



**UFOP**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

---



**CÁSSIO CASTOR DE OLIVEIRA**

**MAPEAMENTO DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO PARA A  
ÁREA URBANA DA CIDADE DE SANTO ANTÔNIO DO  
GRAMA - MG**

Ouro Preto

2022

Mapeamento das manchas de inundação para a área urbana da cidade de Santo  
Antônio do Grama - MG

Cássio Castor de Oliveira

Trabalho Final de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção  
do Grau de Engenheiro Ambiental na  
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 20/10/2022

Área de concentração: Engenharia Ambiental

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dra. Ana Letícia Pilz de Castro

Ouro Preto

2022



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Cássio Castor de Oliveira**

### **Mapeamento das manchas de inundação para a área urbana da cidade de Santo Antônio do Grama - MG**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro ambiental

Aprovada em 20 de outubro de 2022

#### Membros da banca

Dra. - Ana Letícia Pilz de Castro - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dra. - Tamara Daiane de Souza - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dra. - Marina de Medeiros Machado - Universidade Federal de Ouro Preto

Ana Letícia Pilz de Castro, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Ana Letícia Pilz de Castro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/10/2022, às 09:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0417669** e o código CRC **A6348FBF**.

*Dedico esse trabalho a toda população de Santo Antônio do Grama,  
principalmente a todos que já foram afetados pelas inundações na cidade.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me dado força, persistência e coragem em todos esses anos de graduação.

Aos meus pais Angelita Aparecida Castor Oliveira e Antônio Leles de Oliveira, por confiar em mim, pelo suporte e apoio para garantir que esse sonho fosse realizado. A minha namorada Edpaula por todo companheirismo durante a graduação.

A toda minha família e amigos que me apoiam sempre.

À professora Ana Letícia Pilz de Castro por toda paciência, orientação e incentivo a mim dedicados neste trabalho.

A todos meus colegas de curso, especialmente à turma 16.2 e 17.2.

A toda Universidade de Ouro Preto, à Escola de Minas, ao DEAMB e todos os professores, pelo ensino de qualidade.

## RESUMO

O crescimento acelerado das áreas urbanas levou a um grave problema associado, a falta de planejamento para atender as demandas da população. Essas ocupações, na maioria das vezes, se deram em área ribeirinhas, o que acarretou diversos problemas relacionados à drenagem urbana. O objetivo do presente trabalho é elaborar as manchas de inundação para a área urbana da cidade de Santo Antônio do Grama - MG. Para isso utilizou-se o *software* QGis para caracterizar a bacia e obter os principais parâmetros geomorfológicos da bacia. A seguir foram obtidos os dados de vazões máximas para os tempos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos através do método de regionalização de vazão. Dessa forma, a partir desses dados foi possível realizar a modelagem hidráulica do canal utilizando o *software* HEC-RAS. Por fim, pode-se simular as manchas de inundação e gerar os mapas. A bacia hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio apresentou uma área de 121,34 km<sup>2</sup> e se apresentou pouco suscetível à inundações de acordo com suas características físicas, o que diverge da situação real. Ao final da simulação das manchas de inundação, os resultados apresentados culminaram em uma altura de lâmina d'água de 2,86 metros para o Tr de 10 anos e 4,41 metros para o Tr de 500 anos, sendo este, o pior cenário modelado. Além disso, foram comparados os produtos gerados pela modelagem com eventos reais para avaliar o tempo de retorno para as chuvas de 2017 e 2019, anos onde ocorreram enchentes no município. De acordo com a modelagem, no ano de 2019, onde a lâmina d'água atingiu uma altura de aproximadamente 3,30 metros, houve uma chuva com tempo de recorrência próximo de 50 anos, enquanto em 2017, pior enchente que se tem conhecimento da cidade, houve naquele ano, provavelmente, uma chuva com tempo de retorno se aproximando dos 1.000 anos. As conclusões geradas por esse estudo fornecem dados para possíveis intervenções público-privadas visando à mitigação dos impactos associados a inundações na cidade.

Palavras-chaves: Manchas de inundação, HEC-RAS, Regionalização de Vazão, Drenagem Urbana, Santo Antônio do Grama - MG.

## ABSTRACT

The accelerated growth of urban areas has led to a serious associated problem, the lack of planning to meet the demands of the population. These occupations, most of the time, took place in riverside areas, which caused several problems related to urban drainage. The objective of the present work is to elaborate the flood spots for the urban area of the city of Santo Antônio do Grama - MG. For this, the QGIS software was used to characterize the basin and obtain the main geomorphological parameters of the basin. Next, the maximum flow data for the return times of 10, 20, 50, 100 and 500 years were obtained through the flow regionalization method. Thus, from these data it was possible to perform the hydraulic modeling of the channel using the HEC-RAS software. Finally, the flood spots can be simulated and maps generated. The Ribeirão Santo Antônio watershed had an area of 121.34 km<sup>2</sup> and was not very susceptible to flooding according to its physical characteristics, which differs from the real situation. At the end of the flood spot simulation, the results presented culminated in a water depth of 2.86 meters for the 10-year Tr and 4.41 meters for the 500-year Tr, which is the worst case scenario. modeled. In addition, the products generated by the modeling were compared with real events to evaluate the return time for the rains of 2017 and 2019, years where floods occurred in the municipality. According to the model, in 2019, where the water depth reached a height of approximately 3.30 meters, there was a rain with a recurrence time of close to 50 years, while in 2017, the worst flood known in the city, there was probably a rain that year with a return time approaching 1,000 years. The conclusions generated by this study provide data for possible public-private interventions aimed at mitigating the impacts associated with floods in the city.

Keywords: Flood patches, HEC-RAS, Flow Regionalization, Urban Drainage, Santo Antônio do Grama - MG.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo Hidrológico .....	7
Figura 2 – Representação em planta e corte de uma bacia hidrográfica .....	8
Figura 3 – Esquema dos quatro níveis de água atingidos por um curso d'água.	10
Figura 4 – Rua no centro da cidade inundada pelo evento de 2017 .....	11
Figura 5 – Fluxograma geral da metodologia de regionalização de vazão .....	16
Figura 6 – Interface do software de regionalização de vazão. ....	18
Figura 7 – Interface do <i>software</i> .....	19
Figura 8 – Localização da área de estudo .....	22
Figura 9 – Mapa da Hidrografia da área de estudo.....	23
Figura 10 – MDE e Mapa de Elevação .....	28
Figura 11 – Uso do Solo na região de estudo.....	31
Figura 12 – Eixo de estudo do Ribeirão Santo Antônio .....	33
Figura 13 – Perfil Topográfico do Eixo Longitudinal.....	33
Figura 14 – Resultados da Elevação da Superfície D'água.....	34
Figura 15 – Mancha de Inundação para Tr de 10 anos .....	38
Figura 16 – Mancha de Inundação para Tr de 20 anos .....	38
Figura 17 – Mancha de Inundação para Tr de 50 anos .....	39
Figura 18 – Mancha de Inundação para Tr de 100 anos .....	39
Figura 19 – Mancha de Inundação para Tr de 500 anos .....	40
Figura 20 – Altura da lâmina d'água na enchente de 2019.....	42
Figura 21 – Altura da lâmina d'água na enchente de 2017.....	43



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – População Brasileira e Porcentagem de População Urbana .....	4
Tabela 2 – Cenários e equações para cálculo das vazões pelo método da regionalização de vazões .....	26
Tabela 3 – Morfometria da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio .....	30
Tabela 4 – Coeficiente de Manning .....	32
Tabela 5– Cenários para a Modelagem Hidráulica .....	32
Tabela 6 - Resultados das velocidades de escoamento em (m/s).....	35
Tabela 7 - Resultados para número de Froude. ....	36
Tabela 8 – Áreas das Manchas de Inundação.....	40

## LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BHRSA – Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

HEC-RAS – *Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System*

HU – Hidrograma Unitário

KC – Coeficiente de Compacidade

MDE – Modelo Digital de Elevação

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

TR – Tempo de Retorno

UFV – Universidade Federal de Viçosa

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
2.	Objetivos .....	3
2.1.	Objetivo Geral.....	3
2.2.	Objetivo Específico .....	3
3.	Revisão Bibliográfica.....	4
3.1.	Urbanização.....	4
3.2.	Ciclo Hidrológico.....	6
3.3.	Bacias Hidrográficas.....	7
3.4.	Inundações .....	9
3.4.1.	Susceptibilidade a inundações.....	10
3.4.2.	Inundações no contexto de Minas Gerais .....	10
3.5.	Modelagem Hidrológica .....	12
3.5.1.	Modelos Hidrológicos.....	13
3.5.1.1.	Método Racional .....	14
3.5.1.2.	Hidrograma Unitário .....	14
3.5.1.3.	Hidrograma Unitário Sintético de SCS.....	15
3.5.2.	Regionalização de vazão .....	15
3.6.	Modelagem Hidráulica – HEC-RAS .....	18
3.7.	Mapas de inundação .....	20
4.	Metodologia.....	22
4.1.	Local de Estudo.....	22
4.1.1.	Hidrografia.....	23
4.2.	Caracterização da Bacia do Ribeirão Santo Antônio .....	23

4.2.1.	Modelo Digital de Elevação.....	23
4.2.2.	Caracterização Morfométrica .....	24
4.2.3.	Uso e Ocupação do Solo .....	25
4.3.	Dados Hidrológicos.....	25
4.4.	Modelagem Hidráulica – HEC-RAS.....	26
4.5.	Comparação da modelagem com eventos críticos reais .....	27
5.	Resultados .....	28
5.1.	Caracterização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio.....	28
5.1.1.	Modelo Digital de Elevação.....	28
5.1.2.	Morfometria da Bacia .....	29
5.1.3.	Uso e Ocupação do Solo .....	31
5.2.	Dados Hidrológicos.....	32
5.3.	Modelagem Hidráulica .....	32
5.4.	Comparação com eventos críticos reais.....	41
6.	Conclusões .....	44
7.	Bibliografia .....	46

# 1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado das áreas urbanas, principalmente da forma que ocorreu nos países menos desenvolvidos levou a graves problemas associados à falta de planejamento para atender as demandas da população.

Esses crescimentos decorreram-se a partir do século XIX e aflorou os problemas de planejamento e gerenciamento de infraestruturas para controle hídrico das cidades. No século seguinte, houve um aumento significativo da população em áreas urbanas e que deve superar 70% até 2050, segundo FAO (2019). O Brasil acompanha essa tendência, e, segundo dados censitários de 2015, mais de 85% da população se encontra nas áreas urbanas (IBGE, 2015).

Sendo o recurso natural fundamental para garantir a existência humana, as primeiras cidades surgiram ao redor dos corpos d'água, esses, que passaram a sofrer impactos hidrológicos. Essas ocupações, na maioria das vezes, se deram em área ribeirinhas (MANTOVANI, 2016).

Provenientes da urbanização, os impactos hidrológicos já foram largamente relatados: diminuição dos processos de infiltração, aumento e aceleração das vazões de escoamento superficiais, o que acaba ocasionando uma ascensão dos picos do hidrograma. A junção da infraestrutura urbana e canalização dos rios acabam levando ao não funcionamento dos sistemas de drenagens e conseqüentemente ao aumento dos eventos de cheia (LIZARDO *et al.*, 2019).

A urbanização e ocupação das margens dos canais d'água associado ao aumento do escoamento superficial geram grandes impactos socioambientais. No processo de urbanização, as áreas de solo e cobertura vegetal são substituídas por materiais impermeáveis e com isso diminui a infiltração de água no solo. Soma-se a isso o fato de que, essas alterações estruturais impactam em áreas onde, a depender da precipitação, fazem com que as infraestruturas de drenagem urbana não atendam as demandas para as quais foram projetadas, principalmente pelo acelerado processo de impermeabilização das cidades (MÁRCIA; SILVA; AMORIM, 2016).

Nesta conjuntura o risco ambiental se torna eminente e se faz necessário um reconhecimento da área a fim de, com intensificação das chuvas, compreender os

métodos que sejam capazes de prever, de modo eficaz, a extensão dos eventos críticos.

A utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) somado a modelagem hidrológica possibilita a agregação das características da bacia hidrográfica com os bancos de dados hidrológicos, realizando análises rápidas e eficazes.

A previsão de áreas susceptíveis a inundações está relacionada ao modelo digital do terreno (MDE), uso e ocupação do solo e dados hidrológicos e hidráulicos. Portanto as utilizações dessas técnicas possibilitam a agregação das características da bacia hidrográfica com os bancos de dados hidrológicos. A obtenção das manchas de inundações é feita a partir dos dados hidrodinâmicos requerendo uma vasta quantidade de dados que são de difícil obtenção. Assim, para locais com baixa disponibilidade de parâmetros, busca-se modelagens alternativas mais simplificadas, porém, que auxiliem na prevenção dos desastres.

Desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército Norte Americano, o *Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System (HEC-RAS)*, é um *software* que se torna um grande aliado para o desenvolvimento de estudos hidrodinâmicos, sendo assim, ele foi utilizado no presente estudo a fim de gerar as manchas de inundação.

A cidade de Santo Antônio do Gramma/MG está localizada na zona da mata mineira, à aproximadamente 220 km da capital. A ocupação indevida dos leitos do curso do Ribeirão Santo Antônio que corta a cidade, associada à impermeabilização do solo, culminam com eventos recorrentes de inundações nos últimos anos levando a perdas e problemas para a população.

Desta forma, este estudo teve como objetivo mapear as áreas inundáveis do município para servir de base para políticas públicas voltadas para a gestão do sistema de drenagem.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

O objetivo do presente trabalho é mapear as manchas de inundação para a área urbana da cidade de Santo Antônio do Grama a fim de fornecer informações para as políticas de gestão de drenagem urbana da cidade.

### **2.2. Objetivo Específico**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Caracterizar a bacia hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio;
- ✓ Obter os dados das vazões associadas a diferentes tempos de retorno através do método de regionalização de vazão
- ✓ Gerar os mapas das manchas de inundação através do *software* de modelagem hidráulica HEC-RAS e
- ✓ Comparar os dados simulados com eventos de cheias reais.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Urbanização

As áreas onde se tem consumos e moradias são conhecidas como sistemas urbanos, geralmente possuem diferentes tamanhos ou integrações. No ano de 1900, 13% da população mundial era urbana, em 2009, esse número passou para 50%, e ocupando apenas 2,8% do território do globo (TUCCI, 2012).

O crescimento urbano nas últimas décadas transformou o Brasil em um país essencialmente urbano. Segundo dados do IBGE apresentados na Tabela 1, houve um crescimento populacional e conseqüentemente aumento da população urbana, que fica evidenciado tendo mais de 80% vivendo em centros urbanos.

**Tabela 1** – População Brasileira e Porcentagem de População Urbana

<b>Ano</b>	<b>População (milhões de habitantes)</b>	<b>Porcentagem da população urbana</b>
1940	41,2	31,2
1950	51,9	36,1
1960	70,0	44,6
1970	93,1	55,9
1980	119,0	67,5
1991	146,8	75,5
2000	169,0	81,2
2007	158,4	84,3

Fonte: AUTOR (2022) a partir do IBGE (2003 e 2010).

Diante disso, diversos tipos de impactos ao meio ambiente são causados. Segundo a resolução nº 306/2002 do Conselho Nacional do Meio ambiente (BRASIL, 2002), meio ambiente são os conjuntos de condições, leis, influência e interações de ordem física, química, biológica, social, cultura e urbanística, que permitem, abrigam e regem a vida em todas suas formas. Além disso, a resolução ainda trata impacto ambiental sendo como:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer matéria



ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais (BRASIL, 2002).

Dentre os diversos problemas relacionados ao meio ambiente, o uso e ocupação do solo afeta os recursos hídricos principalmente no que tange à expansão irregular sobre mananciais, ocupação em áreas de declividade acentuada e ribeirinhas, aumento da demanda hídrica, impermeabilização das áreas públicas e canalização de rios (TUCCI, 2012).

No Brasil, a urbanização ocorreu principalmente ao longo dos rios, trazendo diversas consequências para os recursos hídricos. Além disso, por consequência, os impactos se estendem ao solo, fauna, flora e na qualidade do ar (FENDRICH; OLIYNIK, 2002).

A fim de reduzir, amenizar ou resolver os impactos causados aos recursos hídricos, o Governo Federal Brasileiro ao longo dos anos aprovou leis, regulamentos e criou órgãos para atuar sobre os problemas.

Um dos principais instrumentos para regulação foi a criação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) que foi instituída pela Lei nº 9.433/1997, que estabeleceu a descentralização da gestão dos recursos hídricos, delegando funções para os estados e ao governo. Além disso, por meio da PNRH criou-se o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) que é implantado pela ANA (BRASIL, 1997).

Outro importante instrumento para preservação dos recursos hídricos e planejamento urbano foi a Lei nº 12.651 de 2012 que dispõe sobre a vegetação nativa e define área de preservação permanente como:

Área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e

assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2012).

A análise dos impactos se mostra fundamental para planejamento, ordenamento e desenvolvimentos das áreas urbanas. Sendo assim, a apropriação do espaço geográfico deve satisfazer a sociedade, porém, sem que isso ocasione o esgotamento da qualidade dos recursos naturais. Com isso, torna-se evidente a necessidade de um planejamento adequado e eficiente nas cidades garantindo qualidade de vida e preservação (SILVA; SANTOS; GALDINO, 2016).

### **3.2. Ciclo Hidrológico**

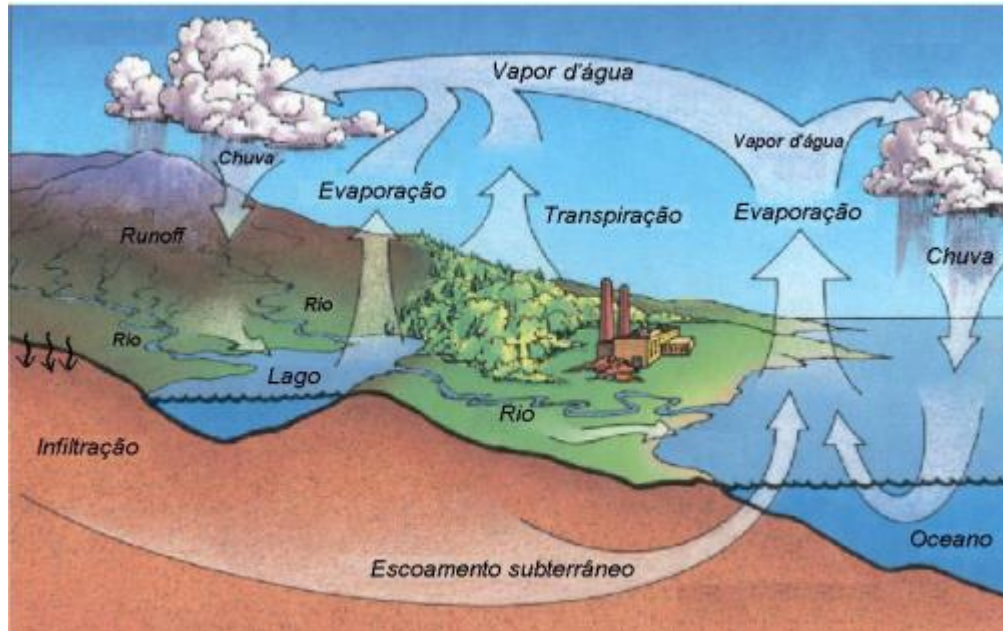
O ciclo hidrológico (Figura 1) é uma dinâmica complexa de transformação e circulação fechada da água entre a superfície terrestre (oceanos e continentes) e a atmosfera. Esse fenômeno é impulsionado principalmente pela energia solar em associação com a gravidade e rotação do planeta (TUCCI, 2004).

Tucci (2004) descreve o ciclo hidrológico a partir da precipitação, fenômeno que é resultado da condensação dos vapores d'água presentes na atmosfera. Essa precipitação pode ocorrer de diferentes maneiras como neve, chuva, granizo, nevoeiro, orvalho e geada.

Uma parte dessa água precipitada sofre evaporação, outra é interceptada pelos obstáculos encontrados na crosta terrestre e eventualmente pode evaporar. O excesso atinge o solo e pode retornar para a atmosfera pela evaporação, outra parcela infiltra-se no solo ou escoar superficialmente (TUCCI, 2004).

Esse escoamento tanto subterrâneo quanto superficial acaba por finalizar no exutório, onde encontram os oceanos e rios, sendo assim o processo se inicia novamente.

**Figura 1 – Ciclo Hidrológico**



Fonte: BARBOSA (2007).

Embora pareça um sistema contínuo, com a água se movimentando permanentemente e com uma taxa constante, na realidade, a situação é mais complexa. Em cada uma das fases do ciclo hidrológico a água se movimenta de maneira aleatória, variando tanto no espaço quanto no tempo (VILLELA; MATTOS, 1975).

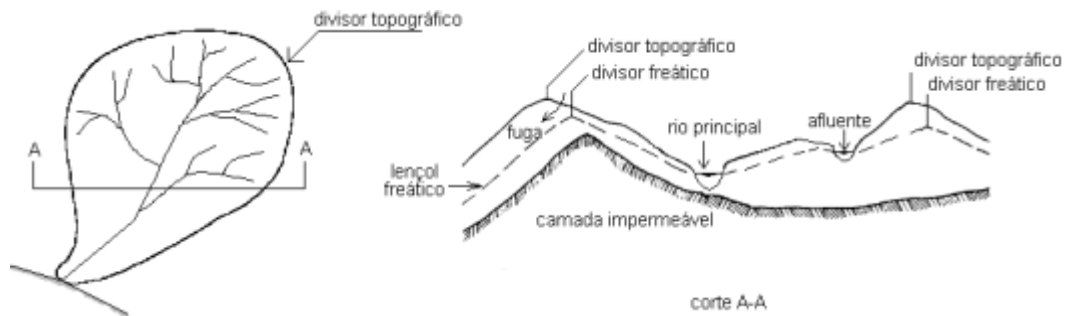
Considerando a escala global o ciclo hidrológico é fechado, porém, em escala regional pode existir subciclos. Se analisar uma região, a água precipitada que escoar em um rio pode evaporar, condensar e precipitar antes de chegar ao oceano (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

### 3.3. Bacias Hidrográficas

Do ponto de vista da engenharia, os estudos hidrológicos são feitos com maior interesse na fase terrestre, sendo a bacia hidrográfica o elemento fundamental para a análise. A bacia hidrográfica (Figura 2) é um conjunto de terras drenadas por

um rio e seus afluentes convergindo os escoamentos para um único ponto de saída, denominado exutório. Seu contorno é limitado pelas partes mais altas do relevo conhecidas como divisores de água (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

**Figura 2** – Representação em planta e corte de uma bacia hidrográfica



Fonte: BARBOSA (2007).

O comportamento do escoamento em uma bacia hidrográfica pode ser definido a partir das características geomorfológicas como relevo, área, geologia, tipo de solo, dentre outros; e do tipo de uso e ocupação do solo. Sendo assim, as características da bacia vão influenciar diretamente nos processos do ciclo hidrológico (TONELLO, 2005).

No Brasil, a partir de 1997, com a promulgação da Política Nacional de Recursos Hídricos, houve um enfoque na bacia hidrográfica como unidade de planejamento, dando origem aos comitês de bacias e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos começou a ser implantado (LIMA; NERY, 2017).

Existem várias formas de se quantificar e qualificar os impactos gerados nas bacias hidrográficas. BACANI *et al.*, (2015) utilizando SIG pode propor um modelo de ordenamento físico-territorial considerando o mapeamento da fragilidade ambiental e legislação.

SILVA e MACHADO (2014) utilizaram-se do Sistema de Informações Geográficas e análise multicritério para classificar e mapear a susceptibilidade erosiva natural e com influência antrópica da bacia hidrográfica do córrego Mutuca,

em Nova Lima. Esse estudo se tornou importante para mapear as áreas e propor tomadas de decisão e facilitar as ações de planejamento ambiental local.

A simulação hidrológica é uma análise mais avançada, Andrade, Mello e Beskow (2013) utilizaram essa análise na Bacia Hidrográfica do ribeirão Jaguará objetivando uma representação mais realista do comportamento hidrológico na bacia. Após obtenção dos dados e calibração, obtiveram um resultado considerado apto para simulações no local de estudo.

### **3.4. Inundações**

Costumeiramente pode-se associar enchente a catástrofe, porém, as duas palavras não são necessariamente sinônimas. A enchente é um processo natural que ocorre nos corpos d'água, tendo em vista que os mesmos têm sua área natural de inundação. O problema começa ocorrer quando o homem não respeita os limites naturais dos rios. O crescimento populacional associado a crescente edificação das cidades traz uma consequência direta: o aumento das áreas impermeáveis (ENAMOTO, 2004).

Para entender as inundações urbanas devem-se conceituar os termos que são utilizados, como: enchentes, inundações e alagamentos. Segundo Tucci (2007), a inundação acontece quando as águas dos cursos d'água saem do leito de escoamento e ocupa áreas onde a população utiliza para moradia, comércios, entre outros mais variados usos urbanos.

As enchentes também são fenômenos naturais que ocorrem quando há uma chuva de magnitude elevada. A urbanização ou alteração no equilíbrio do ciclo hidrológico a montante das áreas urbanas são as causas das enchentes em ambiente urbano (POMPÊO, 2000).

Segundo Defesa Civil (2020), alagamento é a extrapolação do escoamento nos sistemas utilizado como drenagem urbana nas cidades e conseqüentemente, há um acúmulo de água nas infraestrutura urbanas decorrentes de precipitações intensas.

Para exemplificar, a Figura 3 demonstra o nível normal do curso d'água, enchente, inundação e alagamentos.

**Figura 3** – Esquema dos quatro níveis de água atingidos por um curso d'água



Fonte: SEMASA (2022).

### 3.4.1. Susceptibilidade a inundações

Santos (2012) define susceptibilidade como sendo a possibilidade de ocorrer um evento em determinada área. Entende-se este evento como sendo o fenômeno relacionado a perdas ou danos ao ser humano. A susceptibilidade está relacionada as características naturais da área ou aos fatores de ocupação.

O mesmo autor ainda cita que os problemas decorrentes de inundações dependem do grau de ocupação das planícies de inundação e da impermeabilização e canalização da rede de drenagem.

Portanto entende-se como susceptibilidade a inundações, uma área que tem probabilidade de ser atingida por enchentes, cheias e alagamentos, sendo assim, desenvolver o mapa fornece conhecimento que pode servir de base para ações preventivas.

### 3.4.2. Inundações no contexto de Minas Gerais

O município de Santo Antônio do Gramma, assim como vários outros municípios brasileiros, sofre com as inundações. Diversas causas podem estar associadas com esse fenômeno, tais como: baixo relevo da área urbanizada, ocupação dos leitos do rio, supressão da vegetação nas zonas a montante da cidade, impermeabilização do solo, entre outros.

Na área urbana alguns pontos ficam em situação crítica em épocas de precipitação elevada. O centro da cidade é constantemente afetado por esse evento, devido principalmente da proximidade das construções com o curso d'água. A Figura 4 apresenta um dos eventos ocorrido em 2017 e mostra as ruas da cidade submersas levando a perdas para a população.

**Figura 4** – Rua no centro da cidade inundada pelo evento de 2017



Fonte: SAMUEL RIBEIRO (2017). Acervo pessoal.

Ainda no ano de 2017, o município de Rio Casca, vizinho da cidade de Santo Antônio do Gramma também sofreu com as enchentes. Segundo informações do Corpo de Bombeiros, a água entrou nas casas e destruiu um trecho da MG-329, que liga a cidade com Ponte Nova. Dentro da cidade, a água subiu mais de dois metros de altura, carros foram submersos e ficaram presos no alagamento.

Essa não é uma problemática apenas das cidades do interior, na capital Belo Horizonte há registros de diversos desastres associados a enchentes que acabaram causando grandes estragos e preocupação para a população no período chuvoso. O aumento da população em Belo Horizonte foi acompanhado pelo crescimento de casos de enchentes. Desde sua fundação foram constatadas ocorrências de enchentes, destacam-se as enchentes de 1908 e 1916. (RODRIGUES, 2020).

Com a expansão da cidade e conseqüente ampliação dos sistemas de drenagem, a cidade de Belo Horizonte vivenciou ao longo das décadas de 80 e 90 diversos momentos de eventos críticos de inundação. Dentre eles, destaca-se a

enchente de 1983, considerada umas das maiores da história da capital mineira, quando a favela Sovaco da Cobra foi carregada pelas águas do ribeirão Arrudas. Foram registradas 55 mortes em decorrência da enchente (UAI Estado de Minas, 2012).

A partir de 1983 diversas obras hidráulicas começaram a ser realizadas a fim de diminuir os impactos causados pelas inundações na cidade, porém, estas diminuíram os comprimentos dos cursos d'água, aumentando velocidades nos canais e congestionando os trechos a jusante. O resultado foi um aumento significativo dos picos de enchente em relação à condição natural, principalmente, nas áreas à jusante das intervenções (RODRIGUES, 2020).

Mais recentemente, em janeiro de 2020, Minas Gerais foi um dos estados mais afetados por eventos de inundações. Cento e uma cidades ficaram em estado de emergência e cinco decretaram estado de calamidade. Neste mesmo mês, Belo Horizonte registrou o mês mais chuvoso da história da cidade, acumulando 932,3 milímetros de chuva contra os 850,4 milímetros acumulados em janeiro do ano de 1985 (G1 Minas Gerais, 2020).

### **3.5. Modelagem Hidrológica**

Conforme descrito por Tucci (2004), a hidrologia é uma ciência que se baseia na observação dos processos envolvidos no meio físico natural. Inicialmente os modelos hidrológicos eram voltados para os estudos de cada componente do ciclo hidrológico de forma segmentada. Só com o avanço da tecnologia foi possível integrar os dados de todos os processos.

Brubacher (2014) cita que a modelagem hidrológica é uma ferramenta fundamental para embasar projetos de engenharia relacionados a recursos hídricos, além de ter um papel importante no gerenciamento dos mesmos.

Visando resolver os variados problemas que envolvem a utilização dos recursos hídricos, preservação do meio ambiente e ocupação da bacia, surge a Hidrologia Aplicada que está voltada exclusivamente para esses problemas (TUCCI, 2004).



Moreira *et al.*, (2019) utilizou a modelagem hidrológica para estimar as vazões médias mensais utilizando os dados de precipitação mensal com a aplicação do modelo *Soil Water Assessment Tool*. Nesse trabalho os autores avaliaram o resultado da simulação a partir de índices estatísticos e concluíram que o desempenho do modelo foi satisfatório para área em estudo.

### **3.5.1. Modelos Hidrológicos**

Os modelos hidrológicos são ferramentas matemáticas elaboradas para descrever e analisar o comportamento hidrológico de uma área e, a partir disso, prever condições diferentes das observadas (TUCCI, 2005).

Entre as principais funções do modelo hidrológico, estão entre elas, representar o comportamento da bacia hidrográfica, prever condições futuras, simular situações hipotéticas no intuito de avaliar impactos. Sendo assim, esses modelos abrangem um sistema de equações e procedimentos compostos por parâmetros utilizados em estudos ambientais com finalidade de entender o impacto das alterações no uso e ocupação do solo e alterações nos ecossistemas (ALMEIDA; SERRA, 2017).

A princípio foram elaborados modelos hidrológicos simplificados, os modelos chuva-vazão, admitia a bacia de forma única e se apoiavam em relações empíricas ou conceituais para representar os processos descritos no ciclo hidrológico. Esses modelos visavam representar os hidrogramas no exutório da bacia, sem fidelizar a representação dos processos intermediários (TUCCI, 2005).

Ainda segundo Tucci (2005), os modelos hidrológicos evoluíram principalmente a partir da invenção do computador, na década de 50. Antes, modelos semiconceituais, a partir da evolução tecnológica, começaram a surgir os modelos empíricos. Sendo assim, atualmente, os modelos têm se dividido em modelos empíricos (grandes bacias) e modelos distribuídos (pequenas bacias).

O modelo à ser escolhido é determinando a partir do objetivo do trabalho, parâmetros e características da bacia e a disponibilidade dos dados.

### 3.5.1.1. Método Racional

O método racional é amplamente utilizado e foi desenvolvido em 1889. É um dos métodos mais simples que transformam chuva em escoamento superficial. Sendo assim, a aplicação deste método deve ser restrita a pequenas bacias hidrográficas (BARBOSA, 2007). O método racional utiliza uma equação que demonstra um estado permanente da transformação da chuva em vazão, sendo ela:

$$Q_s = C \times i \times A \quad \text{Equação 1}$$

Onde  $Q_s$  representa o escoamento superficial em  $m^3/s$ ;  $i$  sendo a intensidade da chuva, em  $m/s$ ;  $A$  a área de drenagem em  $m^2$  e  $C$  o coeficiente de escoamento superficial (*runoff*), variável que leva em consideração a permeabilidade da área de drenagem.

### 3.5.1.2. Hidrograma Unitário

Proposto por Sherman em 1932, o hidrograma unitário é um modelo que transforma chuva em vazão. Esse modelo é baseado na construção do hidrograma resultante de uma precipitação efetiva de lâmina unitária, uniforme em toda área de drenagem da bacia e de duração determinada. As ordenadas do hidrograma unitário pode ser feita a partir dos dados de precipitação e vazão de um evento. Do hidrograma resultante, porém, deve ser separada as parcelas que se referem ao escoamento superficial e subterrâneo. O volume precipitado, em  $mm$ , é obtido através do valor de precipitação efetiva, ou a partir do somatório das vazões através da seguinte equação (ESCARIÃO, 2001):

$$h = \frac{\sum Q_t \times N_d}{A_d \times 10^3} \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

$h$  = altura da chuva efetiva em  $mm$ ;

$Q_t$  = vazão do intervalo  $t$  em  $m^3/s$

$N_d$  = número de segundos do intervalo de tempo

$A_d$  = área de drenagem da bacia em  $\text{km}^2$

De posse do HU, pode-se simular as vazões para a bacia a partir dos dados de precipitação de um evento que tenha a mesma duração do evento que gerou o referido hidrograma.

### **3.5.1.3. Hidrograma Unitário Sintético de SCS**

Pode-se obter o hidrograma unitário a partir de equações baseadas nos parâmetros físicos da bacia, esses hidrogramas são denominados hidrogramas unitários sintéticos. Um exemplo desse hidrograma é o *Soil Conservation Service* (SCS), desenvolvido pelo Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Esse hidrograma utiliza os dados de uso e ocupação do solo a partir de uma variável denominada *Curve Number* (CN). Este método é difundido pelo mundo, por apresentar resultados satisfatórios.

### **3.5.2. Regionalização de vazão**

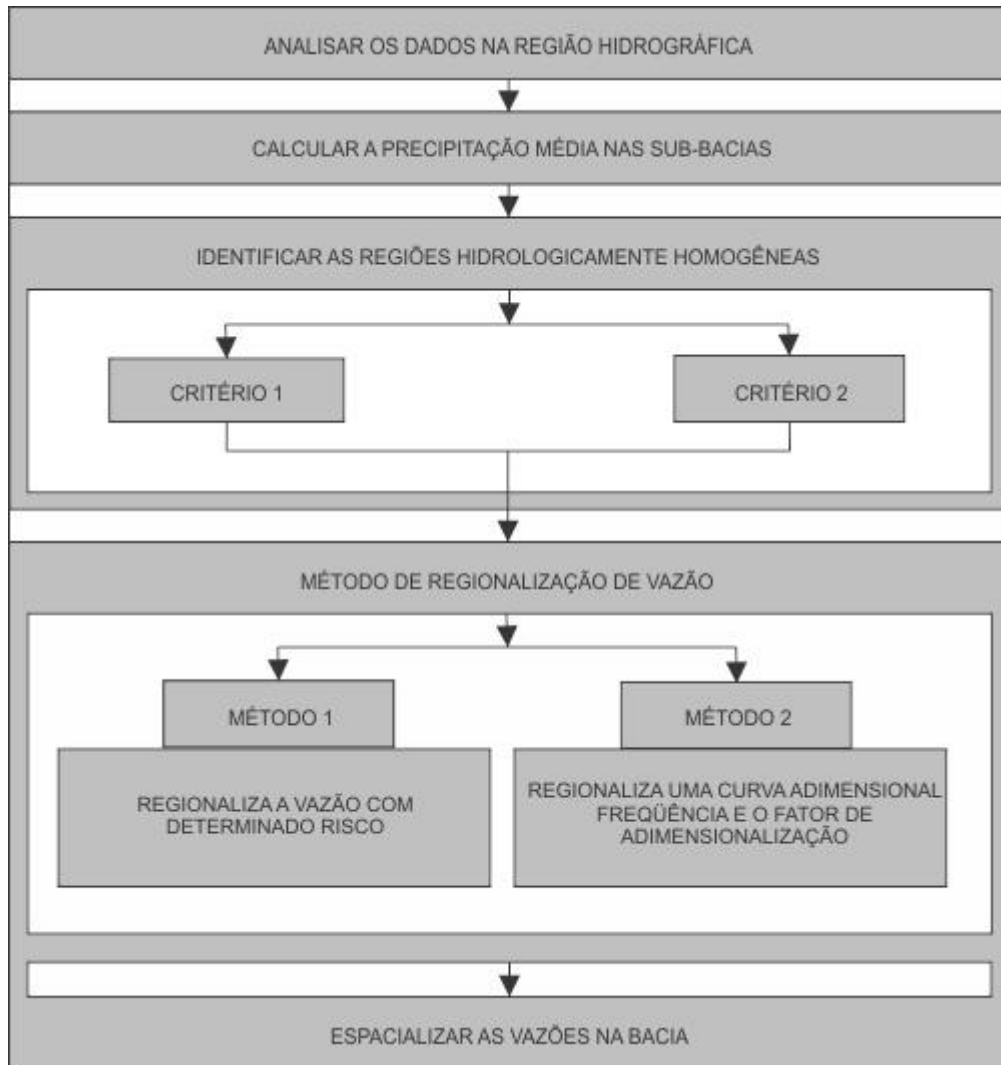
Uma rede de drenagem dificilmente abrange todas regiões de interesse necessários a gestão dos recursos hídricos de um local. Portanto se faz necessário estudos de métodos capazes de surtir os vazios temporais e espaciais. Sendo assim uma técnica que vem sendo utilizada é a regionalização hidrológica, processo no qual há uma transferência de dados de estações hidrométricas para regiões onde não há dados disponíveis (BAENA *et al.*, 2004).

Por causa do elevado custo de construção, operação e manutenção de uma rede hidrométrica, se torna fundamental a otimização dos dados disponibilizados. Sendo assim a regionalização passa a ser usada para melhor analisar as amostras pontuais e conseqüentemente aprimorar as estimativas das variáveis, analisar a fidelidade das séries hidrológicas e identificar a falta de pontos de observação.

Sendo assim, é possível determinar as vazões mínimas, médias e máximas a partir da utilização de critérios que ajudam na identificação das regiões

hidrológicamente homogêneas (UFV, 2013). A regionalização de vazões pode ser representada através do fluxograma representando na Figura 5.

**Figura 5** – Fluxograma geral da metodologia de regionalização de vazão



Fonte: UFV (2013).

O método de regionalização de vazões proposto pela Universidade Federal de Viçosa a partir do estudo de Euclides (1999) é dividido em quatro etapas. A primeira consiste em analisar os dados descritivos, hidrológicos e físicos da bacia com base nas informações existentes de estudos anteriores. Dados como, cursos d'água principais e seus afluentes, cobertura do solo, relevo, formação geológica,

hidrogeologia, dados climatológicos, entre outros parâmetros são levantados nessa etapa. Os dados hidrológicos são obtidos através da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) por meio das estações fluvi-pluviométricas. Nessa etapa também é feita uma análise visando à eliminação de erros grosseiros e inconsistentes.

Na segunda etapa objetiva-se a obtenção da precipitação média, para isso utiliza-se do método de Thiessen, no qual se calcula a precipitação média por meio da média ponderada entre a precipitação de cada estação e o peso a ela atribuída (área de influência de cada estação).

A etapa três visa identificar as regiões hidrologicamente homogêneas. Para isso, adotam-se dois critérios para definição de tais regiões.

**Critério 1** – Se baseia na distribuição de frequência de vazões adimensionalizadas. Esse critério segue o princípio em que, após obtenção das séries transformadas de vazão, as regiões homogêneas têm distribuições de frequência de vazões adimensionalizadas idênticas nas suas estações. As distribuições de frequência são representadas pelas distribuições de probabilidade, sendo elas long-normal, Gumbel e Weibull.

**Critério 2** – Trata-se de um critério estatístico que tem como base analisar a regressão múltipla das vazões médias com relação às características físicas e climatológicas da bacia. A combinação de estações que apresentam o melhor ajustamento deverá estar uma região hidrologicamente homogênea.

O quarto, e último passo, aplica-se o método de regionalização conforme os dois métodos descritos a seguir:

**Método 1** – O método de regionalização de vazão com determinado risco visa no ajuste das distribuições teóricas de probabilidade às séries históricas de vazão para cada estação. A seguir aplica-se a regressão múltipla entre as vazões e as características físicas e climáticas das sub-bacias.

**Método 2** – O método de regionalização de curva adimensional de frequência e do respectivo fator de adimensionalização busca adimensionalizar as curvas de probabilidade com base em seu valor médio e definir uma curva adimensional regional média das estações homogêneas.

Os métodos descritos acima foram aplicados e inseridos em um *software* pela Universidade Federal de Viçosa. A Atlas Digital das Águas de Minas fornece as formulações de vazões máximas, mínimas e médias através da metodologia descrita acima. A Figura 6 apresenta a interface do site.

**Figura 6 – Interface do software de regionalização de vazão.**



Fonte: UFV (2013).

### 3.6. Modelagem Hidráulica – HEC-RAS

Amplamente utilizadas atualmente, a modelagem e simulação numérica são ferramentas fundamentais na engenharia contemporânea. A modelagem numérica permite reproduzir e prever situações de variadas tipologias. Além disso, os modelos computacionais evitam ou completam o uso de estudos físicos, reduzindo gastos financeiros e de tempo para execução.

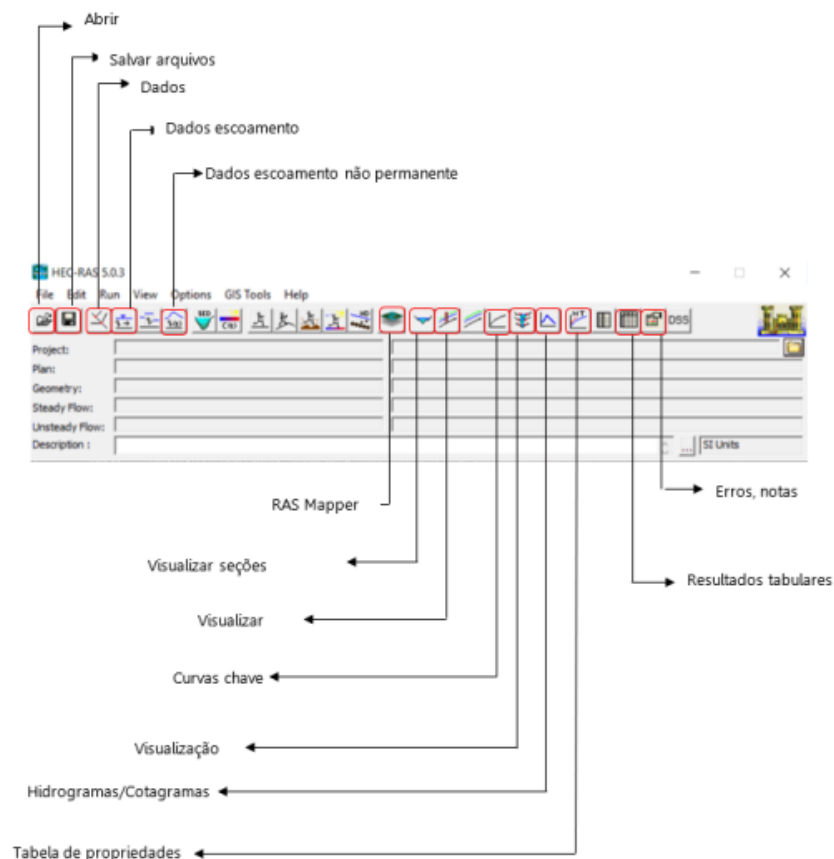
O *software Hydrologic Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS)* é um modelo computacional gratuito desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos da América. A Figura 7 representa a interface do *software* HEC-RAS.

Os dados básicos de entrada do *software* são os dados geométricos das seções transversais dos cursos d'água, dados de vazão e condições de contorno para realizar os cálculos hidráulicos.

Silva (2013) cita algumas aplicações do HEC-RAS:

- Estudos para mapeamento das áreas de inundação dos rios e de proteção contra enchentes;
- Efeitos dos vários obstáculos hidráulico como pontes, bueiros, vertedores, diques, dentre outros;
- Investigação das mudanças nos perfis da superfície d'água devido a modificação da geometria do canal e
- Múltiplos perfis de superfície d'água (modelagem de cenários para diferentes condições hidráulicas e hidrológicas), erosão em pontes e operação de barragens em sequências.

**Figura 7 – Interface do *software***



Fonte: ANA (2018).

Uma grande vantagem do HEC-RAS é possuir uma interface de SIG dentro do *software*, o que possibilita ao usuário a importar dados espaciais georreferenciados extraídos de MDE e de Uso e Ocupação do Solo. Além disso, também é possível exportar os resultados gerados para o SIG e gerar mapas com informações mais refinadas.

Para o presente estudo, são necessários os dados abaixo:

- **Projeção de Referência Espacial:** A definição do sistema de coordenadas espaciais não é obrigatória para modelagem no programa, porém, agrega ao trabalho de georreferenciamento.
- **Dados geométricos:** Demonstram o contorno geométrico dos variados perfis transversal, das seções e da distância média entre essas seções.
- **Condições de contorno:** São as condições do escoamento definidas nas extremidades de montante e jusante do escoamento.
- **Coeficiente de Manning:** Para modelagem do projeto é necessário definir o coeficiente de rugosidade de Manning para a região do escoamento.
- **Tipo de escoamento:** Determinação do tipo de escoamento: permanente ou não permanente.

### **3.7. Mapas de inundação**

Sousa (2012) cita que há um avanço na implantação de recursos que auxiliam na diminuição da incidência de inundações. Essas estratégias vão das mais simplificadas até as mais complexas, incluindo a geração de mapas de susceptibilidade a inundação e confecção de modelos de gestão de riscos.

O mapeamento das áreas de risco de inundação é uma ferramenta muito importante para o controle e prevenção dos eventos de cheia. Os mapas de inundação estão ligados ao risco de inundação e os prejuízos (BARBOSA, 2006).

Tucci (2005) divide os mapas de inundações em dois tipos:

- **Mapas de Planajemento:** Descreve os locais que serão atingidos por cheias a partir de determinados tempos de retorno.



- Mapas de Alerta: São colocados em pontos específicos das áreas de riscos com os valores de cotas, proporcionando os moradores acompanharem a subida do nível d'água em réguas instaladas na região.

O monitoramento e a gestão de áreas de riscos são legitimados pela Lei 12.608, de 10 de Abril de 2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). O Art.7º do parágrafo IV determina que compete aos Estados:

Identificar e mapear as áreas de risco e realizar estudos de identificação de ameaças, susceptibilidade e vulnerabilidade, articulação com a União e os Municípios (BRASIL, 2012).

Um dos principais benefícios dos mapas de risco é que, a partir deles, podem ser dimensionados e construídas estruturas que visam a prevenção de danos, alertar atuais ou futuros proprietários de áreas sujeitas a inundações e além disso auxiliar as autoridades a desenvolver políticas públicas visando o uso sustentável dessas terras. (GOERL; KOBIYAMA; PELLERIN, 2012).

Lima *et al.* (2021) argumentam que os tratamentos tradicionais do poder público não vem sendo efetivos na prevenção, preparação e na resposta das ocorrências de eventos climáticos extremos, sendo assim, o mapeamento das áreas susceptíveis a inundação permitem as ações e intervenções imediatas nas áreas problemáticas e além disso, defina as etapas em que o município irá atuar em uma gestão ambientalmente adequada.

Os mapas de risco tem papel fundamental principalmente em cidades pequenas e com recursos financeiros limitdos, tendo em vista que, nesses locais a adoção de sistemas de monitoramento e alerta para os eventos críticos se torna difícil (SHIDAWARA, 1999).

## 4. METODOLOGIA

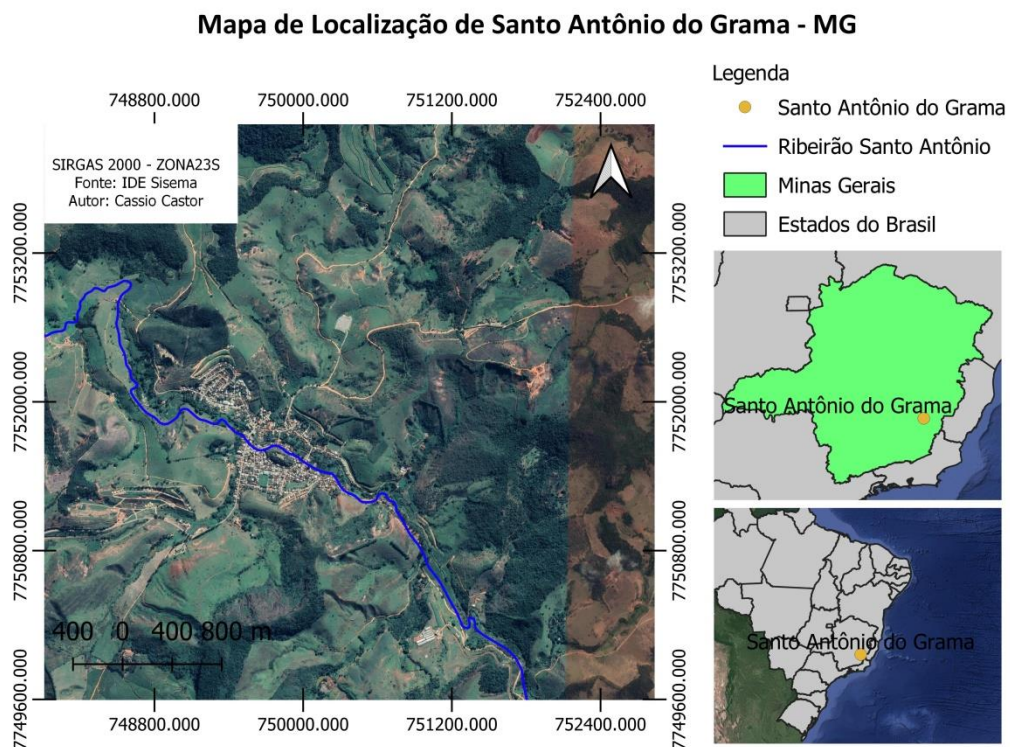
### 4.1. Local de Estudo

A área de estudo localiza-se no município de Santo Antônio do Grama, no estado de Minas Gerais. A cidade está situada na Zona da Mata e fica a 227 km de distância da capital do Estado.

Santo Antônio do Grama possui uma população de 4.085 habitantes. A economia da cidade é baseada na agricultura, tendo o café como principal produto agrícola (IBGE, 2010).

Escolheu-se, portanto, a área urbana do município para realizar o presente estudo tendo em vista os locais de ocorrências de inundações. A Figura 8 apresenta a localização da área de estudo.

**Figura 8 – Localização da área de estudo**

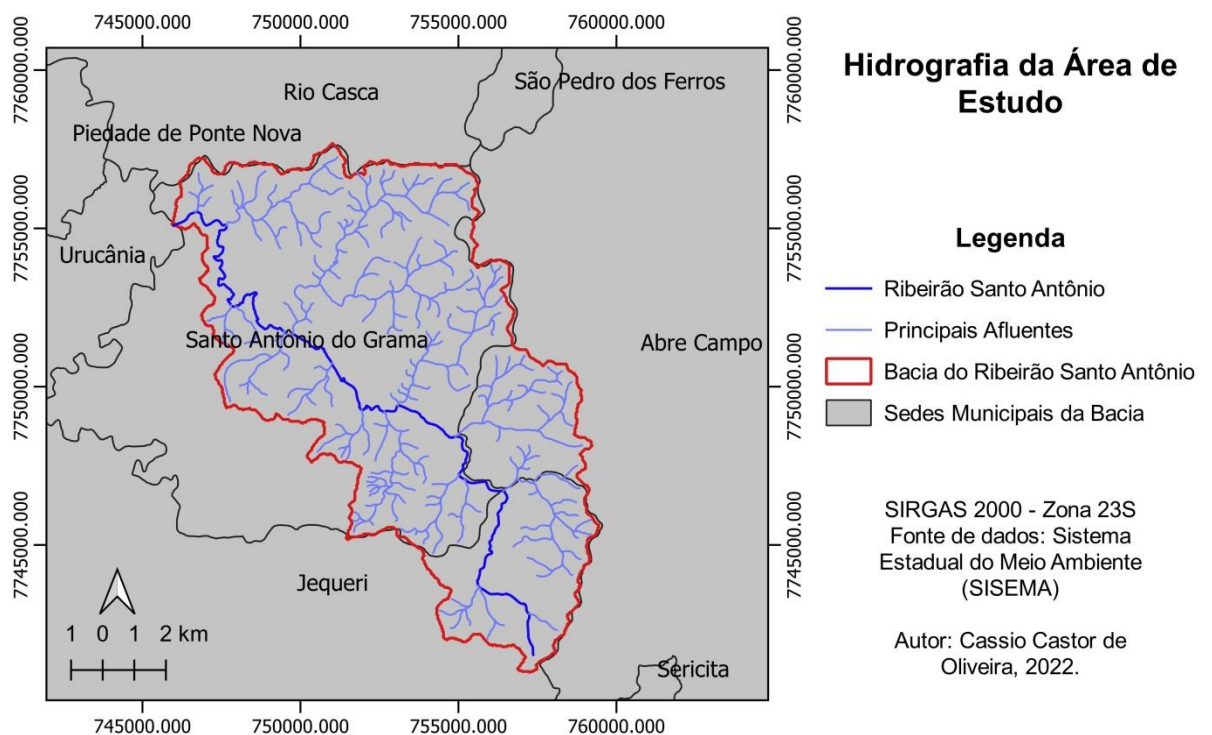


Fonte: AUTOR (2022).

### 4.1.1. Hidrografia

O ribeirão Santo Antônio constitui-se em um afluente da margem direita do Rio Casca, sendo então, um subafluente do rio Doce. Sua nascente localiza-se no município de Jequeri, banha a cidade de Santo Antônio do Grama, e neste mesmo município, desemboca no rio Casca. A bacia do Ribeirão Santo Antônio compreende três municípios: Abre Campo, Jequeri e Santo Antônio do Grama. A Figura 9 apresenta a hidrografia da área de estudo.

**Figura 9 – Mapa da Hidrografia da área de estudo**



Fonte: AUTOR (2022).

## 4.2. Caracterização da Bacia do Ribeirão Santo Antônio

### 4.2.1. Modelo Digital de Elevação

Com os dados topográficos do Catálogo de Metadados da ANA (ANA, 2016), com resolução de 10mx10m foi possível delimitar a bacia hidrográfica com o uso da

caixa de ferramentas do GRASS no QGIS. Utilizou-se a ferramenta “*r.watershed*” para delimitar as direções de fluxo de escoamento. Após isso, foi possível gerar a imagem da bacia hidrográfica delimitada.

#### 4.2.2. Caracterização Morfométrica

A partir da delimitação da bacia fez-se a análise morfométrica da bacia hidrográfica. A área e o perímetro da bacia hidrográfica podem ser obtidos pela ferramenta calculadora de campo, sendo \$*área* e \$*perimeter*, as respectivas funções do software QGIS.

O coeficiente de compacidade (Equação 3) de uma bacia hidrográfica ( $K_c$ ), é um valor que informa sobre a tendência de ocorrência de inundações nas partes mais baixas da bacia. É calculado a partir da relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de igual área. O  $K_c$  é um valor sempre maior que 1, portanto quanto menor o  $K_c$  (mais próximo de 1), mais circular será a bacia, menor o tempo de concentração e maior a tendência de haver picos de enchente (BARBOSA, 2007).

$$K_c \cong \left( \frac{P}{\sqrt{A}} \right) * 0,28 \quad \text{Equação 3}$$

O fator de forma ( $K_f$ ) (Equação 4) se dá pela relação entre a largura média da bacia e seu comprimento axial (BARBOSA, 2007). Sendo o comprimento axial da bacia,  $L$ , igual ao comprimento do curso d’água principal mais a distância da sua nascente ao divisor topográfico, a largura média da bacia,  $l$ , pode ser obtida:

$$l = \frac{A}{L} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo  $A$ , a área da bacia. Assim, o fator de forma resulta na Equação 5.

$$K_f = \frac{l}{L} = \frac{A}{L^2} \quad \text{Equação 5}$$

As bacias alongadas apresentam menores valores de fator de forma e conseqüentemente são menos susceptíveis às inundações, sendo que torna menos provável que uma chuva intensa cubra toda sua área.

O comprimento do rio principal pode ser determinado a partir do perfil longitudinal do curso d'água medindo-se o comprimento do trecho entre a nascente mais distante e o ponto de interesse ou exutório.

A declividade de uma bacia hidrográfica controla boa parte da velocidade do escoamento superficial, interferindo no tempo em que a água irá concentrar-se nos leitos fluviais. Com os dados topográficos do Catálogo de Metadados da ANA (ANA, 2016) foram processados e gerados os dados de declividade.

O rio principal de uma bacia é geralmente aquele que drena a maior área dentro da bacia. A declividade do mesmo é uma medida representativa do seu relevo e utilizada em estudos hidrológicos. Sendo que o Ribeirão Santo Antônio apresenta um perfil longitudinal razoavelmente uniforme, adotou-se a declividade entre extremos,  $S_1$ , (Equação 6) para estimar sua declividade.

$$S_1 = \frac{Z_{cabecera} - Z_{foz}}{L} \quad \text{Equação 6}$$

#### 4.2.3. Uso e Ocupação do Solo

Para definir os coeficientes de Manning mais adequados para a área em estudo utilizou-se do mapa de uso e ocupação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio. O mapa foi confeccionado a partir dos dados disponibilizados pela (ANA, 2016) em seu catálogo de metadados. Os dados foram classificados pela ANA por meio das imagens dos satélites ALOS, QUICKBIRD, WORLD VIEW I e LANDSAT-7 e disponibilizados no formato de vetor. De posse desses dados foi possível recortar para a área de estudo.

#### 4.3. Dados Hidrológicos

As vazões máximas utilizadas como parâmetros de entrada no *software* foram obtidas a partir da equação de regionalização de vazão para o Ribeirão Santo Antônio, obtidas pelo Atlas Digital das Águas de Minas (UFV, 2013). A equação da regionalização de vazão tem como parâmetro a área da bacia que foi obtido através da metodologia descrita no item 4.2.2.

Foram simuladas as vazões para os tempos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos. A fórmula para cálculo das vazões através do método de regionalização de vazão está descrita na Tabela 2.

**Tabela 2** – Cenários e equações para cálculo das vazões pelo método da regionalização de vazões

Cenário	Tempo de Retorno (anos)	Equação
1	10	$1.0256*(A^{0.7784})$
2	20	$1.2126*(A^{0.7784})$
3	50	$1.4479*(A^{0.7784})$
4	100	$1.6289*(A^{0.7784})$
5	500	$2.0512*(A^{0.7784})$

Fonte: UFV (2013).

#### 4.4. Modelagem Hidráulica – HEC-RAS

Após a caracterização geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio e obtenção das vazões de projeto na modelagem hidrológica, parte-se então para modelagem hidráulica. Utilizou-se do SIG disponibilizado pelo HEC-RAS a partir da extensão HEC-GeoRAS.

Primeiramente utilizou-se do MDE obtido na seção 4.2 desse trabalho, para realizar a construção geométrica da área em estudo. A partir disso, foi necessário preparar manualmente os dados. Em seguida criaram-se os *shapefiles*: *river* (opção *river*), *flowpaths* (opção *FlowPaths*) e *banklines* (opção *BankLines*). Essas opções correspondem a rio, área de inundação e margens do canal, respectivamente.

O rio deve ser desenhado de montante para jusante, assim como o *shapefile flowpatch* (margens do canal), se atentando nesse caso que, deve ser criado primeiro a margem esquerda e depois, a direita.

Tendo em vista a característica meandrante da região, as seções da calha do rio foram desenhadas manualmente. A seção foi desenhada da esquerda para a

direita, deve-se cruzar apenas uma vez na linha dos *shapfiles* criados, além disso, deve-se estar perpendicular ao canal do rio.

Após a finalização da geometria da área, adicionaram-se coeficientes de Manning (n), estes podem ser obtidos de maneira automática pelo HEC-GeoRAS, ou adicionado de maneira manualmente para cada seção.

Em seguida os dados de vazões foram adicionados. Dentro da ferramenta de edição, as condições de contorno do *SteadyFlow* devem ser denominadas em *Reach Boundary Conditions*. Para simplificação de projeto foi adotado o regime permanente, sendo assim, nem todas as opções estão disponíveis. Para determinar as condições de contorno, necessitou-se da declividade obtida na seção 4.2.

Finalmente visando à obtenção das manchas de inundação, rodou-se o modelo a partir da opção *run*. Os resultados obtidos foram exportados para o QGis para tratamento final dos dados.

#### **4.5. Comparação da modelagem com eventos críticos reais**

Após modelagem e elaboração das manchas de inundações para os diferentes tempos de retorno, pode-se comparar os resultados obtidos no estudo com os eventos críticos reais ocorridos em 2017 e 2019.

Para medir a altura que a lâmina d'água atingiu utilizou-se um barbante com um peso amarrado na sua extremidade para medir a altura do curso d'água até a ponte. A seguir fez-se a medição do barbante com uma trena, esta, que também foi utilizada para medir a altura atingida pela água em pontos estratégicos a partir de fotografias dos eventos.

Realizada a medição, pode-se, de posse dos dados modelados e reais, fazer uma comparação com relação à altura d'água atingida e o tempo de recorrência.

## 5. RESULTADOS

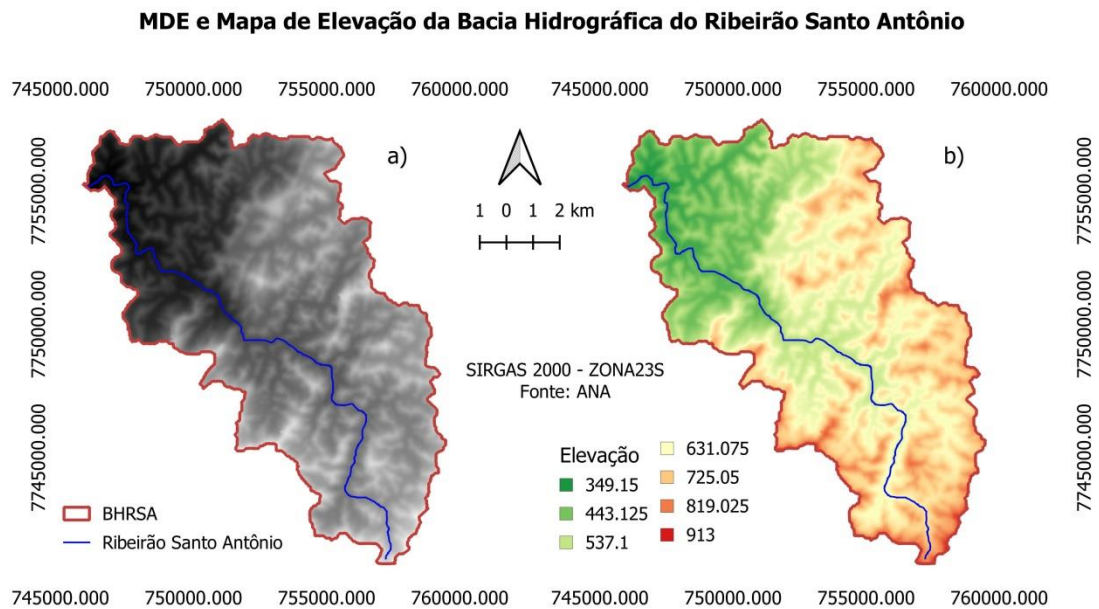
### 5.1. Caracterização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio

#### 5.1.1. Modelo Digital de Elevação

Para a realização da simulação da modelagem hidráulica é necessário a inserção do modelo digital do terreno. Portanto, para realização do presente estudo, utilizou-se o MDE da Bacia do Rio Doce disponibilizada no Banco de Metadados da ANA. A Figura 10 apresenta o MDE para a BHRSA (10 a) e também o mapa de elevações da bacia gerado a partir do modelo (10 b).

Por se localizar em uma região montanhosa, a bacia estudada apresenta pontos de grandes elevações, principalmente nas regiões à montante do Ribeirão Santo Antônio, onde se verifica elevações acima de 900 metros de altitude. Os pontos mais baixos da bacia localizam-se próximo do exutório (Figura 10 b).

**Figura 10 – MDE e Mapa de Elevação**



Fonte: AUTOR (2022).



### 5.1.2. Morfometria da Bacia

A bacia hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio é de 10ª ordem, indicando ser muito ramificada. Possui área total de 121,34 km<sup>2</sup> e um perímetro de 84,62 km. O comprimento do canal principal é 24,35 km com uma rede de drenagem total de 291,11 km.

O coeficiente de compacidade (Kc) resultante foi de 2,15 mostrando que a bacia diverge da bacia circular. O Fator de Forma (Kf) calculado foi de 0,32 que sugere uma bacia alongada, sendo assim, menos sujeita a picos de enchente. Resultados semelhantes foram descritos por LOPES *et al.* (2022) na morfometria da bacia hidrográfica do Rio Caratinga, subafluente do Rio Doce. Os autores encontraram um valor de 2,13 para o coeficiente de compacidade (Kc) e 0,213 para o fator de forma, ambos indicam pouca suscetibilidade à enchentes.

Além disso, o índice de circularidade resultante da bacia do Ribeirão Santo Antônio foi igual a 0,21, confirmando os resultados obtidos pelo Kc e fator de forma, pois o afastamento da unidade indica que a bacia não tende à forma circular, ou seja, apresenta uma forma mais alongada e sendo assim, segundo Villela e Mattos (1975), possuem menor concentração de deflúvio.

Com relação a característica do relevo descrito na Tabela 3, a BHRSA apresenta altitude máxima e mínima de 931 m e 349,15 m, respectivamente. Sendo assim, a amplitude altimétrica foi igual a 581,85 metros, indicando um relevo montanhoso. Tonello *et al.*, (2006) descreve que relevos com altitudes elevadas influenciam diretamente na quantidade de luz solar que a bacia recebe e diante disso, na evapotranspiração, temperatura e precipitação na bacia. O valor elevado da amplitude altimétrica como observado na bacia em estudo tende a favorecer o escoamento rápido.

A bacia possui uma declividade média de 25,59% condizente com o relevo forte-ondulado da região.

Os parâmetros de drenagem são fundamentais para entender o comportamento hidrológico da bacia. Sendo assim, a densidade de drenagem é um dos principais parâmetros para estudo morfométrico de uma bacia. Segundo Villela e Mattos (1975) a densidade de drenagem varia de 0,5 km/km<sup>2</sup> (bacias pouco

drenadas) a 3,5 km/km<sup>2</sup> ou mais (para bacias bem drenadas). A bacia em estudo possui uma densidade de drenagem igual a 2,39 km/k<sup>2</sup> indicando um elevado escoamento superficial, corroborando para eventos de cheias à jusante.

A Tabela 3 compila os dados morfométricos calculados para a bacia do Ribeirão Santo Antônio

**Tabela 3 – Morfometria da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio**

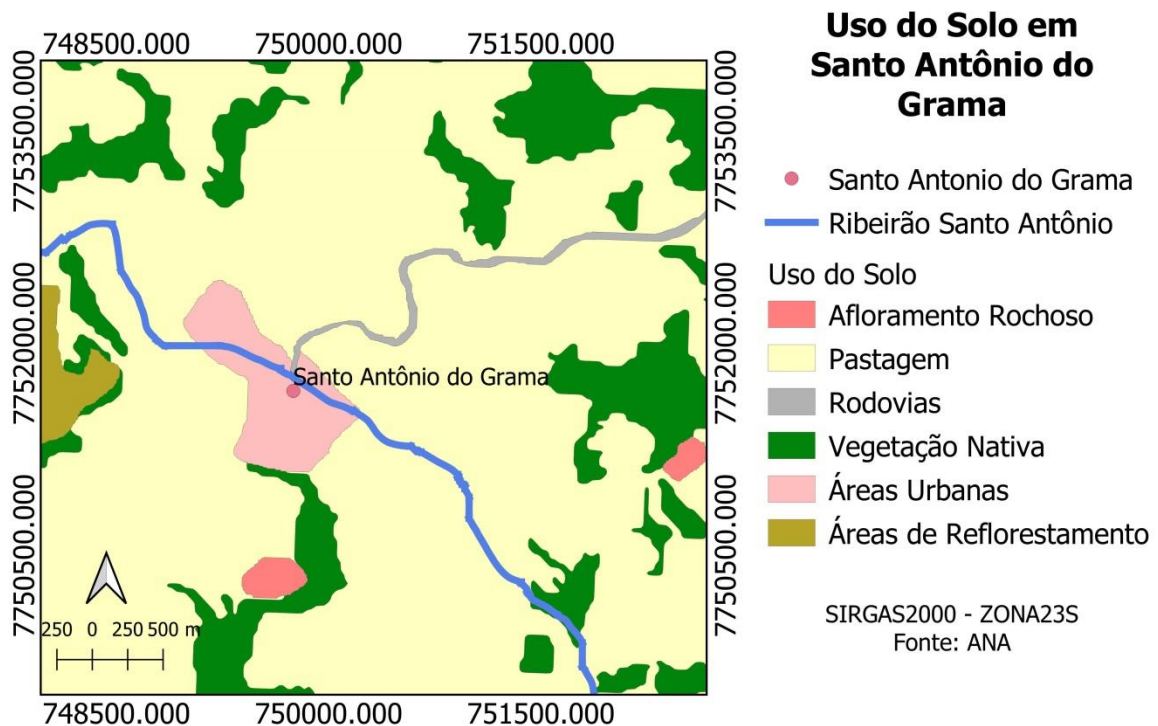
<b>Quanto à forma</b>	Área total (A)	121,34 km <sup>2</sup>
	Perímetro total (P)	84,62 km
	Comprimento axial da bacia (La)	19,26 km
	Coeficiente de Compacidade (Kc)	2,15
	Fator de Forma (Kf)	0,32
	Índice de Circularidade (Ic)	0,21
<b>Característica do relevo</b>	Orientação	SE-NO
	Altitude mínima	349,15 m
	Altitude média	603,35 m
	Altitude máxima	931 m
	Declividade mínima	0%
	Declividade média	25,59%
	Declividade máxima	196,50%
	Amplitude altimétrica da bacia	581,85 m
Declividade média do curso d'água principal	0,0181 m/m	
<b>Característica da rede de drenagem</b>	Ordem dos cursos d'água (hierarquia fluvial)	10
	Comprimento do curso d'água principal (L)	24,35 km
	Comprimento total dos cursos d'água (Lt)	291,11 km
	Densidade de drenagem	2,39 km/km <sup>2</sup>

Fonte: AUTOR (2022).

### 5.1.3. Uso e Ocupação do Solo

Sendo o coeficiente de Manning o parâmetro que determina a rugosidade das superfícies por onde passa o fluxo, foi necessário definir esses valores para a área em estudo. Essa definição partiu do mapa de Uso do Solo (Figura 11).

**Figura 11** – Uso do Solo na região de estudo



Fonte: AUTOR (2022).

A partir da definição do uso e ocupação do solo para a área de estudo utilizou-se da tabela dada por Tucci (2004), a qual está adaptada na Tabela 4 para atribuir os valores de Manning para cada classe observada.

**Tabela 4 – Coeficiente de Manning**

<b>Cobertura da Bacia</b>	<b>n</b>
Corpos Hídricos	0.040
Pastagem	0,030
Área Urbana	0,100

Fonte: Adaptado de TUCCI (2004).

## 5.2. Dados Hidrológicos

Diante da metodologia e dados descritos anteriormente, foi possível realizar a modelagem hidráulica para cinco cenários de escoamento (Tabela 5). O tempo de retorno é calculado pelo inverso da probabilidade para o valor de vazão máxima ser igualado ou excedido em um ano qualquer. Sendo assim, foram consideradas as vazões para os tempos de retornos de 10, 20, 50, 100 e 500 anos.

**Tabela 5– Cenários para a Modelagem Hidráulica**

<b>Cenário</b>	<b>Tempo de Retorno (anos)</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>
1	10	43,09
2	20	50,95
3	50	60,83
4	100	68,44
5	500	86,18

Fonte: AUTOR (2022).

## 5.3. Modelagem Hidráulica

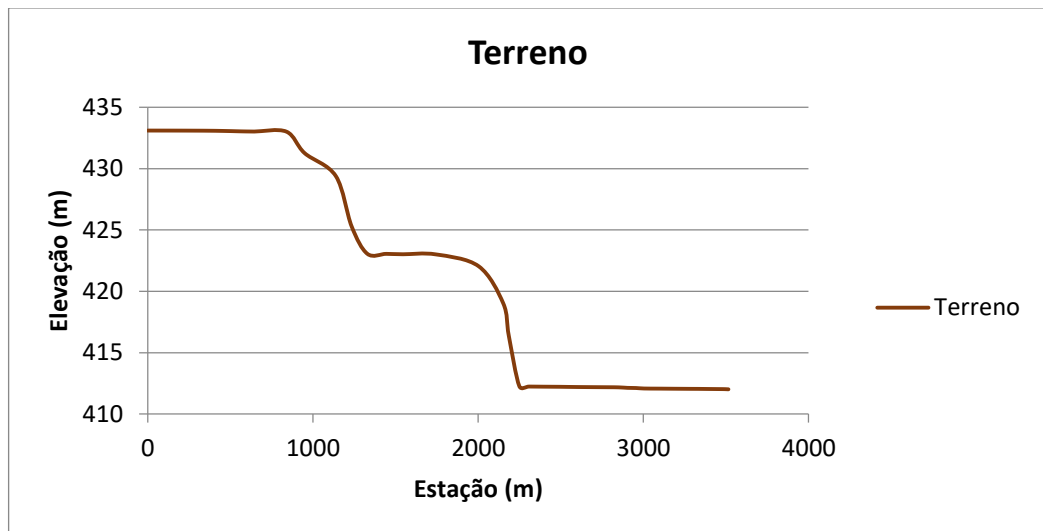
Para o presente estudo foi escolhido o seguinte eixo (Figura 12) e o perfil topográfico do mesmo está representando na Figura 13. Nota-se pelo perfil topográfico uma maior declividade próxima às seções 1.000 e 2.000 metros.

**Figura 12 – Eixo de estudo do Ribeirão Santo Antônio**



Fonte: AUTOR (2022).

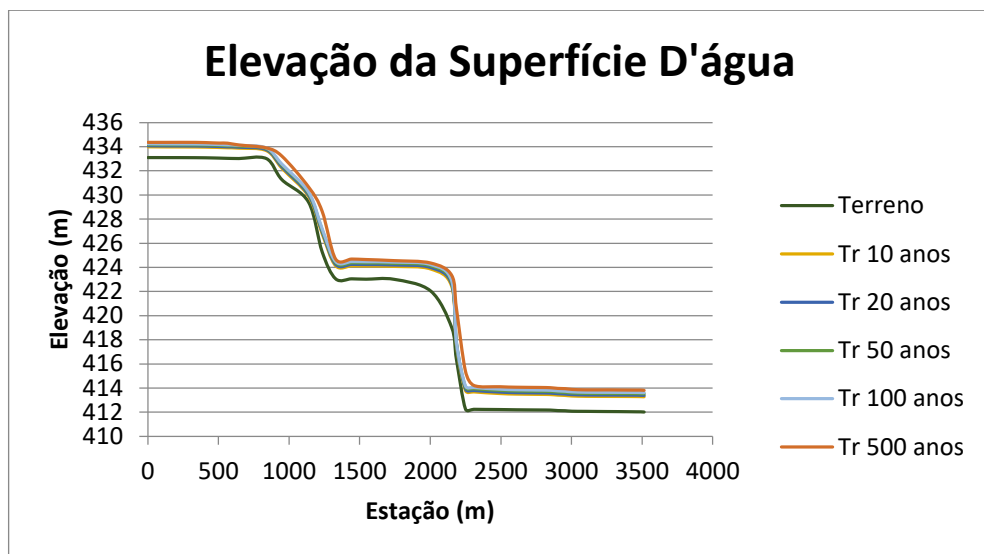
**Figura 13 – Perfil Topográfico do Eixo Longitudinal**



Fonte: AUTOR (2022).

Para os tempos de retornos modelados temos associados à elevação da linha d'água conforme está representado na Figura 14. Nota-se que os resultados obtidos estão em conformidade com o esperado, observando-se uma elevação da cota de água em função do aumento do tempo retorno.

**Figura 14** – Resultados da Elevação da Superfície D'água



Fonte: AUTOR (2022).

Os resultados de velocidade do escoamento também foram obtidos e descritos na Tabela 6. São observados também que em regiões com maior declividade do terreno, têm-se maiores velocidades de escoamento. Para o tempo de retorno de 10 anos foi encontrada uma velocidade média de 0,41 m/s e 0,59 m/s para o TR de 500 anos.

Há dois trechos com maiores picos de velocidades conforme observado na tabela, sendo o primeiro próximo à estação 1.000 metros e o segundo próximo à estação 2.100 metros. Os resultados são condizentes, tendo em vista que esses são os trechos com maior declividade, conforme observado na Figura 13. Porém, o segundo pico ao apresentar um valor muito acentuado pode inferir uma instabilidade da modelagem da região, possivelmente causada pelo afinilamento do trecho e com isso, proximidade com a condição de contorno no local.

Além disso, os trechos onde há uma maior velocidade coincidem com trechos críticos em eventos de inundação localizados na região central da cidade.

**Tabela 6** - Resultados das velocidades de escoamento em (m/s).

Distância (m)	Velocidade (m/s)				
	Tr 10 anos	Tr 20 anos	Tr 50 anos	Tr 100 anos	Tr 500 anos
3514,7	0,39	0,41	0,44	0,46	0,50
3491,1	0,15	0,16	0,17	0,18	0,21
3463,3	0,27	0,29	0,32	0,34	0,38
3329,3	0,21	0,22	0,24	0,25	0,28
3258,1	0,20	0,21	0,23	0,24	0,27
3103,9	0,63	0,68	0,74	0,78	0,87
3003,6	0,49	0,53	0,57	0,60	0,66
2955,4	0,41	0,44	0,47	0,50	0,55
2903,9	0,54	0,58	0,62	0,65	0,72
2849,9	0,39	0,43	0,47	0,49	0,55
2776,7	0,43	0,47	0,50	0,53	0,59
2608,3	0,41	0,44	0,47	0,49	0,55
2493,5	0,88	0,93	0,99	1,04	1,13
2308,1	1,37	1,43	1,52	1,59	1,70
2249,1	0,57	0,61	0,67	0,71	0,79
2185,4	2,27	2,36	2,49	2,59	2,76
2151,7	7,49	7,70	7,92	8,05	8,30
2003,2	2,78	2,86	2,96	3,06	3,18
1743,9	0,88	0,92	0,97	1,00	1,08
1545,3	0,49	0,51	0,53	0,54	0,58
1443,5	0,14	0,15	0,16	0,16	0,18
1329,4	0,22	0,23	0,25	0,26	0,28
1234,4	1,28	1,52	1,76	1,91	2,19
1138,6	1,59	1,83	2,07	2,22	2,50
948,8	1,61	1,85	2,38	2,53	2,81
839,8	1,64	1,74	1,84	1,91	2,07
645,1	0,94	1,02	1,10	1,16	1,28

Continua

Continuação da Tabela 6

Distância (m)	Velocidade (m/s)				
	Tr 10 anos	Tr 20 anos	Tr 50 anos	Tr 100 anos	Tr 500 anos
564,8	0,23	0,25	0,27	0,28	0,31
508,9	0,32	0,35	0,38	0,41	0,45
453,8	0,36	0,39	0,43	0,45	0,51
338,6	0,26	0,28	0,30	0,32	0,35
131,8	0,40	0,43	0,46	0,48	0,54
0,0	0,47	0,51	0,55	0,58	0,64

Fonte: AUTOR (2022).

Os resultados para o número de Froude estão apresentados na Tabela 7. O escoamento é classificado na sua maior parte como subcrítico (fluvial), porém alguns pontos se mostraram inconsistentes, apresentando uma classificação torrencial em dois trechos.

O primeiro é próximo à estação 2.100 metros, em consonância com o gráfico de velocidades. O outro trecho é próximo à estação de 2.700 metros, divergindo do gráfico de velocidades e da declividade.

**Tabela 7 - Resultados para número de Froude.**

Distância (m)	Número de Froude				
	Tr 10 anos	Tr 20 anos	Tr 50 anos	Tr 100 anos	Tr 500 anos
3514,7	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18
3491,1	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15
3463,3	0,09	0,09	0,09	0,1	0,1
3329,3	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14
3258,1	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13
3103,9	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09
3003,6	0,34	0,35	0,36	0,37	0,39
2955,4	0,78	0,78	0,78	0,78	0,79
2903,9	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14

Continua



Continuação da Tabela 7

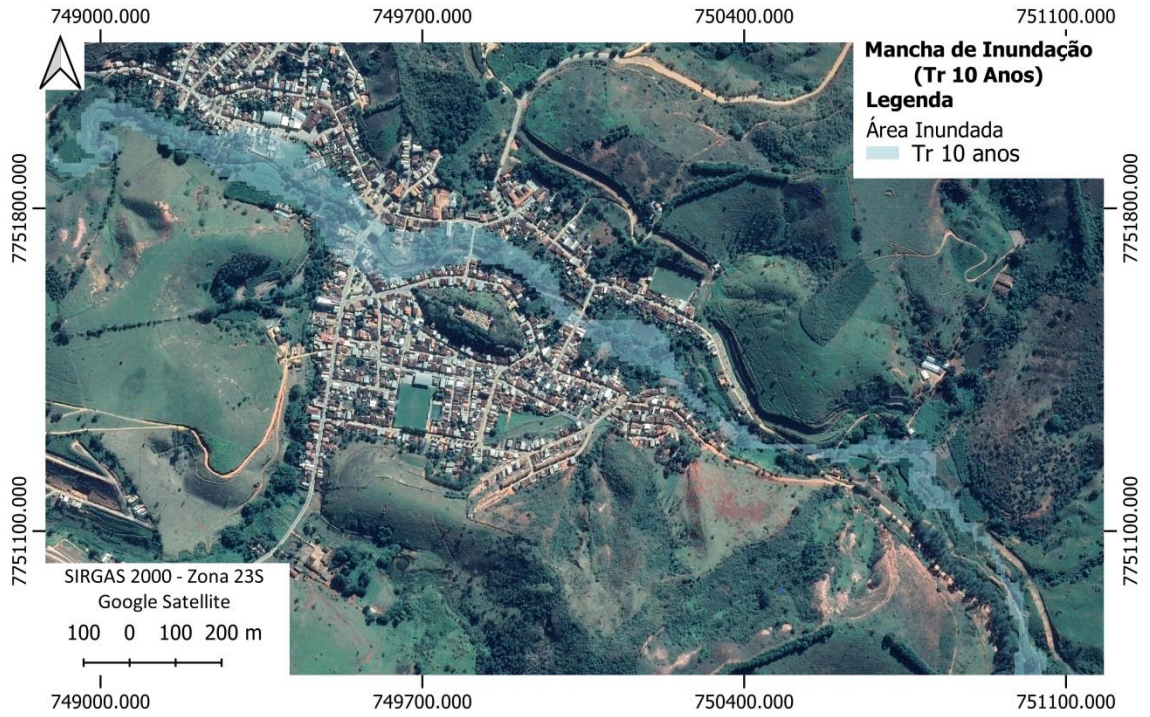
2849,9	0,65	0,73	0,79	0,83	0,91
2776,7	1,62	1,65	1,66	1,66	1,66
2608,3	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
2493,5	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
2308,1	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14
2249,1	0,28	0,28	0,27	0,27	0,28
2185,4	0,93	0,92	0,91	0,92	0,91
2151,7	3,42	3,33	3,24	3,17	3,04
2003,2	0,91	0,89	0,9	0,91	0,91
1743,9	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17
1545,3	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38
1443,5	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26
1329,4	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13
1234,4	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14
1138,6	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13
948,8	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17
839,8	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13
645,1	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16
564,8	0,18	0,19	0,19	0,2	0,21
508,9	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
453,8	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07
338,6	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09
131,8	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
0,0	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12

Fonte: AUTOR (2022).

A partir dos dados hidrológicos foram obtidos os mapas das manchas de inundações do municípios pelas vazões que foram geradas para os tempos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos. Da figura 15 a Figura 19 é apresentada os resultados obtidos.

Conforme análise dos mapas de inundação descritos pelas Figuras 15 a 19 e pela Tabela 8, deduz-se que as manchas crescem de acordo com o aumento do Tempo de Retorno. Nota-se que o crescimento da área de inundação não é muito significativo de um cenário para o outro, isso pode ser resultante da topografia da região. Diferente da área, a variação da altura da lâmina d'água aumenta consideravelmente com aumento da vazão.

**Figura 15 – Mancha de Inundação para Tr de 10 anos**



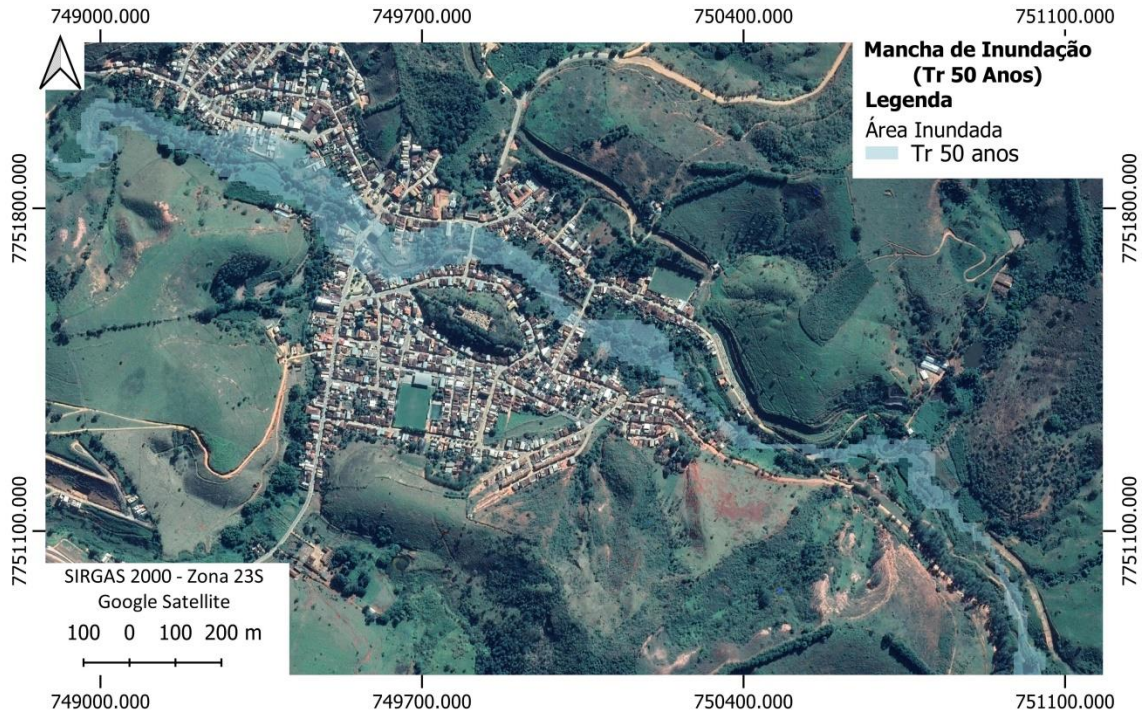
Fonte: AUTOR (2022).

**Figura 16 – Mancha de Inundação para Tr de 20 anos**



Fonte: AUTOR (2022).

Figura 17 – Mancha de Inundação para Tr de 50 anos



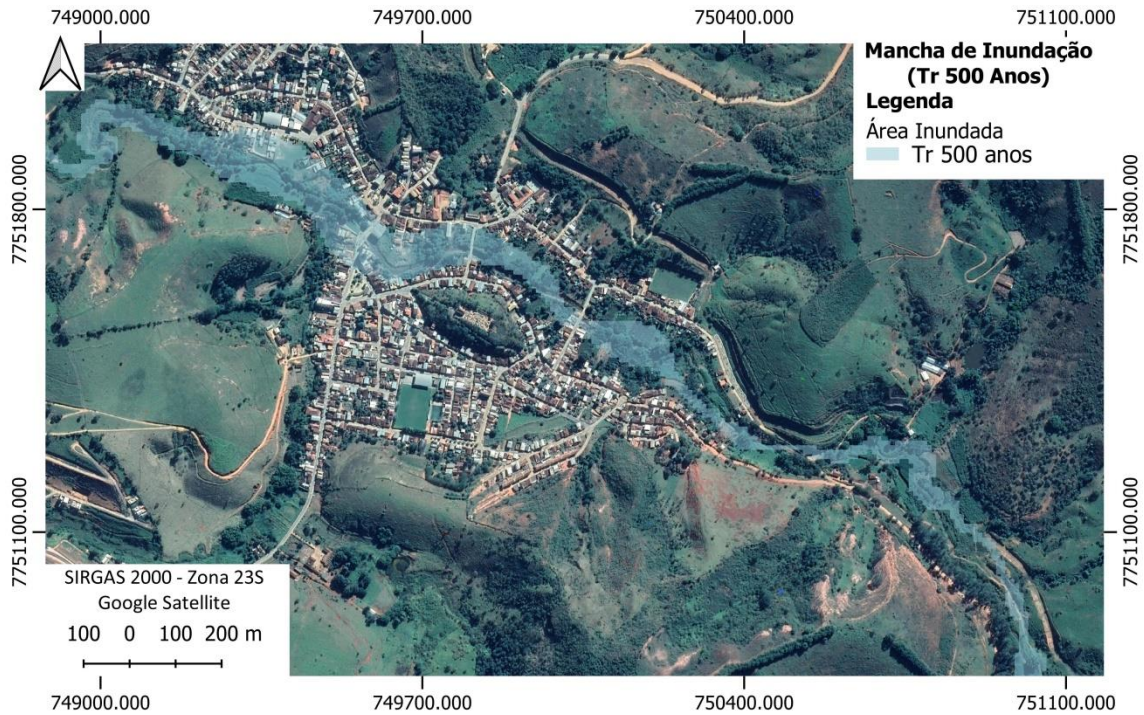
Fonte: AUTOR (2022).

Figura 18 – Mancha de Inundação para Tr de 100 anos



Fonte: AUTOR (2022).

**Figura 19 – Mancha de Inundação para Tr de 500 anos**



Fonte: AUTOR (2022).

A Tabela 8 apresenta as áreas em m<sup>2</sup> das áreas inundáveis e altura máxima da lâmina d'água do município de Santo Antônio do Grama de acordo com cada tempo de retorno abordado.

**Tabela 8 – Áreas das Manchas de Inundação**

<b>Cenário</b>	<b>Tempo de Retorno (anos)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Altura máxima da lâmina d'água (m)</b>
1	10	175.199	2,86121
2	20	175.122	2,98007
3	50	175.451	3,30554
4	100	175.809	3,56653
5	500	176.132	4,41343

Fonte: AUTOR (2022).

A atenção deve ser voltada para as áreas ribeirinhas da cidade de Santo Antônio do Grama, tendo em vista a proximidade das casas ao leito do curso d'água. O centro da cidade é frequentemente atingido por inundações, justificado pelos resultados da modelagem.

A fim de fazer um paralelo entre os resultados obtidos, não foi possível encontrar estudos semelhantes realizados na região analisada, sendo assim, optou por trazer os resultados alcançados por Feliciano (2022) e Dos Reis *et al.*, (2021) que discorrem respectivamente sobre os rios Piracicaba – MG e Gualaxo do Norte – MG. Ambos os canais fazem parte da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e possuem escoamento em canais naturais em seção aberta, assim como o Ribeirão Santo Antônio, alvo de estudo deste presente trabalho.

Feliciano (2022) observou em seu estudo uma declividade média de 0,0006 m/m no canal do rio, isso resultou em uma velocidade de escoamento de aproximadamente 2,1 m/s para o escoamento referente a modelagem do tempo de retorno de 1.000 anos, sendo este o pior cenário modelado. Em consequência dessa baixa declividade do curso d'água, o estudo resulta em regime subcrítico para todos os cenários que foram modelados.

Em contrapartida, Dos Reis *et al.*, (2021) em seu estudo encontrou uma declividade média de 0,00556 m/m para o canal do Rio do Gualaxo do Norte. Os autores ainda descrevem uma velocidade de 0,8 m/s na época chuvosa da região e classifica o escoamento como sendo subcrítico.

#### **5.4. Comparação com eventos críticos reais**

Após visitas em campo, pode-se comparar alguns eventos de inundação com os dados obtidos na modelagem hidráulica. No evento crítico de 2019 (Figura 20), a altura da lâmina d'água chegou a cerca de 0,40 centímetros nas escadarias da prefeitura da cidade, somando-se a altura de água no canal, esse valor chega a cerca de 3,30 metros. Nota-se, portanto que, provavelmente nesse ano teve uma chuva com tempo de recorrência de 50 anos, conforme visto na modelagem realizada nesse presente estudo.

**Figura 20** – Altura da lâmina d'água na enchente de 2019



Fonte: Estado de Minas (2019) e AUTOR (2022).

Através de medições em campo também pode-se obter a altura da lâmina d'água atingida na maior enchente que ocorreu na cidade, que foi a registrada no ano de 2017 (Figura 21). Naquele ano, a altura da água atingiu cerca de 5,60 metros. Essa chuva provavelmente tem um tempo retorno de aproximadamente de 1.000 anos. De acordo com relatos do Sr. Cloves Bayão, morador da cidade há 85 anos, nunca houve no município uma enchente que se aproximasse do evento ocorrido em 2017. Ainda segundo ele, em 1979 houve uma grande enchente, porém não se compara com a de 2017, não existia muitas construções na época, o que provavelmente explica a diferença do nível de elevação da lâmina d'água. Na enchente de 79 as águas do Ribeirão Santo Antônio não atingiram a praça da matriz, diferentemente de 2017 onde as águas da Avenida Vicente Bretas Cupertino se uniram as águas da Rua Padre João Coutinho, atingindo a Praça da Igreja e descendo para os locais de declividades mais baixas, causando diversos estragos.

**Figura 21 –** Altura da lâmina d'água na enchente de 2017



Fonte: Defesa Civil e AUTOR (2022).

## 6. CONCLUSÕES

Em vista dos problemas abordados propôs-se realizar um trabalho que teve por objetivo geral gerar os mapas das manchas de inundações da cidade de Santo Antônio do Gramma, Minas Gerais para eventos de chuvas de determinadas vazões. Mas especificamente objetivou-se: a) caracterizar a bacia hidrográfica na qual a cidade está inserida; b) obter os dados de vazões através do método de regionalização de vazão; c) simular as manchas de inundação para a cidade; d) comparar com eventos críticos reais.

As vazões em  $m^3/s$ , obtidas através do método de regionalização de vazões da Universidade Federal de Viçosa para os tempos de retornos de 10, 20, 50, 100 e 500 anos foram respectivamente: 43,09, 50,95, 60,83, 68,44 e 86,18.

Conforme visto na caracterização morfométrica, a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santo Antônio possui uma área de 121,34  $km^2$  e apresenta pouca susceptibilidade de ocorrências de inundação, tendo em vista o coeficiente de compacidade, o fator de forma e o índice de circularidade. Porém, na prática, o que se vê, é um alto risco associado a eventos críticos de vazões.

A ocupação indevida na região de leito maior da calha do curso d'água, associado à impermeabilização na zona urbana da cidade contribuem para que se construa um cenário diferente do esperado pela caracterização morfométrica.

Apesar das limitações impostas pelos modelos, a simulação resultante deste trabalho apresentou-se muito próxima a realidade. Como esperado, em locais com maior declividade obteve-se as maiores velocidade de escoamento. A velocidade média para o tempo de retorno de 10 anos foi igual a 0,41 m/s, enquanto para o tempo de retorno de 500 anos foi 0,59 m/s.

Devido à topografia do local, as áreas inundáveis da cidade não apresentou uma grande variância, ao contrário das alturas máximas atingidas pela lâmina d'água. Para um tempo de recorrência de 10 anos a altura da lâmina d'água foi de 2,86 metros, já para um Tr de 500 anos altura foi de 4,41 metros.

Fez-se também uma comparação com eventos de inundações dos anos de 2017 e 2019. A partir dos resultados modelados pressupõe-se que na enchente de 2017 teve uma chuva com tempo de retorno de aproximadamente 1.000 anos, e



aproximadamente 50 anos para o ano de 2019. Deve-se ter uma atenção maior para as ruas e bairros situados na margem do córrego Santo Antônio, sendo estes os primeiros atingidos pelas inundações.

Portanto este estudo pode ser aperfeiçoado no futuro e ainda servir de base para ações e políticas públicas preventivas. Ademais, recomenda-se que em trabalhos futuros seja feito um estudo hidrológico mais detalhado para a região e conseqüentemente um refinamento nos parâmetros hidráulicos e hidrológicos. Além disso, recomenda-se um levantamento topográfico/batimétrico para melhor representação do terreno e com isso gerar modelos mais precisos.

## 7. BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, Lizane ; SERRA, Juan Carlos Valdés. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE** , v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Catálogo de Metadados da ANA**, 2016. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/b4cfe37d-467c-4b67-8aaa-841b4081925b>. Acesso em: 2 Julho 2022.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2018. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecercerh/handle/ana/3273?mode=full>. Acesso em: 15 Julho 2022.

ANDRADE, M.A. ; MELLO, C.R. de ; BESKOW, S.. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Anlto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. v. 17, n. n. 1, p. p. 69-76, 2013.

BACANI, V.M. *et al.* Sensoriamento Remoto e SIG Aplicados à Avaliação da Fragilidade Ambiental de Bacia Hidrográfica. **Mercator**, Fortaleza, mai/ago. 2015. 119-135.

BAENA, Luiz G. N. *et al.* Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do Rio Paraíba do Sul. **Engenharia Agrícola**, v. 24, p. 612-624, 2004.

BARBOSA, F.A.R.. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape, PB**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2006.

BARBOSA, Prof. Antenor Rodrigues Júnior. **Elementos de Hidrologia Aplicada**. Ouro Preto: [s.n.], 2007.

BRASIL. LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. **Planato**, 1997. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm). Acesso em: 16 Abril 2022.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução do Conama: Resoluções vigentes publicadas entre setembro de 1984 e janeiro de 2012**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2002.

BRASIL. LEI Nº 12.608, DE 10 DE ABRIL DE 2012. **Planalto**, 2012. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm). Acesso em: 15 Agosto 2022.

BRASIL. LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012. **Planalto**, 2012. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em: 22 Abril 2022.

BRUBACHER, João Paulo. **Análise da suscetibilidade a inundações, na área urbana do município de Igrejinha/RS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [S.I.]. 2014.

COLLISCHONN, W. ; DORNELLES, F.. **Hidrologia Para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), v. 336p., 2013.

DE LIMA, Renato Eugênio et al. Proposta metodológica para mapeamento de risco de inundação no município de Curitiba (Paraná). **Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 82, p. p. 01-12, 2021.

DEFESA CIVIL. COBRADE. **Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade)**, 2020. Disponível em: <http://www.defesacivil.rj.gov.br/images/formularios/COBRADE.pdf>. Acesso em: 9 Maio 2022.

DOS REIS, Deyse Almeida *et al.* Características hidráulicas e autodepurativas do rio Gualaxo do Norte após o rompimento da barragem de Fundão. **Pesquisa em Ciência Ambiental e Poluição**, v. 28, n. 36, p. 50593-50601, 2021.

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

ESCARIÃO, Rodrigo Dutra. **Modelagem hidrológica da bacia do rio Negro na Amazônia**. Tese de Doutorado. Dissertação de M. Sc. Universidade de Brasília. Brasília. 2001.

ESTADO de Minas. **UAI**, 2019. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/12/24/interna\\_gerais,1110402/temporal-atinge-santo-antonio-do-grama-na-zona-da-mata-e-alaga-ruas.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/12/24/interna_gerais,1110402/temporal-atinge-santo-antonio-do-grama-na-zona-da-mata-e-alaga-ruas.shtml). Acesso em: 15 Julho 2022.

EUCLYDES, H.P. et al. Regionalização hidrológica, manual do programa. Viçosa, MG: UFV. **MMA / RURALMINAS**, p. 149p., 1999.

FAO. **FAO framework for the Urban Food Agenda**. FAO. Roma, p. 44. 2019.

FELICIANO, Fernando César Soares. **Modelagem hidrodinâmica e mapeamento de áreas de inundação urbana do município de Rio Piracicaba/MG**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2022.

FENDRICH, Roberto ; OLIYNIK, Rogério. **Manual De Utilização Das Águas Pluviais**. Curitiba: Livraria do Chain Editora, 2002.

G1 Minas Gerais. **Chuva destrói parte de BH; MG tem 55 mortos em 6 dias**, 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/01/29/apos-mais-um-temporal-com-enchentes-bh-e-regiao-metropolitana-contabilizam-mais-estragos.ghtml>. Acesso em: 2022.

GOERL, Roberto Fabris ; KOBAYAMA, Masato ; PELLERIN, Joel Robert Georges Marcel. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho–SC. **Boletim de Geografi**, v. 30, n. 1, p. p. 81-100, 2012.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2008. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 02 Julho 2022.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/santo-antonio-do-grama/panorama>. Acesso em: 1 Agosto 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE**, 2015. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 1 Maio 2022.

LIMA, A.J.R. ; NERY, J.T.. Instituto de Geociências - UNICAMP. **Revisitando o conceito de bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão e a governança das águas**, Campinas-SP, 2017. p. 726–738.

LIZARDO, Laura Niquini *et al.* Sustentare. **MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O USO DE INFRAESTRURAS VERDES: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO CÓRREGO RESSACA, SITUADA NO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE**, Rio Verde, Janeiro/Julho 2019. 42-63.

LOPES, Isabela do Carmo Precci *et al.* CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CARATINGA, SUB BACIA DO RIO DOCE, MG, Viçosa, 2022.

MANTOVANI, Barbára. **Mapeamento de risco a movimentos de massa e inundação em áreas urbanas no município de Camaragibe**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 288. 2016.

MÁRCIA, Luciana Gonçalves; SILVA, Luciana F. Baptista; AMORIM, Rochele Ribeiro. O USO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM PARA CONTROLE DOS IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, p. 92-106, 2016. ISSN 978-85-68242-22-3.

MOREIRA, Luana Lavagnoli *et al.* MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MAQUINÉ (RS) UTILIZANDO O SWAT. **XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, Foz do Iguaçu - PR, 2019.

POMPÊO, Cesar Augusto. DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 5, n. nº 1, p. pag. 15-23, 2000.

RODRIGUES, Lorrany Antunes Alves. **Impacto do processo de urbanização na formação de enchentes e alagamentos em Belo Horizonte**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2020.

SANTOS, Kesia Rodrigues dos. Inundações urbanas: um passeio pela literatura. **Geo. UEG**, Goiânia, v. 1, n. 1, p. 177-190, jan/jun 2012.

SEMASA , 2022. Disponível em: <http://www.semasa.sp.gov.br/home/>. Acesso em: 10 Janeiro 2022.

SHIDAWARA, M.. Flood hazard map distribution. **Urban Water**, v. 1, p. p.125-129, 1999.

SILVA, Renato Ferreira da ; SANTOS, Vanderson Aguiar; GALDINO, Sandy Maria Gonçalves. Análise dos impactos ambientais da Urbanização sobre os recursos hídricos na sub-bacia do Córrego Vargem Grande em Montes Claros-MG. **Caderno de Geografia**, v. v. 26, n. n. 47, 2016. ISSN 2318-2962.

SILVA, T.. **Modelagem hidráulica do canal do rio Granjeiro, Crato/CE, utilizando o programa computacional HEC-RAS**. [S.l.]. 2013.

SILVA, V. C. B. ; MACHADO, S.. SIG na análise ambiental: susceptibilidade erosiva da bacia hidrográfica do córrego Mutuca, Nova Lima, Minas Gerais. **Revista de Geografia**, v. V.31, n. No. 2, 2014.

SOUSA, L.F.N. M. de. **Metodologia para o mapeamento de cheias em zonas de risco. Aplicação a um troço de um rio do norte de Portugal**. Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil. Universidade do Porto, Porto. 2012.

TONELLO, Kelly Cristina *et al.* Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães-MG. **Revista Árvore**, v. v. 30, p. 849-857, 2006.

TONELLO, Kelly Cristina. Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG. **Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)**, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. 69f.

TUCCI, C. E. M.. **Inundações urbanas: impactos da urbanização**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, v. p87-124, 2007.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciências e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS ABTH GWP, v. 943p., 2004.

TUCCI, C.E.M. **MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO**. [S.l.]: Ministério das Cidades – Global Water Partnership - Wolrd Bank – Unesco 2, 2005.

TUCCI, Carlos E.M. Gestão da drenagem urbana. **CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA**., Brasília, DF, p. 50p, 2012. ISSN 2179-5495.

UAI Estado de Minas. **A BH das 200 enchentes**, 2012. Disponível em: [https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2012/01/07/interna\\_gerais,271132/a-bh-das-200-enchentes.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2012/01/07/interna_gerais,271132/a-bh-das-200-enchentes.shtml). Acesso em: Agosto 2022.

UFV. Atlas Digital das Águas de Minas. **Universidade Federal de Viçosa**, 2013.  
Disponível em:  
[http://www.atlasdasaguas.ufv.br/atlas\\_digital\\_das\\_aguas\\_de\\_minas\\_gerais.html](http://www.atlasdasaguas.ufv.br/atlas_digital_das_aguas_de_minas_gerais.html).  
Acesso em: 15 Julho 2022.

VILLELA, S. M. ; MATTOS, A.. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: Mc Graw Hill,  
1975.