



Camila Azevedo de Souza

**Uso do geoprocessamento como subsídio
à análise de danos ambientais e urbanos:
geração dos mapas de potencial de impacto
de inundação em caso de rompimento da
UHE Santa Branca**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Luiz Felipe Guanaes Rego

Co – Orientador: Rafael da Silva Nunes

Rio de Janeiro
Maio de 2017



Camila Azevedo de Souza

**Uso do geoprocessamento como subsídio
à análise de danos ambientais e urbanos:
geração dos mapas de potencial de impacto
de inundação em caso de rompimento da
UHE Santa Branca**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da
PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora
abaixo assinada.

Prof. Luiz Felipe Guanaes Rego

Orientador

Departamento de Geografia e Meio Ambiente - PUC-Rio

Prof. Rafael da Silva Nunes

Co-orientador

Departamento de Geografia e Meio Ambiente – PUC-Rio

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Marcelo Motta de Freitas

Departamento de Geografia e Meio Ambiente – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 8 de maio de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Camila Azevedo de Souza

Graduou-se em Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal Fluminense. Atualmente, é engenheira de recursos hídricos na companhia de luz do Rio de Janeiro – Light. Representante da Light Energia no Comitê Guandu, na Câmara Técnica de Estudos Gerais (CTEG) e suplente na Câmara de cobrança dos Recursos Hídricos (CTCOB).

Ficha Catalográfica

Souza, Camila Azevedo de

Uso do geoprocessamento como subsídio à análise de danos ambientais e urbanos: geração dos mapas de potencial de impacto de inundação em caso de rompimento da UHE Santa Branca / Camila Azevedo de Souza ; orientador: Luiz Felipe Guanaes Rego ; co-orientador: Rafael da Silva Nunes. – 2017. 99 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental – Teses. 3. Geoprocessamento. 4. Inundações. 5. Mapa de potencial. 6. Reservatórios. I. Rego, Luiz Felipe Guanaes. II. Nunes, Rafael da Silva. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Agradeço a DEUS, pela saúde e forças para concluir este mestrado.

A minha família, por suportar e entender os momentos de ausência.

Ao meu orientador Luiz Felipe Guanaes e ao meu Co orientador Rafael Nunes, pela oportunidade oferecida, suporte, críticas e sugestões fundamentais para a conclusão do estudo da presente dissertação e aprendizado.

Aos meus amigos por terem paciência comigo durante toda a minha jornada na faculdade.

Aos meus amigos de trabalho alguma forma contribuiu para a conclusão desta pesquisa.

Aos meus colegas da PUC-Rio.

Resumo

Souza, Camila Azevedo de; Rego, Luiz Felipe Guanaes (Orientador). Nunes, Rafael da Silva (Co-Orientador). **Uso do geoprocessamento como subsídio à análise de danos ambientais e urbanos: geração dos mapas de potencial de impacto de inundação em caso de rompimento da UHE Santa Branca** Rio de Janeiro, 2017. 99p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Diante das intervenções humanas relacionadas aos barramentos de rios para inúmeros fins (controle hídrico, produção de energia, entre outras) verifica-se os riscos associados às populações que vivem a jusante destas áreas. O entendimento das possíveis consequências ambientais deste tipo de ocorrência promove a emergência de se avaliar as áreas impactadas, permitindo-se desta maneira a promoção de ações (estruturais ou estruturantes) que visem minimizar o efeito no caso de acidentes. Este estudo visa avaliar e correlacionar os impactos associados às inundações provenientes das rupturas dos barramentos de rios através de um estudo de caso (Reservatório de Santa Branca/SP) a partir de dados obtidos por modelagem hidrológica e de técnicas de geoprocessamento. Como resultado, torna-se possível avaliar não apenas as áreas impactadas pelo rompimento do barramento estudado, mas também avaliar as áreas que apresentariam maiores velocidades (acarretando riscos materiais à população) e também verificar as porções territoriais mais passíveis de sofrerem algum tipo de intervenção pública. As variáveis estudadas, com o intuito de minimizar os impactos, foram: arborização, pavimentação e boca de lobo. Estas, foram comparadas par a par através do método de tomada de decisões AHP, e concluiu-se que a variável que mais ajuda a minimizar o impacto é a arborização. Devido a modelagem hidrológica foi possível encontrar uma vazão de pico de 77.8855,045 m³/s para um tempo de ruptura de 2,5h e verificar que a mancha de inundação abrange as seguintes cidades a jusante da barragem: Santa Branca, Guararema e Jacareí, atingindo o total aproximado de 32.590 habitantes.

Palavras-chave

Geoprocessamento; inundações; mapa de potencial; reservatórios.

Extended Abstract

Souza, Camila Azevedo de; Rego, Luiz Felipe Guanaes. (Advisor), Nunes, Rafael da Silva (Co-advisor). **Use of geoprocessing as a subsidy for analysis of environmental and urban damages: generation of flood impact potential maps in the case of UHE Santa Branca failure.** Rio de Janeiro, 2017. 99p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Floods have always been a major hydrological issue. Its susceptibility is caused by many factors, such as soil sealing, deforestation, disordered densification, climatic variations, among others. Currently Floods have been occurring on a large scale around the world, Brazil included, bringing high social and economic damage to the affected cities.

Even with a low probability of occurring, its devastating effects has ignited the interest of public agencies responsible for security and civil protection to study and plan solutions to mitigate its effects. Knowing how to cope with floods by mitigating their adverse impacts is a measure that should be adopted by civil society and public agencies through interlinked urban and environmental planning.

In 2011, the mountainous region of Rio de Janeiro had one of its biggest climatic catastrophes in Brazil's history. The tragedy was caused by the high rainfall along with the geological conditions of the region, aggravated by its lack of infrastructure and irregular land occupations. According to FABRIANI (1991), the analysis made in relation to disasters that occurred in the mountain region in 1988, it was already possible to guarantee that the existence of urban laws for environmental protection was not sufficient to prevent the city from facing Public services, precariousness in the road system, lack of planning in relation to residential expansion and the increase of sanitary system.

An Emergency Actions Program (EAP), described in detail at Federal Law No. 12,334, of 2010 (BRAZIL, 2010), provides for the evacuation of the riverside population installed downstream and minimization of associated damages in case of dam rupture located upstream ; Shall contain the floodplain map, the execution

of which shall be based on the forecasting and calculation of maximum flooded levels, velocities and discharges resulting from the rupture of a dam in the downstream valley.

The floodplain map is one of the instruments of the Emergency Actions Program (EAP), which streamlines the evacuation procedures to be taken in the event of a flood. The current work has the floodplain potential map as the main goal. In the creation of these maps, it was used mathematical models along with the geotechnologies, allowing to construct a more precise hydrological modeling of the hydrographic basin.

With this floodplain map, the decision-making can be facilitated, minimizing the impacts resulted from a great tragedy, which is in this case, the flood coming from the rupture of a dam as studied.

Advanced hydrological modeling techniques have become feasible, because now the generation and manipulation of data can be efficiently performed through spatial operations in a GIS (Geographic Information System), not only saving time and effort, but also improving Accuracy over traditional methods. (USACE, 2010, p 246)

Aimed at water resources management and dam safety areas, this study aspire to evaluate and correlate the impacts associated with the floods caused by the ruptures of riverbeds, from the adoption of a case study (Santa Branca Reservoir / SP) according to the data obtained by hydrological modeling and the application of geoprocessing techniques.

For the hydrological modeling, the bi-dimensional HEC-RAS program was used, allowing to achieve the flood spot caused by the rupture of the dam and with this, which municipalities will be affected if this event occurs. As to the maps analysis, it was done through the multi-criteria method called AHP, where the variables used were paving, afforestation and manholes. The data used in the maps were downloaded on the IBGE website (2010), these data were used for household accounting, paving, sanitation and afforestation in the region. Firstly, a 3km buffer was made in ArcGis to delimit the area of influence of the flood spot.

As a result, it is possible to evaluate not only the areas impacted by the rupture of the studied dam, but also evaluate the areas that would present higher speeds in the process (causing material risks to the population) and also verifying the most sensitive territorial portions that could suffer some type of public intervention.

The Santa Branca reservoir is part of the complex of hydroelectric power plants belonging to Light Energia S.A. The reservoir located in the headwaters of the basin, being the second plant in the Paraíba do Sul river basin, the dam is located in the municipality of Santa Branca -SP. The plant had its reservoir built in 1959, with the purpose of regularizing the flows of the Paraíba do Sul river for transposition in UHE Santa Cecília.

However, in 1999, it began its hydroelectric development with the implementation of the Santa Branca Hydroelectric Power Plant, which incorporated the 57MW generator plant with installed capacity. The Santa Branca dam currently has a useful volume of 307.30 hm³ in the quota 622.00m and in its maximum maximum quota that is 623.40m has the volume of 469.84 hm³.

This dam together with Funil (RJ), Jaguari (SP) and Paraibuna (SP) supply Rio de Janeiro. Currently, due to the lack of a better organization of water resources management and planning of the city, the municipality of Santa Branca goes through severe problems with flooding occurrences. On the banks of the Paraíba do Sul river there was an irregular growth of houses downstream of the dam causing greater disasters in periods with high rainfall rates.

This work was carried out in order to identify the critical points caused by the flood wave in the municipalities of Guararema, Jacareí and Santa Branca. Based on the results obtained and presented by the hydrological model and the analysis maps in this study, it was possible to carry out an analysis and reach conclusions of possible rupture effects of the dam in the designed molds. The simulation portrayed how the flooding behavior would be downstream if the dam disruption occurred, considering the volume of water released in the case of the reservoir at its maximum level.

Due to hydrological modeling it was possible to find a peak flow of $77.8855.045 \text{ m}^3 / \text{s}$ for a break time of 2.5 h and to verify that a flood spot covers as follows cities downstream of the dam: Santa Branca, Guararema and Jacareí. The flood spot reaches approximately 32,590 inhabitants. The Damage Study of Dams of the National Water Agency (ANA) through the ArcGIS program showed that ANA's hydrological model is consistent with the one found in this work.

The variables used in this work, to try to minimize the impacts caused by the rupture and to reduce its time are: afforestation, paving and manholes. For the analysis were developed five maps using the AHP decision-making method and geoprocessing techniques. The maps are:

- ✓ Map of permanent homes where there is afforestation
- ✓ Map of permanent homes where there is pavement
- ✓ Map of permanent homes where there are manholes
- ✓ Potential Mapping of Trawling
- ✓ Potential Flood Map

According to the results presented by the maps, it was possible to conclude that the afforestation is the variable that will lessen the impact caused by the rupture of the dam, since its infiltration power is high and besides, it helps to hold objects that will be loaded by the inundation. In addition, it is possible to conclude that the total destruction of some areas will be inevitable, due to the speed of the wave and the amount of houses that it reaches. However, such destruction could be prevented by building/improving the structural measures in the region.

In conclusion, it was possible to verify that the AHP method, together with geoprocessing techniques became a very useful tool, facilitating problem structuring, mathematical modeling, and assisting in complex decision processes. Much of the flood-related problems can be worked through the chosen GIS, and through it, process, store and edit a large amount of spatial data, quickly and cost-effectively.

The present study assists in the construction of the Emergency Action Plan (PAE) of a dam. It is possible to adopt mitigating measures and structural measures to avoid further catastrophes in case of dam disruption. In the same way, training for the population regarding the disruption alert is necessary to avoid deaths.

Keywords

Geoprocessing; flood; potential maps; reservoir.

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Objetivo Geral	18
1.2. Estrutura do Trabalho	18
2. Evolução da Legislação de barragens associadas às tecnologias de geoprocessamento	20
2.1. A legislação brasileira de segurança de barragens	22
2.1.1. Lei federal nº 12.334 /2010	23
2.1.2. Fiscalização	25
2.1.3. Plano de Segurança de Barragens (PNSB)	26
2.1.4. Legislação ligada à proteção da população ou à defesa civil	27
3. Histórico de Enchentes no Brasil	31
3.1. Histórico sobre a ruptura de barragens	33
4. Método Proposto	38
4.1. Modelagem Hidrológica	38
4.1.1. Descrição dos parâmetros necessários	39
4.1.2. Estudo de Ruptura de Barragens da ANA	43
4.2. O método AHP	46
4.3. As geotecnologias e suas aplicações	51
4.3.1. O uso de geotecnologias no combate a desastres e como instrumento de suporte ao planejamento urbano e ambiental	52
4.3.2. Análise Matricial	53
4.4. Mapas de Inundações	55
5. Estudo de Caso – Reservatório de Santa Branca	59
5.1. Área de Caracterização	59
5.1.1. Características Geológicas	63
5.1.2. Características Geomorfológicas	64
5.1.3. Características da Barragem	64
5.2. Enchente a Jusante da Barragem de Santa Branca	65
5.3. Operacionalização do Complexo de Lajes	74
6. Discussão e Análise dos Resultados	79
6.1. Mapas de Potencial de Inundações	79
7. Conclusões	94
8. Referências Bibliográficas	96

Lista de figuras

Figura 1-1: Barragem de Santa Branca	17
Figura 2-1: Desastre na Barragem de St. Francis em Los Angeles	21
Figura 2-2: Rompimento da barragem de Teton nos Estados Unidos	21
Figura 2-3: Inundação da Cidade de Rexburg /EUA	22
Figura 3-1: Enchente de Porto Alegre 1941	32
Figura 3-2: Bento Rodrigues após o rompimento da Barragem de Mariana	35
Figura 3-3: Rio Doce depois do Rompimento de Mariana	36
Figura 3-4: Rio Doce atingido por lama de barragem	36
Figura 4-1: Modelo digital do terreno	39
Figura 4-2: Esquema de seção transversal do fluxo	40
Figura 4-3: Mapa de comparação das manchas	45
Figura 4-4: Representação de um modelo vetorial e matricial	54
Figura 5-1: Diagrama Esquemático	60
Figura 5-2: Bacia do Paraíba do Sul	61
Figura 5-3: Reservatório de Santa Branca	62
Figura 5-4: Postos Fluviométricos de Santa Branca	67
Figura 5-5: Hidrograma 1 - 05/01/2010	69
Figura 5-6: Hidrograma 2 - 12/01/2010	69
Figura 5-7: Comparação da cheia na região de Santa Branca – Imóvel Residencial	70
Figura 5-8: Comparação da cheia na região de Santa Branca – Imóvel Industrial	71
Figura 5-9: Comparação da cheia na região de Santa Branca – Imóvel Residencial	71
Figura 5-10: Comparação da cheia na região de Santa Branca – Imóvel Comercial	72
Figura 5-11: Comparação da cheia na região de Santa Branca – Favela	72
Figura 5-12: Inundação do coreto e da área verde dessa residência – Inundação grau 1	73
Figura 5-13: Inundação do 1º pavimento e da área verde dessa residência- Inundação grau 2	74
Figura 5-14: Inundação de barraco de pescador construído numa ilha - Inundação grau 3	74
Figura 5-15: Esquema Geral do Aproveitamento Hidrelétrico do Paraíba do Sul	76

Figura 5-16: Perfil Esquemático Desvio Paraíba-Piraí	78
Figura 6-1: Mapa de domicílios permanentes onde existe arborização	81
Figura 6-2: Mapa de domicílios permanentes onde existe pavimentação	83
Figura 6-3: Mapa de domicílios permanentes onde existe bueiro	85
Figura 6-4: Risco Hidrodinâmico - método Froelich	86
Figura 6-5: Mapa de Potencial de Arrastamento	88
Figura 6-6: Aglomerados de domicílios no município de Jacareí	92
Figura 6-7: Mapa de Potencial de Inundação	93

Lista de tabelas

Tabela 2-1: Classificação da consequência de ruptura de barragens	24
Tabela 3-1: Rompimento de Barragens em Minas Gerais	34
Tabela 3-2: Rompimento de Barragens no Brasil	37
Tabela 4-1: Parâmetros para calculo da formação da brecha	42
Tabela 4-2: Escala Fundamental	47
Tabela 4-3: Comparação de Critérios	47
Tabela 4-4: Matriz de comparação	48
Tabela 4-5: Autovetor normalizado	48
Tabela 4-6: Matriz de comparação dos fatores	50
Tabela 6-1: Definição das consequências do risco hidrodinâmico	87
Tabela 6-2: Tabela reclassificação	89
Tabela 6-3: Quantidade de Domicílios Permanentes	90
Tabela 6-4: Quantitativo aproximado de habitação e de habitantes dentro da mancha	90

1.

Introdução

As inundações sempre foram um grande problema hidrológico. Fatores como, a impermeabilização do solo, desmatamento, adensamento populacional desordenado, variações climáticas, entre outras, passaram a ser determinantes para definir a suscetibilidade de enchente. Atualmente, as cheias estão ocorrendo em grande escala no Brasil e no mundo, trazendo elevados prejuízos sociais e econômicos para as cidades.

As cheias naturais ocorrem independentemente da intervenção humana. Quando os efeitos das cheias naturais são atenuados ou ampliados em consequência da atuação antrópica as enchentes são denominadas naturais modificadas. E as cheias causadas por rupturas de estruturas de contenção, tais como: barragens e diques são chamadas cheias causadas por intervenção humana (CPRM, 2004).

Segundo Almeida (2001), as cheias intensas, súbitas ou inesperadas, permanecem como sendo os eventos mais temidos, perigosos e catastróficos para os habitantes dos vales¹. Franca (2004), diz que a presença de uma barragem em um vale induz um fator de risco devido ao extraordinário potencial destrutivo que constitui o volume de água armazenado.

Ward (1978) descreve as inundações como sendo uma das mais dramáticas interações entre homem e o seu ambiente, enfatizando tanto a força dos eventos naturais, como os esforços insuficientes para controlá-lo. E destaca que os próprios homens se expõem ao risco ao se instalar nas planícies de inundação ou locais suscetíveis a inundações. Mesmo tendo uma baixa probabilidade de eventos, porém, com efeitos devastadores, acendeu o interesse dos organismos responsáveis pela segurança e proteção civil a estudar e planejar soluções de mitigação dos seus efeitos. Saber conviver com as inundações através da mitigação dos seus impactos adversos é uma medida que deveria ser adotada pela sociedade civil e órgãos públicos, através de um planejamento urbano e ambiental interligados.

¹ Vale é uma depressão alongada que geralmente é em forma de U ou V e com o passar do tempo sofre transformações pela ação das águas dos rios. Devido à falta de um planejamento adequado de crescimento das cidades, a população acaba construindo suas casas em torno dos rios, estando mais propícias a serem prejudicadas com as cheias.

Em 2011, a região serrana do Rio de Janeiro teve uma das suas maiores catástrofes climáticas do país. A tragédia foi causada devido ao alto índice pluviométrico junto com as condições geológicas da região, sendo agravada por sua falta de infraestrutura e ocupações irregulares do solo. Segundo FABRIANI (1991), de acordo com a análise feita em relação a desastres que aconteceram na região serrana em 1988, já foi possível garantir que a existência de leis urbanas para proteção ambiental não foi suficiente para impedir que as cidades da região serrana do Rio de Janeiro enfrentassem problemas quanto aos serviços públicos, precariedade no sistema viário, falta de planejamento em relação a expansão residencial e o aumento de sistema sanitário.

O maior problema foi a falta de assimilação de poderes públicos estadual e municipal no sentido de promover os investimentos necessários para se ajustar ao crescimento populacional enfrentado pela cidade, mormente a partir da década de 1950 e não apenas a deficiência da legislação. O fato é que mesmo havendo legislação municipal tratando do tema, muitas vezes o legislador não enfrenta a questão de forma adequada, ignorando a realidade vivida por grande parte da população local. Tal situação reflete, portanto, a baixa representatividade das lideranças comunitárias no processo de produção legislativa (FABRIANI, 1991).

Maidment (2002) acredita que um gerenciamento de recursos hídricos adequado, aliado a uma política pública de uso e ocupação do solo são fundamentais para evitar as grandes catástrofes oriundas da ocupação desordenada das margens dos rios.

O Ministério da Integração Nacional, no Brasil, publicou um Manual de Segurança e Inspeção de Barragens contendo normas de construção, operação e manutenção das barragens, além de indicar os procedimentos necessários para casos de emergência (Ministério da Integração Nacional, 2002).

Um Programa de Ações Emergenciais (PAE), descrito detalhadamente na Lei Federal nº 12.334, de 2010 (BRASIL, 2010), prevê a evacuação da população ribeirinha instalada a jusante e minimização dos prejuízos associados no caso de ocorrência de ruptura de barragem localizada a montante; deve conter o mapa da planície de inundação, cuja execução baseia-se na previsão e cálculo de cotas máximas inundadas, velocidades e descargas resultantes da ruptura de uma barragem no vale a jusante.

O mapa de inundação é um dos instrumentos do Programa de Ações Emergenciais (PAE), que agiliza os procedimentos de evacuação a serem tomados caso ocorra uma inundação. Para a criação destes mapas, este trabalho utilizou de modelos matemáticos juntamente com as geotecnologias construindo uma modelagem hidrológica mais precisa da bacia hidrográfica.

Com isso, a tomada de decisões pode ser facilitada, minimizando os impactos decorrentes de uma grande tragédia, que seria, no caso estudado, a inundação oriunda do rompimento de uma barragem.

As técnicas avançadas de modelagem hidrológica tornaram-se viáveis, porque agora a geração e manipulação de dados podem ser feitas com eficiência por meio de operações espaciais em um SIG (Sistema de Informação Geográfica), não só economizando tempo e esforço, como também, melhorando a precisão em relação aos métodos tradicionais. (USACE ,2010, p. 246)

Voltado para área de gestão de recursos hídricos e segurança de barragens, esta dissertação visa demonstrar os efeitos de rompimento da barragem de Santa Branca, localizada no estado de São Paulo, que é uma das barragens da Light Energia S.A. (Figura 1-1). Esta análise se apoiará na confecção de mapas de inundações visando mitigar e auxiliar na segurança da população instalada na área de influência da mesma. A barragem de Santa Branca está localizada no rio Paraíba do Sul – Santa Branca - SP. Esta represa junto com a de Funil (RJ), Jaguari (SP) e de Paraibuna (SP) abastecem o Rio de Janeiro.



Figura 1-1: Barragem de Santa Branca
Fonte: Light

Atualmente, devido à falta de uma melhor organização de gestão de recursos hídricos e planejamento da cidade, o município de Santa Branca passa por severos problemas quando ocorre uma cheia. Nas margens do rio Paraíba do Sul ocorreu um crescimento irregular de casas a jusante da barragem causando maiores desastres em períodos com altos índices pluviométricos.

Devido à seca que ocorreu nos últimos tempos o reservatório de Santa Branca se encontra em um volume muito baixo, operando com apenas com uma vazão de 30m³/s.

1.1. Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo principal espacializar e analisar as inundações causadas pelo possível rompimento da barragem de Santa Branca que está localizada na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. O projeto envolve uma conexão entre a modelagem hidráulica e o Geoprocessamento. Desta maneira, tem-se como objetivos específicos:

- 1- Realizar e apresentar a modelagem hidráulica da barragem de Santa Branca/SP em caso de rompimento, para gerar a mancha de inundação;
- 2- Sintetizar um modelo com o produto criado pelo HEC-RAS;
- 3- Desenvolver um mapeamento de potencialidade de inundações na área à jusante da barragem de Santa Branca/SP;
- 4- Avaliar os resultados do cruzamento das informações obtidas a partir da sobreposição das resultantes da modelagem hidráulica e do mapa de potencialidade de inundações desenvolvido para a área de interesse.

1.2. Estrutura do Trabalho

A seguir, apresenta-se a estruturação do trabalho. O Capítulo I contém a introdução onde se trata da problemática e da apresentação inicial das principais motivações para o desenvolvimento da pesquisa, assim como os objetivos principais a serem atingidos e a organização do trabalho.

O Capítulo II demonstra, antes de tudo, a importância da legislação em relação a evolução da segurança de barragens e explicará como o uso de geotecnologias é utilizado no combate e suporte para o planejamento urbano e ambiental, caso ocorra o rompimento de uma barragem. Também neste capítulo buscar-se-á discutir minimamente sobre o histórico de enchente no Brasil.

O Capítulo III fala sobre o histórico de enchentes no Brasil, causado por rompimento de barragem, caracterizando os piores desastres que já ocorreram.

O Capítulo IV define a metodologia escolhida para a construção dos mapas de potencial de inundação. Nesta seção, são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do mesmo.

O Capítulo V apresenta toda a área do estudo de caso do reservatório de Santa Branca, que está localizado no município de Santa Branca em São Paulo, caracterizando as suas condições geológicas e geomorfológicas e a estrutura da represa. Além do mais, explica como funciona todo o complexo que liga a usina de Santa Branca na parte de abastecimento de água do Rio de Janeiro e como se faz o controle de cheias.

A partir do Capítulo anterior, o Capítulo VI discute qualitativamente e quantitativamente todos os resultados gerados. Sendo apontados os aspectos positivos e negativos obtidos com a utilização das geotecnologias em ajuda a gestão de recursos hídricos.

Nos últimos capítulos (Capítulo VII e VIII) são apresentadas, respectivamente, as considerações finais do trabalho e as referências bibliográficas.

2. Evolução da Legislação de barragens associadas às tecnologias de geoprocessamento

Desastres ocorrem com uma certa frequência em todo o planeta, sendo eles causados de forma natural ou não. Cada sociedade aprendeu a lidar com o desastre de sua forma, aumentando seu conhecimento e suas tecnologias ao longo do tempo, podendo criar ações preventivas e mitigatórias para cada situação.

Alguns destes lugares apresentam características (físicas principalmente – geológicas, pedológicas, morfológicas, etc.) instáveis, sendo altamente vulnerável na ocorrência de algum fenômeno, podendo este ser climático, sísmico, etc. Isso contribuiu para investimentos em desenvolvimento de tecnologias para controlar os efeitos de uma catástrofe. Através de estudos específicos, foi possível construir planos de ações emergenciais para combater as consequências de um desastre ou até mesmo evitar o acontecimento de um.

A ruptura de uma barragem pode causar severos riscos para uma cidade, podendo até destruí-la. Devido a isso, o apoio a implementação e atualização de leis de segurança de barragens vem crescendo em todo o mundo. Abaixo estão relatados alguns eventos de rompimento de barragem e quais atitudes foram tomadas em relação as leis:

As rupturas das barragens de Bilberry, em 1852 e a de Dale Dyke em 1864, ambas no Reino Unido, causaram, respectivamente, 81 e 245 mortes (HUGHES e KITE, 1998). Isto resultou na publicação de um Ato Parlamentar que informava que todas as barragens deveriam ser inspecionadas regularmente.

Posteriormente, ocorreu o desastre de St. Francis nos Estados Unidos, figura 2-1, em 1930. Esta barragem se rompeu apenas 2 anos depois de ser inaugurada devido a falha humana, isto aconteceu devido a uma má projeção e fiscalização. De acordo com relatos associados ao caso específico, não se teve um melhor estudo do terreno onde a barragem foi construída. O projetista retornou ao lugar diversas vezes após o aparecimento de rachaduras e disse que era apenas um problema corriqueiro. Como consequência, aproximadamente 450 pessoas morreram algumas horas após a uma última inspeção. (Fuhrmann, 2015). Após

este ocorrido, foi culminado o “Reservoirs Act”², de 1930, que atribuía responsabilidades aos proprietários de barragens e regras para a sua construção e operação.

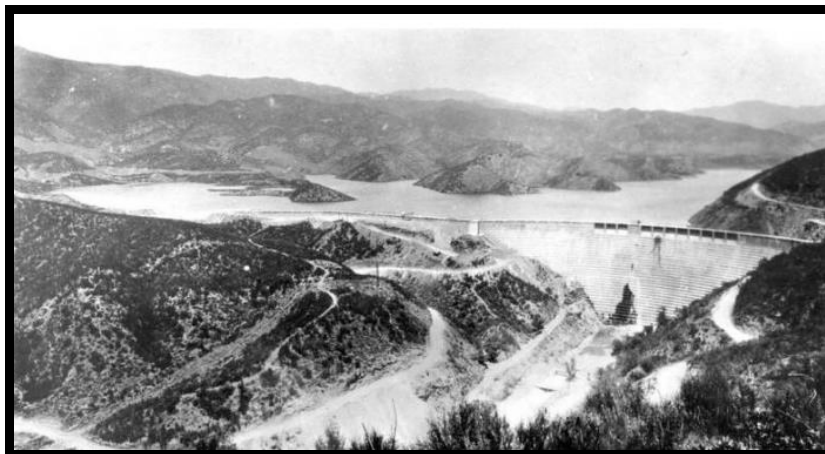


Figura 2-1: Desastre na Barragem de St. Francis em Los Angeles

Fonte: <http://engenhariae.com.br/>

Em 1976, ocorreu o rompimento da barragem Teton nos Estados Unidos, figura 2-2, está barragem foi construída em 1975 e sua ruptura se deu por um Piping (Erosão Regressiva Tubular) na barragem provocando uma enorme onda a jusante.



Figura 2-2: Rompimento da barragem de Teton nos Estados Unidos

Fonte: 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados – nov. 2008

² “Reservoirs Act” foi criado para promover a segurança de reservatórios com mais de 25000 m³. Esta legislação diz que mais de 1 engenheiro de projeto precisa fiscalizar a obra, responsabilizando os proprietários a manterem a fiscalização e manutenção das barragens em dia.

A barragem de Teton, demonstrou que tinha um plano de emergência eficaz, pois as 25 mil pessoas que moravam a jusante da barragem conseguiram evacuar o local e ocorrendo “apenas” 11 óbitos.



Figura 2-3: Inundação da Cidade de Rexburg /EUA
Fonte: Fonte: Arthur Gibbs Sylvester, 1976.

O tufão Nina gerou uma tempestade de período de retorno de 2 mil anos e foi responsável pelo colapso da barragem de Banqiao, Shimantan e um complexo de 62 barragens menores, no ano de 1975 na Província de Henan, matando 25 mil pessoas pela enchente (BROWN, David, 2012).

2.1.

A legislação brasileira de segurança de barragens

O Brasil, inicialmente, não possuía nenhuma lei federal de segurança de barragens. A regulamentação de leis para esta área iniciou a aproximadamente 40 anos atrás com os seguintes documentos: Diretrizes para a Inspeção e Avaliação de Segurança de Barragens em Operação (1983), Segurança de barragens: Recomendações para a Formulação e Verificação de Critérios e Procedimentos (1986) e Guia Básico de Segurança de Barragens (2001).

Em 2010, através da lei federal nº 12.334/ 2010, foi promulgada a Política Nacional de Segurança de Barragens que tem por finalidade estabelecer diretrizes necessárias para segurança e estrutura hidráulica das barragens. Comparando com

outros países é possível verificar que o Brasil teve um grande atraso para se regulamentar.

Os Estados Unidos promulgou o “The Dam Inspection Act” em 1972, autorizando um programa nacional de inspeção de barragens. O Bureau of Reclamation (BUREC), em Denver, Colorado desenvolveu os programas Safety Evaluation on Existing Dams (SEED) e Safety of Dams (SOD), ambos implementados em 1978 e reforçados através do Reclamation Safety of Dams Act of 1978. Em 1988, BUREC publicou um trabalho intitulado: Downstream Hazard Classification Guidelines, onde classifica o risco a jusante em caso de ruptura em termos de número de vidas ameaçadas e perdas econômicas. Em 1989 o BUREC, publicou o documento intitulado “Policy and Procedures for Dam Safety Modification Decision-Making”. (Medeiros, 2003, p.17)

Portugal teve o seu primeiro regulamento de construção de barragens de terra oficializado através do decreto lei nº 48.373/68. Posteriormente, em 1990, foi feito um novo regulamento para segurança de barragens, decreto lei nº 11/90 e em 1993, foi publicado um regulamento para pequenas barragens anexado no decreto nº 409/93.

Em 1992, na Espanha, foi publicada a “Legislacion Espanola Sobre Seguridad de Presas”, produzida pela Comision de Normas de Grandes Presas e para a classificação das barragens em relação ao risco potencial, foi aprovado em 1996 “El Reglamento Técnico sobre Seguridad y Emblases”.

2.1.1.

Lei federal nº 12.334 /2010

A lei federal nº 12.334 foi anunciada no dia 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010), esta lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Sendo está aplicada em quaisquer barragens destinada a acumulação de água para qualquer uso que possuam as seguintes características:

- I. Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
- II. Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);
- III. Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

IV. Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º. (BRASIL, 2010)

O Manual de Segurança e Inspeção de Barragens recomenda a seguinte, tabela 2-1, classificação em função da consequência de ruptura da barragem.

Tabela 2-1: Classificação da consequência de ruptura de barragens

Consequência de ruptura	Perdas de vidas	Danos econômicos, social e ambiental
Muito Alta	Significativa	Dano Excessivo
Alta	Alguma	Dano substancial
Baixa	Nenhuma	Dano moderado
Muito Baixa	Nenhuma	Dano mínimo

Além disso, são objetivos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB):

- I. Garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências;
- II. Regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional;
- III. Promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;
- IV. Criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;
- V. Coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos;
- VI. Estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público;

VII. Fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos. (BRASIL, 2010).

2.1.2. Fiscalização

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada pela Lei N° 9.427 de 26 de dezembro de 1996 (BRASIL,1996). Ela é a autoridade reguladora do setor elétrico brasileiro e é responsável pela fiscalização, acompanhamento e supervisão das usinas de geração do país.

O processo de autorização/concessão para a construção de uma usina e de barragens é dado pela ANEEL. Além disso, é função da agência reguladora fiscalizar e verificar irregularidade nas condições de operação, legalidade, existência de obras irregulares e usinas que operam sem autorização. Se algum problema for detectado com essas inspeções, dependendo da gravidade, pode ir de apenas uma advertência até embargo da obra.

Segundo a lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010), a fiscalização de segurança de barragens caberá sem prejuízo das ações fiscalizatórias dos órgãos ambientais integrantes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama):

- I. À entidade que outorgou o direito de uso dos recursos hídricos, observado o domínio do corpo hídrico, quando o objeto for de acumulação de água, exceto para fins de aproveitamento hidrelétrico;
- II. À entidade que concedeu ou autorizou o uso do potencial hidráulico, quando se tratar de uso preponderante para fins de geração hidrelétrica;
- III. À entidade outorgante de direitos minerários para fins de disposição final ou temporária de rejeitos;
- IV. À entidade que forneceu a licença ambiental de instalação e operação para fins de disposição de resíduos industriais. (BRASIL, 2010)

2.1.3. Plano de Segurança de Barragens (PNSB)

O planejamento de emergência de uma barragem tem por objetivo a proteção da população, bens e ambiente, bem como a mitigação de consequências de um acidente em situações de emergência associadas a ondas de inundação.

O PNSB, como a legislação mundial, informa que o proprietário da barragem é o responsável pela sua segurança, devendo desenvolver ações para garantir isso. De acordo o Plano Nacional de Segurança de Barragens, o Plano de Segurança da Barragem deve compreender, no mínimo, as seguintes informações:

- I. Identificação do empreendedor;
- II. Dados técnicos referentes à implantação do empreendimento, inclusive, no caso de empreendimentos construídos após a promulgação desta Lei, do projeto como construído, bem como aqueles necessários para a operação e manutenção da barragem;
- III. Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem;
- IV. Manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem;
- V. Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;
- VI. Indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e à operação da barragem;
- VII. Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido;
- VIII. Relatórios das inspeções de segurança;
- IX. Revisões periódicas de segurança. (BRASIL, 2010).

O plano de segurança de barragens é um dos instrumentos do PNSB, uma das informações que deve conter neste plano é o Plano de Ações Emergenciais (PAE). Ele é necessário quando a barragem é caracterizada como de dano potencial associado alto.

O PAE deverá estabelecer as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificar os agentes a serem notificados dessa ocorrência, devendo contemplar, pelo menos:

- I. Identificação e análise das possíveis situações de emergência;
- II. Procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem;
- III. Procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação;
- IV. Estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência. (BRASIL, 2010)

Além disso, o PAE deverá estar disponível no empreendimento e nas prefeituras envolvidas, bem como ser encaminhado às autoridades competentes e aos organismos de defesa civil.

2.1.4.

Legislação ligada à proteção da população ou à defesa civil

Não existe uma lei específica para a proteção da população em caso de desastres produzidos por barragens, porém algumas atribuições foram dadas aos proprietários/concessionários.

É de atribuição do Plano Nacional de Segurança de Barragens estabelecer programa de educação e de comunicação sobre segurança de barragem, com o objetivo de conscientizar a sociedade da importância da segurança de barragens, o qual contemplará as seguintes medidas:

- I. Apoio e promoção de ações descentralizadas para conscientização e desenvolvimento de conhecimento sobre segurança de barragens;
- II. Elaboração de material didático;
- III. Manutenção de sistema de divulgação sobre a segurança das barragens sob sua jurisdição;

- IV. Promoção de parcerias com instituições de ensino, pesquisa e associações técnicas relacionadas à engenharia de barragens e áreas afins;
- V. Disponibilização anual do Relatório de Segurança de Barragens.

(BRASIL, 2010)

O objetivo da Defesa Civil é a redução de desastres e isso ocorre através da diminuição de ocorrência e da intensidade dos mesmos. O Sistema Nacional de Defesa Civil (SINDEC) teve sua estrutura implantada através do decreto ° 5376, de 17 de fevereiro de 2005 e seu órgão superior é o Conselho Nacional de Defesa Civil (CONDEC), central (SNDP), regionais (CORDEC ou correspondentes), estaduais (CEDEC ou correspondentes), municipais (COMDEC, NUDEC ou correspondentes), setoriais (órgãos da administração pública) e órgãos de apoio (públicos ou privados, voluntários, ONGs, associações).

Cada um desses órgãos é responsável pela articulação, coordenação e supervisão técnica do sistema no seu nível de atuação. As bases de planejamento da Defesa Civil são os Planos Diretores de Defesa Civil, em nível municipal, estadual, regional e federal, os quais devem ser permanentemente atualizados. Segundo o Plano Nacional de Defesa Civil, as ações de redução de desastres abrangem os seguintes aspectos globais:

- I. Prevenção de Desastres;
- II. Preparação para Emergências e Desastres;
- III. Resposta aos Desastres; e,
- IV. Reconstrução. (BRASIL, 2010)

Os municípios dentro da sua jurisdição podem exercer o controle a fiscalização das atividades capazes de provocar um desastre. Ao mesmo tempo, em situação de desastre as ações de resposta e de reconstrução e recuperação serão de responsabilidade do Prefeito Municipal ou do Distrito Federal.

O Política Nacional de Defesa Civil estabelece as atribuições cometidas ao COMDEC, são estas:

- I. Coordenar e executar as ações de defesa civil;
- II. Priorizar o apoio às ações preventivas e às relacionadas com a minimização de desastres;
- III. Elaborar e implementar Planos Diretores de Defesa Civil, preventivos, de contingência e de ação, programas e projetos de Defesa Civil;
- IV. Vistoriar áreas de risco e recomendar a intervenção preventiva, o isolamento e a evacuação da população de áreas e de edificações vulneráveis;
- V. Manter atualizadas e disponíveis as informações relacionadas às ameaças, vulnerabilidades, áreas de riscos e população vulnerável;
- VI. Implantar o banco de dados e elaborar os mapas temáticos sobre ameaças, vulnerabilidades e riscos de desastres;
- VII. Estar atenta às informações de alerta dos órgãos de previsão e acompanhamento para executar planos operacionais em tempo oportuno;
- VIII. Implantar e manter atualizados o cadastro de recursos humanos, materiais e equipamentos a serem convocados e utilizados em situações de anormalidades;
- IX. Proceder a avaliação de danos e prejuízos nas áreas atingidas por desastres;
- X. Propor à autoridade competente a decretação ou homologação de situação de emergência e de estado de calamidade pública, observando os critérios estabelecidos pelo CONDEC;
- XI. Executar a distribuição e o controle dos suprimentos necessários ao abastecimento da população, em situações de desastres;
- XII. Capacitar recursos humanos para as ações de defesa civil;
- XIII. Implantar programas de treinamento para voluntariado;
- XIV. Realizar exercícios simulados para adestramento das equipes e aperfeiçoamento dos Planos de Contingência;
- XV. Promover a integração da Defesa Civil Municipal com entidades públicas e privadas, e com os órgãos estaduais, regionais e federais;
- XVI. Estudar, definir e propor normas, planos e procedimentos que visem à prevenção, socorro e assistência da população e recuperação de áreas de risco ou quando essas forem atingidas por desastres;

- XVII. Prever recursos orçamentários próprios necessários às ações assistenciais, de recuperação ou preventivas, como contrapartida às transferências de recursos da União, na forma da legislação vigente;
- XVIII. Implementar ações de medidas não-estruturais e medidas estruturais;
- XIX. Promover campanhas públicas e educativas para estimular o envolvimento da população, motivando ações relacionadas com a Defesa Civil, através da mídia local;
- XX. Sugerir obras e medidas de prevenção com o intuito de reduzir desastres; e
- XXI. Estabelecer intercâmbio de ajuda com outros municípios (comunidades irmanadas). (BRASIL, 2010).

Os planos de contingência ligados à população têm como objetivos essenciais salvar vidas, reduzir o sofrimento das pessoas e minimizar os prejuízos econômicos. O art. 18 do decreto 5376/05 estabelece que “em situações de desastre, as ações de resposta e de reconstrução e recuperação serão de responsabilidade do Prefeito Municipal ou do Distrito Federal” (BRASIL, 2005).

3. Histórico de Enchentes no Brasil

O êxodo rural, que teve início na década de 50, provocou um crescimento desregular em todas as cidades. Com isso, houve um encarecimento dos imóveis em áreas mais centrais, promovendo uma série de ocupações irregulares em encostas e principalmente perto de córregos e rios. A retirada de cobertura vegetal, em detrimento da expansão e alocação destas ocupações, e a impermeabilização realizada pela pavimentação e as edificações contribuem para a formação das ilhas de calor³, aumentando as possibilidades de formação de temporais.

A maioria das cidades brasileiras ficam próximas a uma faixa de terra localizada entre o litoral e os planaltos, ou ainda nas proximidades de rios torrenciais e áreas de várzea. Como o território brasileiro está localizado em uma zona climática intertropical, este, está sujeito a uma grande quantidade de insolação e altas possibilidades para formação de climas mais úmidos.

Devido a este alto índice de insolação e formação de nuvens de chuvas, na estação do verão, que ocorre entre os meses de dezembro a março, acontece um alto índice pluviométrico na região aumentando os riscos de enchentes. Ademais, as alterações climáticas e físicas das áreas urbanas também contribuem para as inundações. Em seguida, serão apresentadas outras enchentes e inundações que fazem parte da história dos desastres naturais no Brasil.

Em 1941, por exemplo, ocorreu uma das maiores enchentes na cidade de Porto Alegre. As chuvas dos meses de abril e maio somaram 791mm e deixaram 70 mil pessoas sem energia elétrica e água potável. As cheias do Lago Guaíba alcançaram a cota de 4,75m, situação estimada para o tempo de recorrência de 370 anos. Partes da cidade ficaram de baixo d'água e o transporte foi garantido através de barcos. As principais causas para as enchentes nessa região são de fatores naturais e que podem ser intensificadas em anos de El Niño. Devido a esta

³ Ilhas de Calor é um fenômeno climático, no qual ocorre principalmente em cidades altamente urbanizadas. Ocorre uma elevação de temperatura e consequentemente a redução da umidade relativa do ar, causando um enorme desconforto.

enchente foi construído o Muro da Mauá no final dos anos 60 e no início dos anos 70, separando de vez a população do lago (Ribeiro, 2014).



Figura 3-1. Enchente de Porto Alegre 1941
Fonte: Acervo do Museu Joaquim José Felizardo.

De acordo com Ribeiro (2014), a catástrofe que ocorreu na cidade de Caraguatuba, que fica no Litoral Norte do Estado de São Paulo, em março de 1967, foi reconhecida internacionalmente como o fenômeno Hecatombe. Ocorreu uma chuva constante durante vários dias, enfraquecendo assim o solo e provocando deslizamentos de terras. As enchentes e deslizamentos proporcionaram o isolamento da região, impossibilitando a entrada de ajuda de outra forma que não pelo ar e pelo mar. Centenas de casas foram soterradas, estima-se que morreram 440 pessoas.

Além disso, abaixo estão relatados mais casos de enchentes catastróficas no Brasil:

- ✓ Enchentes em Minas Gerais e Espírito Santo em 1979;
- ✓ Enchentes em Santa Catarina em 2008;
- ✓ Inundações e Deslizamentos de Terra no Rio de Janeiro e São Paulo 2010;

- ✓ Enchentes em Alagoas e Pernambuco em 2010;
- ✓ Enchentes no Norte e Nordeste do Brasil em 2009;
- ✓ Desastres naturais no Rio de Janeiro, em abril de 2010;
- ✓ Enchentes e deslizamentos de terra na região serrana do Rio de Janeiro, em 2011;
- ✓ Enchentes em Santa Catarina em 2011;
- ✓ Enxurradas em Xerém, janeiro de 2013;
- ✓ Enchentes no Sudeste do Brasil em 2013 (Minas e Espírito Santo).

Cabe salientar que os casos citados anteriormente foram considerados catastróficos, porém inúmeros outros casos de escala menor ocorreram e afetaram a qualidade de vida das pessoas. Com isso, podemos ver que os esforços para o desenvolvimento de políticas preventivas de chuvas, precisa considerar todos os fatores climáticos, físicos, populacional e econômico da região. Pois, não é possível resolver o problema das enchentes em um prazo curto, mas é preciso garantir condições de moradia digna para aqueles que convivem todos os anos com esta realidade e, ao mesmo tempo, criar possibilidade para enfrentar as suas consequências.

3.1. Histórico sobre a ruptura de barragens

Segundo o relatório de Seguranças de Barragens 2015 da Agência Nacional de Águas, o Brasil possui ao todo 17.259 barragens cadastradas, sendo 6.123 hidroelétricas. Houve um aumento de 13% e 32% em relação a 2014 de barragens classificadas, respectivamente, em categoria de risco e de dano potencial associado. Cerca de 85% das barragens ainda não foram classificadas.

O rompimento de Barragens é uma particularidade de desastre consideravelmente reincidente na história. Existe dois fatores importantes para a causa primária deste evento: um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou um mau planejamento da estrutura.

Quando acontece rompimento por fenômeno natural, este pode ser classificado como desastre misto⁴, já que a ausência de força externa é classificada como desastre ecológico. Atualmente no Brasil, o rompimento de barragens de rejeito de minério é o mais recorrente. O estado de Minas Gerais é o mais alarmante para rompimento deste tipo de barragem, 6 barragens se romperam ao longo dos últimos 15 anos. Na tabela 3-1 é possível ver os piores casos de rompimento de barragens no estado de Minas Gerais.

Tabela 3-1: Rompimento de Barragens em Minas Gerais

Local	Ano	Nome	Tipo
Itabirito	1986	Barragem de Fernandinho	Barragem de rejeitos Minerários
Nova Lima	2001	Barragem de Macacos	Barragem de rejeitos Minerários
Cataguases	2003	Barragem de Cataguases	Barragem de rejeitos Industriais
Mirai	2007	Barragem do Rio Pomba/Cataguases	Barragem de rejeitos Minerários
Itabirito	2014	Barragem de Herculano	Barragem de rejeitos Minerários
Mariana	2015	Barragem Fundão	Barragem de rejeitos Minerários
Mariana	2015	Barragem Santarém	Barragem de rejeitos Minerários

Fonte: Adaptado de FARIA (2015); IBAMA (2009); N. OLIVEIRA (2015); S. D. SOUZA (2008).

O rompimento das barragens em Mariana é considerado o maior desastre socioambiental da história do Brasil. Estudos preliminares (BRASIL, 2015) apontam que, somente na barragem de Fundão, havia aproximadamente 50 milhões de m³ de resíduos, classificados, segundo a NBR 10.004, como sólidos não perigosos e não inertes, como o ferro e o manganês, ou seja, sua composição era formada basicamente por areia e metais.

⁴ É a somatória entre forças da natureza e falhas na tecnologia humana como causa primária de um desastre. Ocorre quando grandes tempestades e terremotos tem uma grande contribuição para o rompimento da barragem.

O distrito de Bento Rodrigues foi o primeiro a ser atingido pela enxurrada, ele desapareceu soterrado na lama. Com isso, os sobreviventes ficaram desalojados. Outros distritos de Mariana foram atingidos, como águas Claras, Ponte do Gama, Paracatu e etc.



Figura 3-2: Bento Rodrigues após o rompimento da Barragem de Mariana
Fonte: O globo

Bento Rodrigues, embora vilarejo, era um distrito que possuía uma história majestosa e digna de orgulho entre os seus concidadãos. Com 317 anos de existência, abrigava igrejas centenárias com obras sacras importantes e monumentos de notória relevância cultural, além de fazer parte da rota da Estrada Real no século XVII. Além das perdas de vidas humanas, cujos valores são incalculáveis, em apenas onze minutos de avalanche todo patrimônio histórico e cultural, construído ao longo de séculos, fora dizimado pelo mar de rejeitos, figura 3-2. (GONÇALVES; VESPA; FUSCO, 2015).

Além dos impactos sociais, culturais e econômicos, ocorreu impactos ambientais onde segundo o IBAMA, mais de 600 km de cursos de água foram afetados e contaminados pela lama de resíduos da mineração.

Inicialmente, esse rejeito atingiu a barragem de Santarém logo a jusante, causando seu galgamento e forçando a passagem de uma onda de lama por 55 km no rio Gualaxo do Norte até desaguar no rio do Carmo. Neste, os rejeitos percorreram outros 22 km até seu encontro com o rio Doce. Através do curso deste, foram

carreados até a foz no Oceano Atlântico, chegando no município de Linhares, no estado do Espírito Santo, em 21/11/2015, totalizando 663,2 km de corpos hídricos diretamente impactados (BRASIL, 2015, p. 3).

No que tange a biodiversidade da região, alguns danos serão irreversíveis, já que os danos causados foram particularmente perversos. Onde o rastro de lama passou, ficou um rastro de contaminação, mortandade e destruição.



Figura 3-3: Rio Doce depois do Rompimento de Mariana

Fonte: GGN < <http://jornalggn.com.br/noticia/pesquisa-analisa-o-antes-e-o-depois-da-foz-do-rio-doce> >



Figura 3-4: Rio Doce atingido por lama de barragem

Fonte: O globo

A ausência de estudos consistentes de sondagem e inspeção das obras contribui significativamente para o cenário recorrente de colapso de barragens. Mesmo que as causas do rompimento sejam evidenciadas, fica claro que são necessárias mudanças na legislação e na forma das concessões de licenças.

Uma fiscalização efetiva por parte dos órgãos governamentais competentes é uma medida preventiva urgente e necessária para que se possam impedir novos acidentes. Na tabela 3-2 encontra os outros casos de rompimento de barragens no Brasil:

Tabela 3-2. Rompimento de Barragens no Brasil

Local	Ano	Nome	Tipo
Alagoa Nova (PB)	2004	Camará	Barragem de água
Vilhena (RO)	2008	Apertadinho	Barragem de água para geração de energia
Cocal e Buriti dos Lopes (PI)	2009	Algodões	Barragem de água
Laranjal do Jari (AP)	2014	Santo Antônio	Barragem de água para geração de energia

Fonte: Adaptado de FARIA (2015); IBAMA (2009); N. OLIVEIRA (2015); S. D. SOUZA (2008).

4. Método Proposto

Para a criação dos mapas de potencial de inundação, foram feitas análises das séries históricas da região possibilitando assim o entendimento da distribuição sazonal das cheias na bacia. Com isso, através de uma modelagem hidrológica realizada por meio dos programas Autocad e Hec-Ras foi gerada a mancha de inundação associada à área de interesse.

Em relação aos mapas de potencial de inundação, foi utilizado o programa ArcGis. O método AHP auxilia na tomada de decisões por ser um método de multi-atributo. Trata-se de um método que determina os critérios e seus pesos a partir das preferências dos decisores.

4.1. Modelagem Hidrológica

Ultimamente a integração entre modelos de hidrológicos e o sistema de informação geográfica vem se fortalecendo ainda mais principalmente na criação de mapas de inundações. Já que, estas são duas importantes ferramentas para a integração e visualização dos dados de tipos e formatos diferentes. O programa utilizado para a modelagem hidrológica/hidráulica deste trabalho foi o HEC-RAS. Através dele foi criada uma mancha de inundação em caso do rompimento da barragem.

O HEC-RAS é um sistema que contém modelo de unidimensional e bidimensional de fluxo hidráulico contínuo, desenvolvido pela Hydrologic Engineering Center (HEC). Este programa foi projetado para auxiliar os engenheiros em análise de fundo de canal e para a determinação de planícies de inundação. O sistema é capaz de modelar regimes de fluxo subcrítico, supercrítico e de fluxo misto para fluxos consistindo em uma rede cheia de canais, um sistema dendrítico ou um único alcance de rio. Os resultados do modelo são tipicamente aplicados em estudos de gestão de inundação para avaliar os efeitos das invasões de canais de escoamento (HEC, 1997).

A versão utilizada para este trabalho foi a 5.0 e o modelo utilizado para a criação da mancha de inundação foi o modelo 2D, por ser um modelo mais fácil

de se utilizar e por ser melhor aplicado para estudos específicos em trechos de rios como, por exemplo, em estudos de ruptura de barragem e projetos de estruturas hidráulicas onde pode ser observado a ocorrências de diferentes tipos de escoamento, variações relevantes na profundidade e velocidade, e outras características que impedem o uso das simplificações impostas para simulação em modelos 1D.

Para a utilização do modelo hidráulico em bidimensional é necessário um modelo digital de terreno. Com isso, foi utilizada uma foto aerofotogramétrica com um GSD (Ground Sample Distance) de 40 centímetros aliada a uma batimetria realizada com sistema ecobatímetro e DGPS, a figura 4-1 ilustra o material que constitui o modelo de terreno.

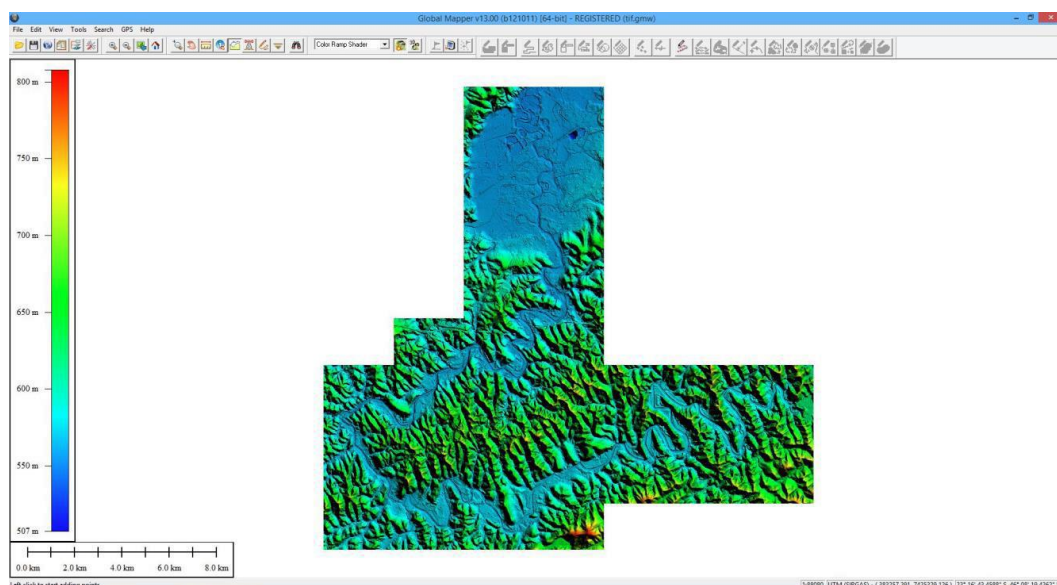


Figura 4-1: Modelo digital do terreno

Em relação à geração dos hidrogramas de ruptura utilizou-se o módulo de “Dam Break” integrante do software HEC-RAS, que é aceito internacionalmente como um software adequado para esse propósito.

4.1.1. Descrição dos parâmetros necessários

O software utiliza uma série de parâmetros de entrada para a análise hidráulica da Geometria do canal de fluxo. Estes parâmetros são utilizados para uma série de cortes transversais ao longo do fluxo. Em cada seção transversal se

localiza os bancos de rios e estes são utilizados para dividir em segmentos o canal de escoamento esquerdo, canal principal e o canal de distribuição direito. O Hec Ras subdivide as seções desta maneira por causa dos parâmetros hidráulicos (Figura 4-2).

Por exemplo, o perímetro molhado no canal de escoamento é muito maior do que no canal principal. Assim, as forças de atrito entre a água e o leito do canal têm uma maior influência na resistência ao escoamento no canal de escoamento, levando a menores valores do coeficiente de Manning. Como resultado, a velocidade de fluxo e o transporte são substancialmente maior no canal principal do que no canal de escoamento. (Maidment, 1999)

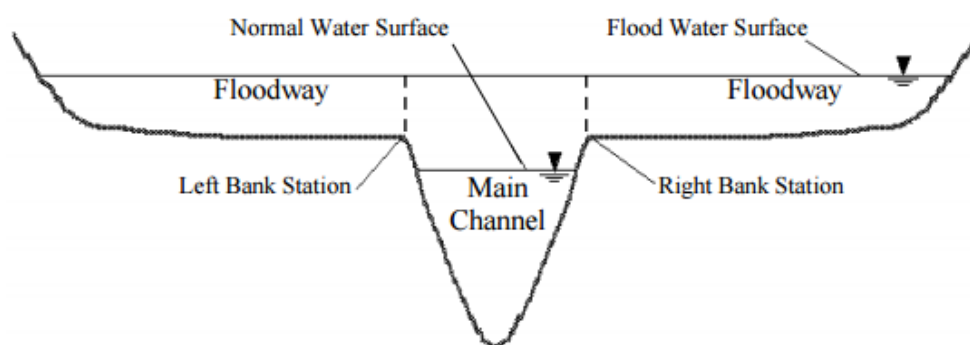


Figura 4-2: Esquema de seção transversal do fluxo
Fonte: Maidment

A formação de brecha pode ser caracterizada de modo geral em duas categorias enquadrando-se na primeira categoria, brechas formadas pela súbita retirada de parte ou toda estrutura de barramento, e na segunda, brechas inerentes da erosão de material de aterro (DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES, 2010). A primeira categoria remete brechas em estruturas rígidas geralmente associadas à perda de capacidade, a segunda categoria é associada à formação de brechas causadas por processos de overtopping e erosão interna (Gomes, et al., 2015).

Considerando que o empreendimento utilizado neste estudo é uma barragem de terra com 54 metros de altura os casos mais prováveis de ruptura pertencem à segunda categoria citada.

A previsão do comportamento da ruptura normalmente é tomada com base em equações empíricas. É sabido que há incertezas inerentes a estas metodologias (equações empíricas) uma vez que em sua maioria estas previsões têm por base diversos casos históricos, análise estatística e poucos estudos práticos (Wahl, 2004). Ainda, é notório que a ruptura de uma barragem é um evento demasiadamente complexo para ser avaliado por fórmulas matemáticas empíricas, sendo assim o intuito é de prover uma provável magnitude dos parâmetros (ICOLD, 1998).

Os parâmetros de formação de brecha são elementos de forma e devem ser estimados de modo a compor o hidrograma de um evento de ruptura (Gomes, et al., 2015). Em cada seção transversal, o HEC-RAS usa vários parâmetros de entrada para descrever forma, elevação e localização relativa ao longo do fluxo:

Top Elevation (M): cota da crista da barragem;

Bottom Elevation (M): elevação do fundo da brecha;

Bottomwidth (M): abertura inferior máxima do trapézio formado pela brecha;

Leftslope (xH:1V): declividade do talude formado no lado esquerdo da brecha;

Rightslope (xH:1V): declividade do talude formado no lado direito da brecha;

Development time (HR): tempo de formação da brecha até atingir a sua abertura máxima;

Trigger method: método que dá início à ruptura. Pode ser o tempo, ou uma elevação ou uma combinação de tempo e elevação.

Trigger elevation (M): nível d'água em que se inicia a ruptura.

Progression method: tipo de progressão da abertura.

Os dados de saída foram gerados em extensão shapefiles para poder ser utilizado posteriormente no ArcGis.

Os parâmetros que influenciam na formação da brecha e o tempo de formação da brecha, que são utilizados pelo HEC-RAS, podem ser calculados com algumas recomendações que estão no documento Critérios de Projeto Civil de Usinas

Hidroelétricas (Eletrobras,2003), apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Parâmetros para calculo da formação da brecha

Tipo de Barragem	Tempo de Ruptura	Forma da Ruptura/Profundidade da Brecha	Largura da Brecha
Arco	Menor do que 0,1 horas	Declividade da lateral da brecha entre zero e a declividade do vale	Comprimento da crista
Contraforte	Entre 0,1 h e 0,3 h	Declividade da lateral da brecha normalmente igual a zero	Múltiplos trechos
Gravidade	Entre 0,1 h e 0,3 h	Declividade da lateral da brecha normalmente igual a zero	Um ou mais trechos (usualmente menor do que metade do comprimento da crista)
Terra e enrocamento	Entre 0,1 h e 1 h (compactada) e entre 0,1h e 0,5h (não compactada)	Declividade da lateral da brecha entre 0,25 e 1	Entre 1 e 5 vezes a altura da barragem (normalmente entre 2 a 4 vezes)

Tais parâmetros são estimados por diversos métodos, considerando as características da barragem em questão optou-se para este trabalho na utilização de equações que tem sua construção em dados históricos e direcionadas a aterros coesivos. As equações utilizadas neste trabalho foram as de Froelich 1995, que seguem abaixo:

Forma da Brecha

$$B_{vag} = 0.1803 K_o V_w^{0.32} h_b^{0.19}$$

(2)

Tempo de Ruptura

$$t_f = 0.0025 V_w^{0.53} h_b^{-0.9}$$

(3)

Vazão de Pico

$$Q_p = 0.607 (V_w^{0.295} h_w^{1.24})$$

(4)

Sendo:

B_{vag} = largura da brecha, m;

K_o = multiplicador do galgamento: 1.4

h_b = altura da brecha, m;

h_d = altura da barragem, m;

h_w = altura da água sobre a brecha no momento da falha, m;

Q_p = Vazão de pico, m³/s;

t_f = tempo de ruptura, horas;

V_w = volume de água sobre a brecha no momento da falha.

O tempo de ruptura encontrado foi de 2,5h para uma vazão de pico de 77.855,045m³/s

4.1.2. Estudo de Ruptura de Barragens da ANA

A Agência Nacional de Águas, fez um estudo de ruptura de barragens, entregue pela empresa ENGEORPS (2012), para compor o relatório “Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio

Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas”.

Dentro deste estudo uma das barragens analisada foi a barragem de Santa Branca, que é o estudo desta dissertação. O programa utilizado pela empresa, para a modelagem, também foi o HEC-RAS e o possível rompimento estudado foi o por galgamento. O tempo de retorno utilizado foi o de 500 anos, gerando uma vazão por galgamento de 63.950 m³/s.

Através, da figura 4-3 é possível verificar que o resultado final desta modelagem foi bem parecido, tendo apenas algumas divergências ao longo de alguns trechos da mancha. Atentar que, o estudo feito pela ANA prevê o rompimento por cascata, por isso a mancha de inundação é bem maior que a deste estudo, que apenas verifica o rompimento da represa de Santa Branca.

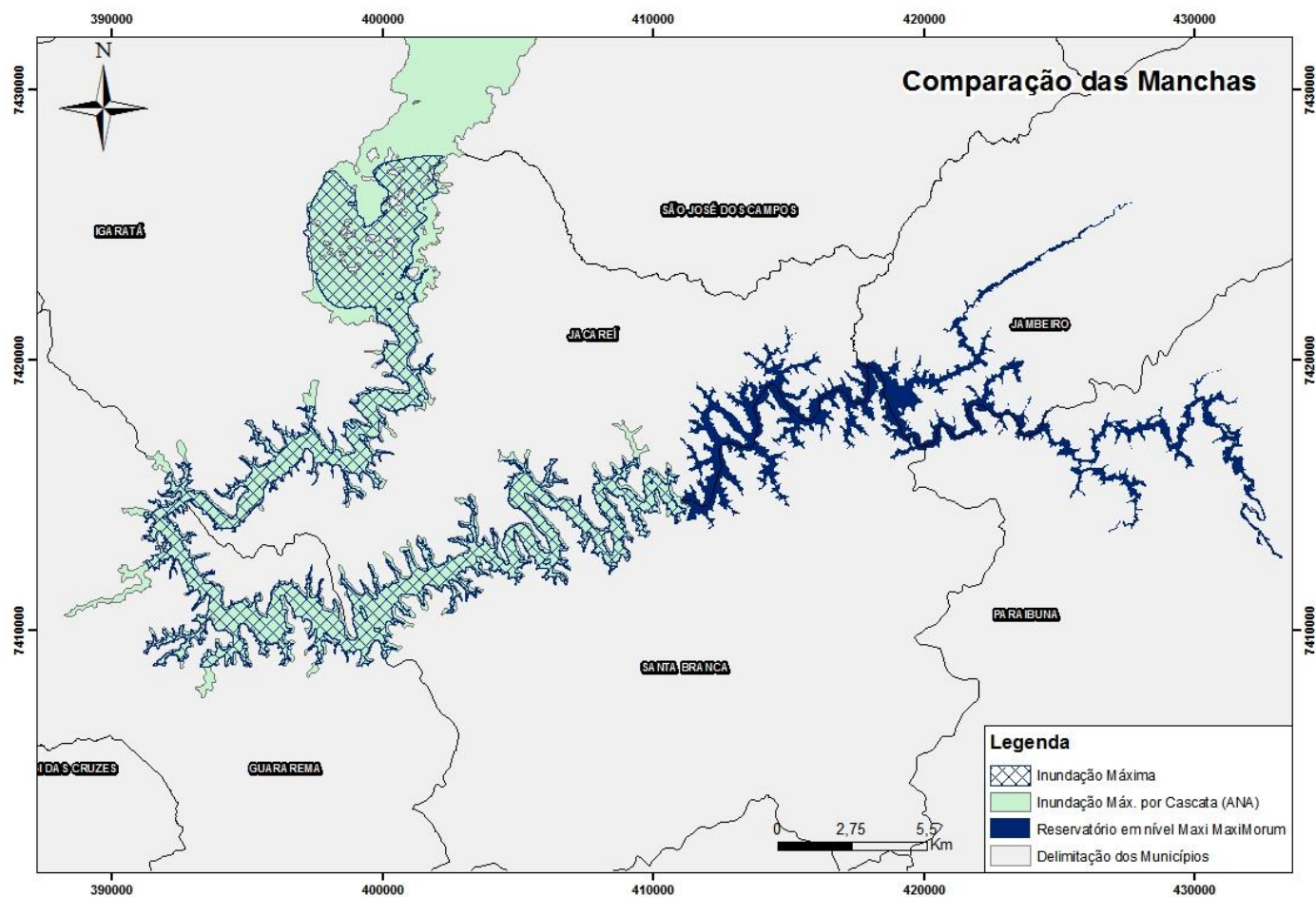


Figura 4-3: Mapa de comparação das manchas

4.2. O método AHP

A metodologia Analytic Hierarchy Process (AHP) foi criada por Thomas Saaty visando auxiliar na tomada de decisão e tem as seguintes virtudes: a) é aplicada a problemas com múltiplos atributos ou critérios hierarquicamente estruturados; b) analisa atributos quantitativos e qualitativos, incorporando a experiência e a preferência dos decisores; c) ordena a importância dos atributos e das alternativas; d) pode ser utilizada em situações complexas que exigem julgamentos subjetivos. É adequada para absorver e lidar com os julgamentos inconsistentes dos especialistas, sugerindo uma melhor avaliação do problema (Saaty, 1980; 1991).

O AHP tem como premissa fundamental a estruturação de um sistema de decisão hierarquicamente complexo em diversos níveis, definidos por afinidade. A organização do problema permite uma visão panorâmica do sistema, identificando os vários elementos, quando o problema envolve a seleção de alternativas permeadas por múltiplos critérios (Cruz Junior et Carvalho, 2003; Iañez et Cunha, 2006).

Para uma melhor estruturação deste método é necessário fazer uma construção por nível hierárquico, facilitando assim a sua compreensão e avaliação. É necessário, identificar os elementos chave para a tomada de decisão e os organiza de acordo com as suas afinidades.

Saaty (1980) e Costa (2002) descrevem a tomada de decisão ancorada nos seguintes princípios:

(i) construção da hierarquia – partindo-se de um problema conhecido, deve-se estruturá-lo em níveis hierárquicos, de modo a facilitar a sua compreensão e a sua avaliação, dando visibilidade ao raciocínio humano. São identificados os elementos-chave para a tomada de decisão e organizados por afinidade; (ii) definição das prioridades – o decisor, com sua habilidade, relaciona os objetos às situações identificadas, fazendo comparações pareadas de acordo com os critérios analisados; (iii) avaliação da consistência – pelo fato de se trabalhar com valores subjetivos, pode haver inconsistências nos dados obtidos dos especialistas, os

quais devem ser cuidadosamente avaliados por intermédio do grau de consistência, que deve ser menor que 0,1.

Quando é estabelecido as prioridades da hierarquia, define-se seus valores através de comparações dois a dois dos critérios quanto a sua importância para critério ou objetivo. Na tabela 4-2, é possível ver os conceitos de pesos utilizados no AHP.

Tabela 4-2: Escala Fundamental

Intensidade de Importância	Definição da Importância	Explicação
1	Mesma	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Intermediário	
3	Pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra.
4	Intermediário	
5	Grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra.
6	Intermediário	
7	Muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática
8	Intermediário	
9	Absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação a outra com o mais alto grau de certeza.

Fonte: Saaty, 1991, p.68

Costa (2003, p.54), exemplifica muito bem esta escala de comparação de critérios – tabela 4-3.

Tabela 4-3: Comparação de Critérios

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremamente	Bastante	Muito	Pouco	Igual	Pouco	Muito	Bastante	Extremamente
Menos importante...					...Mais Importante			

Na comparação par a par, quando o tomador de decisão exprimir sua preferência por um critério “A”, como sendo o mais importante do que “B” para a realização de um critério imediatamente acima da hierarquia, estará atribuindo para o critério “A” peso 5. Na matriz de cálculo dos vetores, o peso recíproco de 1/5 será atribuído para o critério “B”.

Teknomo (2006) explicando, de forma didática, a comparação par a par mostrou um exemplo com três tipos de frutas: banana, maçã e cereja. Na tabela 4-4 são apresentados os três tipos de comparações, por meio de julgamentos subjetivos, resultando numa matriz 3 por 3. Comparando a maçã com a banana, conforme a escala de julgamentos existe uma preferência moderada pela banana em relação à maçã. Assim como, existe uma forte preferência pela maçã em relação à cereja e, do mesmo modo, existe uma preferência muito forte pela banana em relação à cereja.

Na estruturação da matriz de comparação, se o valor do julgamento na escala está situado à esquerda do número 1, insere-se o “valor atual”; senão, insere-se o valor recíproco, conforme a forma matricial apresentada na tabela 4-4, a seguir.

Tabela 4-4: Matriz de comparação

Variáveis	Maça	Banana	Cereja
Maça	1	1/3	5
Banana	3	1	7
Cereja	1/5	1/7	1

Em seguida, a tabela 4-5, a matriz de comparação paritária é submetida a uma técnica matemática denominada “autovetor”.

Tabela 4-5: Autovetor normalizado

Variáveis	Maça	Banana	Cereja	Soma das linhas	Autovetor (%)
Maça	1	1/3	5	0,8485	28,28
Banana	3	1	7	19,302	64,34
Cereja	1/5	1/7	1	0,2213	7,38
Soma das Colunas	1	1	1	3	100

Deste modo, no exemplo de Teknomo (2006) o autovetor, mostra os pesos relativos de importância na comparação entre as frutas, indicando que a banana tem importância de 64,34%, a maçã 28,33% e a cereja 7,38%. O autovetor, por conseguinte, fornece a hierarquia ou ordem de prioridade dos critérios comparados. O próximo passo é determinar o grau de consistência.

O local onde está situada a área de estudo, já possui um histórico de ocupações em que alguns fatores influenciaram na ocorrência de inundações, sendo eles: ocupações irregulares, e loteamentos urbanos, o que pode ser entendido como alguns fatores que são responsáveis pela impermeabilização do solo, e como resultado a ocorrência de inundações.

No nosso objeto de estudo, a inundação iria ocorrer independente dessas ocupações irregulares, devido ao rompimento da barragem. Porém, o que se pretende apresentar nos mapas criados é como a presença ou ausência de estruturas como arborização, bueiros e pavimentação, afetou nas áreas mais atingidas pelo escoamento superficial.

Os dados a seguir foram retirados dos setores censitários do IBGE para o ano de 2010. Foi feita uma análise de multicritérios pelo método AHP para dar a importância devida a cada variável. A matriz de comparação pareada desenvolvida é apresentada conforme a Tabela 4-6.

Portanto, o fator pavimentação foi definido como mais importante, por ter um maior escoamento superficial, diante os três fatores. Além disso, verifica-se a partir do entendimento local que grande parte das vias são pavimentadas, o que corrobora para o elevado impacto da presença destas estruturas no local. Por sua vez, apesar da importância de elementos condicionados à drenagem (bueiros e bocas de lobo), a ausência destas estruturas específicas para o escoamento da água são determinantes para a determinação da maior importância da pavimentação. Por fim, adotou-se a arborização urbana como menor impacto devido ao fato de suas estruturas serem pontuais e complementares à estruturas de drenagem do ponto de vista do encaminhamento de águas pluviais. No presente estudo, os valores dos pesos foram obtidos por meio do script AHP customizado no aplicativo computacional ArcGIS 10.3.

Tabela 4-6: Matriz de comparação dos fatores

Fatores	pav_rec	bue_rec	arb_rec	Pesos
pav_rec	1	3	5	0,6843
bue_rec	1/3	1	2	0,2296
arb_rec	1/5	1/2	1	0,122

Como exemplo daquilo que já fora explicitado, de acordo com a matriz AHP gerada a melhor combinação é a pavimentação, esta é considerada fortemente mais importante do que a arborização, portanto, o valor 5 foi atribuído a posição correspondente da matriz. A posição transposta recebe automaticamente um valor recíproco, que, neste caso, é de 1/5, ou seja, 0,2.

Após a obtenção dos pesos de cada fator, atribui-se os valores conforme a Equação 1, para elaboração do mapa de potencial inundação (PI).

$$PI = 0,6843 Pav + 0,2296 Bue + 0,122 Arb$$

(Eq. 1)

A álgebra de mapas foi realizada no software ArcGIS, com base na equação (1). Os pesos utilizados no processo foram mesmos obtidos no AHP para cada parâmetro. Como já dito anteriormente, do ponto de vista do AHP, o grau de consistência desejável de qualquer matriz de comparação é que seja inferior a 0,10. O grau de consistência encontrado foi de 0,0035.

As enchentes urbanas são um problema crônico no Brasil, devido principalmente a gerência inadequada do planejamento da drenagem, e à filosofia errônea dos projetos de engenharia. A filosofia errônea se reflete na ideia preconcebida de engenheiros de que, a boa drenagem, é aquela que permite escoar rapidamente a água precipitada sobre a área de intervenção. As consequências desses erros têm produzidos custos extremamente elevados para a sociedade como um todo. No entanto, a melhor drenagem é aquela que drena o escoamento sem produzir impactos no local nem a jusante (TUCCI, 1995).

Através dos pesos estabelecidos nas variáveis que influenciam no risco de inundação, e devido a este pensamento errôneo referido pelo TUCCI, foram gerados 5 mapas de potencial de inundações relacionados com a urbanização do local. Sendo:

- a) Relação das áreas com domicílios particulares permanentes com a arborização urbana do local;
- b) Relação das áreas com domicílios particulares permanentes com a quantidade de ruas pavimentadas do local;
- c) Relação das áreas com domicílios particulares permanentes com a quantidade de bueiros do local;
- d) Potencial de Arrastamento em caso de Rompimento da Barragem de Santa Branca;
- e) Potencial de Inundação na área de Influência de 3km.

Para elaboração dos mapas dos fatores analisados, esses foram reclassificados em subfatores sobre os quais foram aplicadas notas de acordo com o grau de susceptibilidade à inundação variando de 1 a 5, do menos ao mais susceptível.

4.3. As geotecnologias e suas aplicações

As geotecnologias são as principais ferramentas que podem ser utilizadas na gestão de riscos. Estas são representadas pelo Sistema de Informações Geográficas (SIG), Sensoriamento Remoto, Aerofotogrametria e o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Com as geotecnologias é possível fazer a coleta e armazenamento de dados, devido a isso a análise de dados é feita em grande escala e com uma melhor visualização espacial.

Esta tecnologia vem sendo usada ultimamente, em larga escala, para tomadas de decisões sobre problemas urbanos e ambientais, podendo ajudar os administradores públicos na gestão do espaço urbano.

É importante ressaltar que um SIG é uma ferramenta que descreve as formas e a estrutura da paisagem em um ou vários momentos, cabendo ao analista geográfico a interpretação e a derivação das funções e dos processos subjacentes, permitindo o entendimento do conjunto expresso pelo espaço geográfico (GUANAES, 2007).

4.3.1.

O uso de geotecnologias no combate a desastres e como instrumento de suporte ao planejamento urbano e ambiental.

O Sistema de informações Geográficas (SIG) utiliza técnicas matemáticas e computacionais para fazer uma melhor análise e ter assim uma melhor representação espacial dos seus dados. Ele oferece aos seus administradores uma ampla visão do seu projeto, com informações facilmente encontradas sobre um determinado assunto e inter-relacionadas com a sua localização geográfica.

Os SIG estão ganhando um espaço cada vez maior entre profissionais que estudam e/ou trabalham com planejamento territorial visto o elevado potencial de aplicações desta geotecnologia, seja para o espaço urbano ou rural. Trata-se de uma tecnologia desenvolvida nos idos dos anos 1950 - na Inglaterra para a pesquisa botânica e nos Estados Unidos para o estudo do tráfego – com propósito de reduzir os custos com produção e manutenção de mapas (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2004, p.2). Porém, o marco inicial viria em 1966 com o Canadian Geographic Information System cuja finalidade era mesmo o mapeamento do território canadense para a prática do planejamento (PEREIRA, 2002, p.30).

O que distingue um SIG de outros tipos de sistemas de informação são as funções que possibilitam a realização de análises espaciais. Tais funções utilizam os atributos espaciais e não espaciais das entidades gráficas armazenadas na sua base de dados, buscando fazer simulações sobre os fenômenos do mundo real, seus aspectos ou parâmetros. O aspecto mais fundamental dos dados tratados em um SIG é a natureza dual da informação: um dado geográfico possui uma localização geográfica e atributos descritivos. Outro aspecto muito importante é que os dados geográficos não existem sozinhos no espaço; tão importante quanto localizá-los é descobrir e representar as relações entre os diversos dados (INPE, 2009).

Um SIG cria uma realidade virtual do espaço geográfico composta por camadas de informação em que cada uma representa um aspecto desse espaço geográfico. Assim, uma camada contendo informações pedológicas, por exemplo, descreverá dentro de uma metodologia própria as formações de solos existentes. Uma camada contendo informações de precipitação descreverá o nível de chuvas, e uma camada composta por setores censitários descreverá informações populacionais. Essas camadas se cruzam espacialmente na medida em que todos esses dados estão

georreferenciados, ou seja, dentro de um mesmo sistema de referência geográfica. (GUANAES, 2007)

Desta maneira, quando se verificam os propósitos de planejamento de ações de emergência, e no caso específico do presente estudo, em caso de rompimento de barragem, o SIG pode contribuir decisivamente para a análise e o entendimento dos impactos consequentes do processo analisado. A partir da delimitação e representação dos elementos existentes na paisagem, bem como da elaboração das informações atreladas ao fenômeno de inundação, pode-se avaliar áreas de preferenciais para a adoção de estratégias de mitigação dos impactos.

4.3.2. Análise Matricial

Os dados espaciais no SIG possuem dois formatos primários, sendo estes o vetorial (vectorial) e o matricial (raster). O formato vetorial estabelece-se a partir de representações baseadas em pontos, linhas ou polígonos propiciando a identificação de objetos de maneira precisas.

Segundo Guanaes (2007), o modelo vetorial quando aplicado a um caso real, permite a espacialização de diferentes objetos que se agregam em diferentes camadas de informação, compondo um todo em que relações topológicas de superposição, diferença, interceptação, interseção entre camadas podem ser estabelecidas. Cada objeto que compõe uma camada pode conter atributos que permitam derivar as funções destes dentro de um contexto específico de análise.

Já o modelo matricial é caracterizado por dividir a estrutura em quadriculas de grades regulares de células. Como suas propriedades podemos ver:

- a) As células e seus valores associados se encontram em camadas;
- b) A sequência é da esquerda para direita de cima para baixo;
- c) Cada célula tem um valor simples.

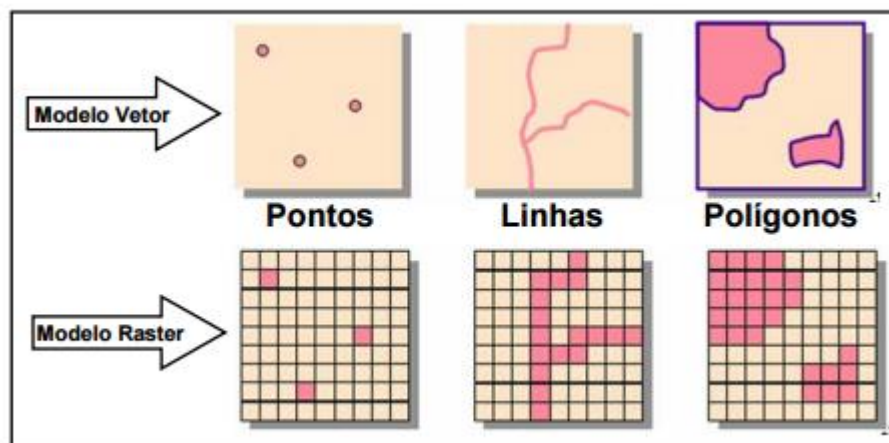


Figura 4-4: Representação de um modelo vetorial e matricial
 Fonte: Childs et al.(2004)

O modelo matricial é a representação de um atributo do espaço geográfico em unidades discretas denominadas pixel. Cada pixel detém uma resolução espacial e somente um tipo de informação. Em oposição ao sistema vetorial, no qual existem objetos de diferentes tamanhos e podendo ter mais de um atributo descrevendo um objeto, uma matriz não contém objetos, apenas células com o mesmo tamanho e com informação de um único atributo (Guanaes apud Burrogh, 1996).

De acordo com PERALTA, 200?, as características significativas de um raster são:

- ✓ **Resolução:** O pixel é o menor que um dispositivo de exibição pode atribuir de forma independente a um atributo como elemento de cor.
- ✓ **Orientação:** É o ao ângulo formado pelo Norte e a direção definida pelas colunas da grade ou raster, sendo habitual o seu valor é 0.
- ✓ **Zona ou Classe:** Este é um agrupamento temático de células em uma matriz de acordo com um critério classificador de imagem (por exemplo, uso da terra).
- ✓ **Valor:** é o valor armazenado em cada célula do raster (ou seja, um valor único por camada celular ou banda). Estes valores podem ser números inteiros ou números reais (com significativa e decimal), esta última produzindo um maior consumo de recursos hardware. Você também pode

armazenar valores textuais, mas a maioria dos softwares codifica valores numéricos (processo de reclassificação). Na área do quadro, isto é considerado como variável local representado por X e Y na célula, e como um valor de pixel Z sujeito variável que é contínua ou discreta.

✓ **Localização:** a informação matricial é disposta em linhas e colunas, e topologia, ao contrário da estrutura de vetor, está implícita para o local das células e os seus vizinhos, deduzindo as relações do tipo: proximidade e orientação relativa (por exemplo, lançado pelo número de linhas e colunas que é mais ao sul e o que mais a norte).

Os dois modelos possuem suas vantagens, porém a análise matricial utiliza a uniformização espacial⁵ e com isso, é possível realizar a integração espacial de múltiplas variáveis. O emprego do ambiente vetorial (pontos, linhas e polígonos), apesar de permitir a correlação de dados, impossibilita a relação física de suas bases devido a diversidade de formatos existentes.

Esse tipo de ambiente espacial é a base para o desenvolvimento de modelos baseados na integração de diferentes tipos de informação, como mapas de risco, de incêndio, de desmatamento, potencial agrícola, potencial de expansão urbana, entre outros. Fenômenos, como, por exemplo, risco ao movimento de massa, podem ser explicados de forma simplificada pelas camadas de informação: declividade, tipos de cobertura, estrutura geológica, tipos de solo, entre outras. Cada uma dessas informações (variáveis) será classificada por especialistas em termos de pesos, visando à explicação do fenômeno (movimento de massa) que se pretende avaliar no espaço geográfico. Cada matriz será convertida para esses pesos, e, por meio de operações algébricas, chegaremos a valores que representam um contínuo que classifica cada pixel do espaço geográfico em função do possível movimento de massa. Esse resultado poderá ser convertido para o ambiente vetorial e integrado à espacialização dos objetos que compõem o espaço geográfico, visando a avaliar a pertinência ou não de sua localização a partir do parâmetro deslocamento de massa (Guanaes,2007).

4.4. Mapas de Inundações

O controle de cheias pode ser feito através de meios estruturais e não estruturais como alternativa para o fornecimento de proteção contra enchente e redução de riscos e importância de danos causados. As medidas estruturais são

⁵ Utilização de pixel para representar determinada parcela espacial.

fundamentalmente construtivas e projetadas especificamente para o controle de enchente. As medidas não estruturais objetivam a melhor convivência da população com as enchentes e consistem em regulamentos que disciplinam os usos do solo, tipos de construção viáveis, seguros e sistemas de alerta.

Segundo TUCCI (2013), o zoneamento das áreas de inundação engloba as seguintes etapas:

- a) Determinação dos riscos das enchentes;
- b) Mapeamento das áreas de inundação; e,
- c) Zoneamento.

Neste capítulo iremos falar os aspectos de mapeamento das áreas de inundações. A utilização de uma base cartográfica confiável, a localização precisa dos elementos do sistema e das características hidráulicas da superfície da bacia constitui em material indispensável para a área técnica. Estes produtos ajudam a complementar as prevenções de uma medida não estrutural.

Um mapa de inundação, basicamente, tem como objetivo identificar os locais mais susceptíveis à ocorrência de enchentes (risco) a partir de dados que ajudem no planejamento de ações de prevenção, controle e na mitigação de cheias.

De acordo com TUCCI (2003), os mapas de inundação podem ser de dois tipos:

- a) Mapa de planejamento: define as áreas atingidas por cheias de tempo de retorno escolhidos; e,
- b) Mapa de alerta: informa em cada esquina ou ponto de controle o nível da régua para o qual inicia a inundação. Este mapa permite o acompanhamento da enchente por parte dos moradores, com base nas observações das réguas.

Para NASCIMENTO et al. [1998], um mapa para medidas não estruturais deve ter:

- a) Cobertura vegetal;
- b) Grau de impermeabilização dos lotes, considerando o seu tipo de utilização;
- c) Solo de acordo com seu nível de permeabilidade e com a vulnerabilidade à erosão;
- d) Declividade;
- e) Informações topográficas com linhas mais densas contornando as áreas críticas;
- f) Redes de drenagem natural e artificial.

Ainda segundo NASCIMENTO et al. [1998], para mostrar os mapas para a população alguns itens devem aparecer:

- a) Divisões para água, com referências que possam existir ao longo das partes mais altas;
- b) Localização dos nomes de pontos altamente conhecidos; c) uso de logotipos e ícones fáceis de identificar;
- c) Declividades, com áreas de alta declividade identificadas por sombras progressivas de cores;
- d) Rodovias principais e secundárias;
- e) Áreas de inundação (de acordo com dados atuais e probabilidade de ocorrência).

A construção de mapas de linhas de inundação envolve a coleta de diversas informações. Dentre estas informações, TUCCI (2013), destaca:

- a) Nivelamento da régua ao um zero absoluto;
- b) Topografia da cidade no mesmo referencial absoluto a régua linimétrica. Cota da rua no meio de cada esquina das áreas de risco;
- c) Estudo de probabilidade de inundações de níveis para uma seção na proximidade da cidade;
- d) Níveis de enchente, ou marcas ao longo da cidade que permita a definição da linha de água;
- e) Seções batimétricas ao longo do rio no perímetro urbano;

- f) Cadastramento das obstruções ao escoamento ao longo do trecho urbano como pontes, edifícios, estradas e entre outro.

A base de dados necessária para mapear as áreas de inundação são os dados geométricos da bacia e dados sobre o escoamento (podendo estes dados serem obtidos de diversas formas, de acordo com o tempo e a disponibilidade econômica). O profissional da área deve ter conhecimento para poder confiar em seus resultados. É preciso também que se tenha responsabilidade na divulgação dos resultados, advertindo pontos que podem ser poucos confiáveis. O desenvolvimento destes mapas envolve a necessidade de investimento em topografia, incluindo aí a batimetria do local, serviços onerosos, gastos com deslocamento e equipamentos. É necessário saber as vazões para o período de retorno, a partir de dados confiáveis e consistidos, o que no Brasil ainda é difícil de se obter gratuitamente em escala compatível com a análise.

Para evoluir com os mapas é necessário saber as vazões para o tempo de retorno, a partir de dados confiáveis e consistidos. Cabe lembrar que, atualmente, no Brasil possuímos postos fluviométricos e pluviométricos, fiscalizados pela Agência Nacional de águas (ANA). Porém, a rede de estações não é do tamanho necessário, nem possui uma alta confiabilidade de dados, já que existe uma grande quantidade de falha de dados. Além disso, salienta-se que em muitos casos não se verifica uma fiscalização permanente destas estações, o que pode contribuir para novos erros na análise dos dados.

Os dados de vazão que são utilizados correspondem a dados obtidos por modelos hidrológicos, de acordo com o período de retorno a ser utilizado e da duração da precipitação. Em relação os dados de níveis de inundação, normalmente são obtidos através de modelos hidráulicos que, a partir de escoamento permanente ou não permanente e dados geométricos da área estudada, definem quais são os níveis de inundação para cada uma das vazões desejadas.

Normalmente, os mapas de inundações são formatados com ajuda de uma ferramenta de geoprocessamento que pode congrega um número grande de informações, além dos níveis, tais como: vegetação, hidrografia, etc.

5. Estudo de Caso – Reservatório de Santa Branca

5.1. Área de Caracterização

A cidade de Santa Branca está situada no Vale do Paraíba, a 91 km da capital São Paulo (SP). Fundada em 22 de maio de 1832, a cidade ainda preserva parte de sua arquitetura, especialmente no centro da cidade e nas fazendas mais antigas. A cidade está a uma altitude de 800m e segundo o censo de IBGE (2010), possui 13.770 habitantes.

Ela é cortada pelo rio Paraíba do Sul e abriga a represa de Santa Branca, objeto de estudo, que é operada pela Light Energia com a finalidade de produção de energia e de controle do nível de águas do rio. Segundo IBGE (2010), a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul localiza-se entre os paralelos 20° e 24° de latitude sul e os meridianos 41° e 47° de longitude oeste, drenando aproximadamente 55.500 km² em áreas pertencentes aos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro.

A Bacia do Paraíba do Sul é uma das bacias mais industrializadas do Brasil. Ela faz parte do sistema da Light Energia e abrange inúmeros municípios que dependem essencialmente dos recursos hídricos disponíveis com as devidas regularizações impostas pelos reservatórios das usinas hidrelétricas existentes (Figura 5-1). O Ribeirão das Lajes junto com o rio Piraí, formam o sistema Guandu, que serve como manancial para abastecimento público da maior parte da população do estado do Rio de Janeiro.

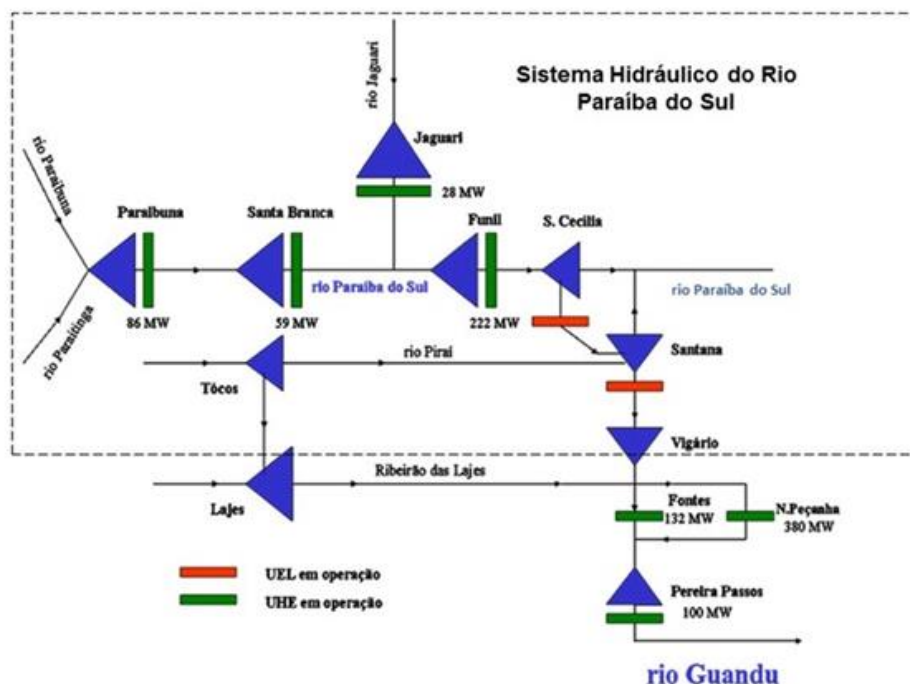
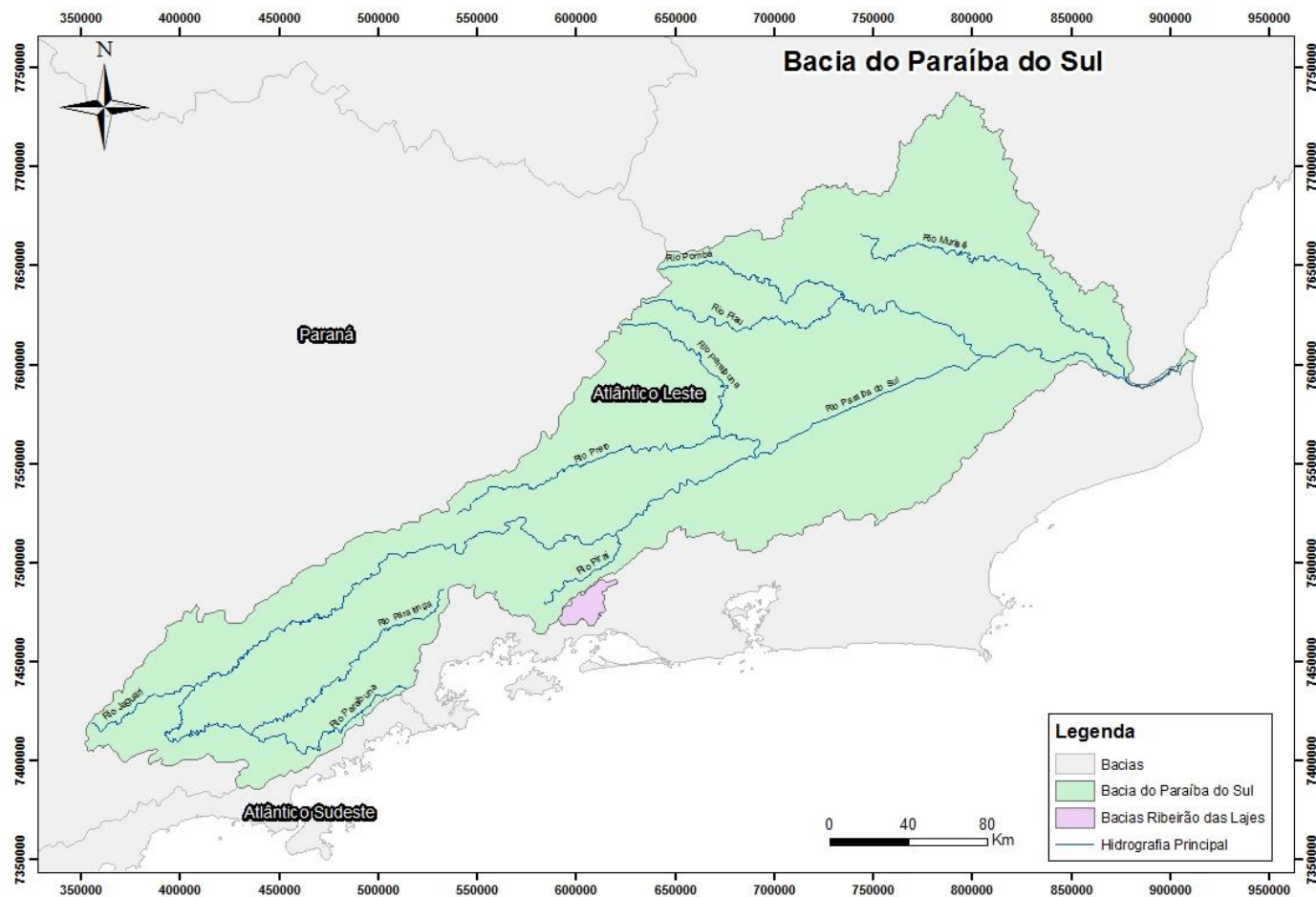


Figura 5-1: Diagrama Esquemático
Fonte: ANA

O rio Paraíba do Sul nasce a partir do encontro dos rios Paraibuna e Paraitinga. Seus principais afluentes são os rios Paraibuna, Pomba e Muriaé, pelo lado esquerdo, e os rios Pirai, Piabanha e Dois Rios, pelo lado direito (Figura 5-2). Ao todo são mais de 1.100 km de extensão, contados a partir da nascente do rio Paraitinga. O rio escoar no sentido nordeste até o município de São Fidélis/RJ, onde desvia para leste e deságua no Oceano Atlântico, no município de São João da Barra/RJ.



Com uma área de drenagem de cerca de 55.500km², a bacia do rio Paraíba do Sul localiza-se na Região Sudeste entre os Estados de São Paulo (13.900km²), Minas Gerais (20.700km²) e Rio de Janeiro (20.900km²). A bacia do Paraíba do Sul drena uma das regiões mais desenvolvidas do país, abrangendo parte do Estado de São Paulo, na região conhecida como Vale do Paraíba Paulista, parte do Estado de Minas Gerais, denominada Zona da Mata Mineira, e metade do Estado do Rio de Janeiro. Em toda essa extensão há atualmente 180 municípios, 36 dos quais estão parcialmente inseridos na bacia, distribuídos como mostra o mapa político - administrativo da bacia.

A população total da bacia, segundo a contagem do IBGE de 2010, é de 6,5 milhões de habitantes, 87% dos quais vivem nas áreas urbanas. Geograficamente, a represa de Santa Branca situa-se no limite político-administrativo dos municípios de Santa Branca, Jacareí, Jambuí, Paraibuna (Figura 5-3). Estes municípios totalizam uma população de aproximadamente 214.734 habitantes, com destaque para o município de Jacareí com mais de 96% desse total.

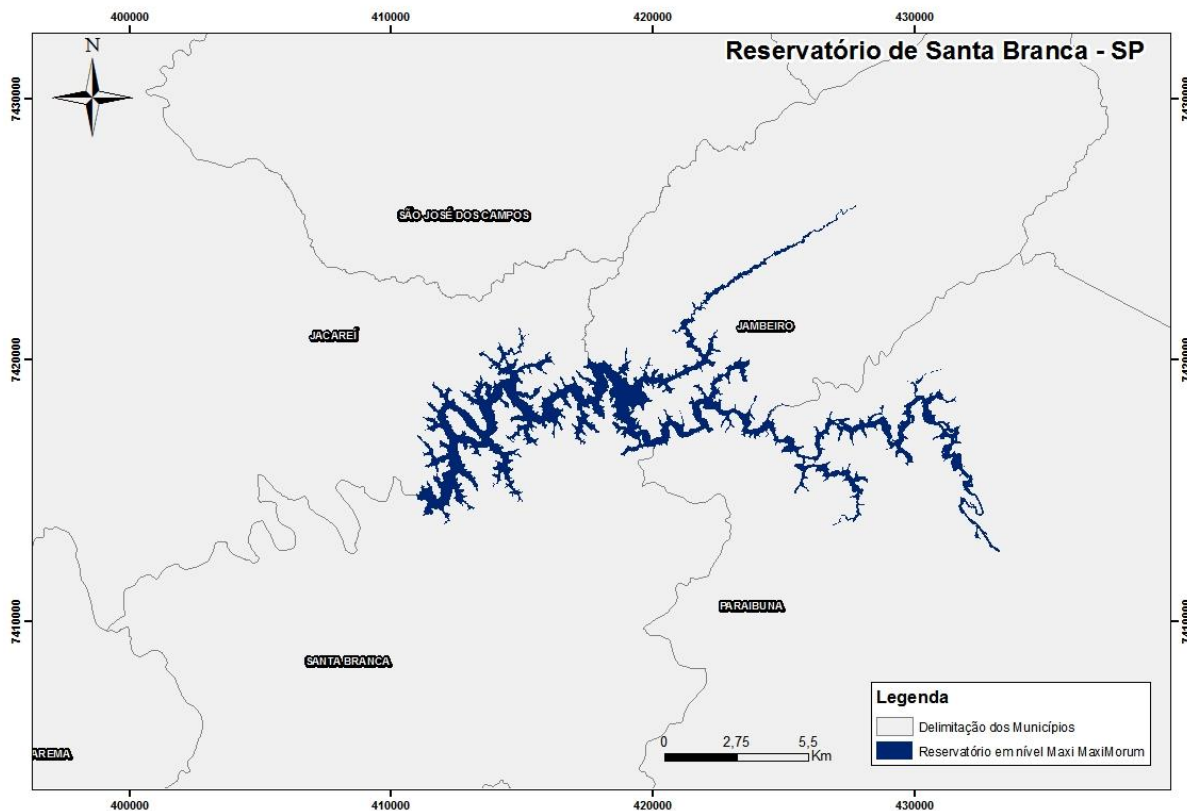


Figura 5-3: Reservatório de Santa Branca

Devido à proximidade espacial, ambas as represas, Paraibuna-Paraitinga e Santa Branca, possuem características fisiográficas e bióticas, apesar de complexas, bem semelhantes. A geologia da área é formada majoritariamente pelo Complexo costeiro (Proterozóico) e Corpos de granito (Fanerozóico e Proterozóico). Também são encontradas as unidades de Xistos (Proterozóico), Ortognáissicas (Proterozóico), Paragnáissica (Proterozóico) e o Complexo Rio Capivari (Arqueano) (IBGE, 2008).

A Geomorfologia é caracterizada pelas formações de morro, sejam paralelos, em mares de morros ou com serras restritas, além de escarpas com espigões digitados e colinas pequenas com espigões locais (IBAMA, 2008).

5.1.1.

Características Geológicas

De acordo com os estudos internos feito pela light para o controle de erosão do reservatório de Santa Branca, foi possível ter uma melhor informação sobre os aspectos geológicos e geomorfológicos do terreno.

A geologia da área é caracterizada por rochas de embasamento, de idade pré-Cambriana Superior e pertencentes ao grupo Açungui. Sobre este grupo, foram depositados sedimentos Quaternários mais novos, compostos por terraços fluviais, aluviões e colúvios. Ressalta-se ainda o desenvolvimento de solos de alteração, por ação de intemperismo, sobre as rochas do embasamento.

A área do reservatório foi objeto de processos metamórficos, que envolveram antigos sedimentos, promovendo a formação de gnaisses e, por fusão parcial (anatexia), migmatitos, preservando estreitas faixas quartizíticas e de xistos. Esse complexo litológico foi submetido a diversas fases de deformação, desenvolvendo em diversas escalas: xistosidades, dobras, lineações, raturamentos, falhamentos e boudinagem. Este último processo é a formação de corpos alongados pela ação das forças de tração que, atuando sobre camadas mais competentes, provocam sua ruptura em diversos corpos lenticulares (boudins) e a curvatura das camadas vizinhas, menos competentes, entre cada boudin.

5.1.2. Características Geomorfológicas

Na região do reservatório foram identificadas três formas de relevo. Estando a primeira às planícies aluviais ao longo dos maiores rios é de ocorrência restrita e sem expressão regional.

A segunda forma são relevos de degradação em planaltos dissecados, onde a ação contínua dos processos de renovação sobre as áreas planálticas criou um modelo de relevos que inclui grande parte da área na categoria de morros, ocorrendo ainda relevos da categoria colinosos e montanhosos, de menor expressão.

A distinção entre os sistemas existentes dentre cada uma das categorias mencionadas, foi feita levando em consideração à amplitude local, a declividade, a densidade da drenagem, a expressão de colinas em área (no caso dos relevos colinosos), as formas de topo, as formas dos pêros de vertentes, os padrões de drenagem, as formas dos vales, a extensão das planícies aluviais interiores e a existência de ravinamento nas vertentes.

A terceira forma é apresentada por relevos de transição, ocupando espaços interplanálticos, caracterizados por alta energia e intensa atuação de processos de degradação. As amplitudes, em geral, excedem em 100m, enquanto as declividades médias mostram variações significativas.

Das características descritas acima, aquelas que influenciam na suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos nas encostas marginais do reservatório são a grande inclinação e a ocorrência de rampas de colúvio, próprias dos morros paralelos, forma predominante de relevo da região em que o reservatório está inserido.

5.1.3. Características da Barragem

O reservatório de Santa Branca faz parte do complexo de usinas hidroelétricas pertencente à Light Energia S.A.. O reservatório situado nas cabeceiras da bacia, sendo a segunda usina na bacia do rio Paraíba do Sul. A

Usina teve o seu reservatório construído em 1959, com a finalidade de regularização das vazões do rio Paraíba do Sul para a transposição em Santa Cecília. No entanto, em 1999 iniciou-se o seu aproveitamento hidrelétrico com a implantação da Usina Hidrelétrica de Santa Branca, que incorporou ao parque gerador da companhia 57MW de potência instalada.

A represa de Santa Branca possui atualmente um volume útil de 307,30 hm³ na cota 622,00m e na sua cota máxima maximorum que é 623,40m possui o volume de 469,84 hm³. A tabela 5-1, mostra as características da barragem principal, do vertedouro e da tomada de água.

As estruturas do complexo compreendem:

- a) Barragem de terra compactada, com filtro de areia, cujo comprimento e altura da crista são 320,0m e 55,0m respectivamente;
- b) Vertedouro, composto de canal de adução de seção trapezoidal, estrutura de concreto com 45,0m de comprimento e 13,6m de altura e duas comportas de 18,30m x 6,37m, que são descarregadas a uma vazão de 1.300m³/s;
- c) Tomada d'água, construída em concreto armado na extremidade de montante, possui forma de torre com 52m de altura, onde estão instaladas grades, vigas de vedação e duas comportas de 7,59m x 4,36m, tipo vagão.
- d) Canal de descarga da Tomada d'água, construído em concreto de seção retangular, com comprimento de 288,89m, altura e largura de 9,75m e 20,0m respectivamente e declividade de 27,54%.

5.2.

Enchente a Jusante da Barragem de Santa Branca

No curso principal do Rio Paraíba do Sul foram criados alguns reservatórios, a partir da construção de barragens para fins de geração de energia elétrica. Esses reservatórios acumulam águas das enchentes, que são liberadas gradativamente para jusante, ao longo do ano, promovendo regularização das vazões no curso d'água. Um desses reservatórios é o de Santa Branca, objeto de estudo desta dissertação.

Nos últimos anos em face de regularização das vazões defluentes proporcionadas pela UHE Santa Branca ocorreu um aumento do número de construções de imóveis para habitação, veraneio, comercial e outros ao longo do rio Paraíba do Sul. Estas construções, em alguns casos ocupando a planície de inundação natural do rio, aliadas a grande quantidade de plantas aquáticas existentes no rio agravam os efeitos das defluências nos períodos de cheia. Ou seja, a significativa estiagem que se verificou na bacia do Rio Paraíba do Sul, levando o volume acumulado na bacia a atingir 15 % de seu valor em outubro de 2003, associada a estratégia de manter a usina com defluência mínima visando a recuperação dos níveis normais de acumulação contribuiu para incentivar a ocupação irregular da calha natural do rio.

A presença destas invasões gera pontos críticos à jusante da usina, que se referem principalmente a casas de veraneio localizadas na saída da Usina (início do trecho do Rio Paraíba do Sul no município de Santa Branca), e ao grande número de casas localizadas na beira do Rio no município de Guararema. Estas casas são atingidas quando ultrapassa o limite de restrição de 300 m³/s.

As duas favelas localizadas, no bairro Jardim do Vale (antes do centro da cidade de Jacareí seguindo o leito do Rio) e outra no bairro Jardim Flórida (após as duas pontes que cortam o Rio no Centro da Cidade) da cidade de Jacareí que já são atingidas quando o nível d'água atinge a cota 560,30 m (valor para caracterização de cheia a jusante) no posto fluviométrico do SAAE (Serviço Autônomo de Águas e Esgotos), para o qual a vazão corresponde a 355 m³/s na curva de descarga.

Além de todas as restrições citadas a acima, ainda existe uma vazão incremental na região, devido ao um rio de 68 km entre Santa Branca e Jacareí, que é variável.

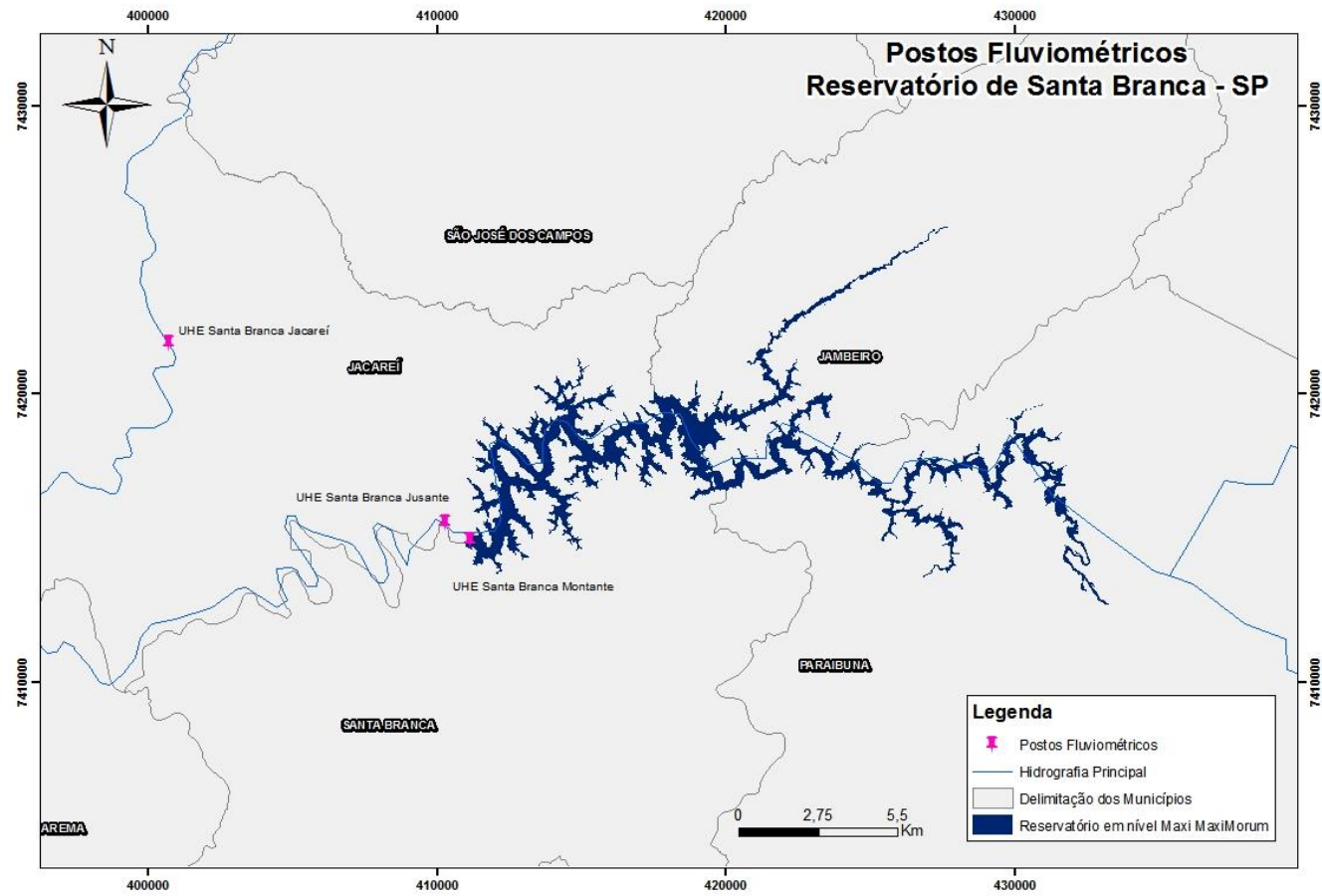


Figura 5-4: Postos Fluviométricos de Santa Branca

Como pode ser visto na figura 5-4, os postos fluviométricos de Santa Branca Jusante e Jacareí, são distantes. Tendo estes um tempo de propagação da água de 8 a 11 horas e existe um eficiente sistema de troca de informações entre a LIGHT e a Defesa Civil de Jacareí, permitindo as operações integradas, visando à minimização dos problemas na cidade.

Nos estudos para a determinação do volume de espera em Santa Branca, é adotada a vazão de restrição ⁶de 300 m³/s no posto Guararema, que fica cerca de 35 km a jusante da usina de Santa Branca.

Diante destas características, é possível ver que existem alguns problemas relacionados à ocorrência de inundações na porção à jusante da barragem. No ano de 2010, ocorreu na região uma chuva com um alto índice pluviométrico. Em 5/01/2010, foi realizada uma 1ª abertura das comportas do vertedouro devido ao grande volume acumulado entre os dias 31/12/2009 e 04/01/2010 oriundos de uma cheia de grandes proporções. Como pode ser visto na figura 5-5, a abertura da comporta foi feita em 2 estágios, um às 7 h da manhã e o segundo as 10h estabilizando a descarga a jusante em 202 m³/s às 17h.

No dia 12/01/2010, figura 5-6, é possível perceber que as vazões foram estabilizadas devido ao declive que indica o termino das chuvas.

⁶ Vazão de restrição é a descarga máxima a ser liberada na operação normal de controle de cheias em cada usina.

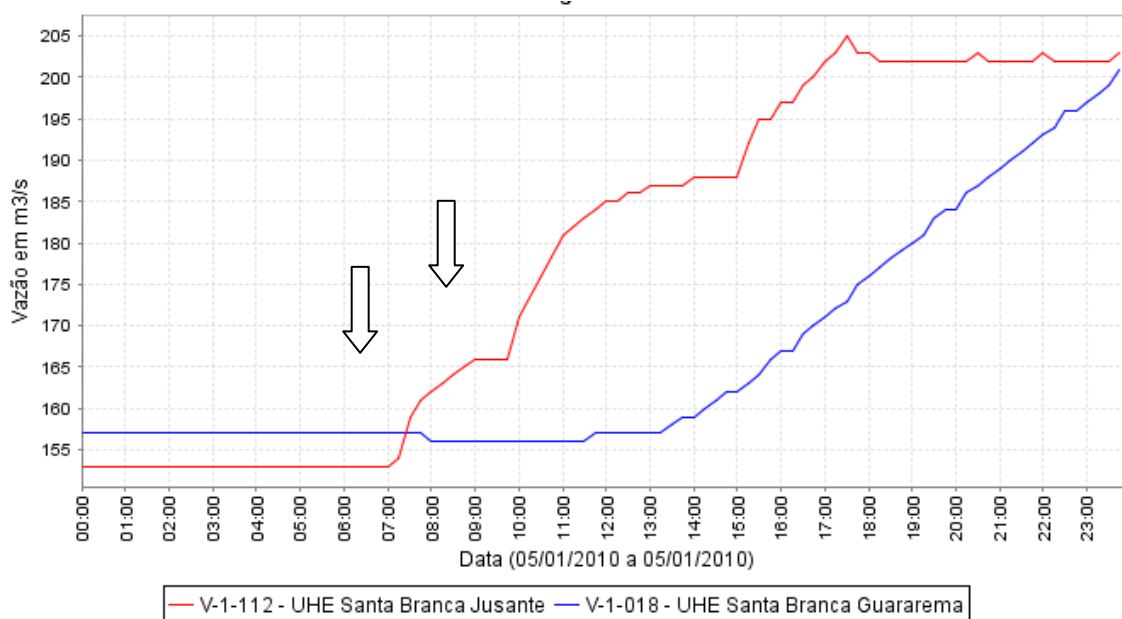


Figura 5-5: Hidrograma 1 - 05/01/2010
 Fonte: Autoria própria (baseada em dados fornecidos pela Light)

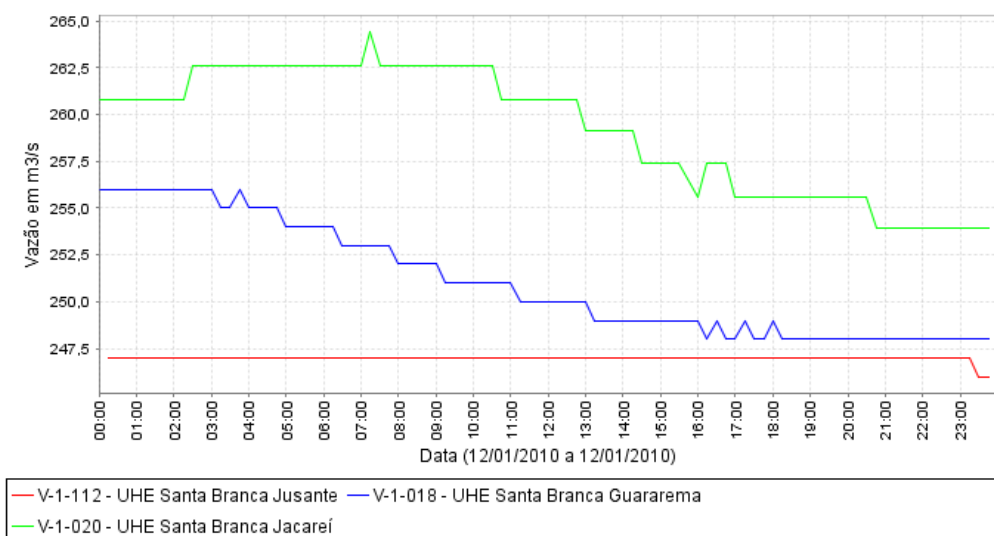


Figura 5-6: Hidrograma 2 - 12/01/2010
 Fonte: Autoria própria (baseada em dados fornecidos pela Light)

Em relação à população, no trecho de Santa Branca, não há tanta preocupação porque as partes das residências que são inundadas são áreas de lazer ou um “pér” / “deck”, exceto o Restaurante DECK que fica completamente inundado. No trecho de Guararema, a grande preocupação é o número de residências que existe na margem do Rio, aliado ao fato da existência de um problema crônico associado ao desbarrancamento das margens do rio (causando

assoreamento do mesmo), tendo em vista que anos atrás, nesta região, se fazia extração de areia.

Outro problema neste município é que existem duas ruas que, com a vazão de restrição de $300\text{m}^3/\text{s}$ no Posto de Guararema, o rio já se encontra na iminência de invadir as mesmas, resultando na possibilidade de, no caso de novas chuvas, ocorrerem novas inundações. No trecho de Jacareí, as favelas localizadas nos bairros Jardim do Vale e Jardim Flórida, preocupam com suas ocupações na margem do rio porque são atingidas com os valores atuais ($2,40\text{m}$ acima do “zero da régua” e/ou $355\text{ m}^3/\text{s}$) de restrição no Posto de Jacareí.

Da figura 5-7 até a 5-14 é se encontra um comparativo das campanhas realizadas na região no ano de 2005 e na campanha realizada em 2010 na região de Santa Branca.



Figura 5-7: Comparação da cheia na região de Santa Branca – Imóvel Residencial
Fonte: Light



Data - 05.01.2010
Vazão - 185 m³/s
Nível - 577,71



Data - 29.01.2010
Vazão - 270 m³/s
Nível - 578,58

Figura 5-8: Comparação da cheia na região de Santa Branca – Imóvel Industrial
Fonte: Light



Data - 05.01.2010
Vazão - 185 m³/s
Nível - 577,71



Data - 29.01.2010
Vazão - 270 m³/s
Nível - 578,58

Figura 5-9: Comparação da cheia na região de Santa Branca – Imóvel Residencial
Fonte: Light



Data - 05.01.2010
Vazão - 185 m³/s
Nível - 577,71



Data - 29.01.2010
Vazão - 270 m³/s
Nível - 578,58

Figura 5-10: Comparação da cheia na região de Santa Branca – Imóvel Comercial
Fonte: Light



Data - 05.01.2010
Vazão - 140 m³/s
Nível - 558,99



Data - 29.01.2010
Vazão - 334 m³/s
Nível - 560,19

Figura 5-11: Comparação da cheia na região de Santa Branca – Favela
Fonte: Light

No ano de 2010, ano associado à uma das últimas chuvas intensas na região, os valores de vazões atingidas foram de:

- Posto de Santa Branca: 270 m³/s.
- Posto de Guararema: 309 m³/s.
- Posto de Jacareí: 334 m³/s.

O conceito de Inundação Utilizado para as campanhas foi de:

- Inundação grau 1: A água atingiu a área externa da propriedade, mas não atingiu a residência principal;
- Inundação grau 2: A água atingiu as áreas externa e interna da propriedade, mas sem necessidade de desocupação;
- Inundação grau 3: A água atingiu as áreas externa e interna da propriedade, mas com necessidade de desocupação.



Figura 5-12: Inundação do coreto e da área verde dessa residência – Inundação grau 1.

Fonte: Light



Figura 5-13: Inundação do 1º pavimento e da área verde dessa residência- Inundação grau 2.
Fonte: Light



Figura 5-14: Inundação de barraco de pescador construído numa ilha - Inundação grau 3.
Fonte: Light

5.3. Operacionalização do Complexo de Lajes

Como já dito anteriormente o reservatório de Santa Branca junto com o de Funil (RJ), Jaguari (SP) e de Paraibuna (SP) abastecem toda a cidade do Rio de Janeiro, através do sistema Guandu. O Complexo de Lajes faz parte do Parque Gerador da LIGHT. Este complexo é formado por três usinas geradoras (UHE Fontes Nova, UHE Nilo Peçanha e UHE Pereira Passos), duas usinas elevatórias (UEL Vigário e UEL Santa Cecília) e pelos reservatórios (Santa Cecília, Santana,

Vigário, Tócos, Lajes e Ponte Coberta), destinados à exploração do potencial hidrelétrico do Ribeirão das Lajes e do rio Paraíba do Sul.

Estes reservatórios ajudam na regularização das vazões no curso d'água, já que, acumulam grande parte das águas de enchentes, e estas são liberadas gradativamente para jusante. Como resultado da operação dos reservatórios, sua capacidade de acumulação e a situação dos níveis do leito do rio a jusante, há uma compensação entre os valores máximos e mínimos das vazões.

O Canal de São Francisco, chamado inicialmente de Ribeirão das Lajes (e depois Rio Guandu) é o curso de água mais importante da região, não só pelo volume, como também, por ser o principal manancial de abastecimento público da cidade do Rio de Janeiro. Este canal, recebe as vazões regularizadas da Usina Hidrelétrica de Ponte Coberta, usina de Pereira Passos, que faz parte do Complexo LIGHT.

Na figura 5-15 pode-se visualizar um esquema que representa o Complexo de Lajes e as múltiplas estruturas componentes do mesmo.

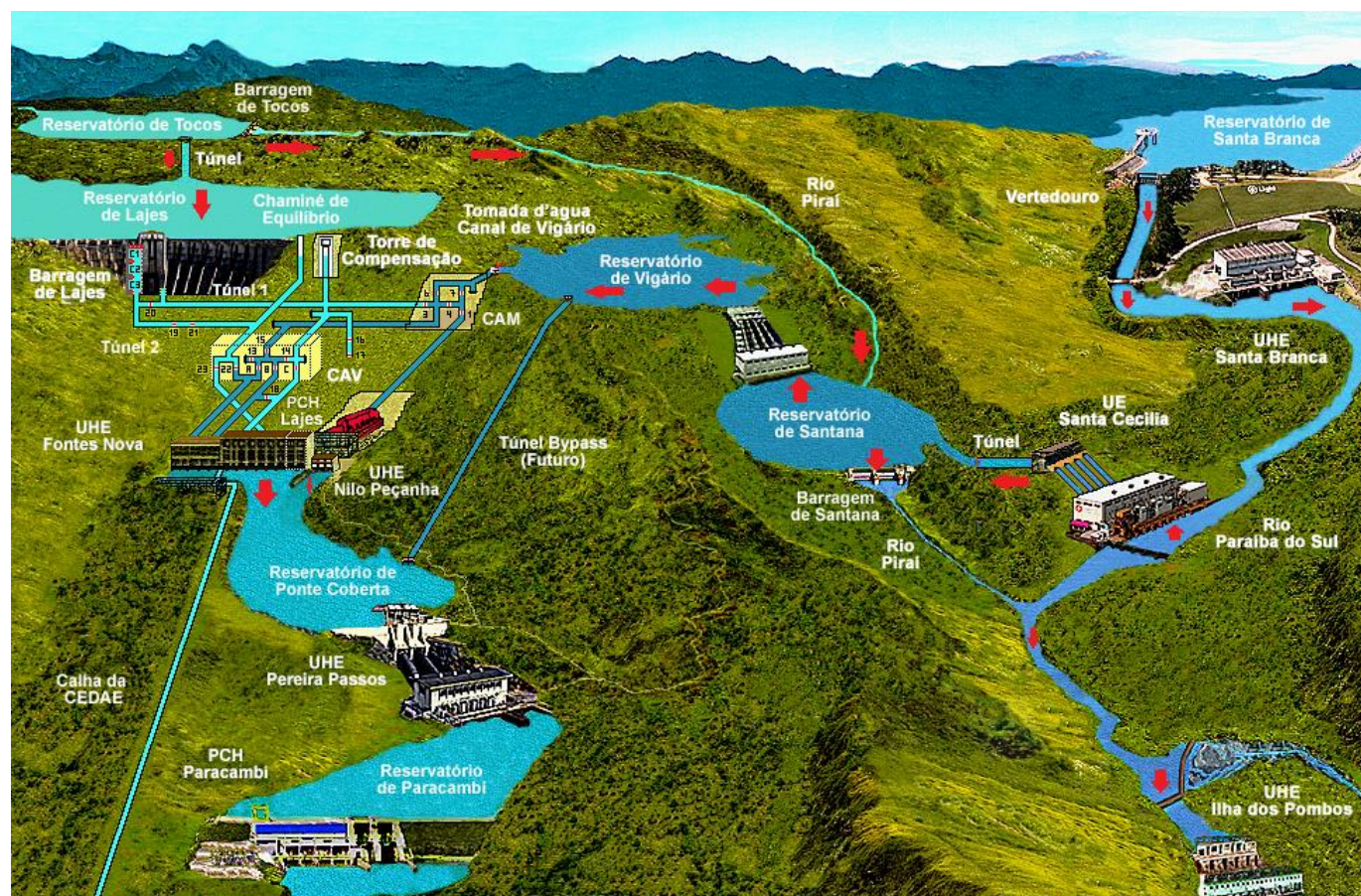


Figura 5-15: Esquema Geral do Aproveitamento Hidrelétrico do Paraíba do Sul
Fonte: Light

O Ribeirão das Lajes, por apresentar um trecho extremamente íngreme, com queda localizada de mais de 300 m, teve seu potencial energético aproveitado desde o início do século 20, com a construção da Usina Hidrelétrica de Fontes.

No seu curso médio, encontra-se localizado o reservatório de Lajes. Além da contribuição natural da bacia a montante, esse reservatório recebe as vazões transpostas do rio Pirai, através do túnel de Tocos. A jusante desse reservatório, o Ribeirão das Lajes recebe as águas transpostas do rio Paraíba do Sul através do sistema de bombeamento Santa Cecília–Vigário.

Além do desvio de águas do rio Pirai para o Ribeirão das Lajes, que é feito através do túnel de Tocos, a operação do Complexo injeta na bacia do rio Pirai e, posteriormente no Ribeirão das Lajes, águas derivadas do rio Paraíba do Sul.

O desvio, denominado Paraíba-Pirai, transfere as águas dos rios Pirai e Paraíba do Sul para a bacia hidrográfica do rio Guandu. Este desvio entrou em operação em 1952 e representa a transferência de uma vazão média de 146 m³/s. As obras incluíram:

- ✓ Usina elevatória de Santa Cecília, com capacidade de bombeamento de 160 m³/s, barragem, túnel e canal para encaminhamento da água para o reservatório de Santana;
- ✓ Barragem e reservatório de Santana, de modo a encaminhar para a usina de Vigário as vazões bombeadas do rio Paraíba do Sul;
- ✓ Usina elevatória de Vigário, com capacidade de bombeamento de 190 m³/s, para bombeamento das águas do reservatório de Santana para o de Vigário;
- ✓ Reservatório de Vigário;
- ✓ UHE Nilo Peçanha.

O desvio Paraíba-Pirai veio a constituir-se no mais importante reforço para o suprimento de água para a população da região metropolitana do Rio de Janeiro.

Complexo hidroelétrico de Lajes
sub-sistema **Paraíba – Pirai**

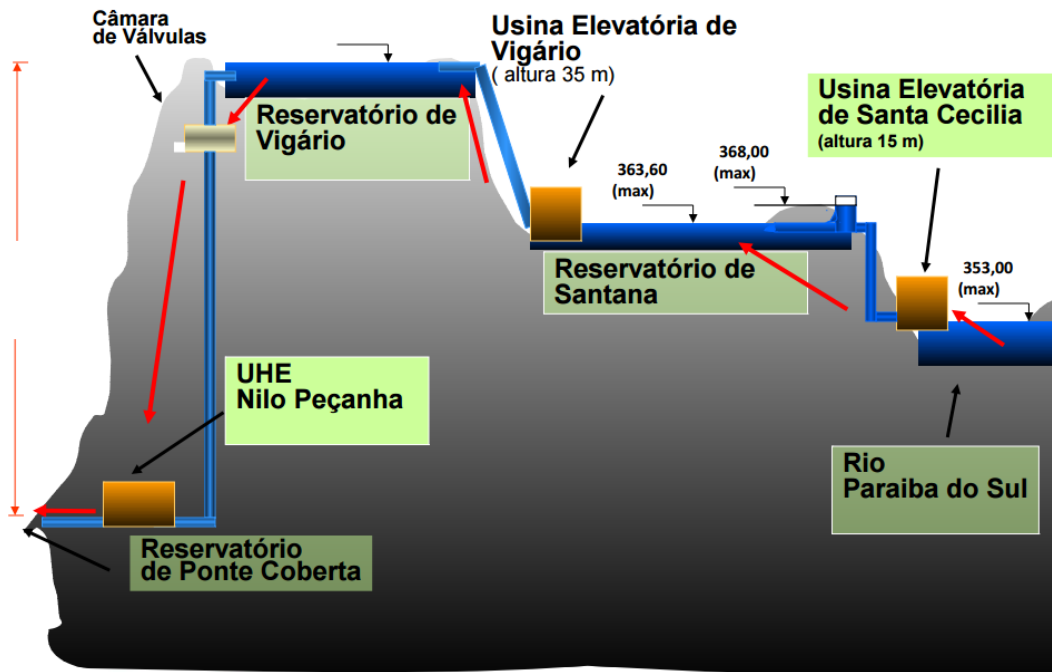


Figura 5-16: Perfil Esquemático Desvio Paraíba-Pirai
Fonte: Light

6. Discussão e Análise dos Resultados

6.1. Mapas de Potencial de Inundações

Através da modelagem hidrológica foi gerada a manchas de inundação e esta foi sobreposta no mapa da região da barragem de Santa Branca. É possível perceber que em caso de rompimento da barragem as cidades que serão afetadas são: Santa Branca, Guararema e Jacareí.

Para encontrar a mancha de inundação no HEC-RAS, foi considerado um evento de cheia extremo e, para tal, foi utilizada uma vazão com tempo de retorno de 1000 anos. O colapso da estrutura ocorre no momento do pico de vazão, de 77855,045 m³/s em um tempo de ruptura de 2,5h.

Os mapas produtos foram feitos através de dados disponibilizados pelo censo do IBGE (2010) para contabilização de domicílios, pavimentação, saneamento e arborização na região. Primeiramente, foi feito um buffer de 3km para delimitar a área de influência da mancha de inundação. Depois, os dados foram reclassificados de 1 a 5, sendo 1 o pior caso e 5 o melhor.

Mapa de domicílios permanentes onde existe arborização

Devido ao alto grau de impermeabilização, verticalização, asfaltamento e pavimentação, entre outros fatores, a utilização de arvores de médio e grande porte é indispensável para a mitigação dos efeitos causados pela ação humana sobre o meio. Ademais, folhas, galhos superficiais e casca das árvores interceptam e armazenam por algum tempo água das chuvas, reduzindo o escoamento superficial e atrasando o início do pico de enchente.

Segundo dados do CUFR (2002), uma árvore de porte médio pode interceptar em torno de 12.795 L de água de chuva por ano. Silva et al. (2007), algumas espécies de maior porte usadas na arborização urbana, como a Sibipiruna e a Tipuana, podem reter até 60% da água nas duas primeiras horas de chuva, liberando-a aos poucos. O aumento de cobertura vegetal e a deposição de matéria

orgânica melhoram a capacidade de infiltração da água no solo, contribuindo assim para a recarga do lençol freático e diminuindo assim problemas enfrentados pelas metrópoles no que se refere a enchentes e suas consequências.

Na figura 6-1 é possível perceber que a região por onde a inundação atinge, tem acima de 60% de área arborizada. Isso ajudará a segurar a cheia no rompimento, diminuindo os impactos na região.

Porém, alguns impactos vêm junto com a arborização, impactos estes como: entupimento de calhas e rede de drenagem pela queda das folhas, interferência na iluminação, entre outros, aumentando assim os custos com manutenção. Por isso, se deve fazer uma coleta de resíduos de varrição (galhos e folhas) e poda eficientes na região, ajudando assim em um melhor funcionamento do sistema de drenagem.

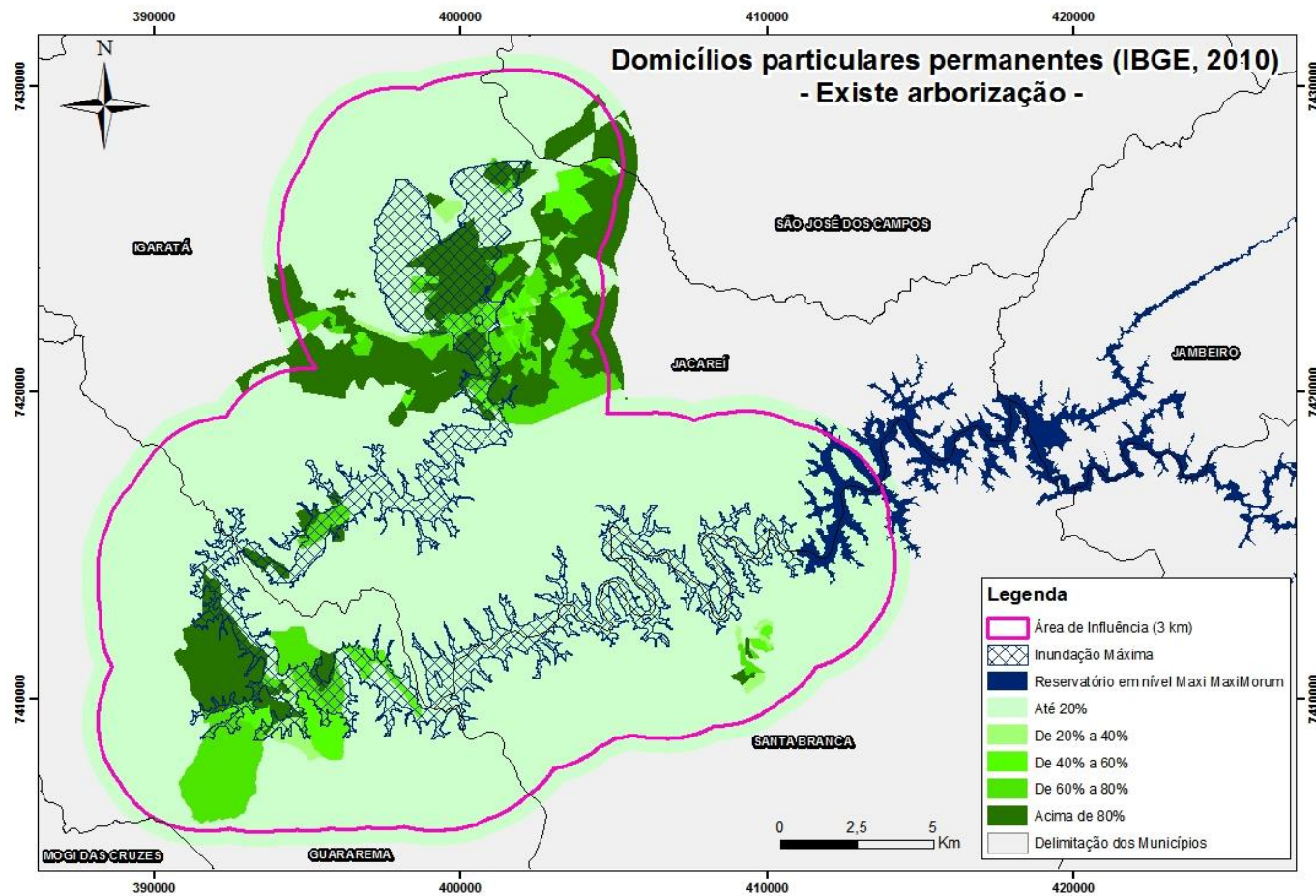


Figura 6-1: Mapa de domicílios permanentes onde existe arborização
Fonte: Autor próprio

Mapa de domicílios permanentes onde existe pavimentação

A água tem três caminhos a seguir: evaporação, infiltração e escoamento superficial. Quando as chuvas são muito intensas e a umidade é elevada, praticamente não há evaporação e, com a impermeabilização dos solos (com asfaltos e calçadas), o escoamento superficial tende a aumentar intensificando o poder das enchentes.

A impermeabilização do solo nas cidades é um fenômeno bastante conhecido e causa impactos importantes sobre a capacidade de recarga do lençol freático e sobre as enchentes e as enxurradas que atingem as cidades.

A figura 6-2 mostra que as cidades de Guararema e Jacareí já estão bem evoluídas na parte de pavimentação de rua, estando estas acima de 60% pavimentadas. Como a impermeabilização é um agravante para o escoamento superficial, isso acaba acelerando o pico de uma cheia. Como mitigação, seria necessário que a cidade colocasse pavimentação permeável, facilitando a infiltração na área.

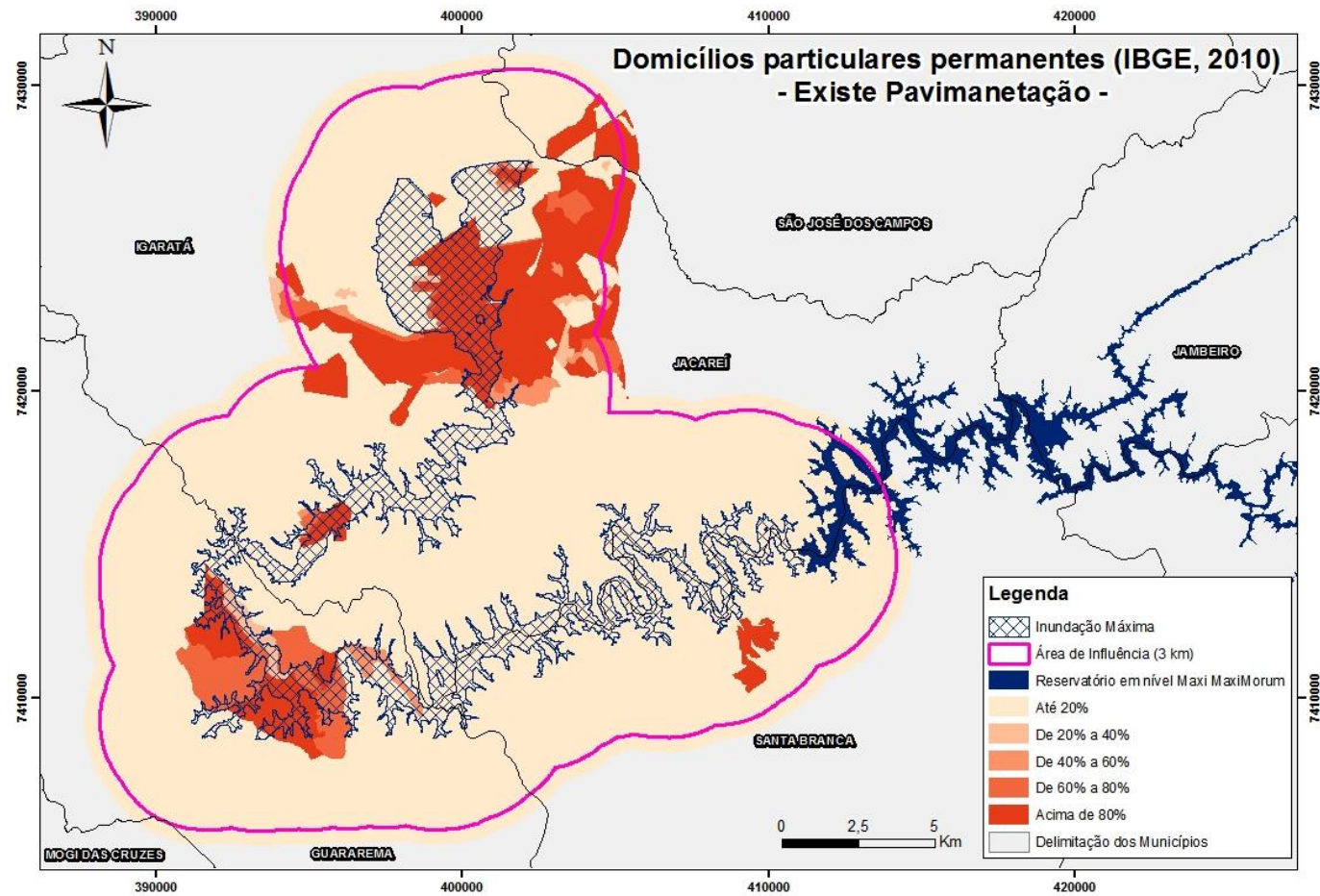


Figura 6-2: Mapa de domicílios permanentes onde existe pavimentação.
Fonte: Autor próprio

Mapa de domicílios permanentes onde existe bueiro

O problema da pavimentação das ruas e a cimentação de quintais e calçadas poderia ser amenizado se ocorresse uma correta instalação de sistemas de drenagem, que são meios para ajudar a conter ou a escoar o curso das enxurradas por meio de “bueiros”, “piscinões” ou dutos para levar o excesso de água para outra localidade. Porém, geralmente esses sistemas são ineficientes e mal construídos.

A falta de planejamento da drenagem urbana no Brasil e a limpeza da infraestrutura é precária, os resíduos sólidos carregados através do sistema de drenagem são os mais variados possíveis. Desta forma a probabilidade de alguns desses bueiros estarem entupidos é bastante elevada. Com isso, a eficácia deles, na ausência de serviços de varrição e coleta de resíduos, em relação a uma cheia é praticamente nula e o escoamento superficial se prolonga por mais áreas.

A figura 6-3 demonstra que a quantidade de bueiros existente na região é pouca, ficando boa parte abaixo de 60%. Além disso, como boa parte desses bueiros, provavelmente, não tem uma manutenção adequada, seria necessário fazer um estudo de coleta de resíduos da cidade. Com isso, evitaria que grande parte dos resíduos sólidos sejam carregados em período de cheia dificultando ainda mais a drenagem.

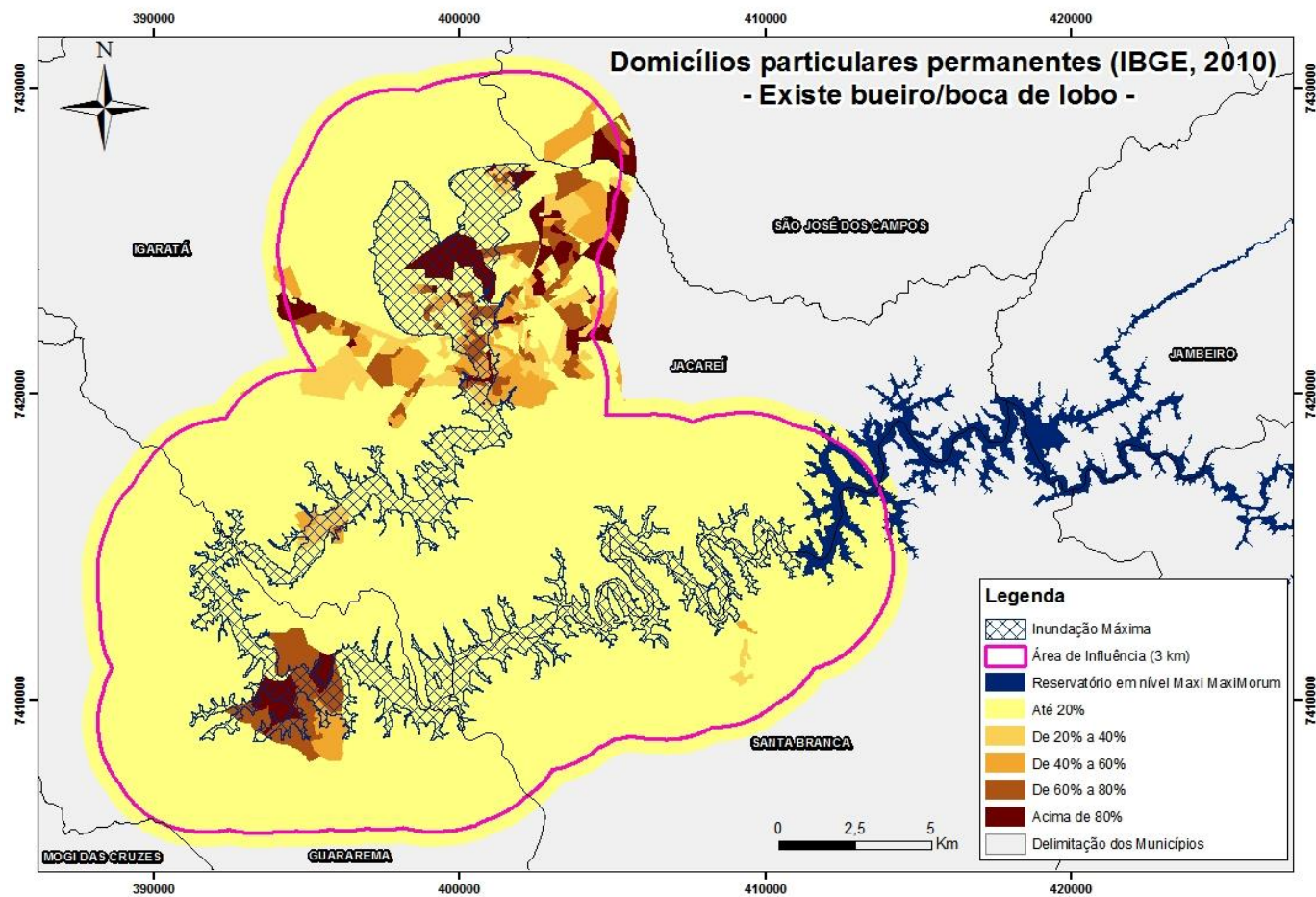


Figura 6-3: Mapa de domicílios permanentes onde existe bueiro
Fonte: Autor próprio

Mapa de Potencial de Arrastamento

Através da modelagem hidrológica (baseado no HEC-RAS) foi possível gerar um raster com os dados contidos no hidrograma de ruptura da barragem. Com isso, foi criado o mapa de arrastamento, que nada mais é que o Risco hidrodinâmico. Segundo Balbi (2008), a capacidade da cheia de provocar danos a pessoas, animais ou bens materiais é relevante e tal ameaça pode ser conferida ao Risco Hidrodinâmico que compreende o produto da profundidade da inundação (m) e a velocidade do fluxo (m/s).

O hidrograma abaixo, figura 6-4, mostra o comportamento da onda a distância de 10km a jusante da barragem. Foi verificado um alto valor nesta combinação, considerando que, de acordo com a tabela 6-1, valores acima de 7 tem potencial para destruir edificações (os picos chegam a 100~150 m²/s).

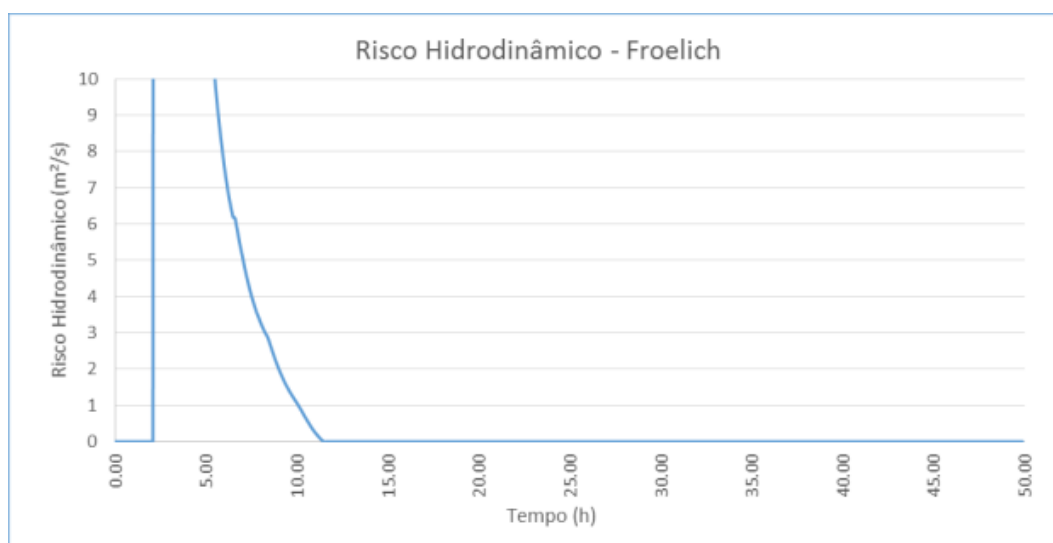


Figura 6-4: Risco Hidrodinâmico - método Froelich
Fonte: Light

Tabela 6-1: Definição das consequências do risco hidrodinâmico

Parâmetro HxV (m^2/s)	Consequências
<0,5	Crianças e deficientes são arrastados
0,5 – 1	Adultos são arrastados
1 – 3	Danos de submersão em edifícios e estruturais em casas fracas
3 – 7	Danos estruturais em edifícios e possível colapso
> 7	Colapso de certos edifícios

Fonte: Balbi, 2008 apud SYNAVEN et al., 2000

Na figura 6-5 é apresentado o mapa de risco hidrodinâmico no instante final do tempo em potencial de alerta à zona de auto salvamento, para o trecho em questão. É possível perceber que existe uma grande possibilidade de o rompimento da barragem causar danos severos em quase todas as áreas que a cheia irá percorrer. De acordo, com o parâmetro da tabela 6-2, na maior parte da área chegará a ter colapso de edifícios.

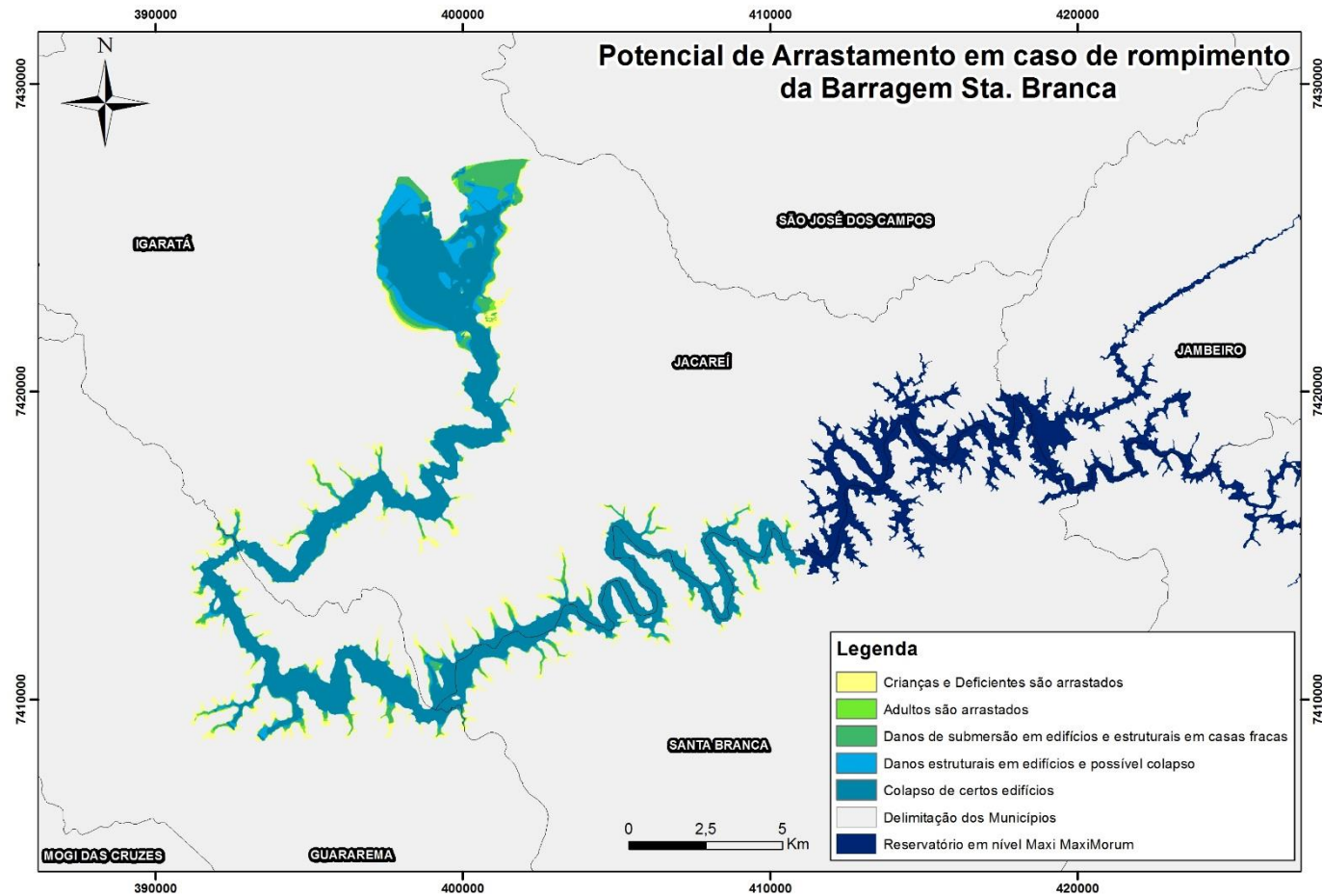


Figura 6-5: Mapa de Potencial de Arrastamento
Fonte: Autor próprio

Mapa de Potencial de Inundação

O mapa de potencial de Inundação é o produto final dessa dissertação, ele foi desenvolvido através do algoritmo encontrado pelo método AHP unindo as variáveis de domicílios permanentes com pavimentação, arborização e bueiros, de acordo com IBGE 2010. Foi feito um buffer de 3 km da mancha de inundação e as variáveis citadas, foram reclassificadas de 1 a 5, tabela 6-2, sendo a classificação 1 com (Muito Baixo Potencial) como o melhor cenário e a classificação 5 (Muito Alto Potencial) como o pior cenário, ou seja, um grande aglomerado de domicílios.

Tabela 6-2: Tabela reclassificação

Porcentagem	Pavimentado	Bueiro	Arborização
Até 20	1	5	5
De 20 a 40	2	4	4
De 40 a 60	3	3	3
De 60 a 80	4	2	2
De 80 a 100	5	1	1

Para cada uma das áreas de risco foi feita uma estimativa sobre o número de habitações envolvidas e o número de habitantes. O número de habitantes foi definido de duas formas, sendo a primeira através do shapefiles do setor censitário de 2010 do IBGE e a segunda forma foi através da contagem das habitações registradas nas fotografias aéreas digitais da área, enquanto o número de habitantes foi estimado a partir do cálculo da média de habitantes por moradia do IBGE, que é 3,4 habitantes por habitação.

Na primeira forma, foram selecionados apenas o quantitativo de domicílios permanentes, tabela 6-3, que possuem as variáveis de pavimentação, arborização e bueiros. Atentar que, os polígonos dos setores censitários extravasam a mancha de

inundação e o quantitativo de domicílios, na tabela 6-3, pode estar associado em todas as variáveis, já que estamos apresentando por temas. Devido a esse extravasamento, para se ter uma quantidade de pessoas mais aproximada possível, foi feita a contagem de domicílios, listados na tabela 6-4.

Tabela 6-3: Quantidade de Domicílios Permanentes

Municípios/Variáveis	Pavimentado	Bueiro	Arborização
Guararema	3.416	2.658	2.618
Jacareí	51.601	22.985	48140
Santa Branca	2.856	352	1.313

Fonte: IBGE, 2010.

Tabela 6-4: Quantitativo aproximado de habitação e de habitantes dentro da mancha

Municípios	Habitação	Habitantes
Guararema	3246	11036
Jacareí	5896	20047
Santa Branca	443	1507

Com o aumento da urbanização, a estrutura do solo acaba tendo uma mudança e isso acaba desequilibrando o fluxo natural das águas, alterando assim o balanço hídrico das águas urbanas e acelerando o processo de inundação. As características entorno dos domicílios nos permite entender as condições de vida da população, em relação a circulação de pessoas: devido a existência de calçadas, ruas pavimentadas, e das condições do meio ambiente: existência de esgoto, de bueiros, entre outros.

Ademais, em função da distribuição espacial do Mapa de Potencial de Inundação, é possível perceber através da figura 6-6 que as cidades mais atingidas em questão populacional, de acordo com a mancha de inundação, são: Guararema e Jacareí. Estas cidades estão nas zonas de muito alto potencial.

Na figura 6-7 é possível verificar o limite da zona de auto salvamento⁷, que está indicado pela linha roxa, possui poucos domicílios, facilitando assim a retirada das pessoas e diminuindo os danos causados. A partir deste perímetro a obrigação de aviso e retirada da população a jusante da barragem é da defesa civil de cada município. Na zona de auto salvamento moram, aproximadamente, 296 pessoas

⁷ Corresponde à zona próxima da barragem em que o aviso à população é de responsabilidade do empreendedor, variando entre 5 a 10 km.

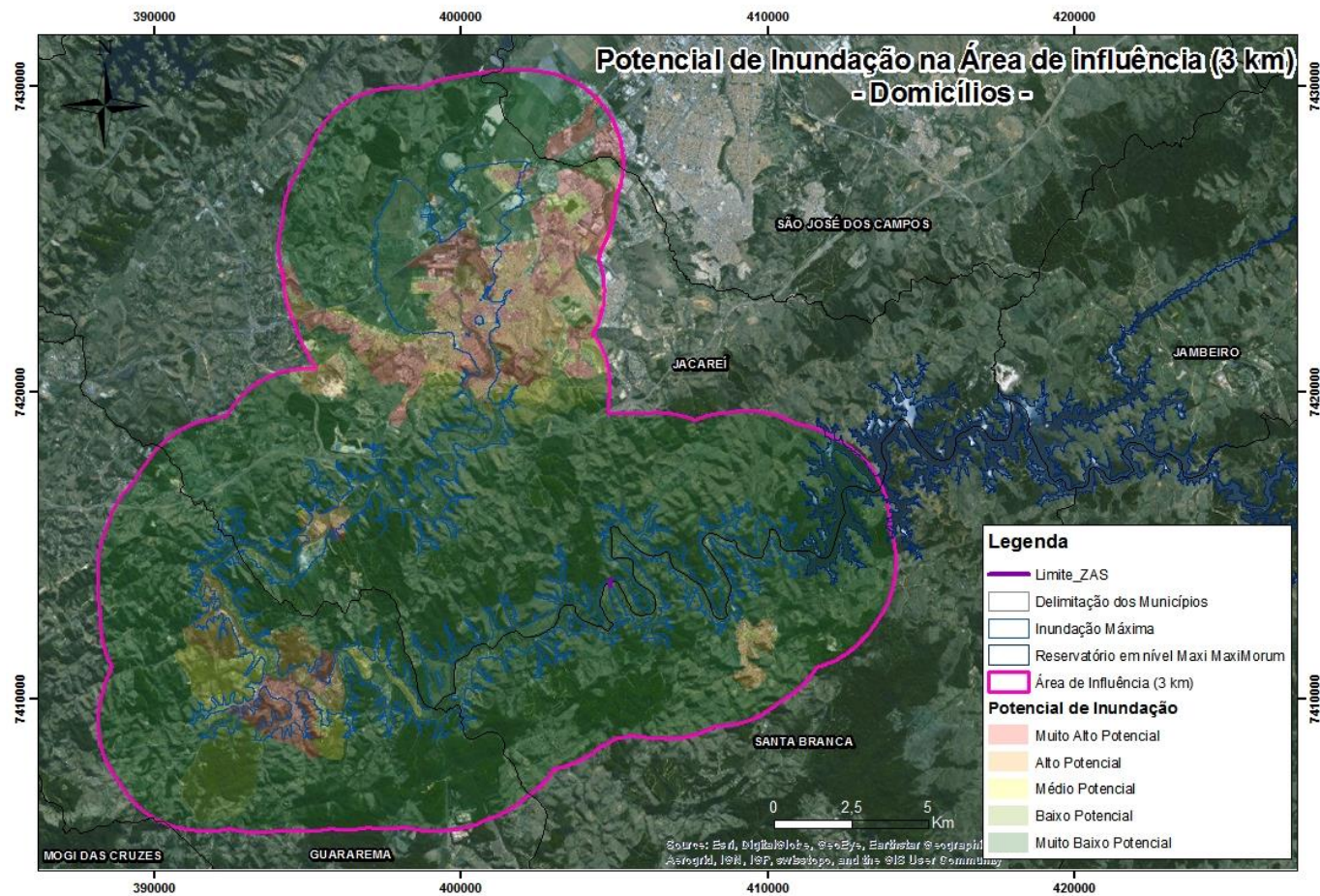


Figura 6-6: Aglomerados de domicílios no município de Jacareí.
Fonte: Google Maps

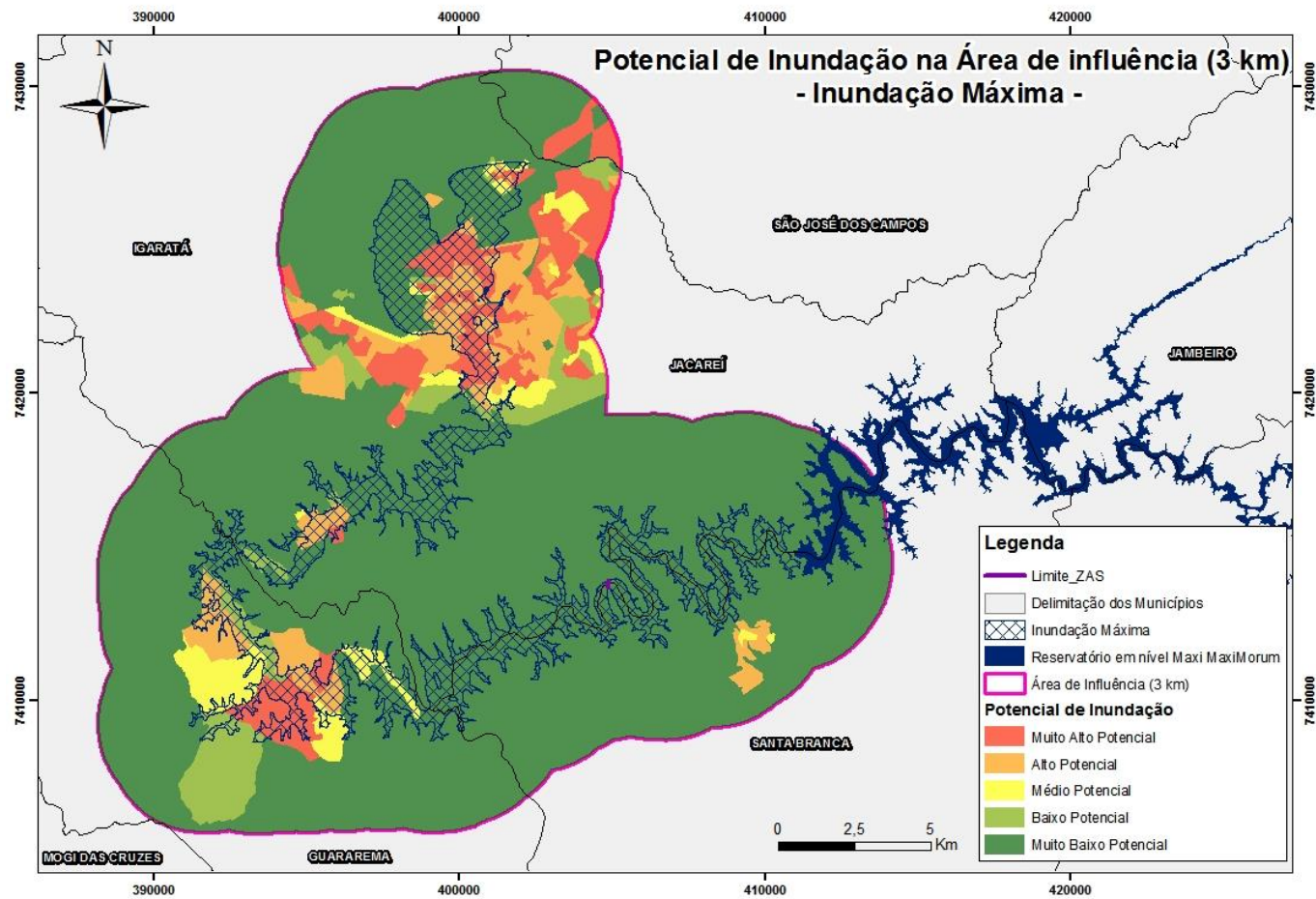


Figura 6-7: Mapa de Potencial de Inundação
Fonte: Autor próprio

7. Conclusões

Este trabalho foi realizado com o intuito de identificar os pontos críticos provocados pela onda de cheia nos municípios de Guararema, Jacareí e Santa Branca. Com base nos resultados obtidos e apresentados, foi possível realizar uma análise e chegar a conclusões de quais seriam alguns dos efeitos de um rompimento da barragem nos moldes projetados. A simulação retratou como seria o comportamento da inundação a jusante da barragem se viesse a ocorrer o seu rompimento, considerando o volume de água liberado no caso do reservatório em seu nível máximo.

De acordo com os resultados apresentados no item 6, é possível concluir que é inevitável a destruição de algumas áreas caso ocorra o rompimento da barragem, ao total serão, aproximadamente, 32.590 habitantes atingidos. As variáveis estudadas, não acabariam com a destruição causada por uma cheia de grande porte, como é a cheia por rompimento de barragem. Porém, essas variáveis seriam úteis para aumentar o tempo de ruptura, já que no caso da UHE Santa Branca o tempo para a vazão de pico de 77.855,045 m³/s foi de apenas 2,5h.

Se medidas estruturais fossem melhoradas/construídas na região está destruição poderia ser amenizada. A melhoria da drenagem de uma cidade se dá com: a arborização, construção de bueiros adequados, a utilização de uma pavimentação infiltrável e em alguns casos a construção de reservatórios de retenção para segurar uma grande cheia é necessário.

Além disso, através dos resultados obtidos no estudo realizado foi possível concluir que o método AHP, aliado a técnicas de geoprocessamento se torna uma ferramenta bastante útil, facilitando a estruturação de problemas, e a modelagem matemática, além de auxiliar em processos de decisão complexos. Grande parte dos problemas relacionados com inundações, podem ser trabalhados através do SIG escolhido, e através dele processar, armazenar e editar uma grande quantidade de dados espaciais, com agilidade e de forma econômica.

Em relação a comparação da mancha elaborada neste trabalho com a que foi feita no estudo de ruptura de barragens para a Gestão do Risco de Inundações do

Paraíba do Sul da ANA, pode se perceber que contemplou quase as mesmas áreas, tendo algumas discordâncias ao longo da mancha.

O presente estudo, auxilia na construção do Plano de Ação de Emergência (PAE) de uma barragem. É possível adotar medidas mitigadoras, e medidas estruturais, para evitar maiores catástrofes em caso de rompimento da barragem. Do mesmo modo que, um treinamento para população em relação ao alerta de rompimento é necessário para se evitar mortes.

Por fim, foi possível perceber, que até para motivos de cheias regulares a drenagem da cidade não é eficiente, devido a grandes áreas com falta de uma infraestrutura adequada e com isso, este trabalho pode ser usado para contribuir para o plano de drenagem da cidade ao apresentar as falhas estruturais que podem corroboram com o aumento do risco dos habitantes de determinada região.

Para estudos futuros Cabe estudar outras variáveis para o trabalho, como por exemplo: a organização espacial, uso e ocupação do solo, vegetação, erosão, entre outros. Ademais, um estudo por rompimento de cascatas também é necessário, fazendo assim uma melhor comparação com o estudo de ruptura feito pela Agência Nacional de Águas.

8.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, A. B. **Emergências e Gestão do Risco**. Curso de exploração e segurança de barragens - Instituto da Água, INAG, Lisboa, 2001.

ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas. Engecorps, revisão 4, 2012**. Disponível em: <http://gripbsul.ana.gov.br/rels/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens/R06.Estudo%20de%20Ruptura%20de%20Barragens.Tomo_I_Texto.pdf>

BRASIL, L. S. S. **Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem**. Estudo de Caso: Barragem de Rio de Pedras. Belo Horizonte. 201 p. (Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

BRASIL. **Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. In: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Minas Gerais, 2015. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf. Acesso em: 07 de dezembro 2017.

BRASIL. **Política Nacional de Segurança de Barragens. Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm>. Acesso em: novembro de 2016.

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

CÂMARA, GILBERTO; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio M. V. (orgs.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. EMBRAPA: Brasília, 2004. Disponível em: . Acesso em: 11 de novembro de 2017.

CARDEAL DE SOUZA, V.L,2003. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidroelétricas**. ELETROBRAS, outubro 2003.

CHILDS, C.; KABOT, G.; MURAD-AL-SHAUK, M. **Working with ArcGIS Spatial Analyst**. ESRI,2004.

COSTA, HELDER GOMES. **Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão**. Niterói: H.G.C., 2002

CPRM. **Definição da Planície de Inundação da Cidade de Governador Valadares**. Relatório Técnico, Belo Horizonte, 2004.

CUFR – CENTER FOR URBAN FOREST RESEARCH. Fact sheet 4: **control stormwater runoff with trees**. [2002]. Disponível em: <<http://www.fs.fed.us/psw/programs/cufr/products>>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2017

FABRIANI, C. B. **Por Uma Política de Conservação da Natureza: O Desafio de Petrópolis**. Revista de Administração Pública Vol. 25. Rio de Janeiro, abr./jun. 1991, Fundação Getúlio Vargas.

FARIA, M. **Barragens de rejeito já causaram diversas tragédias em Minas Gerais**; Belo Horizonte, 5 nov. 2015. Disponível em: http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/11/05/interna_gerais,705019/barragens-de-rejeito-ja-causaram-diversas-tragedias-em-minas-gerais-r.shtml. Acesso em: 19 de fevereiro de 2017.

FRANCA, M J; BRAUNSCHWEIG, F; ALMEIDA, A B. **RODAB: um novo modelo de ruptura de barragens baseado em resultados experimentais**. 7º congresso de água. Associação portuguesa de recursos hídricos, 2004.

FUHRMANN, Leonardo. **Barragem de St. Francis**. Revista Superinteressante, 2015 < <http://super.abril.com.br/tecnologia/barragem-de-st-francis>>. Acesso em 13 de dezembro de 2016.

G1 GLOBO, < <http://g1.globo.com/espirito-santo/noticia/2015/11/conheca-o-rio-doce-antes-e-depois-da-enxurrada-de-lama.html>> Acesso em: 9 de janeiro de 2016

GONÇALVES, E.; VESPA, T.; FUSCO, N. **Tragédia Evitável**. Revista Veja. Minas Gerais, Edição 2.452, ano 48, nº 46, p. 70-71, 2015

GUANAES, LUIZ FELIPE. **Paisagem, Espaço e Sustentabilidade: Uma perspectiva multidimensional da Geografia**. Editora PUC, Rio de Janeiro, 2007, 83p.

HEC (Hydrologic Engineering Center). 1997. **HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual**. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

Hidroweb: **Sistema de Informação Hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em novembro de 2016.

IBAMA. **Relatório Acidentes Ambientais 2008**. Brasília: IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2009.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. <<http://www.cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?lang=&codmun=330400&search=%7Cpirai>> Acesso em 11 de janeiro de 2017

LIGHT ENERGIA S/A. Dados internos da empresa. Rio de Janeiro, 2016.

MAINDMENT, D. **Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcView.** Center for research in water resources. Austin, Texas, 1999. 24p. <www.caee.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>

MAINDMENT, D. **Arc Hydro GIS for water resources.** Redlands, California-USA: ESRI Press, 2002. 203p.

MEDEIROS, Carlos Henrique. **Segurança e Auscultação de Barragens. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Salvador, 2003, p17.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, PROÁGUA/SEMI-ÁRIDO. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (MSIB).** Departamento de Projetos e Obras Hídricas – DPOH, Brasília-DF, 2002.

NASCIMENTO, G. A., e ORTH, N. M. **Adequate Mapping-a non estrutural Measure on urban drainage.** Workshop Internacional sobre medidas não estruturais para controle de inundações em áreas urbanas, 22 a 24 de Abril, 1998, São Paulo.

OLIVEIRA, N. Minas já sofreu com outros rompimentos de barragens. O Tempo, 11 mai. 2015. Disponível em: . Acesso em: 11 out. 2015.

PERALTA, FRANCISCO. **Análisis Espacial con Datos Raster en ArcGIS Desktop 9.2, 11 p.** Disponível em: <http://foro.gabrielortiz.com/descargas/Analisis_Espacial_con_Datos_Raster_en_Spatial_Analyst.pdf> . Acesso em 12 de dezembro de 2016

PEREIRA, GILBERTO C. **Dados geográficos: aspectos tecnológicos.** In: PEREIRA, Gilberto C.; ROCHA, Maria C. F. (orgs.). **Dados geográficos: aspectos e perspectivas.** Salvador: Quarteto / UFBA / Faculdade de Arquitetura, 2002.

RIBEIRO, LUIZA. **Histórico de Enchentes no Brasil.** Aquafluxus, 2014 <<http://www.aquafluxus.com.br/historico-de-enchentes-no-brasil/>>. Acesso em 05 de janeiro de 2017.

SAATY, T.L. (1980). **The Analytic Hierarchy Process.** New York: McGraw-Hill.

SAATY, T.L. (1991). **Método de Análise Hierárquica.** São Paulo, Editora Makron.

SILVA, L.F.; LIMA, A.M.L.P.; SILVA FILHO, D.F.; ROLLO, F.M.A. **Capacidade de interceptação da chuva em duas espécies, mais evidentes em arborização urbana.** Congresso Brasileiro de Arborização Urbana, Vitória, 2007.

SPRING: **Tutorial de Geoprocessamento**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE / Divisão de Processamento de Imagens - DPI. Disponível em: Acesso em: 26 de dezembro 2016.

TEKNOMO, K. **Analytic Hierarchy Process (AHP) tutorial**, 2006.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. In: Tucci,C.E.M.; Porto, R.L.L.; Barros, M.T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1995, V.5, p.15-36.

TUCCI, C.E.M., **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

US Army Corps of Engineers-USACE. **HECgeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS Using ArcGIS - User's Manual. Hydrologic**. Engineering Center, Davis, CA, USA. 2009b. 246 p. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/>>. Acesso em: 26 de dezembro 2016.

WARD, R. **Floods: A Geographical Perspective**. 1. ed. New York: Jonh Wiley & Sons. 1978. 244 p.