volume Total do Reservatório (a)	**Existência de população a jusante(b)**	**Impacto ambiental (c)**	**Impacto socioeconômico (d)**
Pequeno: 500 mil a 5 milhões m³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	POUCO SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B – Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (2)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
Médio: 5 milhões a 25 milhões m³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6)	MÉDIO (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
Grande: 25 milhões a 50 milhões m³ (4)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	MUITO SIGNIFICATIVO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT) (8)	ALTO (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
Muito Grande: V ≥ 50 milhões m³ (5)	-	MUITO SIGNIFICATIVO AGRAVADO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I – Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT) (10)	-

APÊNDICE C – SEÇÃO TRANSVERSAL DA BARRAGEM DE TETON (SEED E DUNCAN, 1986).

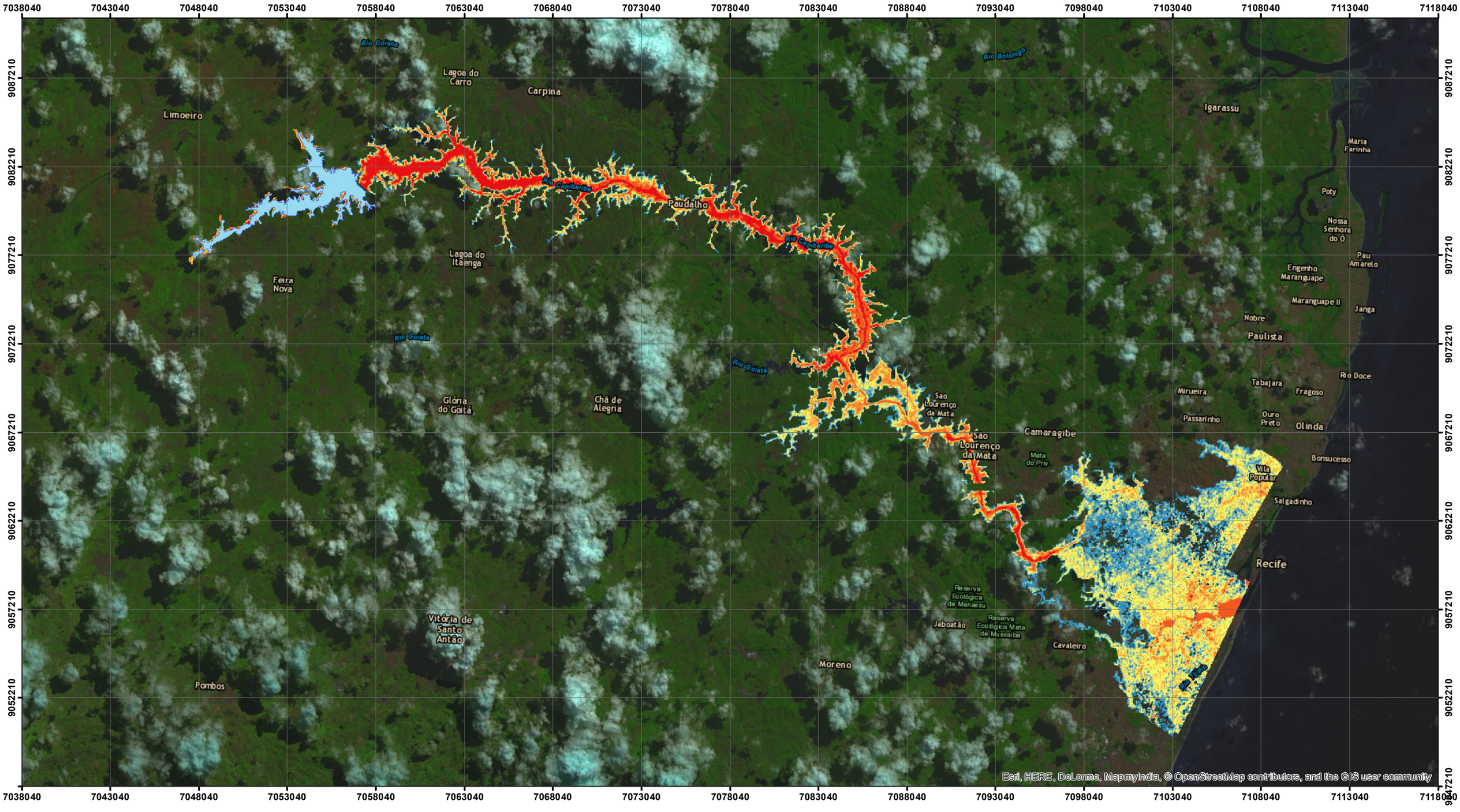


APÊNDICE D – SEÇÃO TRANSVERSAL DA BARRAGEM DE CARPINA (AMARANTE, 1982)



Zona	Nome	Material
A	Núcleo	Argila siltosa
B	Transição 1	Areia (granulação variada)
C	Transição 2	Areia (média a grossa)
D	Transição 3	Areia (grossa)
E	Enrocamento	Enrocamento
F	Coroamento	Concreto

APÊNDICE E – MAPAS DE INUNDAÇÃO



Profundidade (metros)

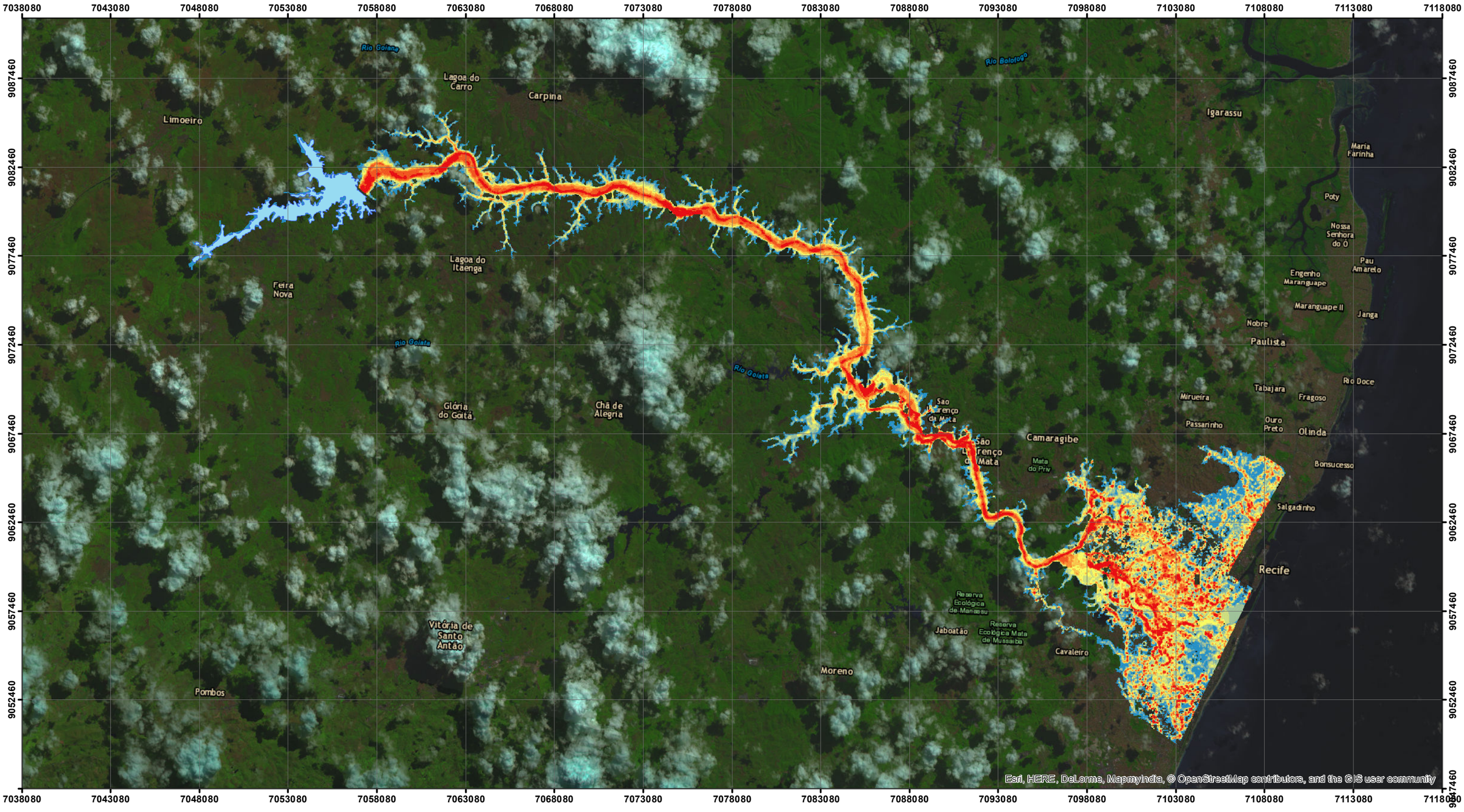
0 - 2	4 - 5	9 - 12	Barragem de Carpina
2 - 3	5 - 7	12 - 16	
3 - 4	7 - 9	>16	

0 2 4 8 12 16
Km

N

Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia
Estudo de Dam Break - Barragem de Carpina - PE

MAPA 1 - Profundidade da Cheia (m)
Datum e Projeção: SIRGAS 2000 Brazil Polyconic
Escala 1:200.000 - Folha A3



Velocidade da onda (m/s)

0 - 0,3	0,8 - 1,2	2,1 - 2,7	Barragem de Carpina		
0,3 - 0,5	1,2 - 1,6	2,7 - 3,6			
0,5 - 0,8	1,6 - 2,1	> 3,6			

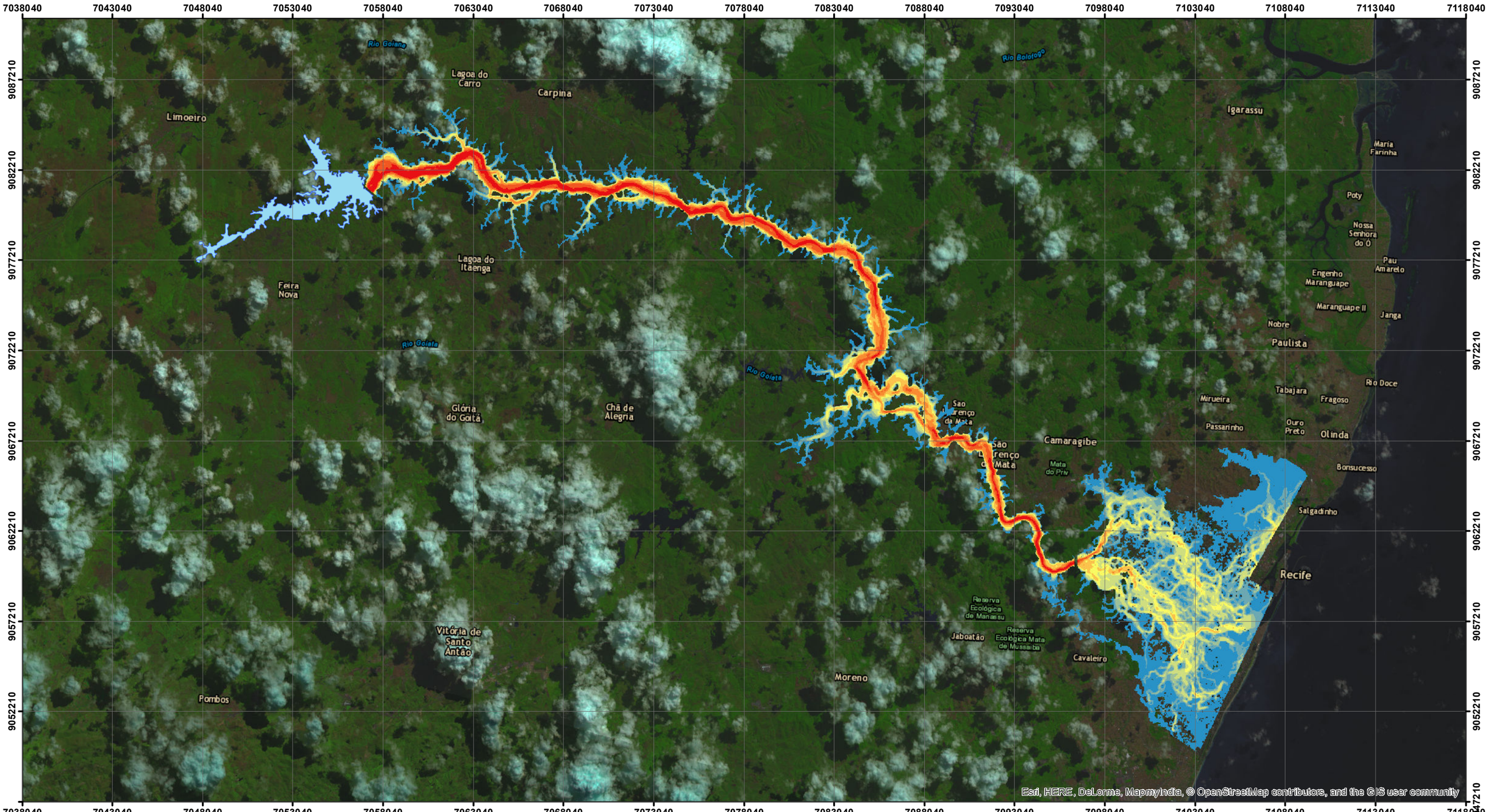
0 2 4 8 12 16

Km

N

Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia
Estudo de Dam Break - Barragem de Carpina - PE

MAPA 2 - Velocidade da Onda de Cheia (m/s)
Datum e Projeção: SIRGAS 2000 Brazil Polyconic
Escala 1:200.000 - Folha A3



Risco hidrodinâmico (m²/s)

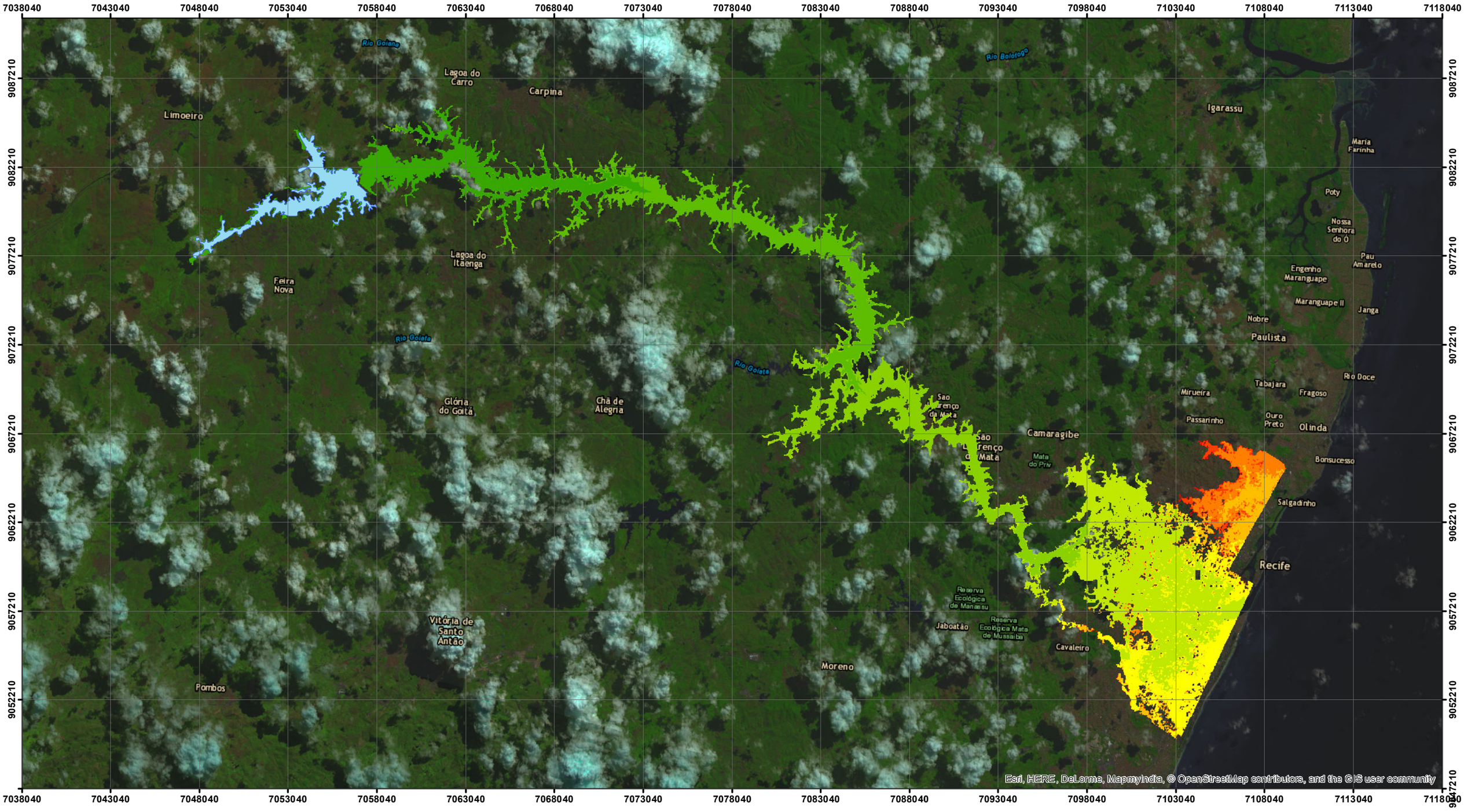
0 - 1	3 - 6	19 - 31	Barragem de Carpina
1 - 2	6 - 10	31 - 49	
2 - 3	10 - 19	> 49	

0 2 4 8 12 16
Km

N

Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia
Estudo de Dam Break - Barragem de Carpina - PE

MAPA 3 - Risco Hidrodinâmico (m²/s)
Datum e Projeção: SIRGAS 2000 Brazil Polyconic
Escala 1:200.000 - Folha A3



Tempo de chegada da onda (h)

0 - 3	9 - 12	18 - 21	Barragem de Carpina		
3 - 6	12 - 15	21 - 24			
6 - 9	15 - 18	> 24			

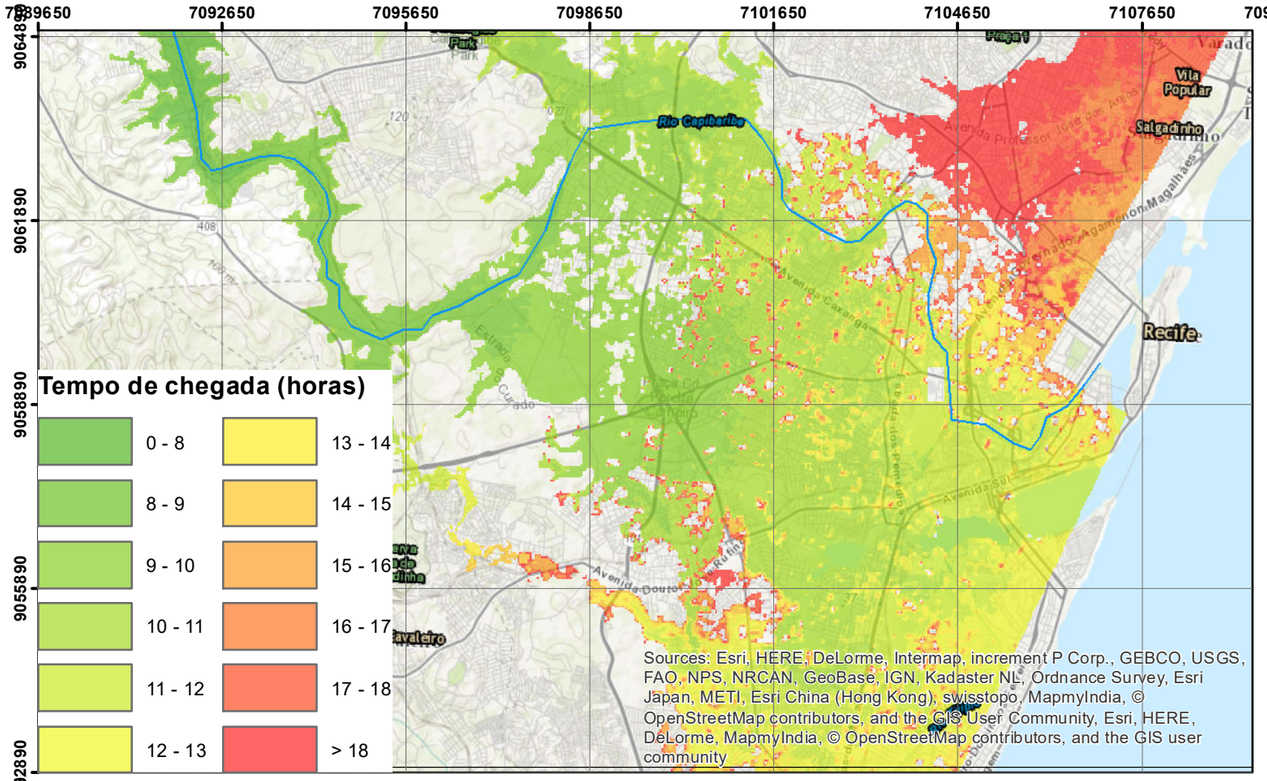
0 2 4 8 12 16

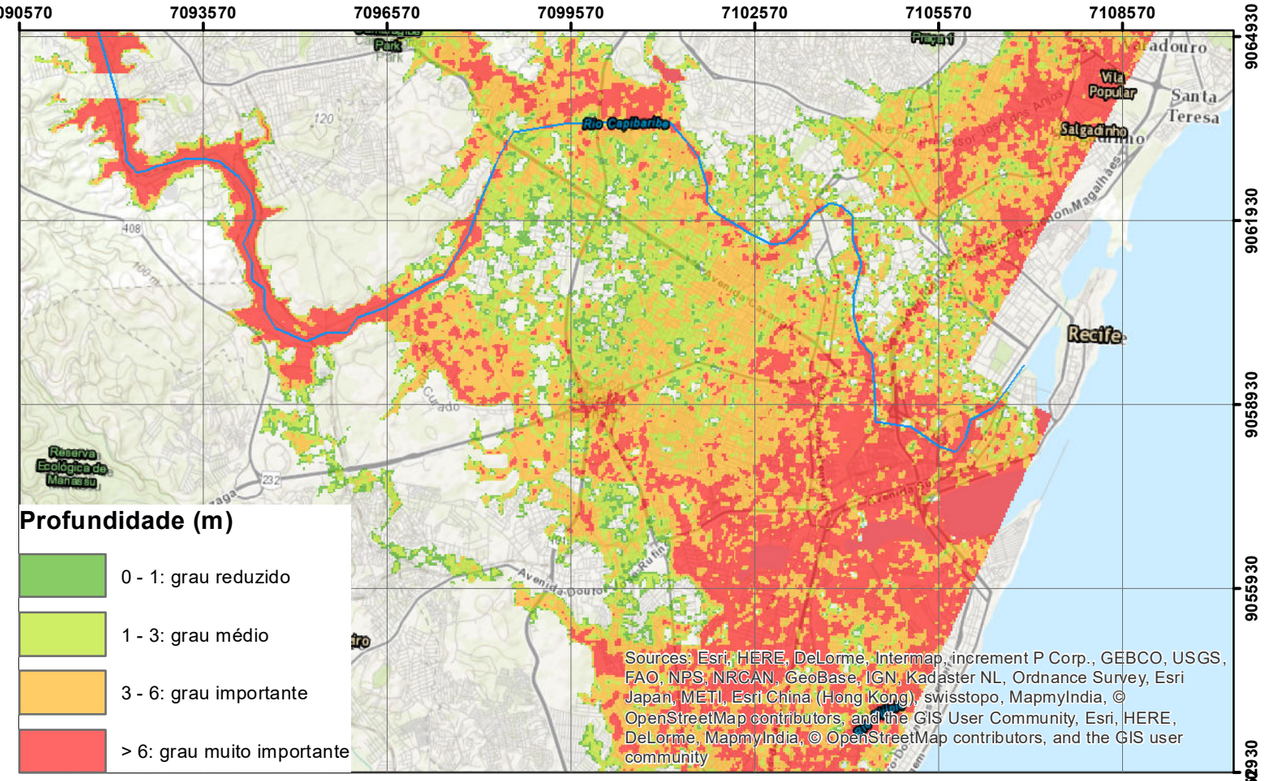
Km

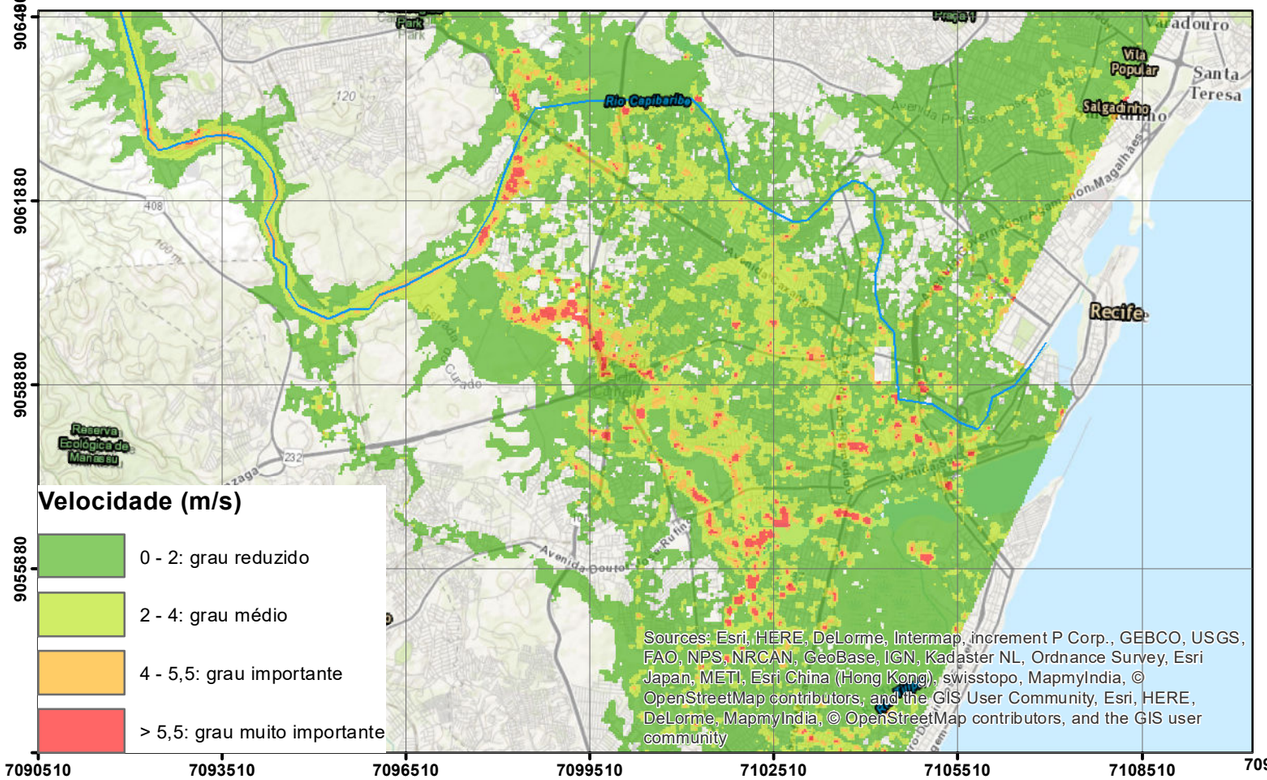
N

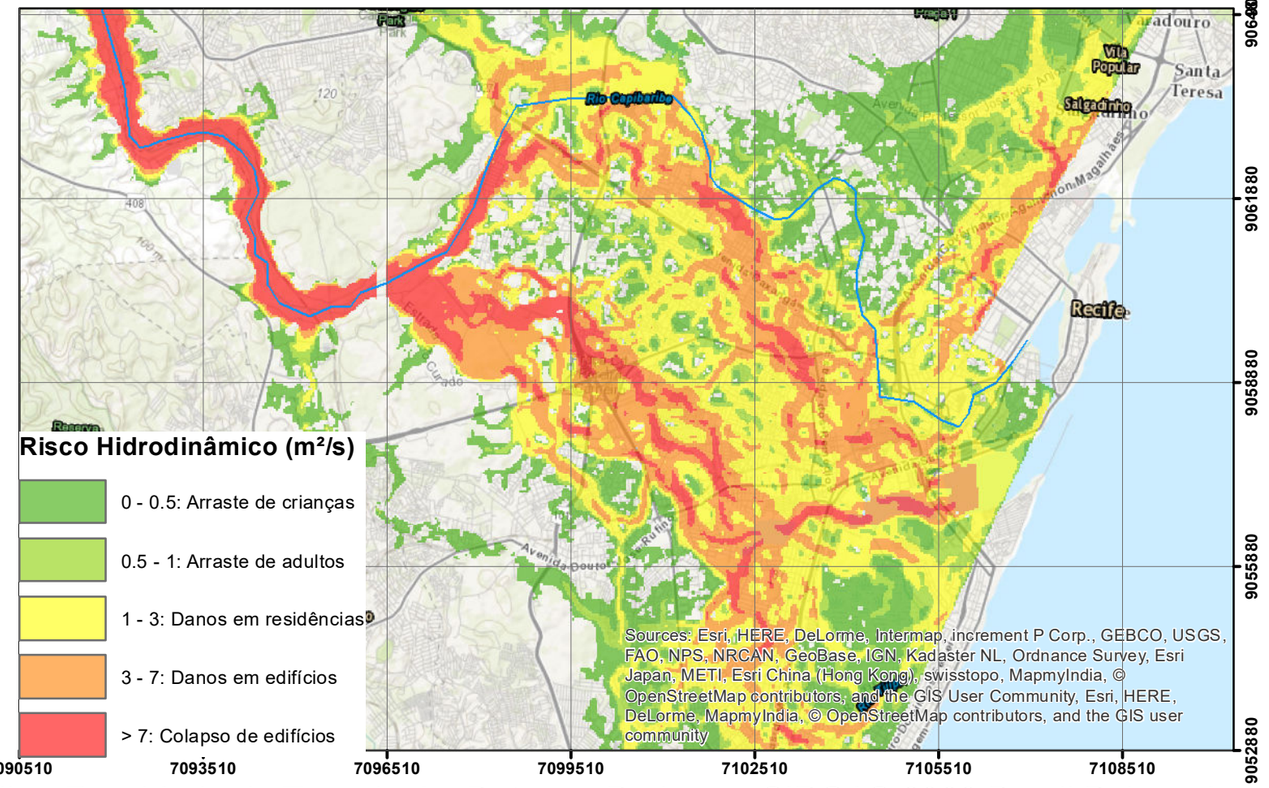
Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia
Estudo de Dam Break - Barragem de Carpina - PE

MAPA 4 - Tempo de Chegada da Onda de Cheia (horas)
Datum e Projeção: SIRGAS 2000 Brazil Polyconic
Escala 1:200.000 - Folha A3







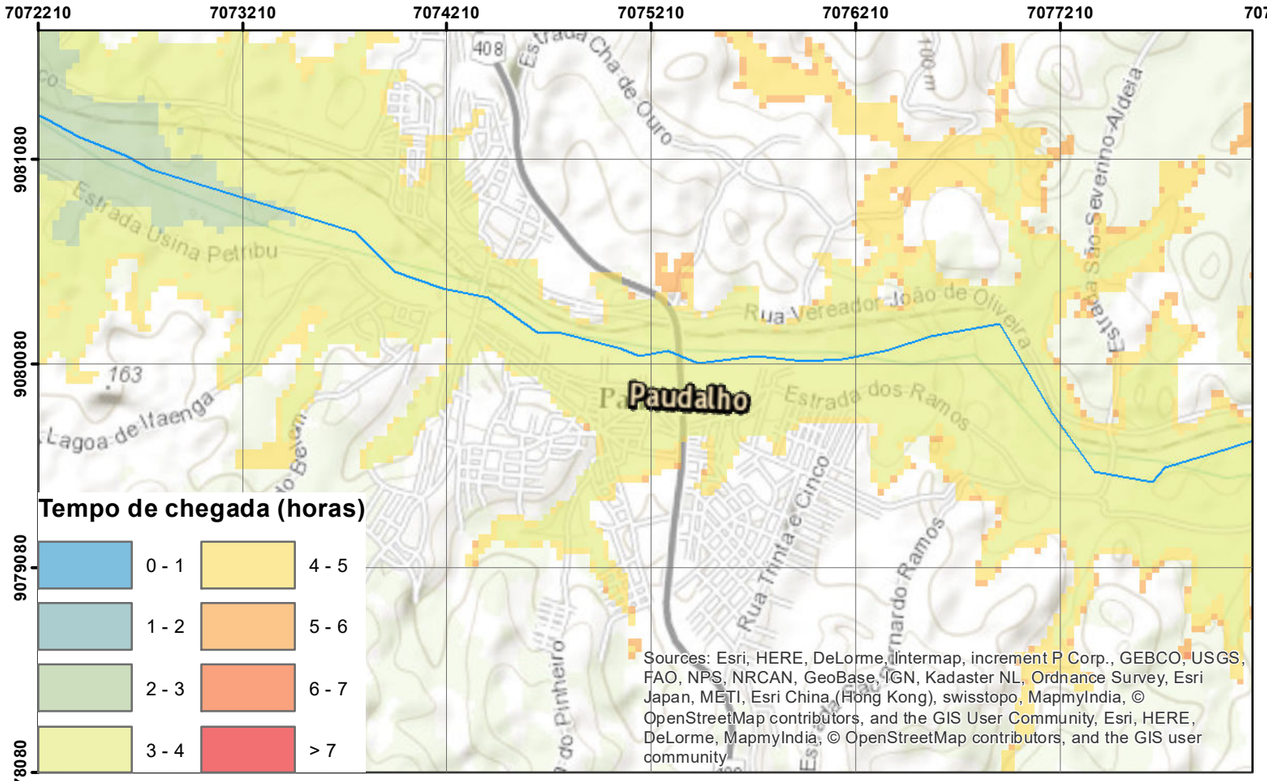


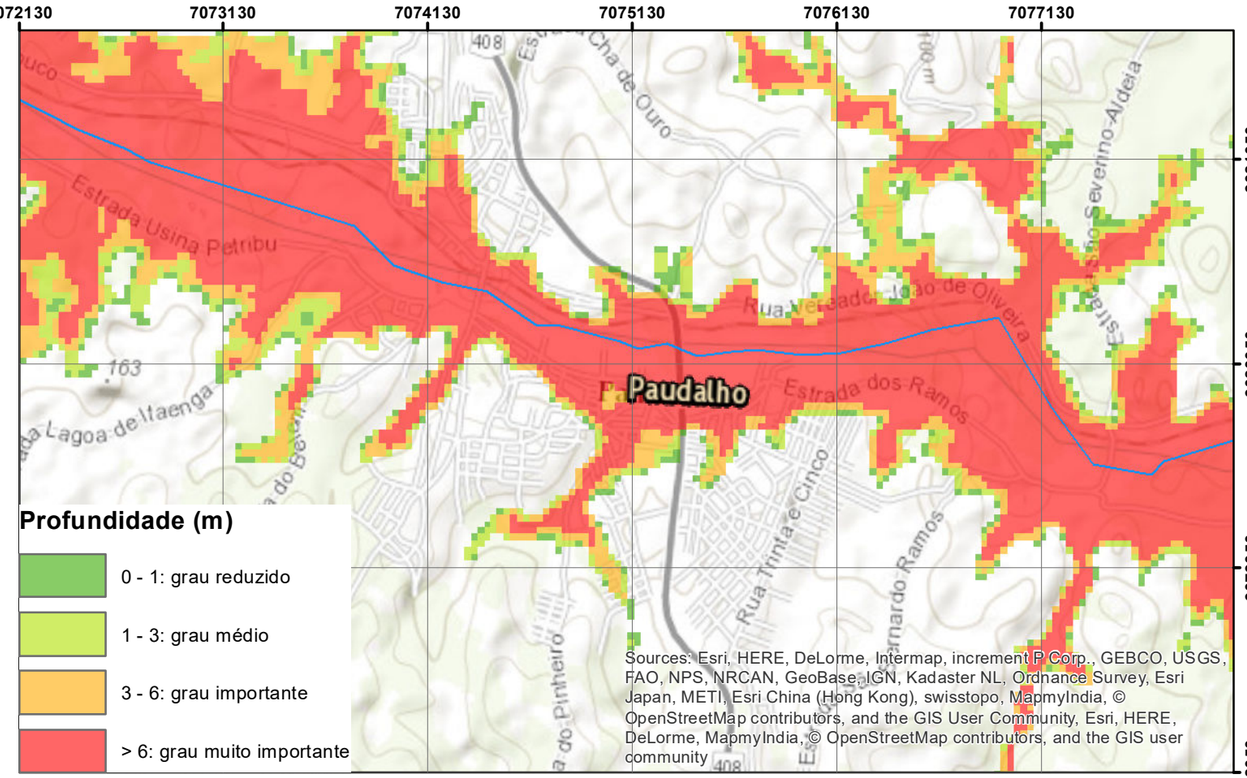
0 1 2 4 6 8
Km

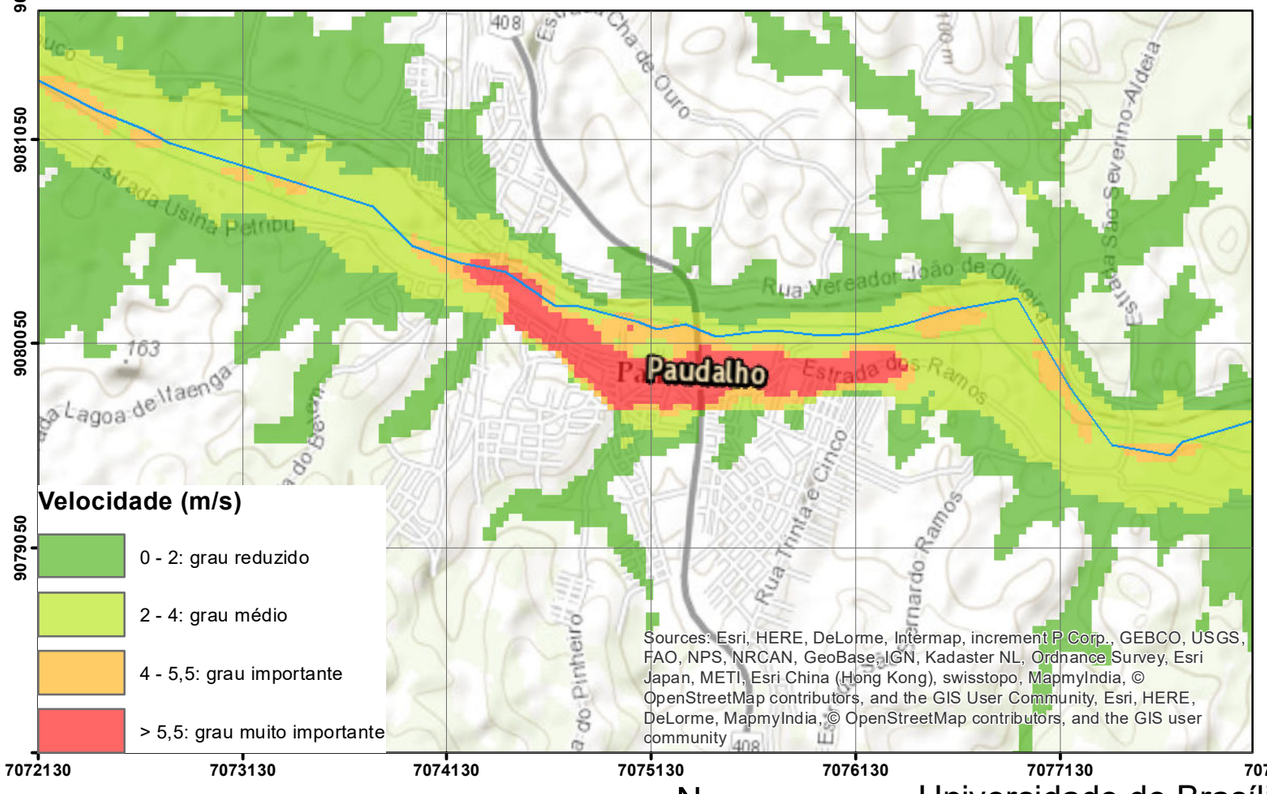
N

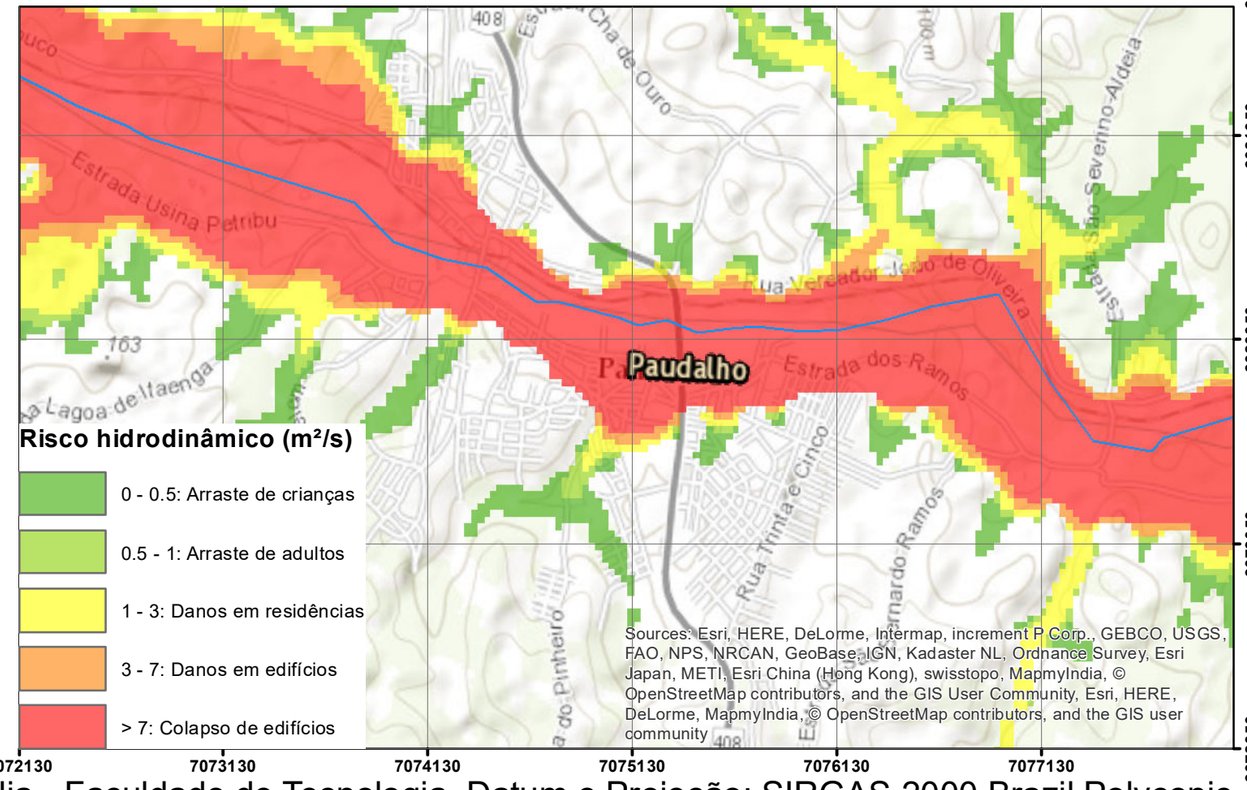
Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia Datum e Projeção: SIRGAS 2000 Brazil Polyconic
Estudo de Dam Break - Barragem de Carpina - PE Escala 1:100.000 - Folha A3

MAPA 5 - Mancha de inundação em Recife - PE Lucas Oliveira Mendes









7072210 7073210 7074210 7075210 7076210 7077210 | 7072130 7073130 7074130 7075130 7076130 7077130

9081080 9080080 9079080 9078080 | 9081050 9080050 9079050 9078050

0 0.3 0.6 1.2 1.8 2.4
Km

N

Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia Datum e Projeção: SIRGAS 2000 Brazil Polyconic
Estudo de Dam Break - Barragem de Carpina - PE Escala 1:30.000 - Folha A3

MAPA 6 - Mancha de inundação em Paudalho - PE Lucas Oliveira Mendes