



Universidade Federal
de São João del-Rei

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

RAMON TEIXEIRA MARQUES ALVES
MATEUS FRANCISCO DE ANDRADE

**CONSTRUÇÃO DE MAPA DE INUNDAÇÃO EM ÁREA URBANA:
ESTUDO DE CASO DA CIDADE DE CONSELHEIRO LAFAIETE-MG**

OURO BRANCO-MG
JUNHO DE 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA**

**RAMON TEIXEIRA MARQUES ALVES
MATEUS FRANCISCO DE ANDRADE**

**CONSTRUÇÃO DE MAPA DE INUNDAÇÃO EM ÁREA URBANA:
ESTUDO DE CASO DA CIDADE DE CONSELHEIRO LAFAIETE-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei,
Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Emmanuel Kennedy da Costa
Teixeira

**OURO BRANCO-MG
JUNHO DE 2019**

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB) e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A553c

Andrade, Mateus Francisco de.

Construção de mapa de inundação em área urbana: estudo de caso da cidade de Conselheiro Lafaiete, MG / Mateus Francisco de Andrade; Ramon Teixeira Marques Alves; orientador Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira. — Ouro Branco, 2019.

48 p. il.

Trabalho de Conclusão (Graduação – Engenharia Civil) – Universidade Federal de São João del-Rei, 2019.

1. Modelagem matemática em hidráulica 2. Mapa de inundação 3. Drenagem urbana 4. Conselheiro Lafaiete I. Alves, Ramon Teixeira Marques II. Teixeira, Emmanuel Kennedy da Costa, orient. III. Título.

Membros da banca examinadora:

Professor Orientador: Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira

Professora: Eliane Prado Cunha Costa dos Santos

Professor: Anderson Ravik dos Santos

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus que, com sua misericórdia infinita, tem abençoado imerecidamente nossas vidas, e com sua destra poderosa tem guiado os nossos caminhos.

Às nossas famílias: que com todo amor nos apoiaram até momento atual e que assim farão em quaisquer circunstâncias, que garantiram todo sustento, tanto emocional, quanto financeiro; e as nossas respectivas namoradas pela amizade incomparável e pelas palavras de compreensão e apreço.

Ao nosso querido orientador pelo apoio, pela infinita paciência e compreensão, pela amizade e tempo despendido na orientação e correção deste trabalho.

Agradecemos um ao outro, pela realização deste trabalho, pela assistência e amizade durante a realização deste trabalho, e aos amigos de Ouro Branco que nos auxiliaram durante todo este período.

Aos nossos colegas de curso que se tornaram grandes amigos no decorrer dos anos e em cada dificuldade se mostraram sensíveis e generosos, prestando todo tipo de ajuda.

A UFSJ, pela oportunidade e apoio a este tipo de engrandecimento acadêmico. Aos demais professores da UFSJ que fizeram parte do acréscimo de conhecimento que foram essenciais para realização de nosso trabalho.

“Que diremos, pois, diante dessas coisas? Se Deus é por nós, quem será contra nós?”

Romanos 8;31

RESUMO

Devido ao intenso processo de urbanização no decorrer das últimas décadas no país, problemáticas relacionadas às inundações urbanas se tornaram cada vez mais constantes ao passar dos anos, afetando as cidades de forma imprevisível e causando danos graves, como perdas materiais e até vidas humanas. Associado a esses eventos e a prática recorrente de ocupação desordenada, a cidade de Conselheiro Lafaiete-MG sofre destes problemas de drenagem urbana em diversas áreas. O presente trabalho identificou uma zona de maior risco, localizada em área urbana, em região com densidade demográfica acentuada, além de estar situada ao redor de áreas comerciais e de utilidade pública. Com a ajuda do *software* QGis, de disponibilização gratuita, obteve-se o modelo topográfico a fim de manter uma base de dados altimétricos suficientes para caracterizar a sub-bacia hidrográfica do exutório pré-determinado para o estudo, com intuito de importá-la ao HEC-RAS. Esse *software* foi responsável, através de seu modelo computacional, por gerar os mapas de inundação para as vazões calculadas através do Método Racional, sendo elas com períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Tais representações se apresentaram eficientes para ilustrar a gravidade das enchentes no trecho estudado do Rio Bananeiras e planejar possíveis ações de controle dessas cheias. Contudo, ainda faz-se necessário um estudo mais detalhado e minucioso com a finalidade de maximizar a precisão das manchas de inundação geradas pelo modelo numérico empregado.

Palavras-chaves: Modelagem matemática em Hidráulica. Mapa de Inundação. Drenagem Urbana. Conselheiro Lafaiete.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Levantamento Teórico.....	3
1.2.1 Ciclo Hidrológico da Água.....	3
1.2.2 Bacia Hidrográfica.....	4
1.2.3 Infiltração.....	4
1.2.4 Escoamento Superficial	5
1.2.5 Vazão Máxima.....	7
1.2.6 Georreferenciamento	8
1.2.7 Imagens Raster	10
1.2.8 O <i>Software</i> Hec-Ras	10
1.2.9 Inundações urbanas.....	13
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
2.1 Materiais utilizados	16
2.2 Caracterização da área de estudo.....	16
2.2.1 Caracterização Geral de Conselheiro Lafaiete-MG.....	16
2.2.2 Definição do local de estudo	17
2.2.3 Obtenção das curvas de níveis de Conselheiro Lafaiete.....	17
2.2.4 Topografia do terreno da área baixa de Conselheiro Lafaiete.....	17
2.3 Modelo digital de elevação (MDE).....	18

2.4	Delimitação da bacia de estudo	18
2.5	Cálculo da vazão	18
2.5.1	Coeficiente de impermeabilidade do Solo.....	18
2.5.2	Duração da chuva de projeto	19
2.5.3	Curva intensidade, duração e frequência (IDF).....	20
2.5.4	Cálculo das vazões máximas de projeto	20
2.6	Modelagem computacional no HEC-RAS	21
2.6.1	Coeficiente de Manning.....	21
2.6.2	Determinação das seções transversais e pontes	22
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
3.1	Resultados da caracterização da área de estudo	23
3.2	Estimativas de vazão	26
3.3	Análise nas Seções	27
3.4	Mapas de Inundação.....	31
4	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ciclo hidrológico (fonte: adaptado de Ministério do Meio Ambiente, 2017).	3
Figura 2 Vazões máximas conforme uso e ocupação do solo (Fonte: Adaptado do Mapa Mental dos Problemas das Enchentes Urbanas - UFRJ,2017).....	6
Figura 3 Perfil de Linha de energia de escoamento livre (fonte: CAMPOS, 2011).	11
Figura 4 Trecho delimitado a análise. Visão aérea (adaptado: Google Earth).....	17
Figura 5 Divisão de áreas para a sub-bacia do rio Bananeiras (adaptado Google Earth Pro).	19
Figura 6 Calha do rio Bananeiras (acervo pessoal).....	21
Figura 7 Ponte no trecho de estudo (Acervo Pessoal).....	22
Figura 8 Foto entre trecho do perímetro estudado (Acervo Pessoal).....	22
Figura 9 Pontos de referência para seção e pontes (adaptado Google Earth).	23
Figura 10 Mapa planialtimétrico da cidade de Conselheiro Lafaiete-MG (adaptado: Google Earth).....	24
Figura 11 Curvas de níveis da região estudada (adaptada Global Mapper v18).....	24
Figura 12 MDE gerado pelo software Qgis 2.18 (adaptado Qgis 2.18).....	25
Figura 13 Modelos para delimitação da bacia (adaptado Qgis 2.18).	25
Figura 14 Sub-bacia de estudo (adaptado Qgis 2.18 e Google Earth Pro).....	26
Figura 15 Seção transversal no ponto 3 para a Qmax com período de retorno de 2 anos (adaptado HEC-RAS).	27
Figura 16 Seção transversal no ponto 3 Qmax com período de retorno de 5 anos (adaptado HEC-RAS).	28
Figura 17 Seção transversal no ponto 3 para Qmax com período de retorno de 10 anos (adaptado HEC-RAS).	28
Figura 18 Seção transversal no ponto 3 para Qmax com período de retorno de 25 anos (adaptado HEC-RAS).	29
Figura 19 Seção transversal no ponto 3 para Qmax com período de retorno de 50 anos (adaptado HEC-RAS).	29
Figura 20 Seção transversal no ponto 3 para Qmax com período de retorno de 100 anos (adaptado HEC-RAS).	30
Figura 21 Mapa de Inundação para Qmax com período de retorno de 2 anos (adaptado HEC-RAS).	31
Figura 22 Mapa de Inundação para Qmax com período de retorno de 5 anos (adaptado HEC-RAS).	32

Figura 23 Mapa de Inundação para Q_{max} com período de retorno de 10 anos (adaptado HEC-RAS).....	32
Figura 24 Mapa de Inundação para Q_{max} com período de retorno de 25 anos (adaptado HEC-RAS).....	33
Figura 25 Mapa de Inundação para Q_{max} com período de retorno de 50 anos (adaptado HEC-RAS).....	33
Figura 26 Mapa de Inundação para Q_{max} com período de retorno de 100 anos (adaptado HEC-RAS).....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Coeficientes de Runoff	8
Tabela 2 Medidas Estruturais	15
Tabela 3 Dados de ocupação de Conselheiro Lafaiete.....	16
Tabela 4 Coeficientes de Runoff adotados para sub-bacia do Rio Bananeiras.....	19
Tabela 5 Coeficientes de Manning.....	21
Tabela 6 Parâmetros para utilização do Método Racional	26
Tabela 7 Vazões de projeto calculadas.....	27

1 INTRODUÇÃO

As inundações não são eventos recentes, sendo que seu desenvolvimento antecede a existência de qualquer tipo de ocupação humana na natureza. A história mostra que o homem tem procurado conviver com esse fenômeno, desde as mais frequentes, até as mais difíceis de acontecer (TUCCI & BERTONI, 2003).

Ademais, com o aumento da densidade populacional, surgem agravantes às inundações, ocasionando problemas de ordem quantitativa na demanda de água para o abastecimento público, aumento de resíduos sólidos, poluição dos rios e lençol freático, deterioração dos corpos d'água, entre outras dificuldades de poluição ambiental. Sendo que, em área urbana, a consequência desse aumento populacional desenfreado é o crescimento de áreas impermeáveis, modificando o sistema de drenagem urbana e suas características principais, como incremento da velocidade de escoamento superficial e vazão de pico, diminuição do tempo de pico de enchentes e vazões da recarga do lençol freático (ENAMOTO, 2004).

Torna-se visível então, a necessidade de planejamento institucional do espaço para a ocupação nas áreas urbanas, de modo a minimizar riscos à população residente. Conforme exemplificado por Tucci e Bertoni (2003), Porto Alegre-RS, a capital que apresentou vários acontecimentos de inundações até o ano de 1967 elaborou um banco de dados com os níveis atingidos pela água desde o ano de 1899. De porte desse material realizou uma obra de proteção em 1970 e a cidade não sofreu mais com eventos desse tipo, elucidando assim a importância da atuação da engenharia para o controle de inundações.

Os modelos computacionais tornaram-se, nas últimas décadas, uma ferramenta a se utilizar para a investigação dos eventos de inundação, problemáticos à sociedade. Dentre eles, o QGIS é um *software* de Sistema de Informação Geográfica de distribuição gratuita, desenvolvido para o trabalho de diversas áreas geográficas. Possui característica de capturar, editar, analisar, desenhar e imprimir informações geográficas de grande valia nos estudos de gerenciamento de dados geográficos voltados aos mapas de inundação.

Outrossim, a modelagem numérica do fluxo em condutos livres é uma ferramenta cada vez mais utilizada e necessária para otimizar os estudos, e cada vez com maior quantidade de aplicações. Nesse âmbito, o *software* HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) é um modelo de contínuo desenvolvimento no domínio da Engenharia Hidráulica e Fluvial, com grande aceitação devida sua programação pertencente a “*US Army corps of Engineers*”, e tendo seu uso difundido em toda a Europa (BLADÉ *et al.*, 2009).

A cidade de Conselheiro Lafaiete/MG está localizada na Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, à aproximadamente 90 km da capital. De acordo com o Censo do IBGE (2010) possui

uma população de 116.512 habitantes, densidade populacional de 314,69 hab/km² e população estimada para 2018 de 127.539 habitantes (IBGE, 2019).

Conforme IBGE (2019), o município apresenta-se como um dos maiores do estado de Minas Gerais, com crescimento notável e conseqüente verticalização, porém, segundo informações obtidas *in loco* e relacionadas a enchentes dos últimos anos, Conselheiro Lafaiete possui grandes problemas com inundações no Rio Bananeiras, que tem grande extensão inserida na zona urbana da cidade.

Portanto, por meio da utilização dos *softwares* listados, modelagem numérica e revisão bibliográfica, este trabalho apresentará a caracterização local de onde ocorrem as inundações, mapas ilustrativos e possíveis soluções para o problema identificado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Considerando a necessidade de novas formas para melhorar a drenagem urbana, o presente projeto objetivou a modelagem numérica do problema de inundação urbana da cidade de Conselheiro Lafaiete e sua representação em forma de mapa de inundação.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são descritos a seguir:

- Elaborar mapa de inundação para a área central através do *software* HEC-RAS;
- Caracterizar a situação de inundação e propor soluções para o plano diretor municipal em relação à drenagem urbana.

1.2 Levantamento Teórico

1.2.1 Ciclo Hidrológico da Água

A água é fundamental para manutenção da vida terrestre, ela é o recurso natural mais importante e dinamiza todos os ciclos ecológicos presentes no planeta. Além de apresentar inúmeras aplicabilidades, como dessedentação, uso doméstico e industrial, irrigação, produção de energia, navegação, recreação, lazer, entres outras (TUNDISI, 2017).

Conforme Silveira (2007), o ciclo hidrológico é a circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera. Tal fenômeno é resultado da ação conjunta entre energia térmica solar (fornecimento de energia às partículas de água), ação dos ventos (deslocamento do vapor d'água entre diferentes localidades) e efeitos da gravidade (precipitação, infiltração e drenagem superficial). A Figura 1 abaixo apresenta a exemplificação das fases do ciclo hidrológico, que serão expostos detalhadamente as etapas de infiltração e de escoamento superficial nos itens 1.2.3 e 1.2.4, respectivamente.

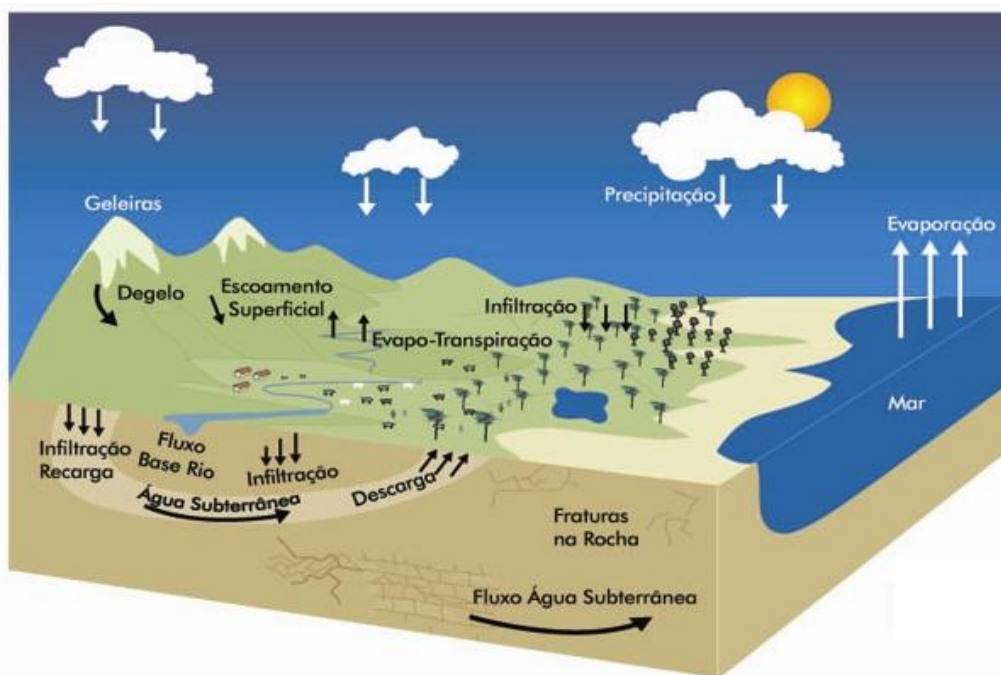


Figura 1 Ciclo hidrológico (fonte: adaptado de Ministério do Meio Ambiente, 2017).

O sol é componente fundamental para o ciclo hidrológico, pois a energia solar é essencial para os fenômenos de evaporação da água e evapotranspiração das plantas. Decorrente dos processos citados, o vapor d'água presente na atmosfera sujeito aos efeitos das condições meteorológicas locais, condensa-se em forma de microgotículas. Os agrupamentos dessas microgotículas dão origem às nuvens que, sob a ação dos ventos e dinâmica das massas de ar, dão

origem à transferência de água da atmosfera para a superfície terrestre por meio da precipitação (TUNDISI, 2017).

Segundo Balbinot (2007), a precipitação ocorre de três maneiras: na primeira e mais comum, a chuva se desenvolve pelo processo de aglutinação de microgotículas de vapor d'água. Quando atingem pesos significativos e por meio da força da gravidade, dá-se início à transferência de água da atmosfera para a superfície na forma líquida. A segunda e a terceira, na forma de neve e granizo, dão-se pelo mesmo método, contudo as condições atmosféricas locais fazem com que o vapor d'água transforme-se em cristais de gelo antes ou durante à precipitação.

Conforme Tundisi (2017), durante a precipitação ocorrem diferentes fenômenos contíguos; há a evaporação da água durante seu percurso descendente, evapotranspiração realizada pelas plantas e quando atinge o solo, infiltração e escoamento superficial, sendo estes dois últimos fundamentais para o trabalho de elaboração dos mapas de inundações do município de Conselheiro Lafaiete/ MG.

1.2.2 Bacia Hidrográfica

Conforme Silveira (2009), bacia hidrográfica é definida por uma área de captação natural da água da precipitação e que, devido aos aspectos topográficos, convergem os escoamentos superficiais para um único ponto, denominado exutório. Ela é composta por uma rede de drenagem formada por cursos d'água com fluxos descendentes da cota de maior altimetria para a de menor e confluem para um único leito no exutório.

As bacias hidrográficas podem ser consideradas então como um meio sistêmico em que há uma entrada de chuva dispersa pela sua área territorial e saída por meio do escoamento superficial no exutório. Logo, possibilita a delimitação de sub-bacias que se interconectam por meio dos sistemas hídricos (PORTO, 2017).

Segundo a Agência Nacional de Águas, sub-bacia hidrográfica é definida como a área de drenagem dos principais afluentes do curso d'água definidor da bacia hidrográfica principal. O Rio Bananeira curso d'água estudado nesse trabalho, faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e sub-bacia do Rio Paraopeba.

1.2.3 Infiltração

De acordo com Silva *et al.* (2017), a infiltração é processo em que a água passa da superfície para o subsolo, logo, o líquido, impulsionado pela força da gravidade, percola pelos poros existentes nos solos em um fluxo descendente. Parte dessa água é absorvida pelas raízes dos vegetais, outra é fonte de reabastecimento de rios e lagos e a última parcela recarrega os lençóis freáticos.

A capacidade de infiltração do solo em um intervalo de tempo é denominada taxa de infiltração. Esta variável, por sua vez, torna-se uma das principais características hídricas para a descrição da dinâmica da água no solo (PINHEIRO *et al.*, 2009).

Segundo Silveira (2007), a taxa de infiltração de água é maior no início de uma precipitação, mas decresce até valores ínfimos durante um intervalo de tempo, quando as camadas superiores do solo ficam completamente umedecidas, nessa etapa diz-se que ela está saturada. Contudo, quando a contribuição de água à superfície para, inicia-se a redistribuição de umidade para as camadas inferiores do solo, gerando um perfil inverso ao descrito, logo as camadas inferiores tornam-se saturadas e as superficiais apresentam baixo teor de umidade.

Em uma precipitação, quando a taxa de infiltração decresce a uma taxa residual, a camada superficial satura e a percolação descendente de água é inferior ao aporte de água na superfície, inicia-se outro processo, denominado escoamento superficial (TUCCI, 2007).

O processo de infiltração é acelerado ou prejudicado devido a inúmeras condicionantes, sendo que as principais são o tipo de solo (mais ou menos poroso), grau de compactação, cobertura vegetal, impermeabilização, declividade do terreno, dentre outras. Portanto, se a taxa de infiltração diminui, o escoamento superficial aumenta e torna-se um problema recorrente para a drenagem pluvial de áreas rurais e urbanas, sendo a última mais afetada.

1.2.4 Escoamento Superficial

De acordo com Silveira (2007), o escoamento superficial é originado quando a camada superior do solo satura-se, a taxa de infiltração é reduzida a uma taxa residual e a contribuição de água pela precipitação é maior que a infiltração, logo forma-se pequenos filetes de água, que impulsionado pela força da gravidade, segue por um trajeto conforme a topografia do terreno, seguindo da maior cota altimétrica para a menor.

O escoamento superficial, um dos principais processos deste estudo, aliado a outros fatores pontuais e regionais ocasiona as inundações, sendo esse o foco desta pesquisa.

Conforme o Ministério do Meio Ambiente (2017), várias são as causas das inundações urbanas, que, entre as principais, são relacionadas ao uso e ocupação solo, sua impermeabilização, crescimento desordenado, destinação inadequada do lixo, assoreamento, projetos de drenagem inadequados ou saturados, além de chuvas de grande intensidade (causa natural).

Conforme o Mapa Mental dos Problemas das Enchentes Urbanas desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ, 2017), a água possui três trajetos naturais ao atingir o solo durante uma precipitação: vertical para cima por meio da evaporação; vertical pra baixo pela infiltração e; horizontal pelo escoamento superficial. Logo, a impermeabilização do solo torna-se um dos mais importantes causadores das inundações, pois ele gera um decréscimo na taxa de

infiltração, que, conseqüentemente, gera um incremento no escoamento superficial ocasionado pela água excedente não infiltrada.

Aliado ao alto grau de impermeabilização como causa de inundações, o crescimento desordenado acarreta em destinações inadequadas para o lixo, logo ele é descartado em terrenos baldios, valas ou ruas, que após chuvas intensas, são transportados para os leitos dos cursos d'água. Assim, o acúmulo desse material antrópico diminui a seção natural desses cursos d'água, diminuindo também a capacidade de escoamento desse leito.

A associação entre o aumento do escoamento superficial em consequência da maior área impermeabilizada, juntamente com a diminuição da seção do leito do curso d'água ocasionadas pelo descarte inadequado do lixo, gera uma demanda a ser escoada maior que a capacidade suporte do leito de drenagem, deste modo esse excedente ocasiona as inundações, popularmente chamada de enchentes.

A Figura 2 abaixo ilustra as vazões de pico para diferentes tipos de uso e ocupação do solo.

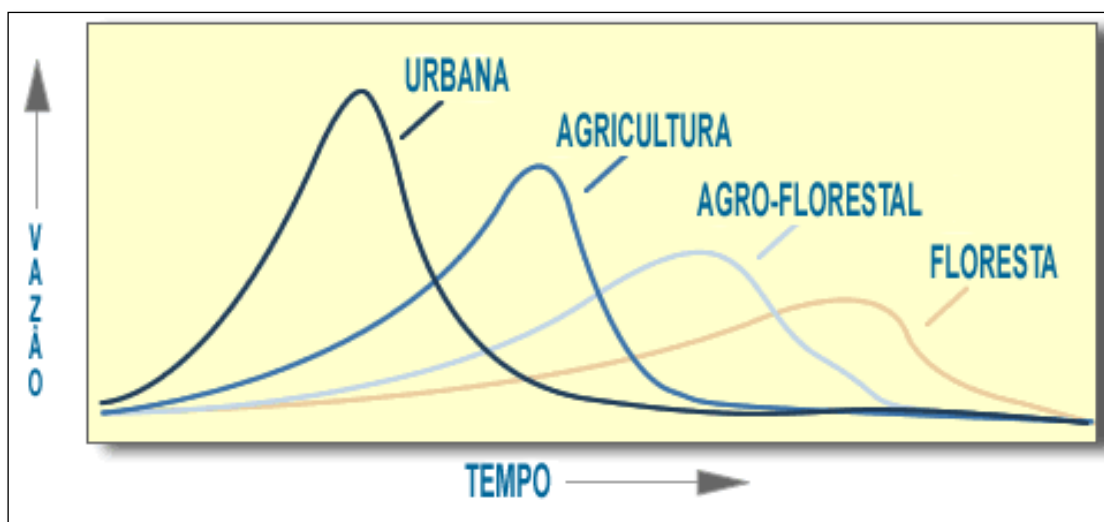


Figura 2 Vazões máximas conforme uso e ocupação do solo (Fonte: Adaptado do Mapa Mental dos Problemas das Enchentes Urbanas - UFRJ, 2017).

A partir da análise da Figura 2, pode-se inferir que a vazão de pico em áreas urbanas é maior que qualquer outra. Tal fato se deve a associação das causas listadas anteriormente, como impermeabilização do solo, crescimento desordenado, descarte inadequado do lixo e sistema de drenagem ineficaz.

Inundações geram conseqüências socioeconômicas e ambientais, pois acarretam perdas materiais, além da destruição parcial ou total de imóveis, veículos, móveis, utensílios domésticos, engarrafamentos de trânsito, perda de trabalho, estragos em lavouras, perdas de produtos perecíveis armazenados, interrupções de energia, além da proliferação de doenças (Mapa Mental dos Problemas das Enchentes Urbanas - UFRJ, 2017).

Conforme o Ministério do Meio Ambiente (2017), é essencial a preservação do ciclo hidrológico natural, reduzir o escoamento superficial adicional gerado pelas alterações antrópicas da superfície do solo decorrentes do desenvolvimento urbano e induzir ações para maximizar a infiltração da água no solo. Portanto, faz-se necessário o planejamento de formas de uso e ocupação que contemplem o controle da erosão, permeabilidade do solo, reservação, infiltração e utilização das águas pluviais nos próprios lotes, com alternativas de pavimentação permeável.

A informação do escoamento superficial é imprescindível em projetos de obras hidráulicas de reservatórios, canais, condutos e para a previsão de enchentes. Dessa forma, a vazão máxima, próximo item a ser discutido, se manifesta como um parâmetro indispensável para o dimensionamento de obras, porquanto representa o valor, associado a um risco, que pode ser igualado ou superado (TUCCI, 2012; ALENCAR *et al.*, 2006).

1.2.5 Vazão Máxima

Um conceito altamente importante no desenvolvimento deste trabalho é o conhecimento da vazão máxima, com papel fundamental para a previsão das enchentes em contexto de área urbana. A partir dela, é possível dimensionar obras hidráulicas e identificar possíveis erros que possam ser motivos de agravamento nos eventos de inundação.

A vazão máxima possui diversos tipos de ferramentas para ser estimada e medida, a exemplar pelos ajustes de distribuições estatísticas, através da regionalização de vazões e pela precipitação, tendo essa primeira estimativa quando há dados históricos de vazão consistentes no local de interesse e as condições da bacia hidrográfica inalteráveis. Quando não há dados suficientes ou quando inexistentes, pode-se utilizar a regionalização de vazões ou precipitações com base nos postos da região, assim como no caso de uma bacia que sofre modificações (TUCCI, 2012).

Para esse estudo, define-se a metodologia para estimar a vazão máxima com base no Método Racional, baseando-se na precipitação de chuvas na área da bacia, encontram-se as vazões máximas de projeto. A Equação 1 é conhecida como Método Racional para estimativa de vazão.

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{CIA}{360} \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

Q, vazão (m³/s);

C, coeficiente de *Runoff*;

I, intensidade da chuva (mm/h);

A, área da bacia (ha).

O Método Racional utiliza algumas hipóteses, conforme apresenta Muniz (2015):

- A duração da precipitação intensa de projeto é igual ao tempo de concentração;
- Adoção de um coeficiente único de perdas (“C”), baseado nas características da bacia;
- Não avalia o volume da cheia e a distribuição temporal das vazões.

O coeficiente de *Runoff* é determinado por tabelas, como a Tabela 1, que contém vários coeficientes ponderados nesse estudo, os quais serão abordados no item Metodologia.

Tabela 1 Coeficientes de Runoff

Superfície	C
Pavimento	
Asfalto	0,70 – 0,95
Concreto	0,80 – 0,95
Calçadas	0,75 – 0,85
Telhado	0,75 – 0,95
Cobertura: grama solo arenoso	
Plano (2%)	0,05 – 0,10
Médio (2 a 7%)	0,10 – 0,15
Alta (7%)	0,15 – 0,20
Gramma, solo pesado	
Plano (2%)	0,13 – 0,17
Médio (2 a 7%)	0,18 – 0,22
Declividade alta (7%)	0,25 – 0,35

Fonte: Adaptado de MUNIZ, 2015 *apud* TUCCI, 2012.

A intensidade da chuva está diretamente ligada ao tempo de concentração, que, por sua vez, relaciona o tempo de pico e o tempo de concentração, através da equação de Kirpich, que será exposta no item 2.5.2. A equação utilizada para a intensidade de chuva é dada pelas curvas de intensidade-duração-frequência, demonstrada na Equação 2.

$$I = \frac{A * Tr^B}{(t + C)^D} \text{ (Equação 2)}$$

I, intensidade em mm/h;

Tr, tempo de retorno em anos;

A, B, C e D, coeficientes que dependem do local;

T, duração em minutos.

1.2.6 Georreferenciamento

Geoprocessamento pode ser definido como um conjunto de técnicas e métodos teóricos e computacionais diretamente ligados com a aquisição, entrada, armazenamento, tratamento e

processamento de dados, objetivando gerar novos dados e/ou informações espaciais georreferenciadas. Ressalta-se que informações/dados georreferenciados têm como característica principal o atributo de localização, logo, possui uma posição bem definida no globo terrestre por meio de suas coordenadas geográficas (ZAIDAN, 2017).

De acordo Santos (2007), há inúmeras definições de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) nas literaturas, mas o SIG poderia ser considerado como uma associação de técnicas utilizadas para relacionar, integrar e analisar dados brutos oriundos de variadas fontes, como imagens fornecidas por satélites terrestres, mapas, cartas climatológicas, censos e outros, logo é necessário o emprego de computadores para adquirir, gravar, avaliar e exibir dados geográficos processados.

Segundo Zaidan (2017), o SIG engloba em sua definição vários aspectos já abordados na definição de Geoprocessamento. Assim, entende-se também como um sistema composto por *softwares* e *hardwares* que submetidos a determinados comandos, utiliza dados brutos georreferenciados para armazenar, processar, analisar e disponibilizar informações. Tais resultados visam à possibilidade de planejar e monitorar questões ligadas ao espaço físico geográfico por meio de arquivos digitais contemplando mapas, gráficos, tabelas e relatórios convencionais.

Técnicas recentes de modelagem hidrológica tornaram-se viáveis devido ao avanço da geração e manipulação de dados executados de maneira eficiente por meio de operações espaciais em um SIG, que, por conseguinte, reduz significativamente o tempo e esforço empregados, além de maximizar a precisão em relação aos métodos tradicionais (CORREIA, 2017).

Portanto, modelos computacionais tornaram-se uma ferramenta a se utilizar para a investigação de inundações. Dentre esses, o QGIS, utilizado neste estudo, é um *software* de SIG de distribuição gratuita e desenvolvido para capturar, editar, analisar, e plotar informações geográficas georreferenciadas.

Conforme Medeiros (2017), o QGIS, anteriormente chamado de Quantum Gis, é o *software* livre para Geoprocessamento mais utilizado no Brasil. Ele é um SIG de código aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral. Este *software* é um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) e funciona em Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android, além de suportar inúmeros formatos de vetores, rasters, bases de dados e funcionalidades.

O *software* Qgis foi utilizado para editar, analisar e plotar informações necessárias ao desenvolvimento deste estudo. Foi introduzida uma imagem raster, obtida através do site earthexplorer.usgs, tendo as imagens do satélite SRTM, que depois de processada gerou um mapeamento planialtimétrico do município de Conselheiro Lafaiete/MG.

1.2.7 Imagens Raster

Conforme OSGeo (2017), dados rasters são formados por uma matriz de *pixels*, sendo que cada uma contém um valor que representa uma condição da área coberta por essa célula. Os dados matriciais podem ser adquiridos de diferentes maneiras, sendo as duas formas mais comuns, a fotografia aérea e imagens de satélite.

Na fotografia aérea, uma aeronave sobrevoa uma área com uma câmera acoplada de maneira que possibilite a captura de imagens da superfície requerida. Posteriormente, elas são importadas para um computador e georreferenciadas. Enquanto que as imagens de satélite são criadas quando os satélites que orbitam um ponto na superfície da terra com câmeras digitais especiais apontadas para a superfície, obtêm uma imagem da área na Terra em que estão passando por cima. Depois que a imagem foi obtida ela é enviada de volta à Terra através de sinais de rádio para estações especiais de recepção, processadas e disponibilizadas para diferentes finalidades.

Neste estudo utilizou-se uma imagem raster do município de Conselheiro Lafaiete-MG para gerar um mapeamento planialtimétrico da área estudada.

1.2.8 O Software Hec-Ras

O *software* HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) é um modelo matemático computacional gratuito, disponibilizado pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos da América. Possui como função principal a simulação de escoamentos unidimensionais, em regimes permanentes ou transitórios, ademais da modelagem de transportes de sedimentos e análise de formas de fundo e, também, modelagem de temperatura de água (USACE, 2010).

A modelagem numérica do fluxo em condutos livres é uma ferramenta cada vez mais utilizada, e cada vez com maior quantidade de aplicações. O *software* HEC-RAS é um modelo de contínuo desenvolvimento no âmbito da Engenharia Hidráulica e Fluvial, com grande aceitação devida sua programação pertencente a “*US Army corps of Engineers*”, e tendo seu uso difundido em toda a Europa (BLADÉ *et al*, 2009).

Os dados básicos de entrada são os aspectos geométricos das seções transversais dos canais, sejam elas naturais ou artificiais, além de rotinas de cálculos geométricos e de dados de vazão e condições de contorno para que sejam efetuados os cálculos hidráulicos (Muniz, 2015).

Assim, o *Software* resolve o fluxo gradualmente variado a partir da equação do balanço de energia, ou equação de Bernoulli, entre duas seções, exceto em casos onde há seções de elementos como pontes, vertedouros, etc. Nesses casos, o Hec-Ras resolve através da equação de conservação

de quantidade de movimento, assim como outras equações empíricas estabelecidas para essas estruturas (BLADÉ *et al*, 2009).

Mediante a aplicação do modelo de casos reais, este *software* apresenta sua base teórica essencial com conceitos importantes e aspectos chaves para execução. Seu modelo matemático surge a partir da proposta de Bernoulli, seguindo a Equação 3, que leva em consideração a conservação de energia (Figura 3), seja ela potencial, cinética ou de pressão, aliada a perda de carga devido ao escoamento, principalmente inerente ao atrito e expansão/contração da seção (MUNIZ, 2015).

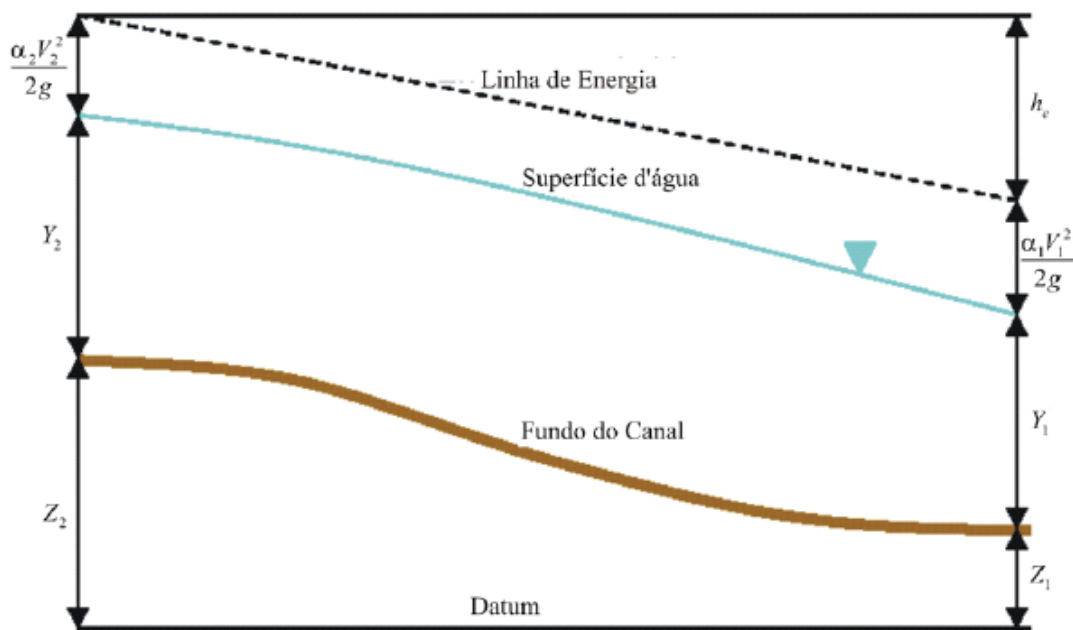


Figura 3 Perfil de Linha de energia de escoamento livre (fonte: CAMPOS, 2011).

O cálculo é feito através de interações entre duas seções considerando suas alturas de lâmina d'água associada às velocidades e, a partir daí, calculam-se as perdas de carga. Utiliza-se o método de substituição nas Equações 3 e 4, até convergir a um valor de erro aceitável (CAMPOS, 2011).

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 * \frac{v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 * \frac{v_1^2}{2g} + h_e \text{ (Equação 3)}$$

Y, profundidade líquida na seção;

Z, cota no fundo do canal na seção em relação a um *Datum* (referencial);

v, velocidade média na seção;

α , coeficiente de Coriolis;

g, aceleração da Gravidade;
he, perda de carga no trecho.

$$he = L * Sf + C \left(\alpha 2 * \frac{V 2^2}{2g} - \alpha 1 * \frac{V 1^2}{2g} \right) \text{ (Equação 4)}$$

L, comprimento no trecho;
Sf, coeficiente de perda de carga por atrito;
C, coeficiente de perda de carga localizada (contração e expansão).

Para o cálculo da variável L, representando o comprimento do trecho em questão, utiliza-se a Equação 5.

$$L = \frac{LmeQ'me + LcpQ'cp + LmdQ'md}{Q'me + Q'cp + Q'md} \text{ (Equação 5)}$$

Lme, Lcp e Lmd são, respectivamente, distância entre duas seções subjacentes da margem esquerda, canal principal e margem direita;
Qme, Qcp e Qmd são, respectivamente, vazão média aritmética da margem esquerda, canal principal e margem direita.

No cálculo da capacidade de escoamento do canal e coeficiente em cada seção, o escoamento é subdividido de forma que a velocidade se presume uniforme, de acordo com o Manning assumido para cada trecho. Dessa forma, pode-se inferir que a capacidade de escoamento é calculada através da equação de Manning, dadas pelas Equações 6 e 7.

$$Q = qSf^{0.5} \text{ (Equação 6)}$$

$$qi = \frac{1}{ni} Ai Rhi^{\frac{2}{3}} \text{ (Equação 7)}$$

Q, vazão média aritmética;
Qi, capacidade de escoamento na subdivisão i;
Ni, Coeficiente de Manning;
Ai, área molhada;
Rhi, raio hidráulico.

Dos cálculos que fundamentam o *software* Hec-ras falta somente especificar o cálculo do coeficiente de Coriolis (α), que é feito segundo a Equação 8, avaliando a energia média para uma altura de lâmina de água específica.

$$\alpha = At * \frac{\frac{qme^2}{Ame^3} + \frac{qcp^2}{Acp^3} + \frac{qmd^2}{Amd^3}}{qt^2} \text{ (Equação 8)}$$

Onde:

At, Ame, Acp e Amd são, respectivamente, área total da seção, área da subdivisão da margem esquerda, do canal principal e da margem direita;

qt, qme, qcp e qmd são, respectivamente, capacidade total de escoamento, capacidade de escoamento da subárea da margem esquerda, do canal principal e da margem direita.

1.2.9 Inundações urbanas

Com o aumento da densidade populacional, surgem os problemas de ordem quantitativa na demanda de água para o abastecimento público, aumento de resíduos sólidos, poluição dos rios e lençol freático, deterioração dos corpos d'água, entre outros problemas de poluição ambiental. Na área urbana, a consequência desse aumento populacional desenfreado é o crescimento de áreas impermeáveis, modificando o sistema de drenagem urbana e suas características principais, como incremento da velocidade de escoamento superficial e vazão de pico, diminuição do tempo de pico de enchentes e vazões da recarga do lençol freático (ENAMOTO, 2004).

Tucci (1995) classifica os impactos gerados pela urbanização:

- Impactos ambientais: acontece devido ao aumento de produção de sedimentos, degradação da qualidade da água e contaminação de aquíferos;
- Impactos no balanço hídrico: acontece devido ao aumento do volume do escoamento superficial e redução da vazão de recarga natural dos aquíferos e da evapotranspiração;
- Impacto no hidrograma de enchente: a urbanização diminui a infiltração e aumenta o escoamento superficial.

Dessa forma, o impacto gerado pela urbanização e diminuição da infiltração agrava os eventos de cheias nas áreas urbanas. Normalmente, os rios são responsáveis pela drenagem proveniente das cabeceiras, produzindo escoamento em alta velocidade. As áreas de ocorrência de inundações são as de cotas altimétricas mais baixas inseridas na sub-bacia hidrográfica do curso d'água, tendo a característica de serem os locais de maior ocupação, pois tendem a apresentar um relevo planificado. A diferença do nível de água em uma enchente pode ser de vários metros, sendo que as maiores inundações em grandes rios estão acompanhadas das precipitações do tipo frontal.

As precipitações frontais são aquelas derivadas da interação de massas de ar quente e frio, caracterizadas por chuvas de longa duração, em grandes áreas e intensidade média (TUCCI, 2012).

Tominaga (2009) define que a inundação representa o transbordo das águas, atingindo a planície de inundação ou área de várzea. Já as enchentes ou cheias, são eventos em que há elevação do nível d'água, porém sem extravasar. Segundo Tucci e Bertoni (2003), as inundações são devidas a um grupo de diversos fatores, como o comportamento natural dos rios, a urbanização e a impermeabilização das superfícies e a canalização dos rios.

Ainda segundo Bertoni e Tucci (2003), os problemas e transtornos que aparecem em diferentes níveis dependendo da ocupação da várzea pela população, as características geográficas do terreno e as interferências humanas, equivale a dizer que, lugares ocupados de forma irregular, ou sem controle e fiscalização do poder público, ou mesmo, com o aval deste, são os que durante e depois das inundações despendem maior esforço e intervenção do poder público para reatar uma condição normalizada após os eventos.

Assim, as inundações são eventos que dificilmente podem ser evitados, entretanto pode se ter melhor adaptação aos seus acontecimentos, diminuindo os impactos ocasionados por sua passagem por regiões suscetíveis a elas, através da adoção de medidas estruturais e não estruturais, visando minimizar as consequências de maneira não isolada (BARBOSA, 2006).

Bertoni e Tucci (2003) afirmam que as medidas para o controle da inundação do tipo estrutural são aquelas que modificam o sistema fluvial, evitando assim os prejuízos provenientes das enchentes, enquanto as medidas não-estruturais são aquelas em que os detrimientos são reduzidos pela melhor convivência da população e as enchentes.

Barbosa (2006) afirma que para o controle de inundação de forma eficiente, torna-se necessária a associação de medidas estruturais e não-estruturais, de modo que garanta à população o mínimo de prejuízo, além de possibilitar uma convivência harmoniosa com o rio.

As principais medidas estruturais podem ser exemplificadas por: controle de cobertura vegetal, controle da erosão, diques e *Polders* (muros laterais construídos para proteger a população ribeirinha de extravasamentos), modificações na morfologia do rio e reservatórios. As demais medidas estruturais podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 Medidas Estruturais

Medida	Principal vantagem	Principal desvantagem	Aplicação
MEDIDAS EXTENSIVAS			
Cobertura vegetal	Redução do pico de cheia	Impraticável para grandes áreas	Pequenas bacias
Controle de perda	Reduz assoreamento	Impraticável para grandes áreas	Pequenas bacias
MEDIDAS INTENSIVAS			
Diques e <i>polders</i>	Alto grau de proteção de uma área	Danos significativos caso falhe	Grandes rios
Melhoria do canal:			
- Redução da rugosidade por desobstrução	Aumento da vazão com pouco investimento	Efeito localizado	Pequenos rios
- Corte de meandro	Amplia a área protegida e acelera o escoamento	Impacto negativo em rio com fundo aluvionar	Área de inundação estreita
Reservatórios:			
- Todos os reservatórios	Controle a jusante	Localização difícil	Bacias intermediárias
- Reservatórios com comportas	Mais eficiente com o mesmo volume	Vulnerável a erros humanos	Projetos de usos múltiplos
- Reservatórios para cheias	Operação com o mínimo de perdas	Custo não partilhado	Restrito ao controle de enchentes
Mudança de canal:			
- Caminho da cheia	Amortecimento de volume	Depende da topografia	Grandes bacias
- Desvios	Reduz vazão do canal principal	Depende da topografia	Bacias médias e grandes

Fonte: Muniz, 2015.

Para as principais medidas não-estruturais, que podem significar medidas com menor custo financeiro, trazendo grandes benefícios, são destacadas por Muniz (2015) as seguintes:

- Regulamentação do uso da terra de áreas inundáveis, muitas vezes sendo reguladas por normas municipais, principalmente os planos diretores das cidades;
- Construção à prova de enchente, sendo responsável por reduzir perdas nas áreas de inundação durante as cheias;
- Seguro, que consiste na proteção econômica dos indivíduos e bens;
- Previsão e alerta, com sistemas de aquisição de dados em tempo real, previsão de modelo matemático e plano de defesa civil para redução de perdas durante as enchentes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados para elaboração deste estudo foram:

- *Software* HEC-RAS para modelagem hidráulica;
- *Software* QGIS para delimitação da bacia de contribuição do ponto de estudo, extração de dados geométricos e obtenção de curvas de níveis;
- *Software* Google Earth Pro para uso de delimitação de uso do solo, caracterização da área estuda e exportação de dados altimétricos;
- Mapa de uso e ocupação do Solo, arquivo em DWG, fornecido pela Prefeitura de Conselheiro Lafaiete-MG;
- Modelo de elevação de terreno a partir de imagem em Raster do satélite *SRTM Shuttle Radar Topography Mission*, com precisão de 30 m, disponibilizado pela *USGS Global Visualization Viewer*;
- Trena para batimetria das seções transversais estudadas e medidas das pontes a serem inseridas no modelo;
- *Software* Plúvio 2.1, para retirada da curva chave Intensidade Duração e Frequência.

2.2 Caracterização da área de estudo

Para a caracterização do local de estudo, realizou-se as seguintes etapas abaixo, sendo explicadas de forma sucinta e os devidos resultados.

2.2.1 Caracterização Geral de Conselheiro Lafaiete-MG

Segundo o IBGE, no censo realizado no ano de 2010; a cidade de Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais, possui algumas características importantes dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 Dados de ocupação de Conselheiro Lafaiete

Característica	Dados
Área territorial	370,246 km ²
População estimada 2017	127.369 pessoas
População residente 2010	116.512 pessoas
Densidade demográfica 2010	314.69 hab/km ²
População residente rural	5.246 pessoas
População residente urbana	111.266 pessoas

Fonte: IBGE, 2010.

2.2.2 Definição do local de estudo

Conforme informações obtidas *in loco* relacionados às enchentes nos últimos anos no município de Conselheiro Lafaiete, definiu-se que a região a ser estudada está localizada no trecho da Avenida Monsenor e Elevado D. Nogueira Rezende, bairro Centro. Esse local é bastante afetado pelas cheias do rio Bananeiras durante os eventos chuvosos. A Figura 4 abaixo delimita esse trecho escolhido.



Figura 4 Trecho delimitado a análise. Visão aérea (adaptado: Google Earth).

2.2.3 Obtenção das curvas de níveis de Conselheiro Lafaiete

De maneira global, por meio do *software* QGis 2.18, gerou-se o mapeamento planialtimétrico da área requerida. No programa, utilizou-se uma imagem *raster* para criar as curvas de nível para a gleba estudada. A imagem em *raster* foi obtida através do site earthexplorer.usgs, tendo as imagens do satélite SRTM. Posteriormente, exportou-se o arquivo em formato KMZ, abrindo-o no *software* Google Earth Pro para a geração do mapa que será apresentado posteriormente.

2.2.4 Topografia do terreno da área baixa de Conselheiro Lafaiete

De maneira local, para encontrar a topografia com maior precisão e em intervalos menores, foi utilizado a interpolação do *software* Global Mapper v18, encontrando valores mais próximos da

realidade e importado através do Google Earth Pro. O plano assim pode ser importado em outros formatos que serão mencionados adiante.

2.3 Modelo digital de elevação (MDE)

Foi feito o modelo digital de elevação (MDE) utilizando-se o *software* QGIS já com as curvas de nível, porém, ainda sem as seções a se analisar. Foi utilizada uma imagem Raster obtida pelo site *Science for a Changing World* (USGS), do satélite SRTM, disponibilizada gratuitamente.

2.4 Delimitação da bacia de estudo

Através do modelo referido no item 2.3, utilizando o QGIS 2.18, juntamente com a função Taudem 5.1.2, usado para análises hidrológicas em *software* de manuseio de arquivos Gis, encontram-se três importantes imagens para a delimitação da sub-bacia. Os resultados dos modelos: direção de fluxo, declividade e área de contribuição estão dispostas no item 3.3.

Portando os modelos referidos, delimita-se a sub-bacia georreferenciada para o local de estudo, criando a área de contribuição para o ponto e importando-o posteriormente ao Google Earth Pro.

2.5 Cálculo da vazão

2.5.1 Coeficiente de impermeabilidade do Solo

Para a estimativa da vazão, definiu-se o Método Racional na transformação chuva-vazão. Utilizou-se para a avaliação das áreas, a delimitação por meio do Google Earth Pro, delimitando assim as zonas consideradas urbanizadas e áreas verdes (remanescentes de vegetação nativa e pastagens), em *layers* diversas, para estimar o coeficiente de impermeabilidade do solo que necessita a metodologia. A Figura 5 abaixo exemplifica as áreas demarcadas.

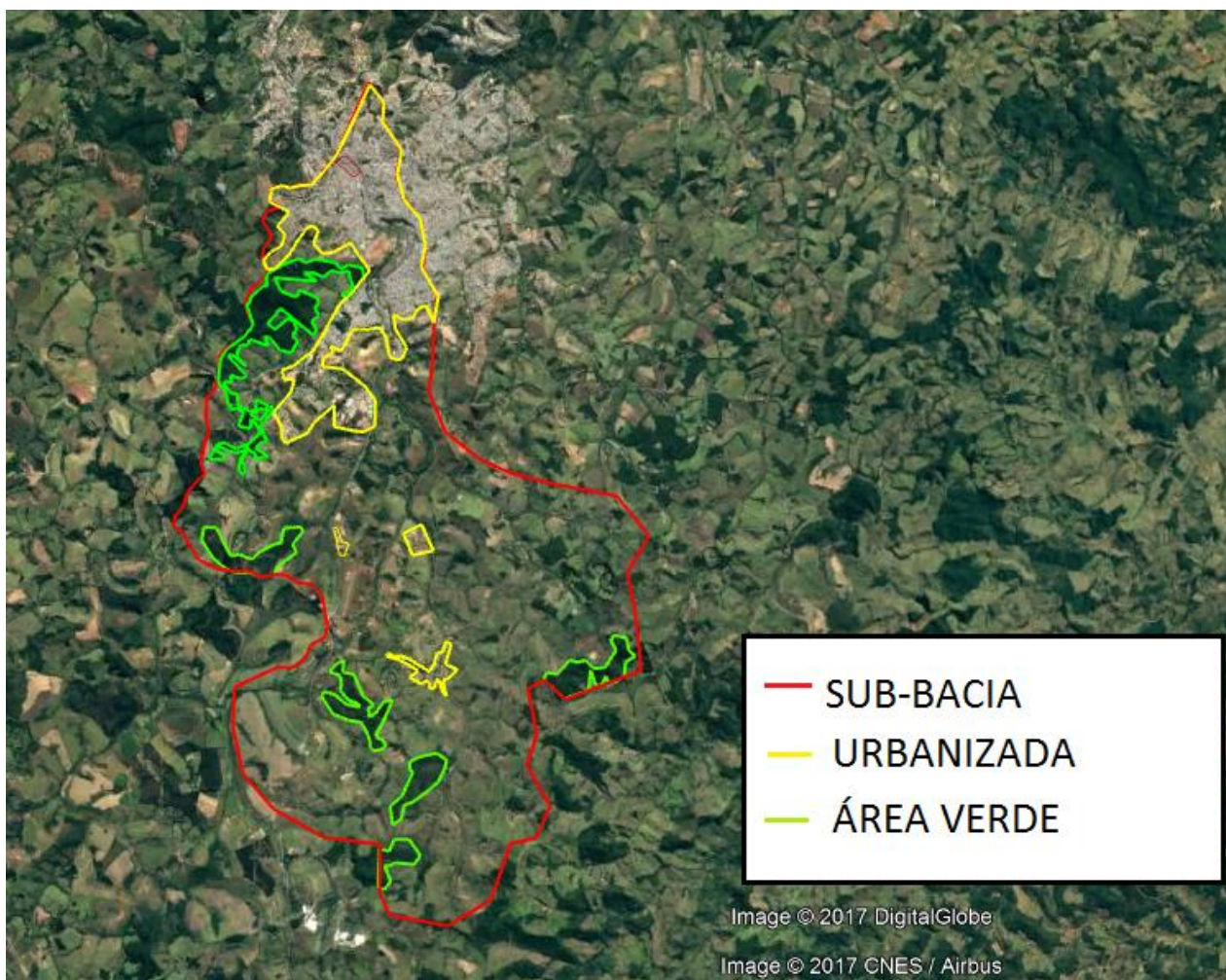


Figura 5 Divisão de áreas para a sub-bacia do rio Bananeiras (adaptado Google Earth Pro).

Os valores das áreas delimitadas encontram-se na Tabela 4, com seus respectivos valores dos coeficientes de *Runoff*. O valor desse coeficiente a ser utilizado para encontrar as vazões de projeto foi a média ponderada entre as áreas.

Tabela 4 Coeficientes de *Runoff* adotados para sub-bacia do Rio Bananeiras.

COBERTURA	ÁREA (km ²)	C indicado	C adotado
Área urbanizada	11,60	0,7 - 0,95	0,80
Remanescentes de vegetação	6,37	0,05 - 0,2	0,10
Solo exposto/Pastagem	64,03	0,05 - 0,2	0,20
Total	82,00	----	0,28

Fonte: Adaptado de Wilken, 1978.

2.5.2 Duração da chuva de projeto

Definiu-se o tempo de concentração da sub-bacia igual à duração de precipitação, sendo uma condição que significa que todos os pontos da bacia estejam contribuindo para a vazão no ponto de exutório estudado. Para tanto, adotou-se a equação de Kirpich, descrita pela Equação 9.

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

t_c , tempo de concentração [min];

L, comprimento axial [km];

H, diferença de cota [m].

Os dados foram obtidos através do MDE pelo *software* QGis 2.18 para encontrar o tempo de concentração.

2.5.3 Curva intensidade, duração e frequência (IDF)

Para cálculo da intensidade da chuva de projeto a ser utilizada, indicou-se trabalhar com a curva intensidade - duração - frequência para Conselheiro Lafaiete, dada pelo *Software* Plúvio 2.1. Foram escolhidos cinco períodos a serem estudados: 2 anos, 5 anos, 10 anos, 50 anos e 100 anos. A Equação 10 demonstra tal equação.

$$I = \frac{3359.207 \cdot T^{0.221}}{(t + 25.103)^{1.026}} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

t, duração da chuva [min];

T, período de retorno [anos];

I, intensidade da chuva [mm/h].

2.5.4 Cálculo das vazões máximas de projeto

Utilizando-se a Equação 11, repetida abaixo, encontram-se as vazões máximas de projeto. Essa equação é conhecida como Método Racional para estimativa de vazão.

$$Q_{\text{máx}} = \frac{CIA}{360} \quad (\text{Equação 11})$$

Q, vazão [m³/s];

C, coeficiente de *Runoff*;

I, intensidade da chuva [mm/h];

A, área da bacia [ha].

2.6 Modelagem computacional no HEC-RAS

2.6.1 Coeficiente de Manning

Para encontrar os coeficientes de Manning (n) adotados no projeto, utilizou-se a tabela dada por Tucci (2012), a qual está adaptada na Tabela 5.

Tabela 5 Coeficientes de Manning.

COBERTURA DA BACIA	n
Asfalto suave	0,012
Asfalto ou concreto	0,014
Argila compactada	0,030
Pouca vegetação	0,020
Vegetação densa	0,350
Vegetação densa e floresta	0,400

Fonte: Adaptado de Tucci, 2012.

Para esse projeto, adotou-se os seguintes coeficientes de rugosidade: ponderou-se 0,025 para o leito do rio, pois o local encontra-se com vegetação rasteira e possuindo o solo argiloso, segundo o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, disponibilizado pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa; e 0,014 para as demais áreas, já que este estudo foca em região altamente urbanizada com asfalto e áreas impermeabilizadas por concreto. As imagens contidas nas Figuras 6 a 8 exemplificam a situação.

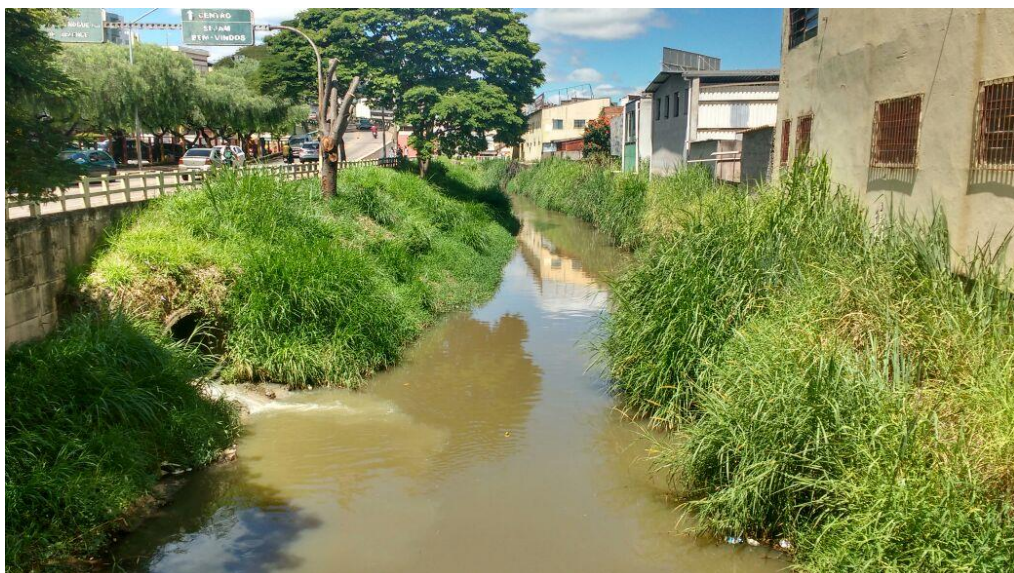


Figura 6 Calha do rio Bananeiras (acervo pessoal).



Figura 7 Ponte no trecho de estudo (Acervo Pessoal).



Figura 8 Foto entre trecho do perímetro estudado (Acervo Pessoal).

2.6.2 Determinação das seções transversais e pontes

Para a determinação das seções transversais do canal de escoamento superficial do Rio Bananeiras, foi obtido *in loco* pontos para obtenção das seções, as quais são dados de entrada no modelo computacional. Entre as pontes existentes na área de estudo, mediu-se, além do comprimento, largura e altura do tabuleiro, a seção imediatamente a jusante ou a montante da ponte para facilitar o acesso e as consequentes medidas. A fim de estabelecer a metodologia, definiu-se

somente a cota lateral com a ajuda de um GPS, com resolução de 1 m, estas medidas foram ajustadas de acordo com a declividade adotada de 0,003 m/m e seguindo a topografia dada pelo MDE, com algumas cotas corrigidas através dos dados da topografia local. As seções de estudos foram adquiridas nos seguintes pontos, de acordo com a Figura 10.



Figura 9 Pontos de referência para seção e pontes (adaptado Google Earth).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados da caracterização da área de estudo

Os resultados da caracterização da área de estudo, contida a metodologia no item 2.2, seguem nas Figuras 10 e 11, respectivamente, decorrentes do item 2.2.3: curvas de níveis de Conselheiro Lafaiete; e 2.2.4: Topografia do terreno da área baixa.

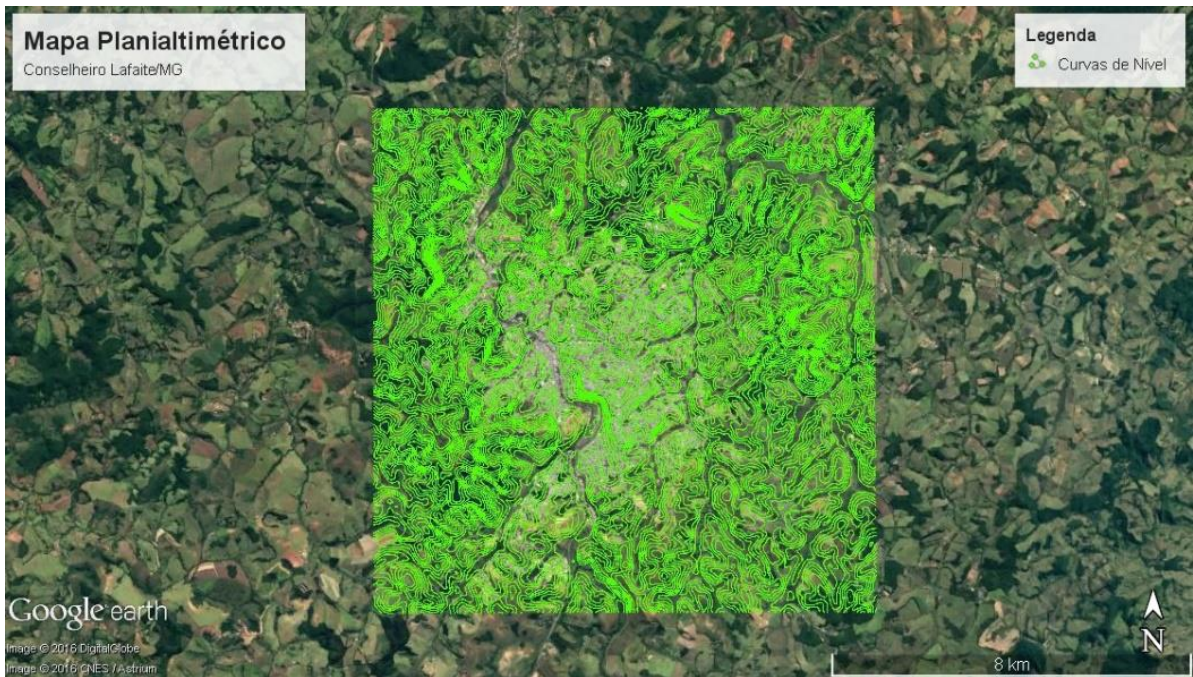


Figura 10 Mapa planialtimétrico da cidade de Conselheiro Lafaiete-MG (adaptado: Google Earth).

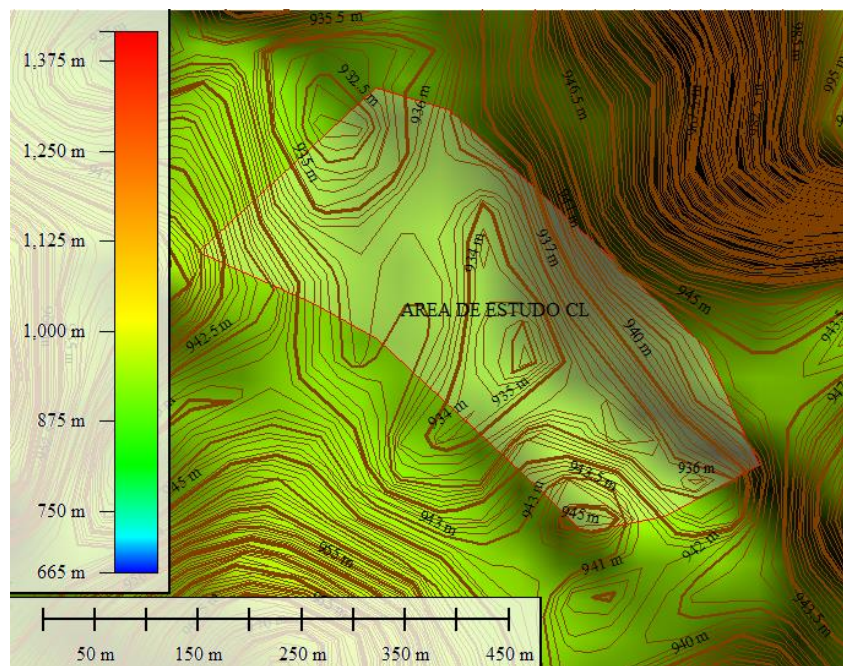


Figura 11 Curvas de níveis da região estudada (adaptada Global Mapper v18).

De acordo com o item 2.3 da metodologia, tem-se o resultado do Modelo Digital de Elevação (MDE) para a área de Conselheiro Lafaiete delimitada através do QGis, conforme indicado na Figura 12.

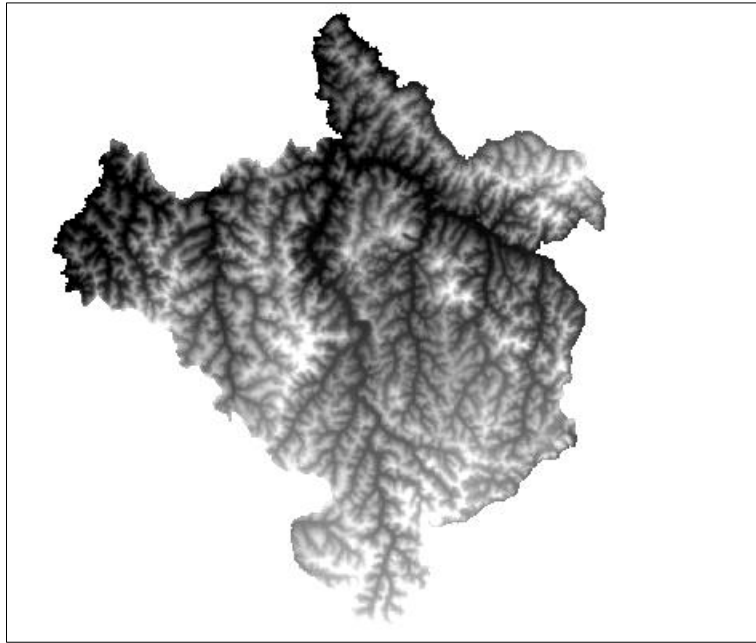


Figura 12 MDE gerado pelo software Qgis 2.18 (adaptado Qgis 2.18).

De acordo com os métodos apresentados no item 2.4, tem-se as Figuras 13 e 14, com direção de fluxo, declividade e área de contribuição, resultando na delimitação da sub-bacia de contribuição para o ponto exutório considerado no estudo.

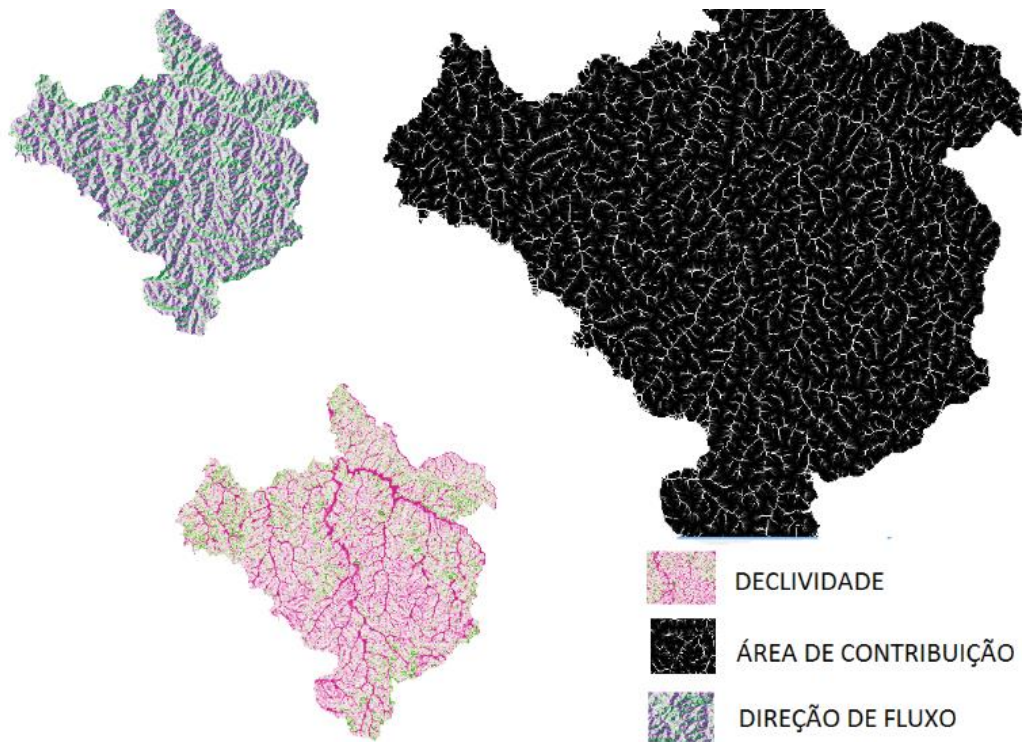


Figura 13 Modelos para delimitação da bacia (adaptado Qgis 2.18).

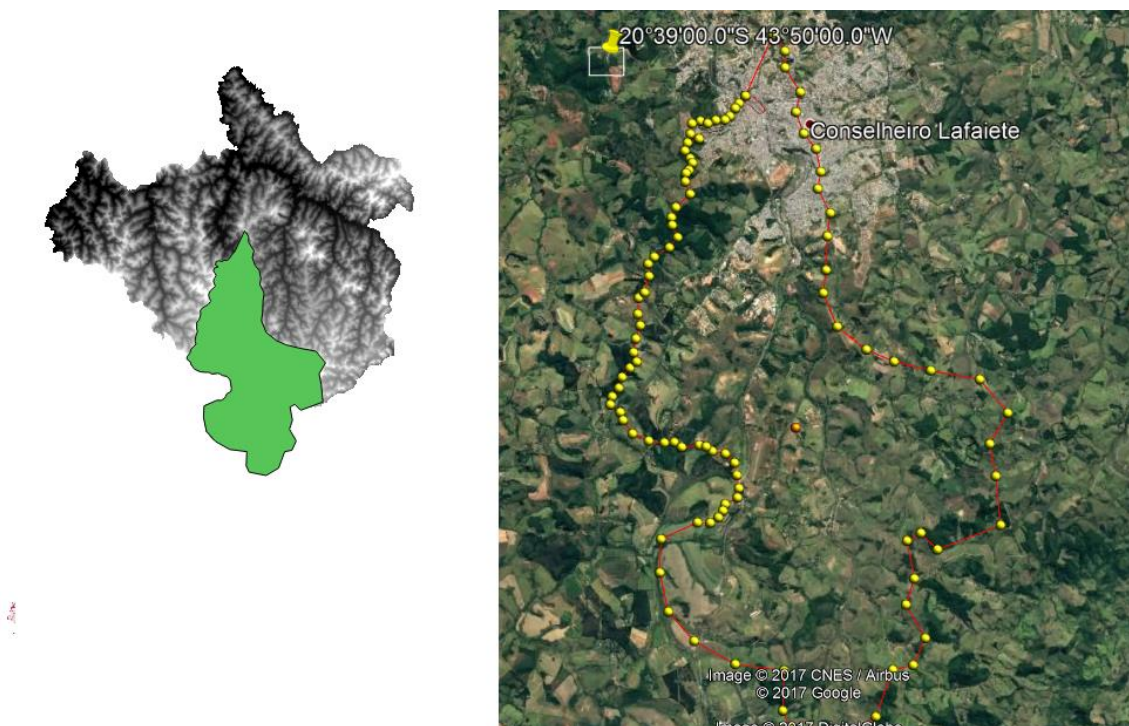


Figura 14 Sub-bacia de estudo (adaptado Qgis 2.18 e Google Earth Pro).

3.2 Estimativas de vazão

Para a estimativa das vazões por meio do método Racional, utilizaram-se os parâmetros dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 Parâmetros para utilização do Método Racional

PARÂMETRO	VALOR
Comprimento do canal principal (km)	15,59
Desnível máximo da bacia (m)	202,00
Tempo de concentração (min)	202,00
Período de retorno (anos)	2, 5, 10, 25, 50 e 100
Intensidade de chuva (mm/h)	14,9; 18,3; 21,3; 26,1; 30,4 e 35,5
Declividade média adotada para bacia (m/m)	0,003
Coefficiente de <i>Runoff</i> da bacia (C)	0,28

Portanto, esses valores permitiram obter as vazões para os referidos tempos de retorno, conforme especificado na Tabela 7.

Tabela 7 Vazões de projeto calculadas

Tempo de retorno [anos]	Vazão máxima [m ³ /s]
2	95,2
5	116,6
10	135,9
25	166,4
50	193,9
100	226,1

O método racional às vezes superestima os valores de vazões máximas, porém ele foi utilizado devido à dificuldade em encontrar dados das vazões históricas na região de estudo. É importante ressaltar que medições periódicas seriam importantes para maior precisão, dando origem ao um banco de dados mais confiável, o que geraria uma maior confiabilidade no modelo computacional do mapa de inundação.

3.3 Análise nas Seções

O *software* HEC-RAS gerou os resultados das cotas altimétricas em que a lâmina d'água se elevaria no Ribeirão Santo Antônio - trecho inserido na área estudada - quando incidissem as vazões de projeto calculadas (Tabela 7) para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25 e 50 anos.

As Figuras 15 a 20 ilustram a variação altimétrica da lâmina d'água no Ponto 3 (ponte 3) de referência do trecho estudado para o Ribeirão Santo Antônio.

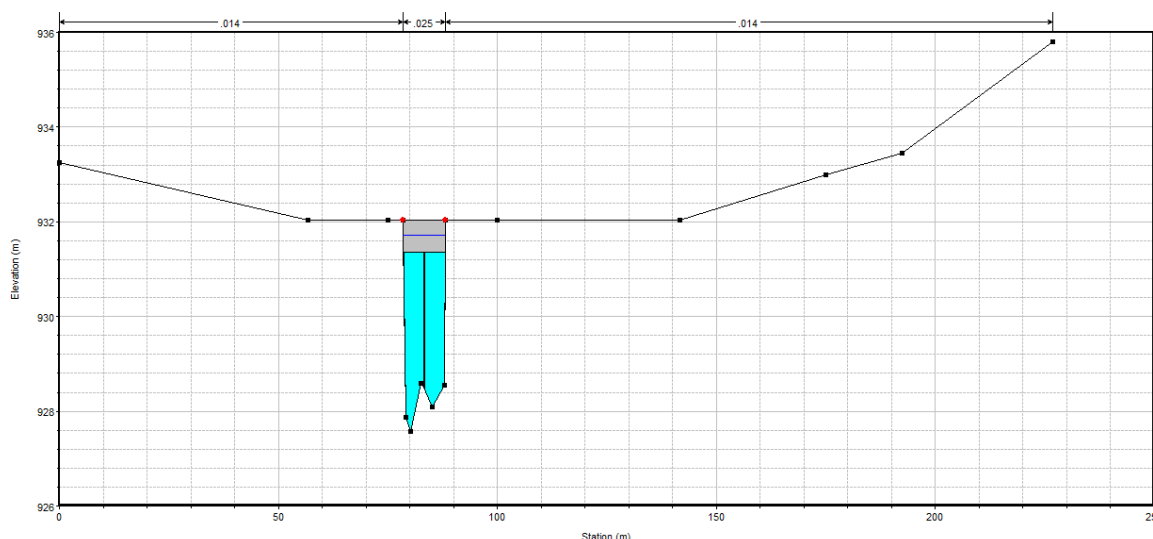


Figura 15 Seção transversal no ponto 3 para a Q_{max} com período de retorno de 2 anos (adaptado HEC-RAS).

Conforme análise da Figura 15, que ilustra a variação altimétrica para a vazão máxima de projeto calculada para um período de retorno de 2 anos, equivalente a $95,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 7), infere-se que a lâmina d'água não extrapola as partes superiores das estruturas físicas (pontes).

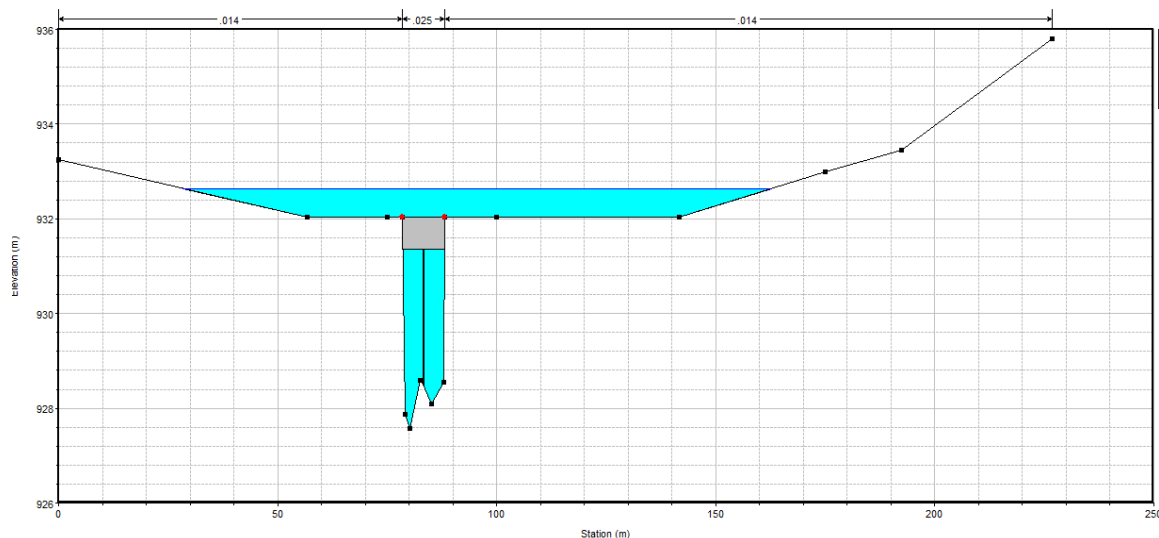


Figura 16 Seção transversal no ponto 3 Q_{max} com período de retorno de 5 anos (adaptado HEC-RAS).

De acordo com a análise da Figura 16, que ilustra a variação altimétrica para a vazão máxima de projeto calculada para um período de retorno de 5 anos, equivalente a $116,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 7), nota-se que a lâmina d'água excede as partes superiores das estruturas físicas (pontes) em aproximadamente 0,6 metros, atingindo a cota de 932,6 m.

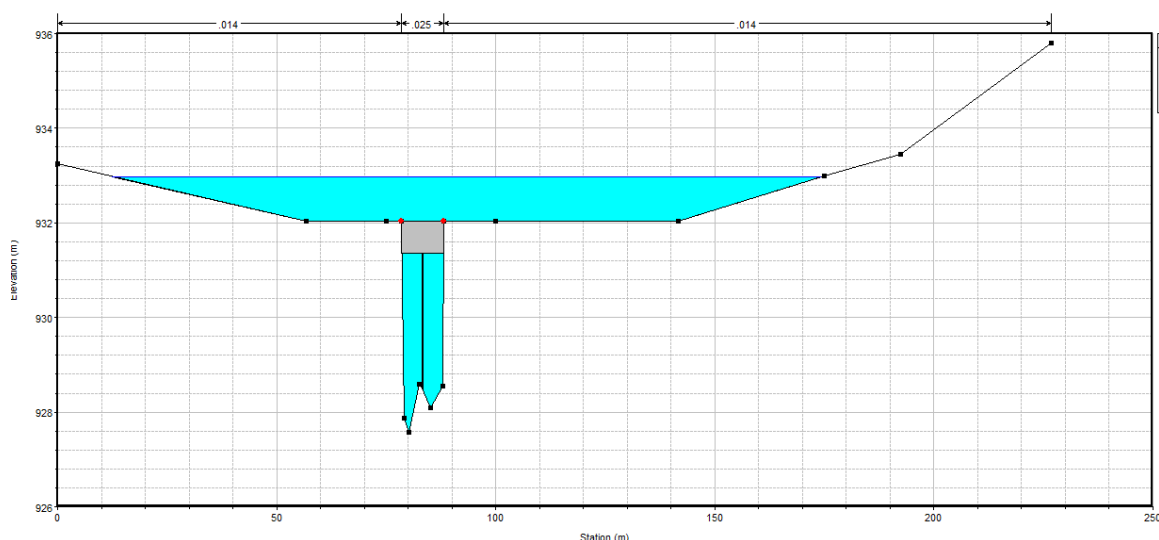


Figura 17 Seção transversal no ponto 3 para Q_{max} com período de retorno de 10 anos (adaptado HEC-RAS).

Com base na análise da Figura 17, que ilustra a variação altimétrica para a vazão máxima de projeto calculada para um período de retorno de 10 anos, equivalente a $135,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 7),

observa-se que a lâmina d'água excede as partes superiores das estruturas físicas (pontes) em aproximadamente 1,0 m, atingindo a cota de 933,0 m.

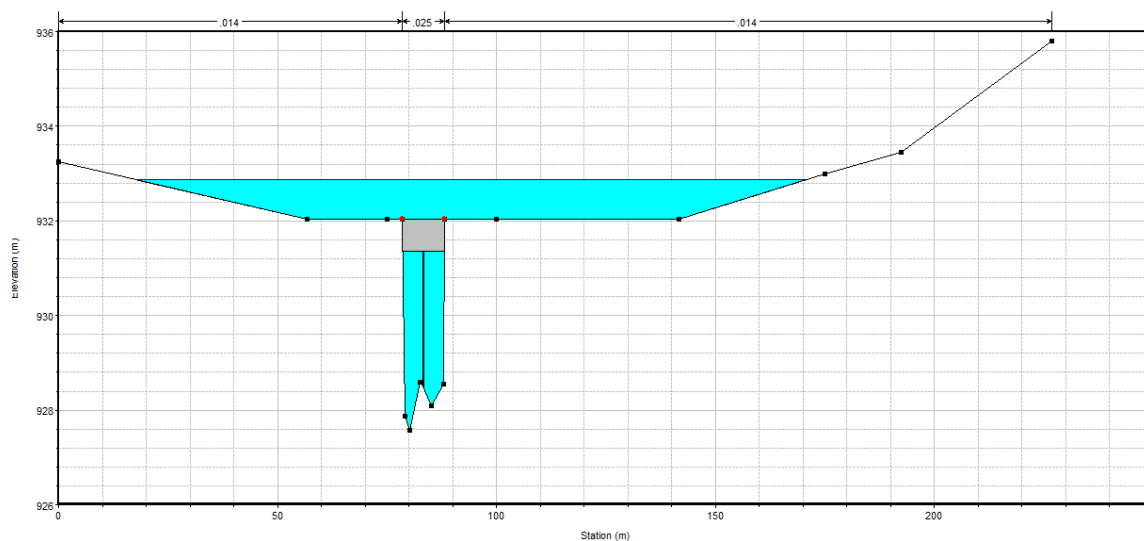


Figura 18 Seção transversal no ponto 3 para Q_{max} com período de retorno de 25 anos (adaptado HEC-RAS).

Conforme análise da Figura 18 acima, que ilustra a variação altimétrica para a vazão máxima de projeto calculada para um período de retorno de 25 anos, equivalente a $166,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 7), nota-se que a lâmina d'água diminui altimetricamente em relação ao período de retorno de 10 anos, excedendo as partes superiores das estruturas físicas (pontes) em aproximadamente 0,8 m, atingindo a cota de 932,80 m.

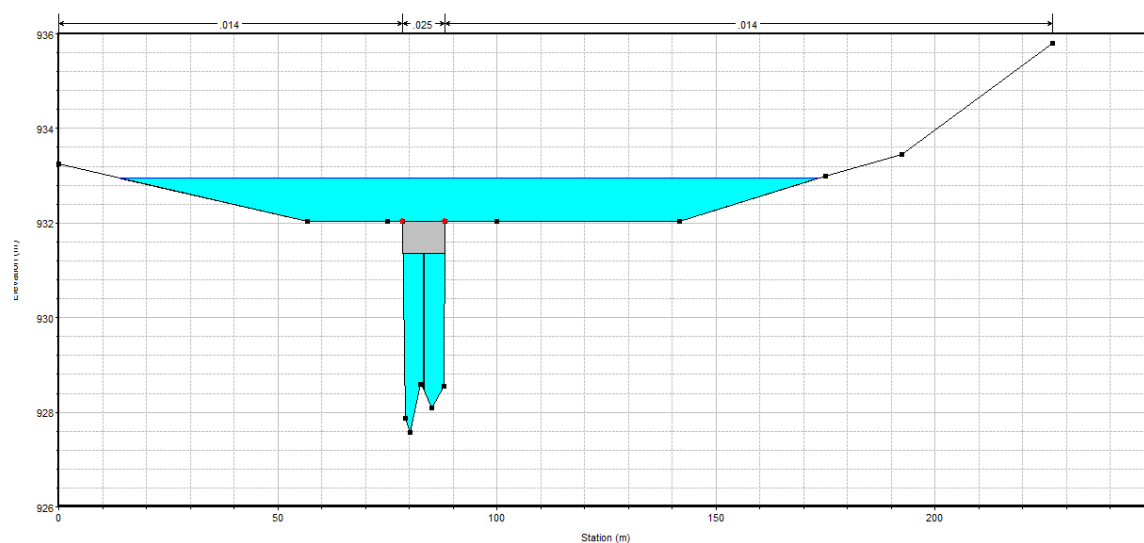


Figura 19 Seção transversal no ponto 3 para Q_{max} com período de retorno de 50 anos (adaptado HEC-RAS).

De acordo com a análise da Figura 19 acima, que ilustra a variação altimétrica para a vazão máxima de projeto calculada para um período de retorno de 50 anos, equivalente a $193,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 7), nota-se que a lâmina d'água volta a extrapolar as partes superiores das estruturas físicas (pontes) em aproximadamente 1,0 metros, atingindo a cota de 933,0 m.

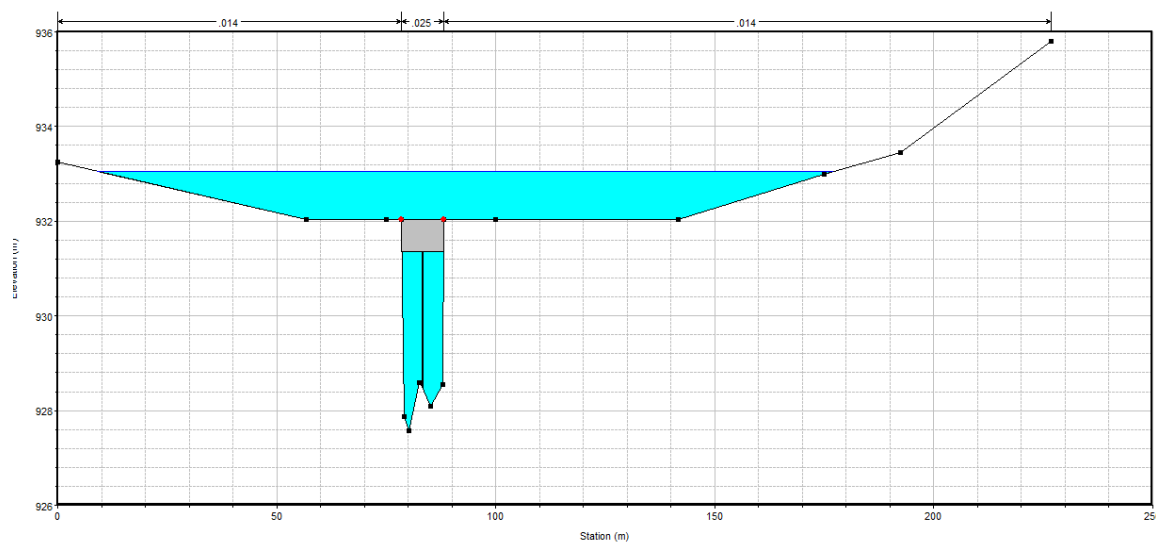


Figura 20 Seção transversal no ponto 3 para Q_{max} com período de retorno de 100 anos (adaptado HEC-RAS).

Conforme análise da Figura 20 acima, que ilustra a variação altimétrica para a vazão máxima de projeto calculada para um período de retorno de 100 anos, equivalente a $226,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 7), nota-se que, semelhantemente à Q_{max} com período de retorno de 10 e 50 anos, a lâmina d'água excede as partes superiores das estruturas físicas (pontes) em aproximadamente 1,0 m, atingindo a cota de 933,0 m.

Após análise das seções apresentadas nas figuras 15 a 20, com exceção para o período de retorno de 25 anos, nota-se que houve acréscimo contínuo na extrapolação altimétrica conforme o aumento do tempo de retorno adotado e sua respectiva vazão de projeto calculada.

A variação altimétrica da seção da lâmina d'água calculada para o período de retorno de 25 anos foi inferior ao período de 10 anos, tornando-se exceção no estudo. Tal fato pode ter acontecido por interferência da geometria da seção transversal do canal de escoamento, pois canais circulares apresentam sua maior vazão com quando estão 95% cheio e não quando estão em 100%. Ressalta-se ainda que essa variação nos resultados pode ter sido um erro na modelagem numérica devido a precisão dos dados utilizados no estudo.

Portanto, apresentadas as seções geradas pelo *software* HEC-RAS, conclui-se que há a extrapolação dos limites superiores das estruturas físicas (pontes) para todas as vazões máximas de projeto calculadas, exceto para a de período de retorno de 2 anos.

3.4 Mapas de Inundação

Neste tópico serão apresentados os mapas de inundações, objetivo geral deste estudo, gerados segundo o modelo. Ressalta-se que a metodologia definiu o uso do MDE com resolução de 30 m, no entanto, para aprimorar a precisão deste modelo seria necessário possuir a topografia real, sendo disponibilizada pela prefeitura municipal ou elaborada por equipamentos topográficos específicos.

A seguir, dispostas nas Figuras 21 a 26, encontram-se os mapas de inundações gerados por meio do *software* HEC-RAS para a área de estudo definida nesta pesquisa.

Em azul claro estão representadas, nas Figuras 21 a 26, as áreas inundadas, conforme modelagem numérica realizada pelo *software* HEC-RAS. A linha em azul escuro representa o canal do curso d'água definido para o trecho da região estudada.

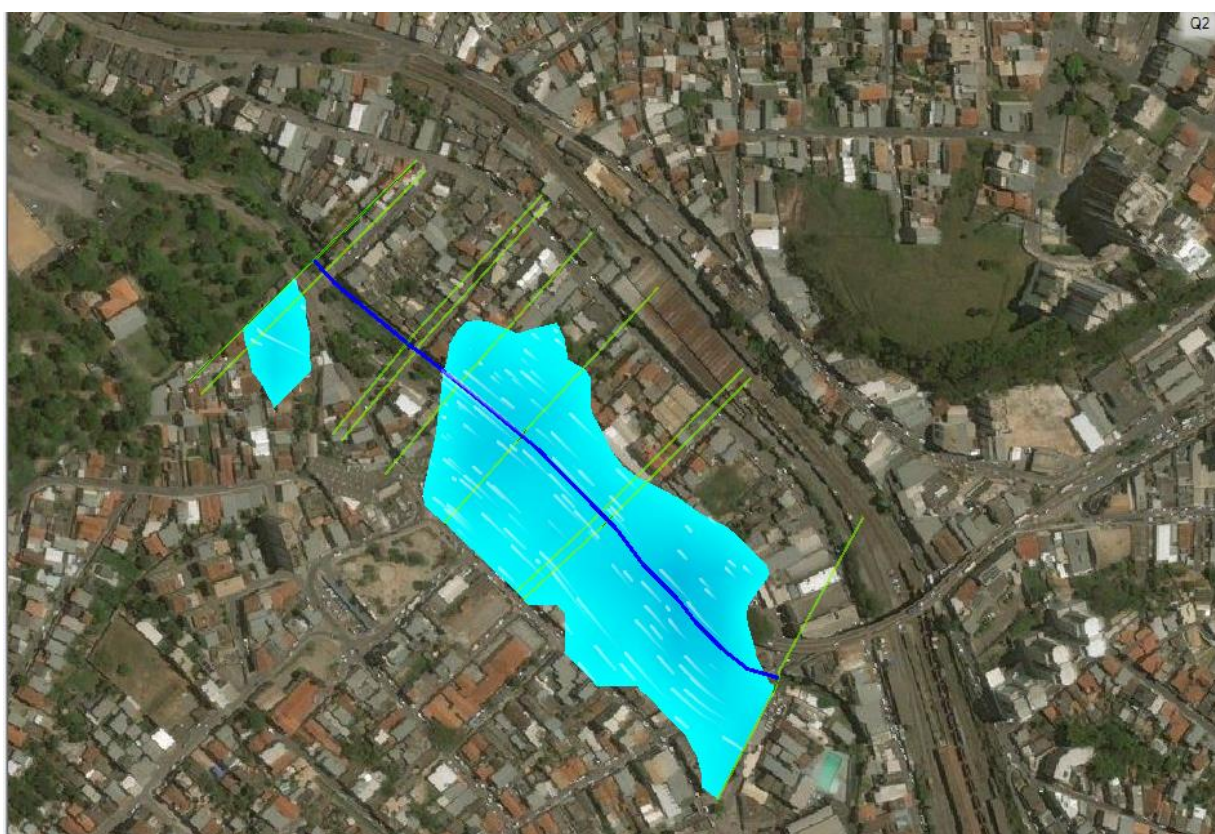


Figura 21 Mapa de Inundação para Q_{max} com período de retorno de 2 anos (adaptado HEC-RAS).

No mapa de inundação apresentado pela Figura 21 acima, nota-se que a área de inundação fica restrita, longitudinalmente, a aproximadamente dois terços da parte final do trecho definido como área de estudo dessa pesquisa, além de abranger, transversalmente, grande parcela da área urbanizada circunscrita ao canal de escoamento superficial deste segmento do Rio Bananeiras.

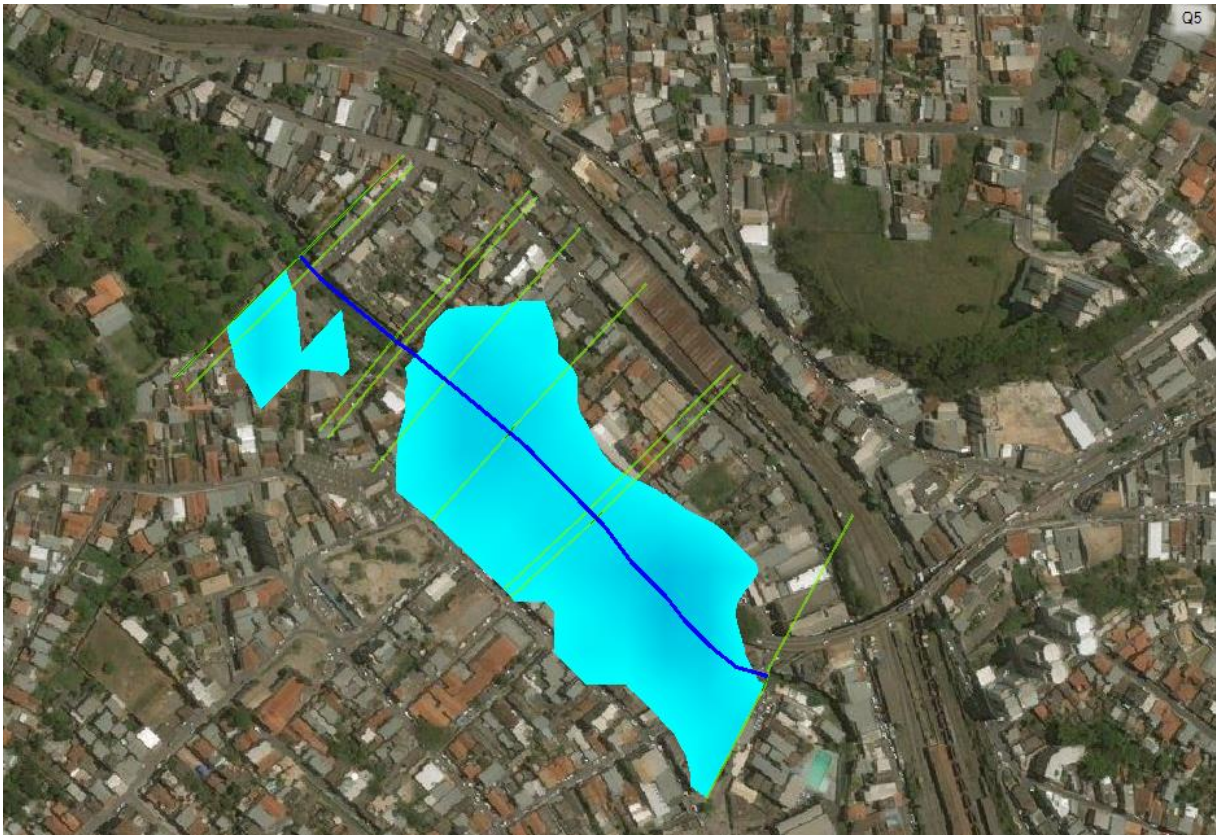


Figura 22 Mapa de Inundação para Q_{max} com período de retorno de 5 anos (adaptado HEC-RAS).

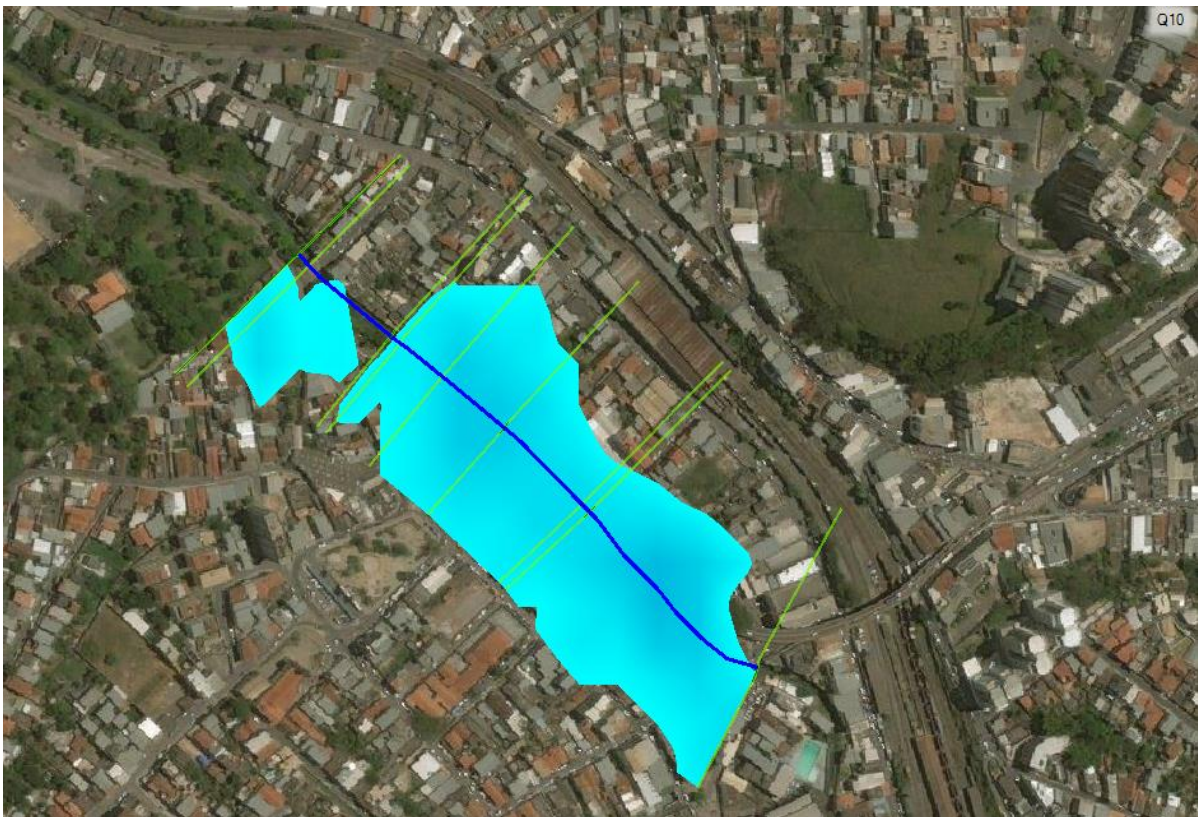


Figura 23 Mapa de Inundação para Q_{max} com período de retorno de 10 anos (adaptado HEC-RAS).



Figura 24 Mapa de Inundação para Q_{max} com período de retorno de 25 anos (adaptado HEC-RAS).



Figura 25 Mapa de Inundação para Q_{max} com período de retorno de 50 anos (adaptado HEC-RAS).



Figura 26 Mapa de Inundação para Q_{max} com período de retorno de 100 anos (adaptado HEC-RAS).

Conforme análise dos mapas de inundação apresentados pelas Figuras 22 a 26 acima, infere-se que as machas de inundação aumentam de acordo com o Tempo de Retorno utilizado para projeto. A área inundável expande-se com maior intensidade no sentido longitudinal do canal de escoamento superficial até preencher todo o trecho estudado do Rio Bananeiras. Nota-se ainda o menor crescimento da região inundada no sentido transversal ao leito do curso d'água em questão.

O método numérico mesmo não portando os melhores dados é uma ferramenta útil nestes tipos de estudos para utilização em planejamentos urbanos, pois representa planimetricamente as áreas passíveis de inundação para diferentes vazões de projetos calculadas para um ponto de exutório pré-determinado.

Para maximizar a precisão de tais estudos, é importante a elaboração de um mapa planialtimétrico da região estudada com equipamentos topográficos específicos, aquisição de mais dados para determinação da seção transversal comum para o canal de escoamento superficial do curso d'água, aquisição de dados pluviométricos locais, cálculo da vazão de projeto com diferentes métodos (racional e hidrograma unitário), dentre outros.

Assim, com base nos mapas de inundação obtidos neste estudo pode-se inferir que medidas preventivas e imediatas devem ser adotadas para atenuar os danos causados à população que reside de forma contígua ou próxima ao leito do canal de escoamento superficial do Rio Bananeiras.

Devido ao alto grau de antropização da área estudada, há um excessivo acúmulo de lixo no leito do curso d'água, logo se faz necessário a limpeza imediata destes resíduos, além da capina nas margens do Rio Bananeiras.

Posteriormente, indica-se adotar todas ou algumas das seguintes medidas preventivas para abrandar as inundações na região estudada: desassorear o leito do curso d'água com o intuito de aumentar a área da seção transversal de escoamento superficial; incentivar a recuperação das áreas de preservação permanente a montante do exutório definido para o estudo, objetivando maximizar o tempo de concentração na bacia de contribuição deste ponto, elevar a taxa de infiltração, e, conseqüentemente, reduzir o volume escoado durante as precipitações e; edificar bacias de contenção contíguas ao curso d'água ou barragens com a finalidade de minimizar ou controlar a vazão de escoamento.

4 CONCLUSÃO

Conforme análise dos dados obtidos, conclui-se que estudos mais detalhados e meticulosos são cogentes, sendo importantes para que a situação seja melhor compreendida e, assim, definir quais medidas de controle deve-se adotar para reduzir a frequência das inundações na área urbana e aumentar o conforto da população, que não seria mais impactada com as enchentes periódicas.

Portanto, neste trabalho, os mapas de inundação determinados pelo *software* HEC-RAS em que apresentam as áreas inundáveis para o trecho pré-definido do Rio Bananeiras apresentaram-se eficientes para ilustrar a gravidade das enchentes acarretadas por diferentes vazões de projeto calculadas e planejar possíveis ações de controle dessas cheias. Contudo, ainda faz-se necessário um estudo mais detalhado e minucioso com a finalidade maximizar a precisão das manchas de inundação geradas pelo modelo numérico empregado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas. **Sinopse das Bacias do Atlântico Sul: Trecho Leste.** Disponível em< <https://goo.gl/smgX9e>> Acesso em 29 de novembro de 2017.

ALENCAR, D. B. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. **Influência da precipitação no escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica do Distrito Federal.** Eng. Agrícola, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 103-112, jan./abr. 2006.

AMARAL, Rosângela do; SANTORO, Jair; TOMINAGA, Lídia Keiko. **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

BALBINOT, Rafaelo. **O Papel da Floresta no Ciclo Hidrológico em Bacias Hidrográficas.** Disponível em: <<http://www.redeacqua.com.br/wp-content/uploads/2011/09/PAPEL-DA-FLORESTA.pdf>>. Acesso em 14 de novembro de 2017.

BARBOSA, F.A.R. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/PB.** 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Urbanismo) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. Disponível em:

<<http://tede.biblioteca.ufpb.br:8080/handle/tede/5490>> Acesso em: 26 de novembro 2017.

BLADÉ, E; et al. **Modelización numérica em ríos em régimen permanente y variable: uma visión a partir del modelo HEC-RAS.** Edicions UPC, 2009, 216 p.

CARVALHO, F. C.; SILVA, L. D. B. **Infiltração.** Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf>>. Acesso em 18 de novembro de 2017.

CORREIA, E., F., G; RIBEIRO, G., P.; BAPTISTA, A.,C. **Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, Utilizando o Potencial de Geotecnologias na Definição de Áreas de Risco à Inundação.** Disponível em: <<file:///C:/Users/Admin/Desktop/UFSJ/TCC/MOdelagem.pdf>>. Acesso em 29 de novembro de 2017.

ENAMOTO, C.F. **Método para elaboração de mapas de inundação estudo de caso na bacia do Rio Palmital, Paraná.** 2004. 132 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de tecnologia, Universidade federal do Paraná. Curitiba-PR.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - **IBGE**, 1976. Disponível em <www.ibge.gov.br>.

Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Ciclo Hidrológico.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>. Acesso em 10 de novembro de 2017.

Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Controle de Inundações.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/aguas-urbanas/controle-de-inunda%C3%A7%C3%B5es>>. Acesso em 25 de novembro de 2017.

MUNIZ, T.P. **Avaliação preliminar da capacidade de escoamento do trecho canalizado no terço superior do Córrego do São Pedro com auxílio da ferramenta HEC-RAS.** Faculdade de engenharia UFJF, 2015. 59p.

Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). **QGIS.** Disponível em: <http://www.qgis.org/pt_BR/site/index.html>. Acesso em 29 de novembro de 2017.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. **Capacidade de Infiltração de Água em Solos sob Diferentes Usos e Práticas de Manejo Agrícola.** Revista Ambiente & Água, v.4, n.2, p.188-199, 2009.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. **Gestão de bacias hidrográficas.** Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142008000200004&script=sci_arttext>. Acesso em 29 de novembro de 2017.

PUESTA, R. T; RENGIFO, J. T; BRAVO, N.M. **ArcGIS: Básico 10.** Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María –Peru, 2011, 148 p.

RIBEIRO, C.B.M.; LIMA, R.N.S. **Simulação de inundações urbanas a partir da integração de técnicas de geoprocessamento à modelagem hidráulica e hidrológica.** Revista de Geografia - PPGeo - v. 2, nº 1, p.1-9, 2011.

ROCHA, C. H. B.; PAIVA, L. E. D. **Das enchentes agravadas devido à canalização do Córrego do São Pedro, do Nível da Água e da BR440.** Núcleo de Análise Geo-Ambiental - NaGEA, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2010.

SILVA, N. F.; CUNHA, F. N.; CABRAL FILHO, F. R.; MORAIS, W. A.; CUNHA, E. S.; ROQUE, R. C.; ALVES, D. K. M.; TEIXEIRA, M. B. **Métodos para Estimativa da Infiltração de Água em um Latossolo sob Plantio Direto e Convencional.** Disponível em: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/886-5602-1-PB.pdf>. Acesso em 18 de novembro de 2017.

SILVEIRA, A. L. L. **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica.** In: Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. UFRGS, 2009. Cap. 2, p. 35-51.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 4ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2012. 943 p.

TUCCI, C.E.M., PORTO, R., BARROS, M. T. **Drenagem Urbana,** Editora da Universidade/UFRGS-ABRH, Porto Alegre, 1995, 428p.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul.** ABRH, Ed. UFRGS: Porto Alegre–RS, 2003, 471 p.

TUNDISI, José Galizia. **Ciclo Hidrológico e Gerenciamento Integrado.** Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?pid=S0009-67252003000400018&script=sci_arttext&lng=en#fig01>. Acesso em 10 de novembro de 2017.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, et al. **Mapas de Solos do Estado de Minas Gerais.** Disponível em: <http://www.dps.ufv.br/?page_id=742>. Acesso em 03 de agosto de 2017.

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). **Mapa mental dos problemas das enchentes urbanas.** Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/de/acidentes/mma10.htm>>. Acesso em 27 de novembro de 2017.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System:User's Manual, version 4.1.** Hydrologic Engineering Center, 2010, 790 p.

ZAIDAN, R. T. **Geoprocessamento Conceitos e Definições.** Disponível em: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/206-391-1-SM.pdf>. Acesso em 29 de novembro de 2017.

ZEE – Zoneamento Ecológico Econômico do Estado de Minas Gerais. **Sistema ZEE.** Disponível em: < http://geosisemanet.meioambiente.mg.gov.br/zee/ >. Acesso em: 28 de novembro de 2017.

WILKEN, P.S. **Engenharia de Drenagem Superficial.** CETESB, São Paulo, 1978, 477p.