



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI
TEÓFILO OTONI – MINAS GERAIS
PPGTAS – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO TECNOLOGIA, AMBIENTE E
SOCIEDADE



VLAMIR SOARES FONSECA

**MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO A INUNDAÇÕES UTILIZANDO
GEOTECNOLOGIAS AMBIENTADAS EM SIG: ESTUDO DE CASO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO CALADÃO – CORONEL FABRICIANO/MG**

Teófilo Otoni

2021

Vlamir Soares Fonseca

**MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO A INUNDAÇÕES UTILIZANDO
GEOTECNOLOGIAS AMBIENTADAS EM SIG: ESTUDO DE CASO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO CALADÃO – CORONEL FABRICIANO/MG**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiente e Sociedade da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Brasil Ferreira Pinto
Co-orientador: Prof. Dr. Caio Mário Leal Ferraz

Teófilo Otoni

2021

Ficha Catalográfica
Preparada pelo Serviço de Biblioteca/UFVJM
Bibliotecário responsável: Gilson Rodrigues Horta – CRB6 nº 3104

F676m Fonseca, Vlamir Soares.
2021 Mapeamento de áreas de risco a inundações utilizando geotecnologias ambientadas em SIG: estudo de caso da bacia hidrográfica do Ribeirão Caladão - Coronel Fabriciano/MG. / Vlamir Soares Fonseca. Teófilo Otoni, 2021.
89 p. ; il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Ambiente e Sociedade, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Brasil Ferreira Pinto.
Coorientador: Prof. Dr. Caio Mário Leal Ferraz.

1. Características fisiográficas. 2. Sistema de Informações Geográficas. 3. Suscetibilidade. 4. Vulnerabilidade sanitária. 5. Vulnerabilidade socioeconômica. I. Título.

CDD: 910



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

VLAMIR SOARES FONSECA

MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO A INUNDAÇÕES UTILIZANDO GEOTECNOLOGIAS AMBIENTADAS EM SIG: ESTUDO DE CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO CALADÃO - CORONEL FABRICIANO - MG

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação **Tecnologia, Ambiente e Sociedade** da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, **nível de Mestrado**, como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Tecnologia, Ambiente e Sociedade**.

Orientador: Prof. **Dr. Daniel Brasil Ferreira Pinto**

Data de aprovação 23/02/2021.

Prof. Dr. Daniel Brasil Ferreira Pinto (Orientador)

Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia - UFVJM

Prof. Dr. Caio Mário Leal Ferraz (Coorientador)

Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia - UFVJM

Prof. Dr. Alexandre Faissal de Brito

Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia - UFVJM

Prof. Dr. Ivan Carlos Carreio Almeida

Instituto Federal do Norte de Minas Gerais - IFNMG



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Faissal Brito, Servidor**, em 12/03/2021, às 13:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Caio Mário Leal Ferraz, Servidor**, em 15/03/2021, às 09:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **IVAN CARLOS CARREIRO ALMEIDA, Usuário Externo**, em 16/03/2021, às 09:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Brasil Ferreira Pinto, Servidor**, em 16/03/2021, às 09:36, 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 https://sei.ufvjm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0303635** e o código CRC **3947659E**.

Dedico este trabalho a família, amigos, colegas,
professores e todos que colaboraram para o
desenvolvimento desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

A meus pais Elmo (in memoriam) e Pia que sempre foram meu esteio e maiores incentivadores em toda minha vida, acadêmica e pessoal.

A minha esposa Miriam por todo o apoio, compreensão e por todo o amor;

Ao meu amigo Dirley pela amizade, apoio e as longas discursões filosóficas;

Aos meus queridos familiares que mesmo distantes não me deixaram desistir

Aos Professores Drs. Daniel Brasil Ferreira Pinto e Caio Mário Leal Ferraz pelas orientações, amizade e incentivo nesta longa caminhada;

A Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri em particular ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiente e Sociedade, pela oportunidade de realizar o mestrado;

Aos professores, funcionários e colegas da UFVJM que foram solidários com informações, materiais durante o desenvolvimento desta pesquisa;

Por fim, o mais importante: agradeço a Deus. Jesus Cristo foi quem mais me deu forças e me amparou até aqui. Me guiando, protegendo, iluminando. Ele supriu minhas necessidades e me deu o que eu precisava, sem que eu soubesse. É nas mãos dele que está toda minha vida e minha maior gratidão.

“A força da alienação vem dessa fragilidade dos indivíduos, quando apenas conseguem identificar o que os separa e não o que os une.”
(SANTOS, 2000, p. 17)

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão (BHRC) localizada no município de Coronel Fabriciano, Região Metropolitana do Vale do Aço, leste do estado de Minas Gerais consiste em uma área de drenagem de 53 km² que contribui para o Ribeirão Caladão, um dos principais afluentes do Rio Piracicaba. Nos últimos anos tal bacia hidrográfica passa por uma acelerada ocupação desordenada que associada às condições naturais peculiares formam um arcabouço de condicionantes fisiográficos e antrópicos que podem ser traduzidos em áreas de risco a inundações. Atualmente este quadro se tornou muito preocupante, pois a atividade antrópica intensa ao longo dos últimos anos tem contribuído para a intensificação das inundações, gerando áreas de risco que conseqüentemente tem causado prejuízos materiais e perda de vidas no sítio urbano desta bacia hidrográfica. Diante deste fato foi proposto identificar e classificar as áreas de risco a inundações da BHRC, através das suas características fisiográficas e antrópicas, utilizando-se os softwares Terra View Hidro 0.4.5 e ArcGIS 10.8, ambos considerados ferramentas de geotecnologia ambientados em SIG- Sistema de Informações Geográficas. Os resultados demonstraram que 53,03% das áreas suscetíveis a inundações dentro da BHRC são consideradas de risco e estão localizadas em todas as sub-bacias da BHRC, sendo que nas sub-bacias III e V concentram-se a maior parte da população em áreas de alto grau de risco. A metodologia empregada consistiu no cruzamento de dados que gerou modelos espaciais de morfometria, escoamento superficial, suscetibilidade a inundações, vulnerabilidade socioeconômica e vulnerabilidade sanitária, ambos delimitados pelo modelo HAND (*Height Above Nearest Drainage*) e processados através da técnica de álgebra. Os resultados culminaram em uma carta de risco a inundações que caracterizam o fenômeno e a condições de vulnerabilidade da população local, baseando-se em um método efetivo e de baixo custo, no qual se espera favorecer o planejamento urbano e ambiental de forma eficiente em âmbito municipal.

Palavras chave: Características fisiográficas; Sistema de Informações Geográficas; Suscetibilidade; Vulnerabilidade sanitária; Vulnerabilidade socioeconômica.

ABSTRACT

The Ribeirão Caladão Hydrographic Basin (BHRC) located in the municipality of Coronel Fabriciano, Metropolitan Region of Vale do Aço, east of the state of Minas Gerais, consists of a 53 km² drainage area that contributes to Ribeirão Caladão, one of the main tributaries of the Piracicaba River. In recent years, this hydrographic basin has undergone an accelerated disorderly occupation that, associated with peculiar natural conditions, form a framework of physiographic and anthropic conditions that can be translated into areas at risk of flooding. Nowadays this situation has become very worrying, since the intense anthropic activity over the last few years has contributed to the intensification of floods, generating areas of risk that consequently has caused material damage and loss of life in the urban site of this hydrographic basin. In view of this fact, it was proposed to identify and classify the BHRC flood risk areas, through their physiographic and anthropic characteristics, using the software Terra View Hidro 0.4.5 and ArcGIS 10.8, both considered geotechnology tools set in GIS-Information System Geographic. The results showed that 53.03% of the areas susceptible to flooding within the BHRC are considered to be at risk and are located in all BHRC sub-basins, with sub-basins III and V concentrating most of the population in high-risk areas. The methodology used consisted of the crossing of data that generated spatial models of morphometry, runoff, susceptibility to flooding, socioeconomic vulnerability and sanitary vulnerability, both delimited by the HAND model (Height Above Nearest Drainage) and processed through the algebra technique. The results culminated in a risk letter to floods that characterize the phenomenon and the conditions of vulnerability of the local population, based on an effective and low cost method, in which it is expected to favor urban and environmental planning. efficiently at the municipal level.

Keywords: Physiographic characteristics; Geographic Information System; Susceptibility; Health vulnerability; Socioeconomic vulnerability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Características dos leitos do rio	18
Figura 2 - Relação entre perigo e desastre.....	20
Figura 3 - Relação dos termos aplicados na formação dos riscos e desastres	26
Figura 4 - Cruzamento de dados na elaboração de mapas de risco via SIG.....	28
Figura 5 - Etapas da metodologia de pesquisa	35
Figura 6- Procedimentos de cálculo para geração e fatiamento do M-HAND.....	42
Figura 7 - Índice de Circularidade e Tendência a Inundações por sub-bacias	50
Figura 8 - Índice de Sinuosidade e Tendência a Inundações por sub-bacias	51
Figura 9 - Tendência de escoamento superficial por sub-bacias	56
Figura 10 - Classificação das sub-bacias da BHRC em relação à tendência de concentração de áreas inundáveis totais	59
Figura 11 - Classificação das sub-bacias da BHRC em relação à Tendência de concentração de áreas inundáveis edificadas.....	59
Figura 12 - Distribuição espacial das variáveis do censo demográfico de 2010, selecionadas para elaboração de modelo de vulnerabilidade social	61
Figura 13 - Distribuição espacial da população da BHRC em relação aos serviços de saneamento básico, considerados essenciais	66
Figura 14 - Distribuição espacial da população da BHRC em relação ao tipo de abastecimento de água, com exceção da rede geral de abastecimento.....	67
Figura 15 - Distribuição espacial da população da BHRC em relação ao tipo de disposição das águas residuais domésticas com exceção da rede geral de esgoto	68
Figura 16 - Distribuição espacial da população da BHRC em relação ao tipo de disposição resíduos domésticos com exceção aos serviços de coleta de lixo	69
Figura 17 - Recorte espacial dos modelos do quadro de suscetibilidade da BHRC através do modelo Height Above the Nearest Drainage (M-HAND).....	72
Figura 18 - Recorte espacial dos modelos do quadro de vulnerabilidade da BHRC através do modelo Height Above the Nearest Drainage (M-HAND).....	73
Figura 19 - Inundação do Ribeirão Caladão no Bairro Surinan	77
Figura 20 - Inundação do Ribeirão Caladão no Bairro Bom Jesus	79
Figura 21 - Inundação do Ribeirão Caladão no Bairro Giovannini.....	80
Figura 22 - Classificação das sub-bacias quanto à tendência de áreas de alto grau de risco ...	80
Figura 23 - Classificação das sub-bacias quanto à tendência de áreas de médio grau de risco	81

Gráfico 1 - Frequência anual de desastres por enxurradas no Estado de Minas Gerais, no período de 1991-2012.....	17
Mapa 1- Localização da bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão.....	30
Mapa 2 – Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão.....	32
Mapa 3 – Mapa de Uso do Solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão.....	33
Mapa 4 – Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão.....	40
Mapa 5 - Disposição dos Setores Censitários na BHRC do município de Coronel Fabriciano, determinados pelo IBGE no ano de 2010.....	44
Mapa 6 - Sub-bacias Hidrográficas e Ordenamento da Rede de Drenagem da BHRC através do método de Strahler.....	49
Mapa 7 - Potencial de Escoamento Superficial da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão..	52
Mapa 8 - Mapa produzido a partir da simulação de inundação na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão, baseado no modelo Height Above the Nearest Drainage (M-HAND).....	57
Mapa 9 - Vulnerabilidade Social na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão.....	63
Mapa 10 - Vulnerabilidade Sanitária na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão.....	70
Mapa 11 - Áreas de Risco a inundações na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão.....	74
Quadro 1 – Relação de termos e seus conceitos empregados no trabalho.....	25
Quadro 2 - Bairros do município de Coronel Fabriciano compreendidos pela BHRC.....	34
Quadro 3 - Índices Kappa (K) para avaliação da Classificação Remota.....	39
Quadro 4 - Valores de Curve Number (CN) para as classes de uso e ocupação do solo.....	41
Quadro 5 - Variáveis censitárias utilizadas para mensurar a vulnerabilidade social.....	45
Quadro 6 - Variáveis censitárias utilizadas para mensurar a vulnerabilidade sanitária.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados Climáticos de Coronel Fabriciano.....	31
Tabela 2 - Distribuição espacial dos setores censitários e bairros dentro da BHRC.....	45
Tabela 3 - Parâmetros e Índices Morfométricos das sub-bacia Hidrográfica compreendidas na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão.....	50
Tabela 4 - Características de uso, ocupação e tipo de solo da BHRC baseando no parâmetro Curve Number (CN), com indicação da área em hectares e percentual de ocupação.	53
Tabela 5 - Parâmetro Curve Number (CN), com indicação da área em hectares e percentual de ocupação por sub-bacias.....	55
Tabela 6 - Distribuição espacial das áreas atingidas na simulação de inundação da BHRC ...	58
Tabela 7 - Quantificação das áreas atingidas na simulação de inundação para cada sub-bacia	58
Tabela 8 - Distribuição espacial das classes de vulnerabilidade social por sub-bacias.....	64
Tabela 9 - Distribuição espacial das classes de vulnerabilidade sanitária por sub-bacias	70
Tabela 10 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia I.....	75
Tabela 11 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia II.....	75
Tabela 12 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia III.....	76
Tabela 13 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia IV	77
Tabela 14 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia V.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
CETEC	Centro Tecnológico de Minas Gerais
CN	<i>Curve Number</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
HAND	<i>Height Above the Nearest Drainage</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IVS	Índice de Vulnerabilidade Social
IVSA	Índice de Vulnerabilidade Sanitária
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
M-HAND	Modelo <i>Height Above the Nearest Drainage</i>
PES	Potencial de Escoamento Superficial
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
S2ID	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USPA	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Desastres e Inundações	17
2.2 Suscetibilidade e Perigo	19
2.3 Vulnerabilidade a Inundações	21
2.4 Risco à Inundações	24
2.5 Sistema de Informações Geográficas	26
2.6 Modelo HAND	28
3 MATERIAS E MÉTODOS	30
3.1 Caracterização da Área de Estudo	30
3.2 Procedimentos metodológicos	35
<i>3.2.1 Banco de Dados</i>	36
<i>3.2.2 Quadro de Suscetibilidade</i>	36
<i>3.2.2.1 Modelo Morfométrico</i>	36
<i>3.2.2.1.1 Modelo de Elevação Hidrologicamente Consistente - MDEHC</i>	36
<i>3.2.2.1.2 Delimitação da Bacia Hidrográfica e suas Sub-bacias</i>	37
<i>3.2.2.1.3 Índices Morfométricos</i>	37
<i>3.2.2.2 Modelo Potencial de Escoamento Superficial</i>	38
<i>3.2.2.2.1 Uso e Ocupação do Solo</i>	38
<i>3.2.2.2.2 Mapa de Solos</i>	39
<i>3.2.2.2.3 Parâmetro Curver Number (CN)</i>	40
<i>3.2.3 Simulação de Inundação</i>	42
<i>3.2.4 Quadro de Vulnerabilidade</i>	43
<i>3.2.4.1 Modelo de Vulnerabilidade Social</i>	44
<i>3.2.4.2 Modelo de Vulnerabilidade Sanitária</i>	47
<i>3.2.5 Modelo de Risco a Inundações</i>	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Análise do Modelo Morfométrico	49
4.2 Análise do Modelo Potencial de Escoamento Superficial	52
4.3 Simulação de Inundação	57
4.4 Análise do Modelo de Vulnerabilidade Social	60
4.5 Análise do Modelo de Vulnerabilidade Sanitária	65

4.6 Análise do Modelo de Risco	72
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de inundações tem sido frequente em áreas urbanizadas, sendo consequências destrutivas das interações entre as características fisiográficas e antrópicas de uma bacia. Os desequilíbrios resultantes dessas interações tem origem na carência de políticas públicas de ordenamento territorial, diante de um desenvolvimento urbano acelerado ocorrido nas cidades brasileiras nos últimos anos.

Segundo Tucci (2014), as grandes cidades e regiões metropolitanas têm apresentado um desenvolvimento urbano concentrado aumentando a ocorrência de inundações à medida que os limites urbanos são ampliados, densificando ainda mais as áreas urbanas, sem que o poder público consiga conter tal processo, culminando na formação de áreas de risco.

Nesta perspectiva, o tema risco é apresentado como consequência das interações entre o quadro natural e o quadro antrópico, que alteram a dinâmica hidrológica quando a expansão da ocupação humana se manifesta de forma desordenada e em desacordo com a capacidade de resposta hidrológica das bacias hidrográficas.

Os estudos da interação do quadro natural e antrópico são fundamentais para o mapeamento das áreas suscetíveis a desastres, pois é a partir destes estudos que se pode determinar as medidas necessárias para a redução de riscos em áreas ocupadas (CARVALHO, 2018).

Diante das tragédias e prejuízos socioeconômicos causados pelo aumento da frequência, intensidade e severidade dos eventos meteorológicos, o tema risco vem se destacando no meio científico, sendo discutido no Brasil por autores como Marcelino (2008), Tominaga (2009), Menezes (2014), Carvalho (2018) e Menegasso (2019), que abordam novas metodologias de mapeamento baseado em geotecnologias.

Anualmente os desastres relacionados à dinâmica hidrológica têm sido intensificados e segundo Brasil (2013), através da obra Atlas de Desastres Naturais de Minas Gerais, entre os anos de 1991 e 2012 foram registrados 1.155 registros oficiais de inundações bruscas¹ no estado, no qual a mesorregião do vale do Rio Doce apresentou 19% destes registros. É importante lembrar que dados mais recentes ainda não foram publicados.

¹ “Chuvas intensas e concentradas, em regiões de relevo acidentado, caracterizando-se por produzirem súbitas e violentas elevações dos caudais, os quais escoam-se de forma rápida e intensa” (CASTRO, 2003, p. 50).

Dentre os municípios mineiros mais atingidos na mesorregião do vale do Rio Doce, encontra-se o município de Coronel Fabriciano, que segundo o Atlas brasileiro de desastres naturais (2013) e a Defesa civil do estado de Minas Gerais (2020), somente neste município foram efetuados 8 registros oficiais de inundações sendo 1 considerada inundação gradual, 7 inundações bruscas e 2 sem classificação, sendo que todas foram consideradas excepcionais e caracterizadas como desastres, entre os anos de 1996 e 2006.

Os dados apresentados pelo Atlas de Desastres Naturais de Minas Gerais (2013) são frutos da lei 12.608/12 que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil autorizando a criação de um sistema integrado de informações sobre desastres – S2ID (BRASIL, 2013).

A aplicação do SIG na análise de desastres naturais causadas por inundações bruscas na BHRC permitiria levantar informações do meio natural e antrópico gerando modelagens e simulações computacionais que indicaram as áreas suscetíveis a inundações e a população vulnerável na bacia.

Logo, a utilização das geotecnologias, em especial o Sistema de Informações Geográficas – SIG se torna essencial no mapeamento de desastres naturais, pois garante rapidez na identificação e caracterização preliminar das áreas de risco, favorecendo a gestão, prevenção e mitigação de desastres.

Neste contexto objetiva-se com este trabalho mapear as áreas de risco a inundações na BHRC, utilizando geotecnologias ambientadas em SIG, que consiste em um método efetivo e de baixo custo, no qual se espera tornar um instrumento de gestão de desastres eficiente em âmbito municipal.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Desastres e Inundações

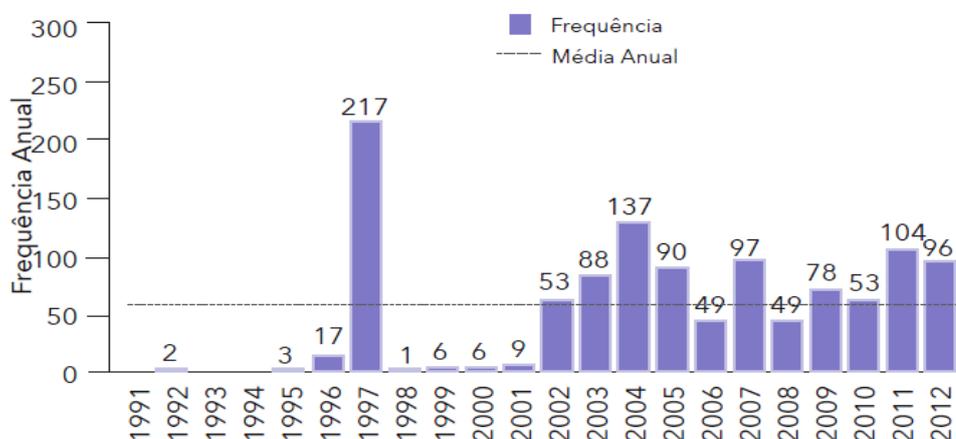
O desastre é definido como “resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais” (CASTRO, 1998, p. 52).

Historicamente os desastres sempre afligiram a humanidade e nas últimas décadas tais fenômenos têm se intensificado em várias partes do mundo, sendo desencadeados pelo aumento da urbanização e a ocupação desordenada, gerada, principalmente, pela falta de planejamento urbano e deficiência na gestão das bacias hidrográficas (KOBAYAMA *et al.*, 2006).

Os desastres de grande magnitude, como terremotos e vulcões, são praticamente inexistentes no Brasil, entretanto o acelerado processo de urbanização associado à ocupação irregular de áreas vulneráveis tem gerado inúmeros e recorrentes desastres, ocasionados por escorregamentos e inundações, acarretando prejuízos e perdas significativas de caráter social, econômico e ambiental (TOMINAGA, 2009).

Segundo o Atlas brasileiro de desastres naturais (2013) somente no estado de Minas Gerais foram efetuados 1.155 registros oficiais de inundações bruscas consideradas excepcionais e caracterizadas como desastres, entre os anos de 1991 e 2012 (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Frequência anual de desastres por enxurradas no Estado de Minas Gerais, no período de 1991-2012

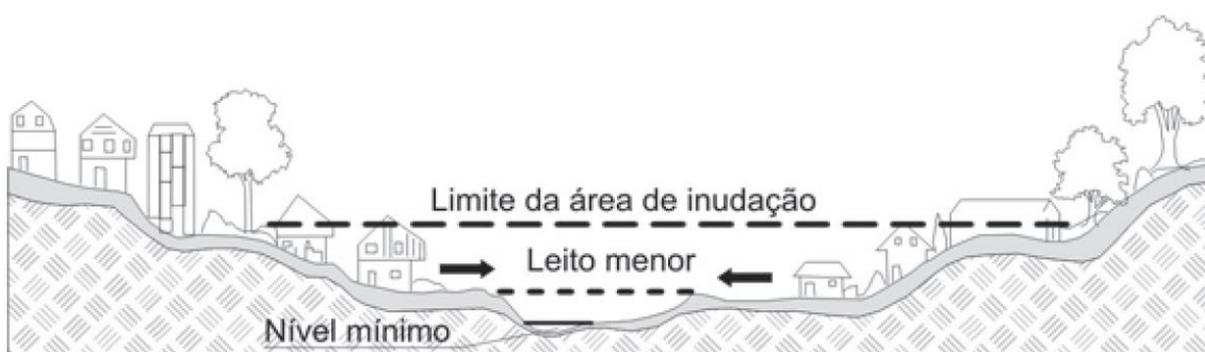


Fonte: Atlas Desastres Naturais Minas Gerais 1991-2012, 2013, p. 47.

Kobiyama *et al.* (2006, p. 45) conceitua a inundação como o “aumento do nível do curso d’água além da sua vazão normal, no qual conseqüentemente gera o transbordamento de suas águas sobre as áreas marginais ao curso d’água denominada planícies de inundação”.

As planícies de inundação são encontradas margeando rios de variadas grandezas e consistem em aluviões e depósitos detríticos gerados pela sedimentação fluvial, organizados em 2 patamares denominados leito menor e leito maior (Figura 1) (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Figura 1 - Características dos leitos do rio



Fonte: Tucci, 2008, p. 105.

Tucci (2008) afirma que:

Os rios geralmente possuem dois leitos: o leito menor, onde a água escoar na maior parte do tempo, é limitado pelo risco de 1,5 a dois anos. As inundações ocorrem quando o escoamento atinge níveis superiores ao leito menor, atingindo o leito maior. As cotas do leito maior identificam a magnitude da inundação e seu risco. Os impactos pela inundação ocorrem quando essa área de risco é ocupada pela população (TUCCI, 2008, p. 105).

Em relação a ocupação dos leitos fluviais, K jha, Bloch e Lamond (2012) afirmam que a expansão urbana em larga escala, sem planejamento, associada a eventos climáticos extremos, tem contribuído para o perigo crescente de inundações nas planícies aluviais urbanas.

Cajazeiro (2012, p. 25) ainda descreve que “a crescente impermeabilização dos solos gera alterações no balanço entre infiltração e escoamento, aumentando o escoamento superficial que contribui para o rápido aumento da vazão fluvial em eventos de chuva”.

Kobiyama *et al.* (2006, p. 49) mencionam que “nos últimos anos a impermeabilização decorrente das ocupações das planícies de inundação vem aumentando gradativamente e conseqüentemente causando inundações e prejuízos.”

Nas últimas décadas a expansão urbana no Brasil, especialmente nas regiões metropolitanas e cidades de médio porte, gerou grandes áreas impermeabilizadas, produzindo obstruções ao escoamento superficial da bacia, que conseqüentemente intensificam as inundações nas planícies fluviais, caracterizadas nestes ambientes urbanos por ocupações espontâneas habitadas em sua maioria por uma população de baixa renda sem infraestrutura adequada, em áreas de preservação permanente negligenciadas pelo poder público local (TUCCI, 2008).

Logo, diante da complexidade da dinâmica urbana sobre as planícies de inundações, durante eventos hidrológicos extremos, se torna difícil a compreensão do fenômeno das inundações sem a abordagem por meio da utilização de leis empíricas, hipóteses e modelagens que seriam úteis para compreensão deste fenômeno diante destas circunstâncias (KOBİYAMA *et al.*, 2004).

2.2 Suscetibilidade e Perigo

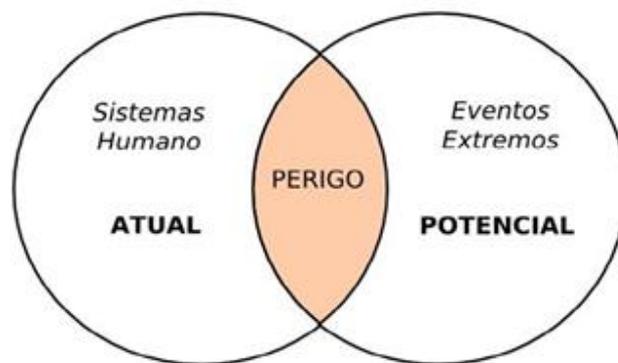
Suscetibilidade e perigo são terminologias distintas, mas complementares, quando se trata dos estudos sobre inundações, entretanto a falta de padronização destes termos conduziu vários pesquisadores a definirem metodologias próprias, conforme afirma Kobiyama *et al.* (2006):

Analizando a literatura, as definições de risco, vulnerabilidade, perigo e susceptibilidade, observa-se que não há um acordo entre os pesquisadores e/ou gerenciadores. Isto aumenta ainda mais a dificuldade no estabelecimento de métodos comuns (KOBİYAMA *et al.* 2006, p. 18)

Ainda contribuindo para este tema, Kobiyama *et al.* (2006, p. 17) em seus estudos apresentam a seguinte definição de perigo: “fenômeno natural que ocorre em épocas e região conhecidas que podem causar sérios danos nas áreas sob impacto”, tal definição vai de encontro com a definição de Tominaga (2009, p. 150): “possibilidade de um processo ou fenômeno natural potencialmente danoso ocorrer num determinado local e num período de tempo especificado”.

Marcelino (2008, p. 23) ainda esclarece que “na natureza ocorrem diversos tipos de fenômenos que fazem parte da própria dinâmica natural da Terra. Mas, se ocorrerem ou se deslocarem sobre um sistema social, tem-se uma situação potencial de danos a pessoas e bens” (Figura 2).

Figura 2 - Relação entre perigo e desastre.



Fonte: MARCELINO, 2008, p. 23

Já o termo suscetibilidade consiste em mais um termo que tem sido muito usual nas pesquisas sobre mapeamento de inundações, entretanto o Ministério das Cidades (BRASIL – IPT, 2007, p. 26) em sua obra destinada a padronização no mapeamento de riscos, busca esclarecer este termo ao apresentar a seguinte definição “potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área, expressando-se segundo classes de probabilidade de ocorrência”, e distingui-lo do termo perigo definindo-o como “condição ou fenômeno com potencial para causar uma consequência desagradável”.

Seguindo este raciocínio Julião *et al.* (2009) elaboraram o Guia Metodológico para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de base municipal, no qual apresentaram a definição de suscetibilidade ao mencionar que a mesma representa:

A propensão para uma área ser afetada por um determinado perigo, em tempo indeterminado, sendo avaliada através dos fatores de predisposição para a ocorrência dos processos ou ações, não contemplando o seu período de retorno ou a probabilidade de ocorrência (Julião *et al.*, 2009, p. 20).

Em relação aos fatores de predisposição na formação das inundações, Dantas (2018) afirma que as condições hidrográficas, morfométricas e quaisquer outros aspectos que

favorecem a ocorrência do fenômeno estão associados ao processo hidrodinâmico das inundações, portanto devem ser considerados nestes estudos.

Souza (2005) ainda afirma que a interação dos aspectos morfométricos de uma bacia são responsáveis pelo seu comportamento hidrológico e conseqüentemente gera perigos hidrometeorológicos, dentre eles as inundações e enchentes.

Logo, a caracterização morfométrica consiste nos procedimentos iniciais para análises hidrológicas, e visa esclarecer a dinâmica ambiental da bacia hidrográfica em análise (TEODORO *et al.*, 2007).

Os aspectos morfométricos da bacia hidrográfica se tornam uma das condicionantes para a avaliação da suscetibilidade a inundações, portanto a análise integrada dos aspectos morfométricos é fundamental para a compreensão dos aspectos mais diretamente correlacionados ao processo de inundação (CAJAZEIRO, 2012).

Entretanto no mapeamento de suscetibilidades a inundações, não se pode descartar as intervenções humanas que podem ser classificadas como agentes intensificadores do processo (MENEGASSO, 2019).

Dentre as intervenções humanas pode-se citar a impermeabilização, que conforme Tucci (2007) gera inundações mais frequentes devido à aceleração do escoamento das águas pluviais em contraponto ao escoamento que ocorria de forma natural, através do ravinamento existente.

Diante do exposto adota-se neste trabalho o termo perigo como possibilidade de um evento induzido ou natural gerar danos humanos e materiais a um sistema social, distinguindo-o da suscetibilidade que seria a predisposição natural do ambiente em ser atingido durante um evento perigoso, expressando-se por classes de possibilidade de incidência espacial (KOBAYAMA *et al.* 2006; BRASIL – IPT, 2007; TUCCI, 2007; MARCELINO, 2008; TOMINAGA, 2009; JULIÃO *et al.*, 2009; CAJAZEIRO, 2012; MENEGASSO, 2019).

2.3 Vulnerabilidade a Inundações

O Ministério das Cidades (BRASIL – IPT, 2007, p. 26) determina vulnerabilidade como “grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área passível de ser afetada por um fenômeno ou processo”.

“Neste caso, a vulnerabilidade tende a ser confundida com exposição a riscos, reduzindo-se à identificação de locais atingidos por eventos circunscritos no tempo e no espaço” (MARANDOLA JR, 2013, p. 106).

Para Tominaga (2009, p. 151) a vulnerabilidade consiste em um “conjunto de processos e condições resultantes de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, o qual aumenta a suscetibilidade de uma comunidade (elemento em risco) ao impacto dos perigos”.

Logo se pode dizer que “a vulnerabilidade humana não é um fenômeno novo, porém tem vindo a agravar-se em consequência da instabilidade financeira e do avolumar de pressões ambientais como as alterações climáticas” (PNUD, 2014, p. 2).

Menegasso (2019, p. 20) segue a mesma linha de raciocínio, apresentando a vulnerabilidade como uma consequência do avanço do capitalismo global:

O avanço do capitalismo global intensificou a industrialização e atenuou o processo de urbanização. Como consequência desta situação, principalmente no mundo subdesenvolvido, apresentou como resultados o aumento das desigualdades sociais, da segregação espacial, da intensificação da pobreza e a degradação do ambiente natural.

Entretanto Cutter (2011, p. 59) menciona que:

A ciência da vulnerabilidade consiste na integração multidisciplinar das ciências sociais, das ciências naturais e da engenharia na compreensão das circunstâncias que colocam as populações e os locais em risco devido aos perigos, e dos fatores que aumentam ou reduzem a capacidade de resposta e de recuperação das populações, dos sistemas físicos ou das infraestruturas em relação a ameaças ambientais.

Marandola Jr (2013, p. 95) reforça ao afirmar que “o tema vulnerabilidade às mudanças ambientais é multidisciplinar e, portanto, multiescalar, tornando imprescindível identificar as diferentes escalas e a forma como interagem em contextos espaciais e sociais”.

Esta interação espacial e social é constatada por Mendonça, Deschamps e Lima (2013, p. 154) em seus estudos quando afirmam:

O que parece ter se intensificado foram os impactos e danos associados às inundações; estas sim parecem ter se intensificado, não porque tenha passado a chover mais nas últimas décadas, mas, sobretudo, porque o acelerado processo de urbanização corporativa da área gerou um contingente populacional cada vez maior de pessoas em situação de alta/altíssima vulnerabilidade socioambiental aos riscos de processos pluviais intensos.

Logo a compreensão e gestão da vulnerabilidade são condicionadas ao processo de urbanização que alteram o espaço geográfico criando múltiplas relações em escalas de tensões diversas que ocorrem em nível local, regional e nacional, principalmente onde se manifestam os riscos e perigos das inundações (MARANDOLA JR, 2013).

Para Olimpio e Zanella (2017) a urbanização seria o processo que desencadeia a remodelagem das áreas urbanas, formando espaços nos quais são notórias as desigualdades sociais em múltiplos níveis que privam seus habitantes de parte da sociedade urbana.

As desigualdades sociais se manifestam espacialmente quando formam as periferias sociais que na maioria das vezes coincidem com as periferias geográficas e representam as condições de vulnerabilidade da população que são notórias quando diante de um desastre demonstra a incapacidade de suportar danos e perdas (MENDONÇA, DESCHAMPS e LIMA, 2013; RIGH, 2016).

Assim sendo a vulnerabilidade social, dentro de um determinado espaço urbano, pode ser determinada a partir das características socioeconômicas de seus habitantes, como nível de renda, escolaridade, idade, gênero, acesso aos serviços públicos, habitação e participação política, que podem levar à predisposição dos habitantes em sofrer danos ou perdas diante do perigo (TOMINAGA, 2009; OLIMPIO e ZANELLA, 2017; MOURA, 2018).

Ressalta-se que a vulnerabilidade não se trata de uma homogeneidade espacial que se apresenta na mesma escala em áreas urbanas e sim uma imposição de segregação socioespacial e socioambiental por parte de um processo de urbanização excludente, no qual pode ser identificada pela capacidade de resiliência e adaptação diante de uma ameaça natural (MARANDOLA, 2013; OLIMPIO e ZANELLA, 2017).

Neste contexto o conceito de vulnerabilidade empregado neste trabalho é definido como grau de fragilidade de um grupo social, nos quais são notórias as desigualdades socioeconômicas em múltiplos níveis, mensuradas por variáveis que revelam a capacidade de resiliência diante de um desastre potencial (BRASIL – IPT, 2007; TOMINAGA, 2009; CUTTER, 2011; MARANDOLA JR, 2013; LIMA, 2013; PNUD, 2014; OLIMPIO e ZANELLA, 2017; MENEGASSO, 2019).

2.4 Risco à Inundações

O termo risco foi adotado por várias ciências em diversas situações e períodos ao longo da história da humanidade, gerando assim, tipologias de risco que abordam desde o perigo ao desastre sobre o meio ambiente, às pessoas, aos bens e processos em tempos variados (OLIMPIO e ZANELLA, 2017).

Tais tipologias incorporaram os conceitos de perigo e desastre, apresentando o risco, em linhas gerais, como dano relacionado a um evento inesperado independente da ação humana (OLIMPIO e ZANELLA, 2017).

Diante desta diversidade de conceitos, as Nações Unidas, através da UNISDR (2004), apresentaram um conceito de risco que se tornou referência ao longo do tempo, sendo determinado por:

Probabilidade de consequências prejudiciais, ou danos esperados (morte, ferimentos a pessoas, prejuízos econômicos etc) resultantes da interação entre perigos naturais ou induzidos pela ação humana e as condições de vulnerabilidade (UNISDR, 2004, p. 6).

Seguindo esta definição de risco, proposta pela UNISDR (2004), as obras de Kobiyama *et al.* (2006), Marcelino (2008) e Tominaga (2009) apresentaram uma atualização de conceitos para o mapeamento e prevenção de riscos no Brasil, afirmando que o risco representaria a fragilidade natural e social do ambiente diante de um perigo potencialmente danoso.

Assim como o termo risco passa por uma definição mais assertiva e atualizada, o termo desastre também passa por uma atualização oficial no Brasil através da Instrução Normativa nº 1, de 24 de agosto de 2012, que define desastre como:

Resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem sobre um cenário vulnerável, causando grave perturbação ao funcionamento de uma comunidade ou sociedade envolvendo extensivas perdas e danos humanos, materiais, econômicos ou ambientais, que excede a sua capacidade de lidar com o problema usando meios próprios (BRASIL, 2012, p. 30).

Diante do referencial teórico exposto é notório que os conceitos empregados na análise e avaliação de riscos e desastres tem sido alvo de discussão científica, devido apresentar diferentes perspectivas. Neste Contexto surge a necessidades de apresentar de

forma sintetizada os conceitos essenciais que orientaram o desenvolvimento deste trabalho e que se encontram no quadro 1.

Quadro 1 – Relação de termos e seus conceitos empregados no trabalho

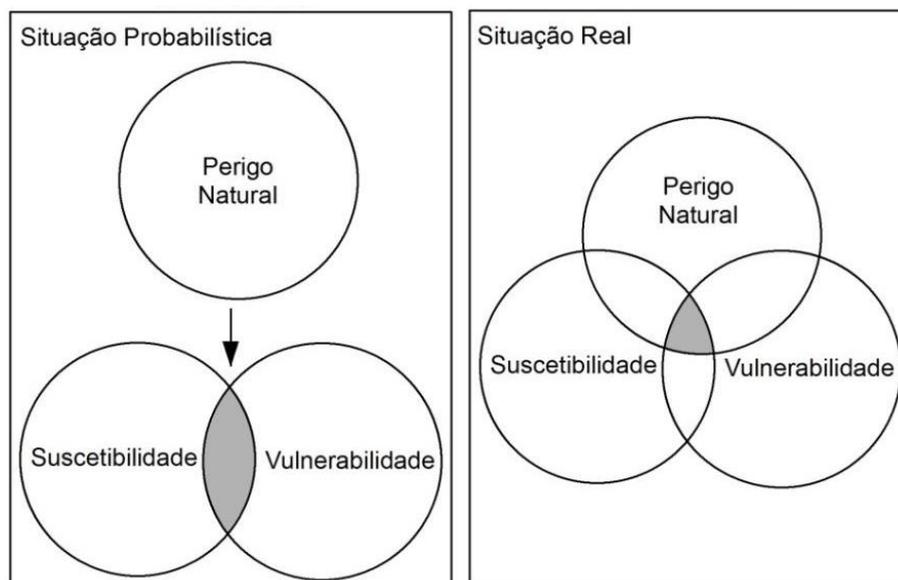
Termos	Conceitos	Autores
Perigo	Fenômeno ou evento de gênese natural, antrópica ou associações entre ambos, com potencial para causar danos diversos.	KOBIYAMA <i>et al.</i> 2006; BRASIL – IPT, 2007; TUCCI, 2007; MARCELINO, 2008; TOMINAGA,2009; JULIÃO <i>et al.</i> , 2009; CAJAZEIRO, 2012; MENEGASSO, 2019
Suscetibilidade	Predisposição natural do ambiente em ser atingido durante um evento perigoso, expressando-se por classes de possibilidade de incidência espacial.	KOBIYAMA <i>et al.</i> 2006; BRASIL – IPT, 2007; TUCCI, 2007; MARCELINO, 2008; TOMINAGA,2009; JULIÃO <i>et al.</i> , 2009; CAJAZEIRO, 2012; MENEGASSO, 2019
Vulnerabilidade	Grau de fragilidade de um grupo social, nos quais são notórias as desigualdades socioeconômicas em múltiplos níveis, mensuradas por variáveis que revelam a capacidade de resiliência diante de um desastre potencial.	BRASIL – IPT, 2007; TOMINAGA, 2009; CUTTER, 2011; MARANDOLA JR, 2013; LIMA, 2013; PNUD, 2014; OLIMPIO e ZANELLA, 2017; MENEGASSO, 2019
Desastre	Situação real, ou seja, no resultado do perigo sobre um cenário social suscetível e vulnerável.	KOBIYAMA, 2006; MARCELINO, 2008; TOMINAGA, 2009; OLIMPIO e ZANELLA, 2017
Risco	Situação probabilística com dinâmica própria compreendida pelas inter-relações entre elementos naturais (susceptibilidade) e sociais (vulnerabilidade) diante de um perigo em potencial	KOBIYAMA, 2006; MARCELINO, 2008; TOMINAGA, 2009; OLIMPIO e ZANELLA, 2017

Fonte: KOBIYAMA *et al.* 2006; BRASIL – IPT, 2007; TUCCI, 2007; MARCELINO, 2008; TOMINAGA,2009; JULIÃO *et al.*, 2009; CUTTER, 2011;CAJAZEIRO, 2012; MARANDOLA JR, 2013; LIMA, 2013; PNUD, 2014; OLIMPIO e ZANELLA, 2017; MENEGASSO, 2019.

Ressalta-se que o termo risco é entendido, neste trabalho, como uma situação probabilística com dinâmica própria compreendida pelas inter-relações entre elementos

naturais (susceptibilidade) e sociais (vulnerabilidade) diante de um perigo em potencial, enquanto que o termo desastre consistiria na situação real, ou seja, no resultado do perigo sobre um cenário social suscetível e vulnerável (Figura 3) (KOBAYAMA, 2006; MARCELINO, 2008; TOMINAGA, 2009; OLIMPIO e ZANELLA, 2017).

Figura 3 - Relação dos termos aplicados na formação dos riscos e desastres



Fonte: OLIMPIO e ZANELLA, 2017, p. 105.

Logo, a interpretação de risco empregado neste trabalho segue a perspectiva estatístico-probabilística dimensionada pelas inter-relações do quadro de susceptibilidade e do quadro de vulnerabilidade diante de um perigo em potencial.

2.5 Sistema de Informações Geográficas

Nos últimos anos pesquisas científicas como a de Sirangelo (2014), Bitar (2014) e Menegasso (2019) têm proposto caminhos metodológicos para o mapeamento das áreas de risco a inundações, através da utilização de ferramentas SIG - Sistema de informações geográficas que segundo Fitz (2008) consiste em:

Sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, o qual integra dados, equipamentos e pessoas com o objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido (FITZ, 2008, p. 23).

Câmara e Queiroz (2004) contribuem para esta temática ao mencionar que:

O termo Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também através de sua localização espacial; oferecem ao administrador (urbanista, planejador, engenheiro) uma visão inédita de seu ambiente de trabalho, em que todas as informações disponíveis sobre um determinado assunto estão ao seu alcance, inter-relacionadas com base no que lhes é fundamentalmente comum – a localização geográfica (CÂMARA e QUEIROZ, 2004, p. 1)

A aplicação do SIG no mapeamento de fenômenos tem apresentado alta eficiência devido à produção de informações específicas através de mapas temáticos que auxiliam na interpretação do cenário e conseqüentemente fornece subsídios na tomada de decisões (FITZ, 2008).

Na análise de um cenário de risco ou desastres é fundamental a interpretação do quadro suscetível e do quadro vulnerável, entretanto trabalhar com grande quantidade de dados analogicamente se tornaria uma tarefa inviável, por isso a importância do SIG, pois possibilitaria a coleta, armazenamento e análise de grande volume de variáveis (MARCELINO, 2008).

Menegasso (2019) demonstra esta eficiência ao concluir que na identificação das áreas de risco às inundações, técnicas agregadas ao SIG, como a cartografia digital foram imprescindíveis no agrupamento de dados, na sobreposição das variáveis e na análise do resultado final de sua pesquisa.

Entretanto para utilizar-se da geotecnologia SIG é necessário inicialmente determinar procedimentos de coleta e armazenamento de dados, bem como definir critérios para a análise espacial, como mensuração das propriedades e relacionamentos com base na localização espacial do fenômeno (CÂMARA, 2004; FITZ, 2008).

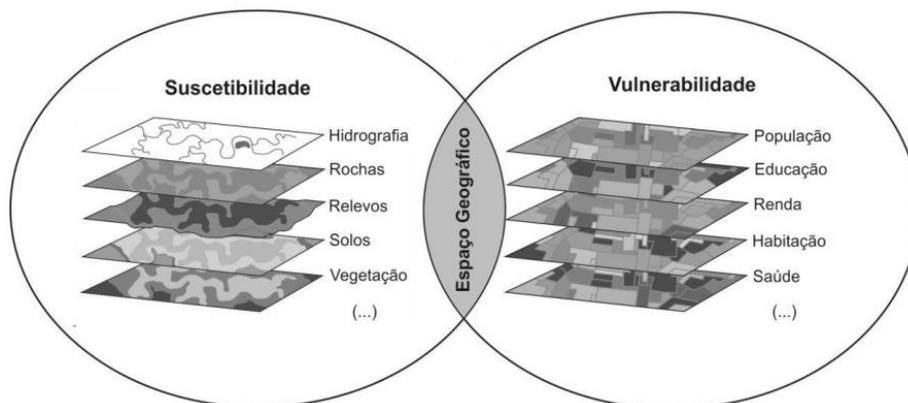
Dentre as técnicas de análise espacial para estudos que envolvem grande volume de dados, destaca-se a álgebra de mapas que conforme Câmara (2004) consiste em:

Conjunto de procedimentos de análise espacial em Geoprocessamento que produz novos dados, a partir de funções de manipulação aplicadas a um ou mais mapas. (CÂMARA, 2004, p. 488).

Os procedimentos mais comuns de análise espacial são a sobreposição e o cruzamento de variáveis geográficas, representadas em forma de mapas e denominadas planos

de informação, que quando aplicadas geram um plano resultante, apresentando regiões equiprobemáticas com delimitações bem definidas, ideal para a produção de mapas de vulnerabilidade e risco (Figura 4) (MARCELINO, 2008; MEDEIROS e CÂMARA, 2004).

Figura 4 - Cruzamento de dados na elaboração de mapas de risco via SIG



Fonte: Adaptado de OLIMPIO e ZANELLA, 2017, p. 100.

Nesta perspectiva é notório que no mapeamento de risco a inundações, o conhecimento das potencialidades da geotecnologia SIG se torna essencial no processo de investigação, organização e análise espacial das variáveis geográficas que influenciam no fenômeno das inundações, produzindo assim informações de forma rápida e de baixo custo contribuindo efetivamente no planejamento e gestão do território (CÂMARA, 2004; FITZ, 2008; MENEGASSO, 2019).

2.6 Modelo HAND

O modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) – M-HAND consiste em um algoritmo descritor do terreno que gera modelos digitais do terreno normalizados pela rede de drenagem local a partir de modelos digitais de elevação (NOBRE *et al.*, 2011; BITAR, 2014).

O modelo Hand normaliza a topografia de acordo com as alturas relativas locais, encontrados ao longo da rede de drenagem, e, desta forma, apresenta a topologia dos potenciais gravitacionais do solo relativos, ou potenciais de drenagem locais. O modelo Hand tem sido utilizado para mostrar uma correlação elevada com a profundidade do lençol de água, fornecendo uma representação espacial exata de ambientes de águas no solo. (NOBRE *et al.*, 2011, p. 13).

Trata-se de um modelo computacional que permite explorar o ambiente através da distância vertical à drenagem mais próxima, sendo ideal para aplicações no mapeamento hidrológico devido à capacidade de gerar modelos que indicam zonas escalonadas de risco a inundações (NOBRE *et al.*, 2011; BITAR, 2014).

No mapeamento de áreas inundáveis o M-HAND é processado em ambiente SIG os valores de distância vertical, com referência ao curso d'água local, são classificados, sendo que os valores mais próximos a zero indicariam áreas em que o solo se encontra em condições próximas à saturação (BITAR, 2014).

O M-HAND torna o mapeamento de áreas inundáveis, mais ágil e com baixo custo de operação, transformando-se em um modelo promissor e aplicável em diversas escalas, entretanto a qualidade do mapeamento sempre dependerá da resolução espacial do Modelo de Elevação Digital (MENGUE *et al.*, 2016).

A baixa resolução espacial do modelo de elevação digital influenciará proporcionalmente na modelagem gerada pelo algoritmo HAND, uma vez que dados de baixa qualidade resultam em modelos imprecisos e pouco representativos, principalmente em áreas de extensas planícies de inundação (BITAR, 2014).

Apesar das limitações, o modelo Hand consiste em um algoritmo descritor do terreno que possui alto potencial de aplicação em diversos campos, tais como: “hidrologia de superfície, meteorologia, biogeoquímica, ciclagem de carbono, biodiversidade, conservação, uso da terra e avaliação de riscos de perigos, e planejamento” (NOBRE *et al.*, 2011, p. 28).

Mengue *et al.* (2016) ainda acrescentam que o modelo HAND pode ser utilizado como uma ferramenta de alto potencial no planejamento e gestão de áreas de risco a inundações, devido a grande disponibilidade de dados de sensoriamento remoto, associada a rapidez e eficiência na produção dos resultados.

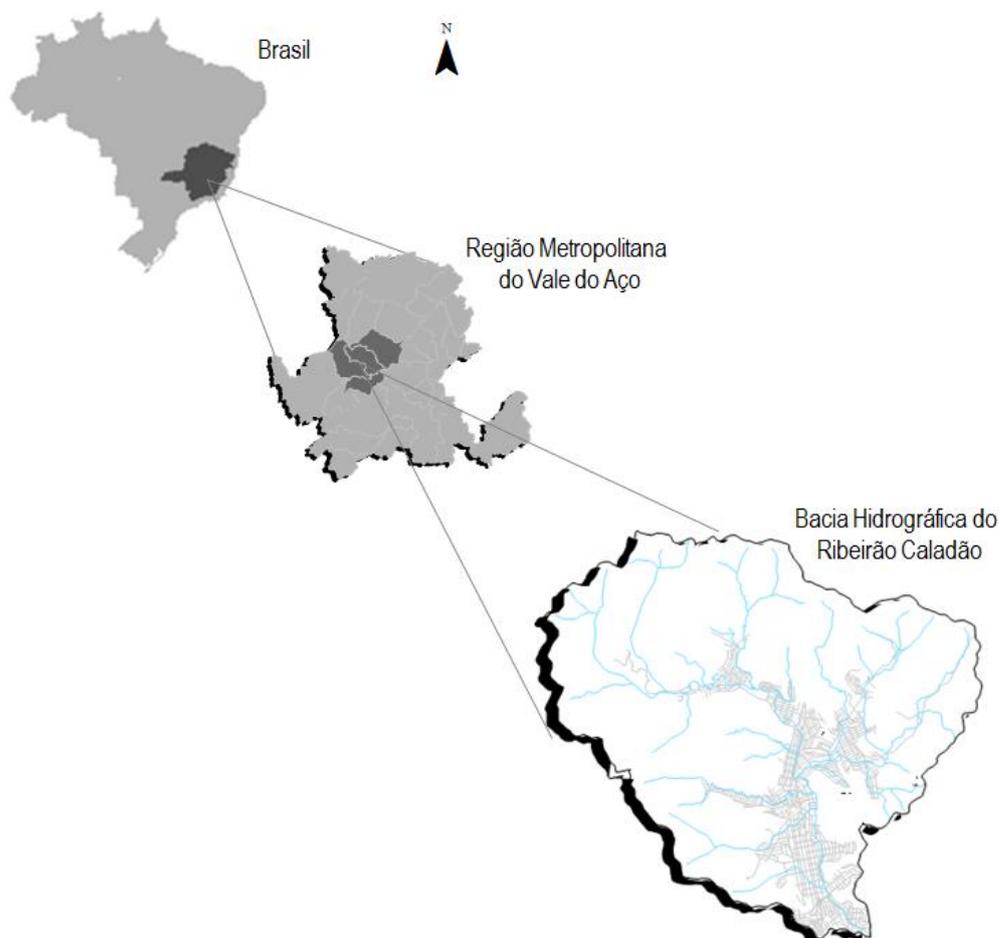
Em alguns casos o modelo HAND tem apresentado resultados com 91% de acerto na delimitação espacial de manchas de inundação, o que tem elevado sua aplicação em localidades de baixa disponibilidade de dados hidrológicos (SPECKHANN, 2018).

3 MATERIAS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área de Estudo

A BHRC está localizada no município de Coronel Fabriciano, na Região Metropolitana do Vale do Aço, no estado de Minas Gerais e caracteriza-se por um vale extremamente dissecado pela ação fluvial e estruturalmente direcionado no qual se concentra quase que em sua totalidade a área urbana do município (Mapa 1).

Mapa 1- Localização da bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão



Fonte: Autor, 2020.

Nos últimos anos a BHRC tem passado por um crescimento populacional acelerado que vem alterando a cobertura do solo e potencializando a formação de áreas de risco a inundações.

Hidrograficamente a BHRC é constituída pelo ribeirão caladão e seus afluentes que no total formam uma rede de drenagem com extensão de 71 km que intercepta o núcleo urbano da cidade desaguando no Rio Piracicaba, um dos principais afluentes do Rio Doce.

O índice pluviométrico anual apresenta média de 1414,9 mm, no qual o maior índice médio mensal concentra-se no mês de dezembro com 312,8 mm e o menor índice médio em julho com 7,4 mm enquanto que a temperatura média anual é de 22,8 °C, no qual as temperaturas mais altas concentram-se nos meses de janeiro à março em torno de 25,3 °C e as temperaturas mais baixas em torno de 19,5 °C nos meses de junho a Agosto (Tabela 1) (INMET, 2020).

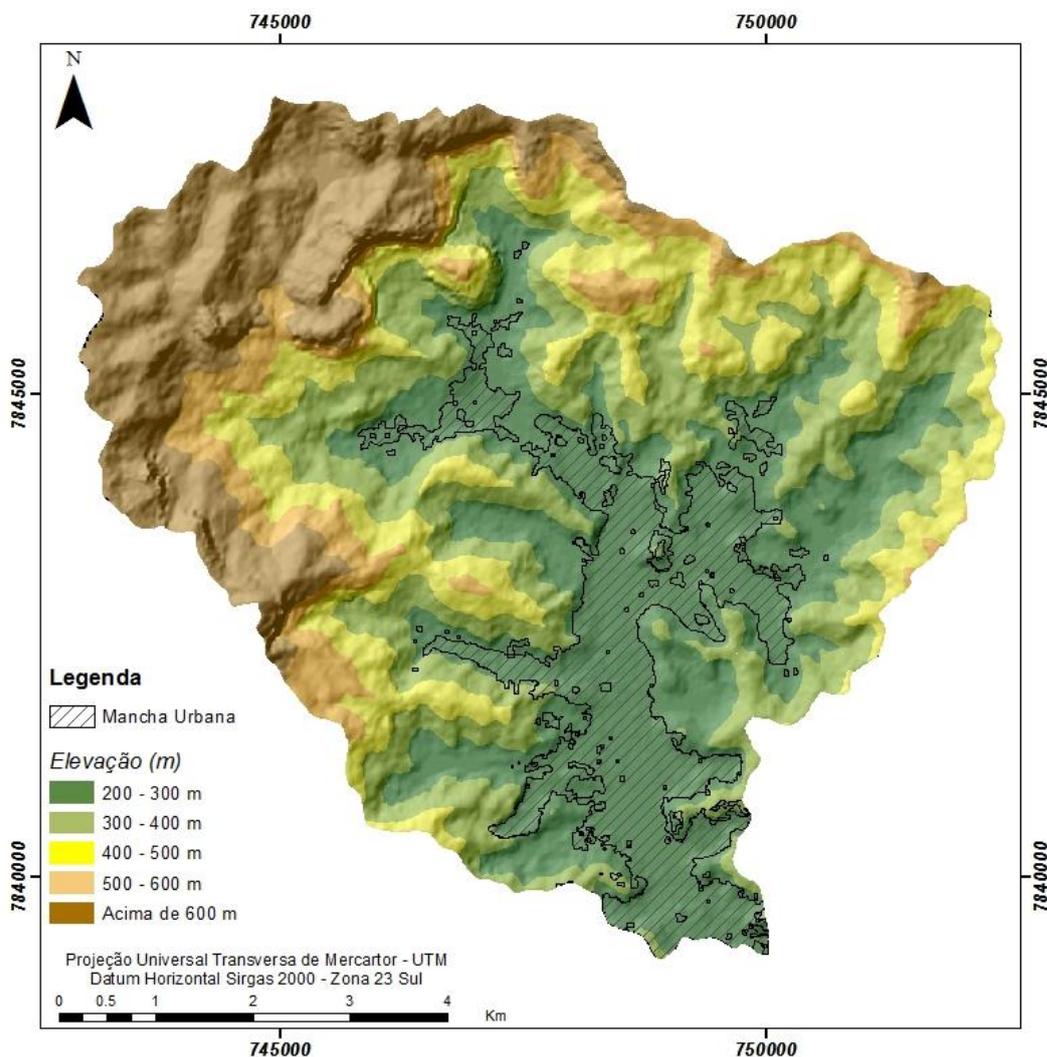
Tabela 1 - Dados Climáticos de Coronel Fabriciano

Meses	Precipitação (mm)	Temperatura Média Compensada (°C)
Jan	239,8	25,3
Fev	137,1	25,5
Mar	162,5	25
Abr	66,6	23,5
Mai	40,6	21,4
Jun	15,2	19,5
Jul	7,4	19,1
Ago	18,1	19,9
Set	48,7	22
Out	108	23,3
Nov	258,1	24,2
Dez	312,8	24,7

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET – normais climatológica 1981-2010.

A paisagem da bacia em estudo esta situada no cinturão orogénico do Atlântico Leste, especificamente nos Planaltos Dissecados do Leste de Minas na Zona de Colinas e Cristas, sendo caracterizado pela predominância de serras e morros alongados, associadas a vales profundos, formados por terraços e planícies aluviais (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 1978) (Mapa 2).

Mapa 2 – Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão



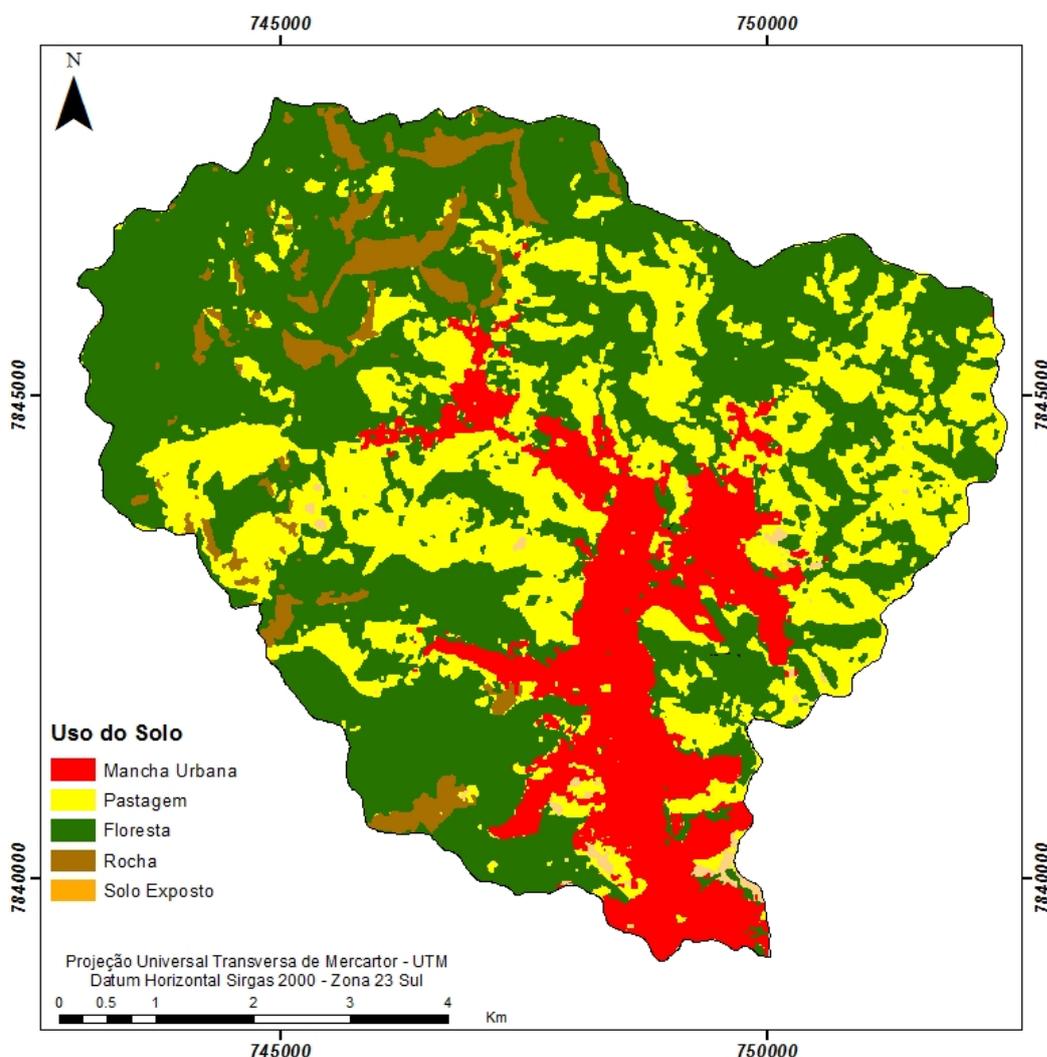
Fonte: Autor, 2020.

As serras e morros alongados distribuem-se por grande parte da área da bacia e são caracterizados por um conjunto de elevações de vertentes ravinadas e dissecadas pela erosão fluvial com cotas altimétricas que variam de 800 a 900 metros (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 1978).

As planícies aluviais da bacia situam-se em altitude próxima a 225 m e consistem em formações geomorfológicas modeladas pela deposição escalonada de sedimentos relativamente recentes. Os terraços situam-se em cotas superiores as das planícies, tornando-se evidências de antigas planícies de inundação abandonadas, formadas por material detrítico aluvionar apresentando sedimentos bastante variáveis que vão desde arenosos, silto-argilosos, castanhos e material orgânico (CPRM, 2000; COELHO, 2006).

A cobertura vegetal da BHRC pode ser dividida em pastagens e florestas, sendo que esta última classe se caracteriza por formações arbóreas com fisionomias mais densas, compostas por florestas primárias da Mata Atlântica e áreas reflorestadas com eucalipto intercalado com sub-bosques, em alto grau de sucessão ecológica (Mapa 3).

Mapa 3 – Mapa de Uso do Solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão



Fonte: Autor, 2020.

As pastagens consistem em uma estrutura campestre abandonada, formada por capins e gramíneas com presença muito espaçada de arbustos, que atualmente apresentam-se em menor estágio sucessional de desenvolvimento.

No contexto local esta estrutura campestre está associada a áreas agrícolas abandonadas em estágio de regeneração, no entanto desmatamentos tem ocorrido visando à

implantação de grandes loteamentos, reduzindo assim as superfícies em estágios de regeneração natural da cobertura vegetal.

As áreas sem cobertura florestal são divididas em 2 classes, nas quais a categoria rocha consiste em áreas compactas e coesas com fissuras insignificantes no qual predominam os afloramentos de rochas ígneas e metamórficas pouco alteradas, neste caso granitos e gnaisses, enquanto que a classe de solo exposto consiste em áreas antes exploradas por atividades agrossilvipastoris que se tornaram passivos ambientais ao município.

A mancha urbana corresponde a 15,3% da bacia, no qual residem 69.448 habitantes concentrados em 49 bairros (Quadro 1) que praticamente impermeabilizam esta parte da BHRC influenciando no escoamento superficial e consequentemente ampliando as áreas suscetíveis a inundação e risco.

Quadro 2 - Bairros do município de Coronel Fabriciano compreendidos pela BHRC

Bairros		
1.Alipinho	18.Jardim Primavera	35.Santa Cruz
2.Alto Belvedere	19.José da Silva Brito	36.Santa Helena
3.Alto Giovannini I	20.Judith Bhering	37.Santa Inês
4.Alto Giovanini II	21.Julia Kubistchek	38.Santa Luzia
5.Belvedere	22.Manoel Maia	39.Santa Rita
6.Bom Jesus	23.Melo Viana	40.Santa Terezinha
7.Caladão	24.Morro do Carmo	41.Santo Antônio
8.Centro	25.Nazare	42.Santo Eloy
9.Chácara OuroVerde	26.Nossa Senhora da Penha	43.São Cristóvão
10.Contente	27.Olaria	44.São Domingos
11.Córrego Alto	28.Padre Rcoha	45.São Geraldo
12.Distrito Industrial	29.Planalto	46.São Vicente
13.Florença	30.Professores	47.Silvio Pereira I
14.Floresta	31.Recanto Verde	48.Silvio Pereira II
15.Frederico Ozanan	32.Residencial Fazendinha	49.Surinan
16.Gávea	33.Residencial Pedra Linda	
17.Giovannini	34.Riacho das Pedras	

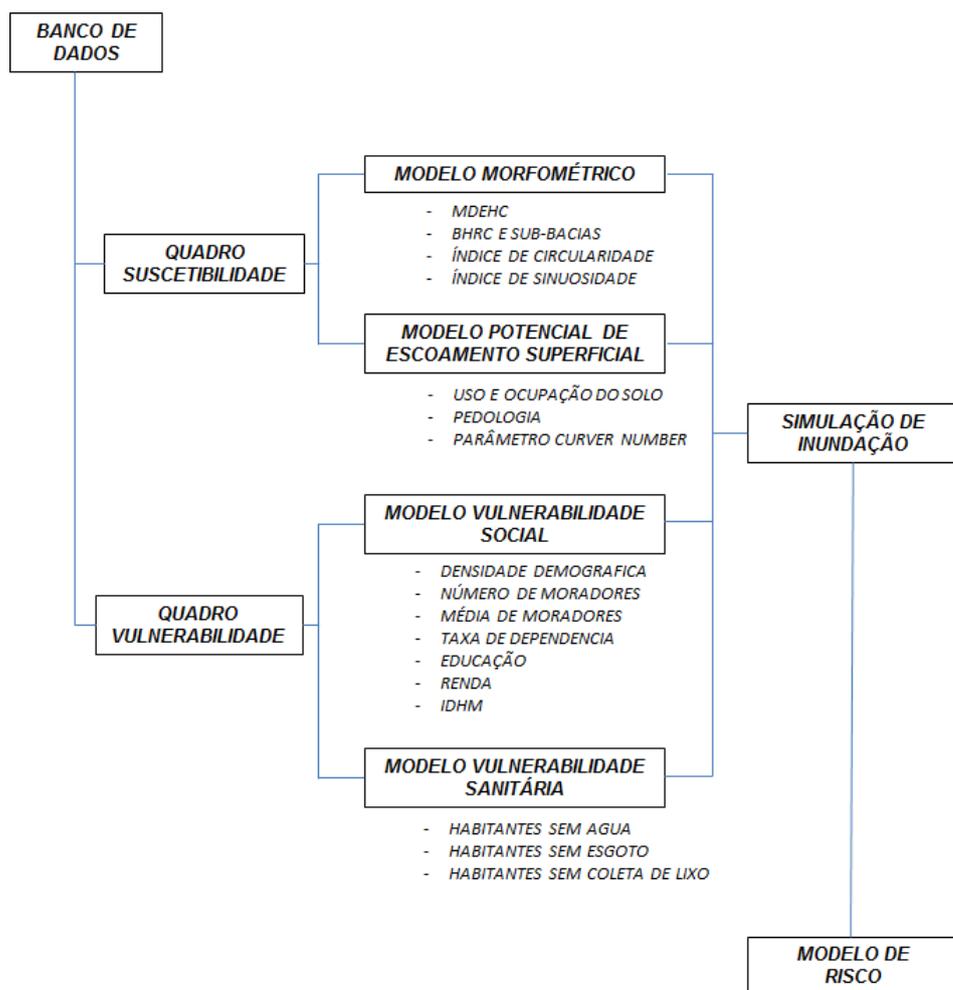
Fonte: Prefeitura Municipal de Coronel Fabriciano (2013)

Ressalta-se que as superfícies da BHRC se apresentam profundamente alteradas no contexto hidrológico, visto que em função da expansão da malha urbana causou uma extensa impermeabilização do solo, aumentando assim a parcela de escoamento superficial.

3.2 Procedimentos metodológicos

A pesquisa desenvolvida possui enfoque quantitativo-qualitativo visando compreender e explicar a influência das características fisiográficas e antrópicas na determinação das áreas de risco a inundações, por meio do processamento de modelos digitais de elevação, imagens de satélites e dados socioeconômicos, utilizando-se recursos da geotecnologia como a modelagem e análise espacial em ambiente SIG – Sistema de Informações Geográficas. As etapas do trabalho encontram-se expressas no fluxograma abaixo:

Figura 5 - Etapas da metodologia de pesquisa



3.2.1 Banco de Dados

A utilização do SIG – Sistema de Informações Geográficas exigiu a elaboração de um banco de dados no qual foi necessário a compilação de dados provenientes de instituições públicas em nível federal, estadual e municipal e instituições particulares que resultaram em dados referentes ao quadro de suscetibilidade e vulnerabilidade da BHRC que consequentemente culminou no modelo de risco a inundações.

3.2.2 Quadro de Suscetibilidade

O quadro de suscetibilidade a inundações consistiu em identificar as variáveis fisiográficas e antrópicas que influenciam o processo de inundação na BHRC e consequentemente explicariam a dinâmica do fenômeno. Diante das informações foi possível classificar as sub-bacias com maior tendência a inundações, através do cruzamento do modelo Morfométrico e do modelo de Potencial de Escoamento Superficial, utilizando a técnica de álgebra de mapas, presente no software ArcGIS 10.8.

3.2.2.1 Modelo Morfométrico

O modelo Morfométrico consiste no resultado do processamento do MDE – modelo digital de elevação associado ao mapeamento da hidrografia por imagens de satélite, em ambiente SIG, visando a identificação das sub-bacias suscetíveis a inundação através da caracterização fisiográfica da BHRC. As etapas do procedimento seguem descritas nos próximos itens.

3.2.2.1.1 Modelo de Elevação Hidrologicamente Consistente - MDEHC

O modelo de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) consiste no resultado do processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE) advindo de imagens do sensor PALSAR do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), com resolução espacial de 12,5 metros, com auxílio do software de geotecnologia SIG – Sistema de Informações Geográficas, ArcGIS 10.8.

Por meio da utilização de ferramentas de geoprocessamento presentes no software SIG gerou-se um dado raster para identificar todas as depressões espúrias do MDE e determinar a direção de fluxo e acumulação.

3.2.2.1.2 Delimitação da Bacia Hidrográfica e suas Sub-bacias

A partir do MDEHC associado a uma sobreposição da hidrografia vetorizada, através das imagens do software *Google Earth*, foi possível determinar os limites da BHRC e suas sub-bacias, através da classificação da hidrografia pelo método de Stralher (1952), no qual identificou-se as confluências dos cursos d'água de quarta ordem para delimitação automática, utilizando-se a ferramenta *Watershed*, presente no SIG ArcGIS 10.8.

3.2.2.1.3 Índices Morfométricos

A partir da discretização das sub-bacias utilizando-se o Modelo de Elevação Hidrograficamente Consistente (MDEHC) e dado vetorial da hidrografia, procedeu-se a extração dos parâmetros morfométricos: área (A), Perímetro (P), Comprimento do canal principal (L), distância Vetorial entre pontos extremos do canal (Dv). Posteriormente calculou-se os índices morfométricos de circularidade (IC) e de sinuosidade (IS), apresentados nas Equações 1 a 2, conforme descrito por Villela e Mattos (1975).

$$IC = \frac{12,57 A}{P^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

A: é a área da sub-bacia;

P: é o perímetro da bacia

$$IS = \frac{100 (L - Dv)}{L} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

L: é o comprimento do canal principal;

Dv: é a distância vetorial entre pontos extremos do canal

3.2.2.2 Modelo Potencial de Escoamento Superficial

O modelo de Escoamento Superficial foi determinado a partir da metodologia CN (USDA-SCS, 1972) que consiste na determinação do parâmetro *curve number* (CN), utilizando-se informações pedológicas e do uso e ocupação do solo, que segundo Santos e Lollo (2016) possibilita a produção de informações sobre o escoamento superficial, sendo estas capazes de suprir a carência de dados hidrológicos existente em grande parte dos municípios brasileiros. As etapas do procedimento seguem descritas nos próximos itens.

3.2.2.2.1 Uso e Ocupação do Solo

O uso e ocupação do solo consistiu na aplicação de técnicas de mapeamento digital a partir da imagem do satélite *Sentinel 2a* (2015) empregando-se o método de classificação supervisionada por máxima verossimilhança, que segundo Fitz (2008) são utilizadas a média e a covariância dos pixels amostrados, sendo calculada a probabilidade de um pixel externo a essas amostras pertencer a elas.

$$\ln = [P(x_i|w_i)] = \ln|C_i| + (x_i - \mu_i)^T \cdot C_i^{-1} \cdot (x_i - \mu_i) \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

x e w: são chamados “eventos”

P: é a probabilidade de coexistência ou interseção destes eventos;

C: é a matriz de covariância da classe w_i ;

μ_i : é o vetor médio para a classe w_i ;

^T: é a matriz transposta.

Segundo Luiz (2014) o método de classificação supervisionada por máxima verossimilhança é uma técnica mais precisa que simula o comportamento do foto-intérprete, utilizando-se além da informação espectral de cada pixel, a relação espacial com um grupo de pixels vizinhos reconhecendo áreas homogêneas nas imagens.

Diante do mapa de uso e ocupação do solo, procedeu-se a validação do modelo através do índice Kappa que segundo Congalton e Green (1999) baseia-se na diferença entre a concordância real na matriz de erro.

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} * x_{+i})}$$

Em que:

K: é o número de linhas da matriz;

x_{ii}: é o número de observações na linha i e coluna i;

x_{i+} e x_{+i}: são, respectivamente, o total marginal de linhas e colunas;

N: é o número total de observações.

Para validação do produto seguiu-se as recomendações de Landis e Kock (1977) que sugerem os valores Kappa do Quadro 3, que podem ser utilizados para interpretar o nível de acurácia alcançado.

Quadro 3 - Índices Kappa (K) para avaliação da Classificação Remota

Índice Kappa (K)	Avaliação da Classificação
< 0,00	Insignificante
0,00 – 0,20	Fraca
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Forte
0,81 – 1,00	Quase Perfeita

Fonte: Landis e Kock, 1977

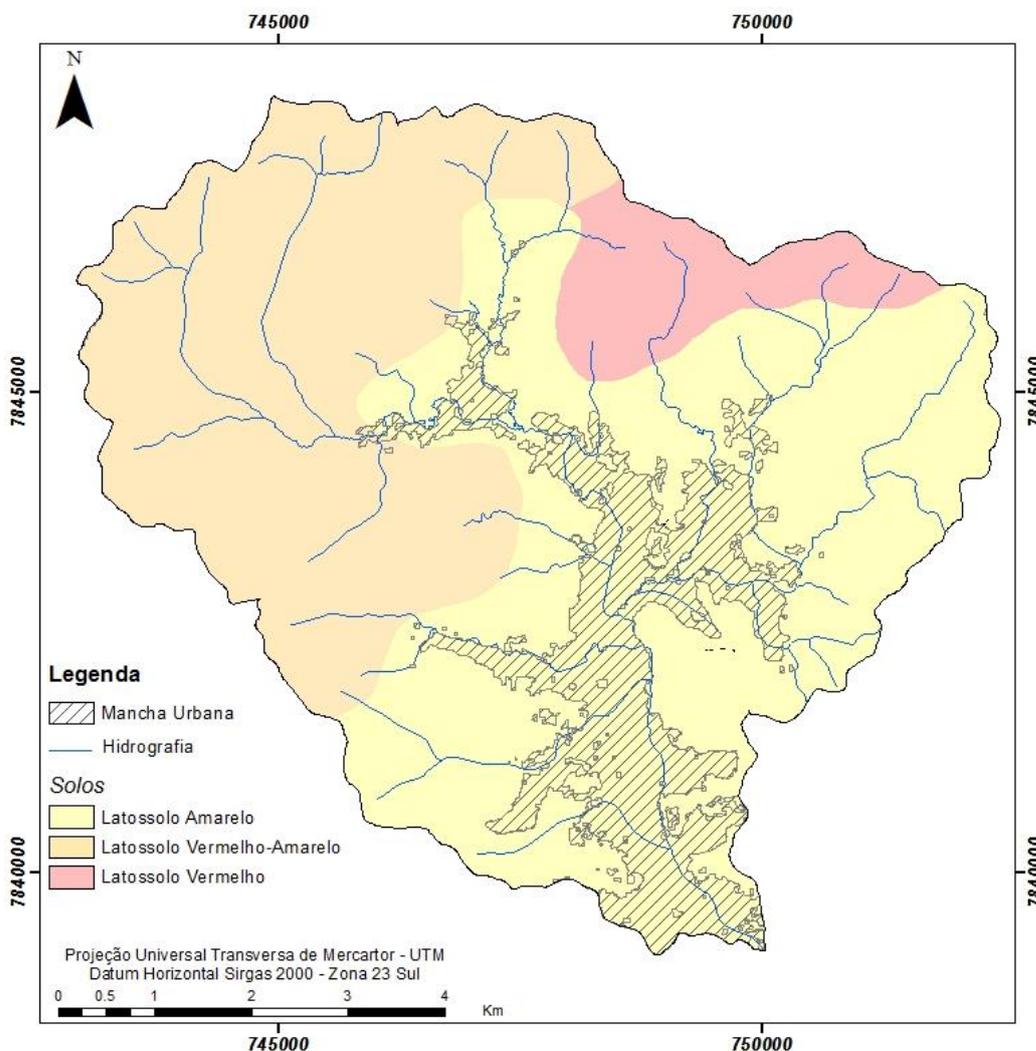
Após processamento da imagem e a verificação da acurácia pelo índice Kappa, foi elaborado o mapa de uso e ocupação do solo com acurácia de K=0,90, que conforme Landis e Kock (1977) consiste em uma acurácia quase perfeita.

3.2.2.2.2 Mapa de Solos

O mapa de solos, apresentado conforme o Mapa 4, foi elaborado a partir da base de dados pública referente ao mapeamento de solos do estado de Minas Gerais, editada e disponibilizada na escala de 1:500.000, pela FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente

em parceria com a UFV- Universidade Federal de Viçosa, CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais e UFLA – Universidade Federal de lavras.

Mapa 4 – Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão



Fonte: Autor, 2020.

3.2.2.2.3 Parâmetro Curver Number (CN)

Diante do mapa de uso e ocupação do solo e o mapa de solos, elaborado nas etapas anteriores procedeu-se ao cruzamento dos dados utilizando a técnica de álgebra de mapas, em ambiente SIG, visando identificar o parâmetro *curve number* (CN) para cada classe de uso e ocupação do solo em conformidade com o grupo hidrológico existente.

No quadro 4 apresenta-se os valores do parâmetro *curve number* (CN) para a BHRC, no qual ressalta-se que quanto maior o valor do parâmetro, maior o escoamento superficial e conseqüentemente menor a taxa de infiltração de água no solo.

Quadro 4 - Valores de Curve Number (CN) para as classes de uso e ocupação do solo

<i>CN</i>	<i>Uso e ocupação do solo quanto ao grupo hidrológico</i>
25	Florestas com boa cobertura em solos do grupo hidrológico A – com baixo escoamento superficial e alta infiltração.
55	Florestas com boa cobertura em solos do grupo hidrológico B - arenoso com permeabilidade superior à média.
68	Pastagens ou terrenos em más condições em solos do grupo hidrológico A – com baixo escoamento superficial e alta infiltração.
72	Arruamento e estradas – terra, solo exposto em solos do grupo hidrológico A – com baixo escoamento superficial e alta infiltração.
79	Pastagens ou terrenos em más condições em solos do grupo hidrológico B - arenoso com permeabilidade superior à média.
98	Arruamentos e estradas asfaltadas com drenagem de águas pluviais, em solos do grupo hidrológico A e B – com baixo escoamento superficial e alta infiltração.
98	Zonas rochosas impermeáveis

Fonte: Adaptado de Tucci , 2001, p. 406.

Posteriormente com base no parâmetro *curver number* (CN) de cada classe de uso e ocupação do solo, calculou-se o potencial de escoamento superficial total de cada sub-bacia que compõe a BHRC, através do cálculo da média ponderada, conforme Naguettini e Pinto (2007).

$$M_p = \frac{p_1 \cdot x_1 + p_2 \cdot x_2 + \dots + p_n \cdot x_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que:

M_p: é a média ponderada;

p₁: é a área referente de cada classe de uso do solo das sub-bacias;

x₁: é o potencial de escoamento superficial de cada classe de uso do solo;

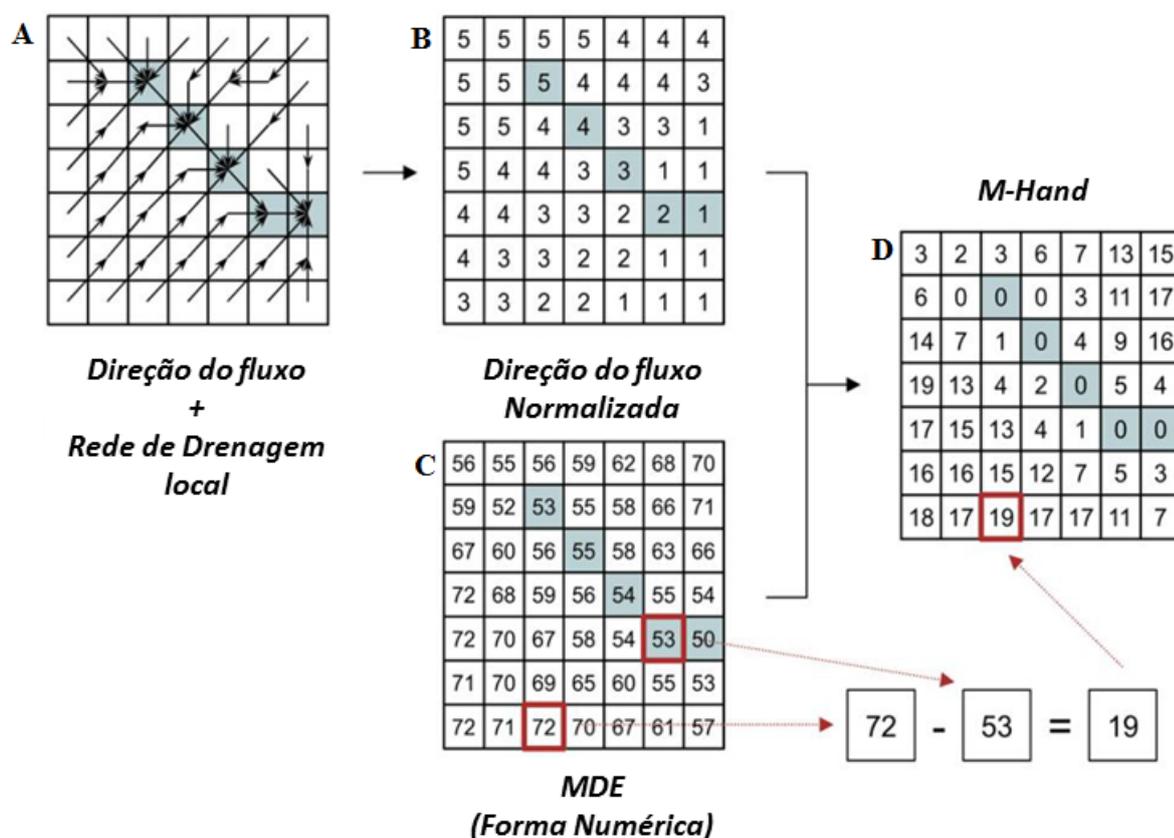
3.2.3 Simulação de Inundação

A simulação de inundação consistiu na delimitação das áreas inundáveis visando elaborar base cartográfica para recorte espacial dos modelos do quadro de suscetibilidade e do quadro de vulnerabilidade da BHRC.

A delimitação das áreas inundáveis foi elaborada a partir do programa TerraViewHidro 0.4.5, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, no qual através do MDEHC gerou-se o *Model Heigh Above the Nearest Drainage* (M-HAND).

Segundo Nobre et al. (2011) consiste na normalização do modelo de elevação digital do terreno de acordo com as altitudes reais encontradas ao longo dos cursos d'água locais, apresentando as áreas com potencial a inundação durante o extravasamento das águas dos corpos hídricos em um evento de precipitação intensa (Figura 6).

Figura 6- Procedimentos de cálculo para geração e fatiamento do M-HAND



A Figura 6A representa a direção do fluxo de água associada com a rede de drenagem local que quando processada no software Terra View Hidro 0.4.5 resulta na Figura 6B que apresenta a direção do fluxo normalizada para a rede de drenagem local que posteriormente ao ser processada em conjunto com o Modelo Digital de Elevação – MDE (Figura 6C) gera-se o M-HAND representado pela Figura 6D.

No M-HAND os pixels referente à drenagem assumem valor igual a zero, enquanto os demais pixels são calculados a partir da diferença entre a altitude referenciada ao nível do mar e a altitude da drenagem mais próxima, favorecendo a identificação das faixas de elevação a partir do nível da drenagem local e não mais referenciado ao nível do mar.

Para atender os objetivos propostos adotou-se o MDEHC, como arquivo base para entrada no software Terra View Hidro 0.4.5, no qual foram processados os parâmetros para análise hidrológica necessários para a produção do M-HAND.

Posteriormente o M-HAND foi exportado em formato raster, para o software ArcGIS 10.8, no qual foi reclassificado através do comando *Reclass* (reclassificação) presente na ferramenta *Spatial Analyst Tools* (Análise Espacial), favorecendo a identificação das áreas inundáveis no intervalo de 0 a 1 metro de altura da lâmina d'água, do nível de base local.

Em relação às áreas ocupadas pela população foi necessário um recorte espacial do M-HAND com base no mapa de uso e ocupação do solo, especificamente a classe de área urbana que foi utilizada para determinar as áreas inundáveis ocupadas e as áreas inundáveis sem ocupação.

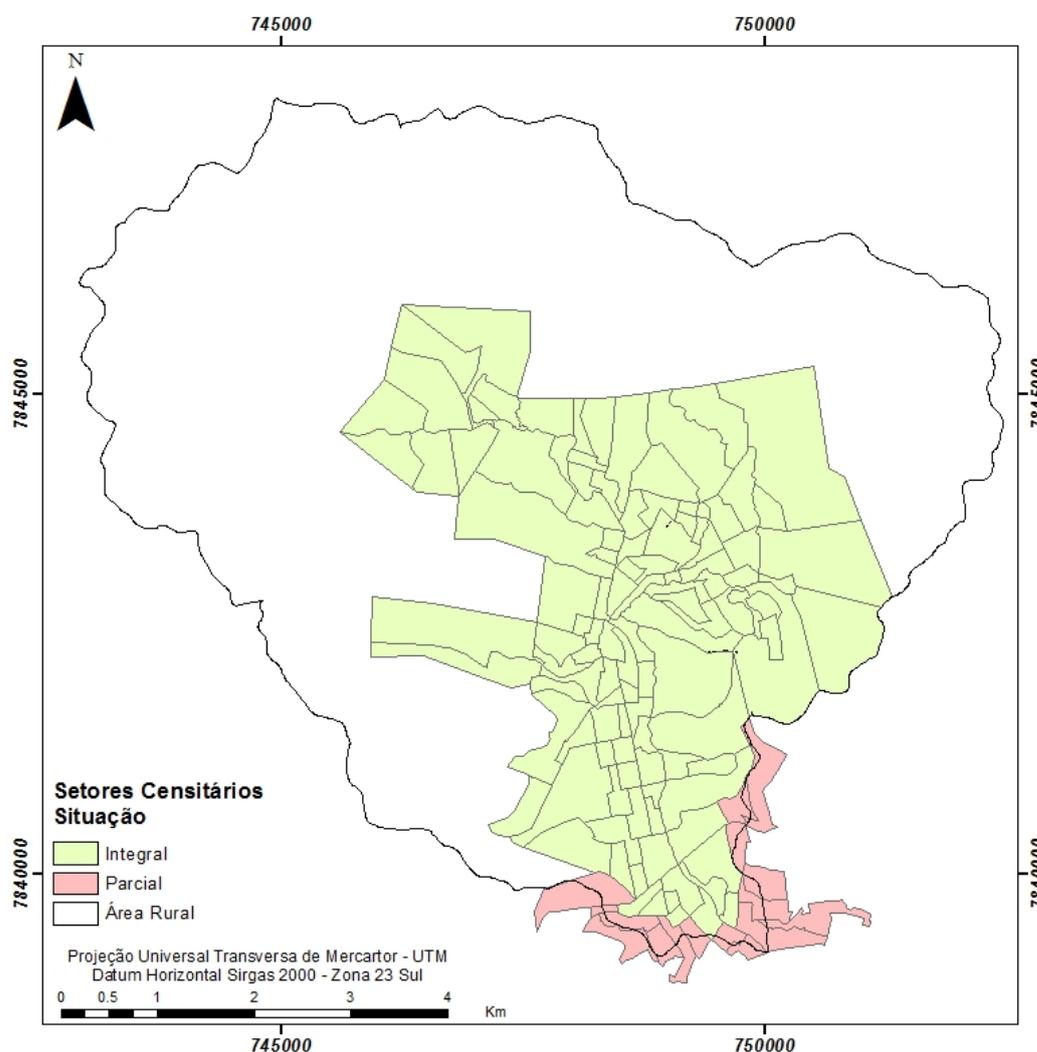
3.2.4 Quadro de Vulnerabilidade

O quadro de vulnerabilidade consistiu em identificar as variáveis socioeconômicas e sanitárias que influenciam na capacidade de resiliência a eventos de inundações e conseqüentemente a determinação da vulnerabilidade da população diante do fenômeno. Para execução desta etapa foi necessário identificar e classificar os setores censitários do Censo Demográfico, produzido pelo IBGE (2010) com maior tendência a vulnerabilidade, através do cruzamento do modelo de vulnerabilidade social e do modelo de vulnerabilidade sanitária, utilizando a técnica de álgebra de mapas, presente no software ArcGIS 10.8, com posterior recorte espacial através da mancha de áreas inundáveis gerada na simulação de inundações.

3.2.4.1 Modelo de Vulnerabilidade Social

Para a elaboração do Modelo de Vulnerabilidade Social foram utilizados dados socioeconômicos provenientes do Censo Demográfico, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010), no qual subdivide a BHRC em 130 setores (Mapa 5), sendo que 116 localizam-se integralmente na bacia enquanto 14 estão localizados de forma parcial no território, conforme a Tabela 2.

Mapa 5 - Disposição dos Setores Censitários na BHRC do município de Coronel Fabriciano, determinados pelo IBGE no ano de 2010



Fonte: Autor, 2020.

Tabela 2 - Distribuição espacial dos setores censitários e bairros dentro da BHRC

Disposição na BHRC	Setores	Bairros
Integral	116	43
Parcial	14	6
Total	130	49

Fonte: Autor, 2020

A partir das variáveis dos setores censitários referentes ao município de Coronel Fabriciano-MG e adotando-se a metodologia proposta por Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012), foram selecionadas as variáveis compatíveis com a densidade demográfica, número de moradores, média de moradores, dependência relacionada a idade, educação e renda, para compor o modelo de vulnerabilidade social (Quadro 5).

Quadro 5 - Variáveis censitárias utilizadas para mensurar a vulnerabilidade social

Variáveis Censitárias	Variáveis de Vulnerabilidade Social
Densidade Demográfica	Densidade demográfica (Dd)
Número Médio de Moradores	Número de moradores no setor (Nm)
Média de Moradores por domicílio	Média de Moradores por domicílio (Mm)
% da população acima de 65 anos % da população abaixo de 12 anos	Soma da porcentagem da população acima de 65 e abaixo de 12 anos (TxD)
% de pessoas analfabetas acima de 12 anos	% de pessoas analfabetas acima de 12 anos (E)
% de responsáveis sem rendimento % de responsáveis com rendimento até 1 salário mínimo	Soma da porcentagem dos responsáveis sem rendimento e com rendimento de até 1 Salário mínimo (R)

Fonte: Goerl, Kobiyama e Pellerin., 2012, p. 91.

Diante das diversas dimensões e unidades das variáveis selecionadas foi necessário uniformiza-las, escalonando-as de 0 a 1, sendo que 0 consiste no valor mínimo e 1 o valor máximo, conforme Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012).

(Eq. 6)

$$V_{\text{escalonado}} = \frac{V_{\text{observado}} - V_{\text{mínimo}}}{V_{\text{máximo}} - V_{\text{mínimo}}}$$

Após o devido escalonamento das variáveis selecionadas procedeu-se ao cálculo do índice de vulnerabilidade social (IVS), conforme Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012):

$$IVS = \frac{Dd + Nm + Mm + TxD + E + R}{IDHM} \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que:

IVS: é o Índice de Vulnerabilidade Social;

Dd: é a densidade demográfica (hab/km²);

Nm: é o número de moradores no setor;

Mm: é média de moradores por residência;

TxD: é a taxa de dependência (idosos e jovens);

E: é a educação (% de analfabetos acima de 12 anos);

R: é a renda (% de responsáveis sem rendimento ou com rendimentos até 1 salário mínimo);

IDHM: é o Índice de Desenvolvimento Humano do Município.

Em relação ao IDHM, utilizado no cálculo de vulnerabilidade social, o mesmo consiste em um índice elaborado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD em conjunto com a Fundação João Pinheiro, visando adaptar a metodologia do IDH Global – Índice de Desenvolvimento Humano para nível municipal baseando-se nos censos demográficos do Brasil. Segundo Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012) tal índice pode ser utilizado para indicar a capacidade de suporte/resposta do município, pois:

Quando ocorre um desastre, apesar de ele possuir limites espaciais e temporais, toda a normalidade do município é afetada. Aulas podem ser suspensas, estradas fechadas, falta de água, luz, etc. Assim, a primeira resposta ao desastre baseia-se na capacidade do município, que no presente trabalho traduziu-se no IDHM (GOERL, KOBİYAMA e PELLERIN, 2012).

Após o cálculo do índice de vulnerabilidade de cada setor censitário compreendido nos limites da BHRC, procedeu-se com sua espacialização optando pela sua representação em três classes de vulnerabilidade (baixa, média e alta) definidas em ambiente SIG, utilizando o método *Quanti*, com posterior recorte espacial através da mancha de áreas inundáveis gerada na simulação de inundações.

3.2.4.2 Modelo de Vulnerabilidade Sanitária

O Modelo de Vulnerabilidade Sanitária também foi elaborado a partir das variáveis dos setores censitários, entretanto empregando-se a metodologia proposta por Furlam e Murara (2018), no qual foram selecionadas as variáveis relacionadas com as características sanitárias (Quadro 6).

A metodologia adotada visa avaliar a possibilidade dos habitantes em contrair alguma doença de veiculação hídrica, durante e após os eventos de inundações, devido ao contágio das águas contaminadas.

Segundo Furlam e Murara (2018) o modelo proposto avalia a capacidade do poder público em garantir os serviços básicos de saneamento.

Quadro 6 - Variáveis censitárias utilizadas para mensurar a vulnerabilidade sanitária

Variáveis Censitárias	Variáveis de Vulnerabilidade Sanitária
Número de habitantes sem acesso a rede de água geral	Porcentagem de habitantes sem acesso a rede de água geral
Número de habitantes sem acesso a ligação do esgoto ligado na rede geral	Porcentagem de habitantes sem acesso a ligação do esgoto ligado na rede geral
Número de habitantes sem acesso a serviços de coleta de lixo	Porcentagem de habitantes sem acesso a serviços de coleta de lixo

Fonte: Adaptado de Furlam e Murara., 2018, p. 186.

Após a devida padronização das variáveis selecionadas procedeu-se ao cálculo do índice de vulnerabilidade sanitária (IVSA), conforme Furlam e Murara (2018):

$$IVSA = \frac{\% H + \% E + \% L}{Total (\%)} \quad (Eq. 8)$$

Em que:

IVSA: Índice de Vulnerabilidade Sanitária;

% H: Porcentagem de habitantes sem acesso a rede de água geral;

% E: Porcentagem de habitantes sem acesso a ligação do esgoto ligado na rede geral;

% L: Porcentagem de habitantes sem acesso a serviços de coleta de lixo;

Total (%): Porcentagem de habitantes sem acesso aos serviços básicos de saneamento.

Após o cálculo do índice de vulnerabilidade sanitária de cada setor censitário compreendido nos limites da BHRC, procedeu-se com sua espacialização optando pela sua representação em três classes de vulnerabilidade (baixa, média e alta) definidas em ambiente SIG, utilizando o método *Quantil*, com posterior recorte espacial através da mancha de áreas inundáveis gerada na simulação de inundações.

3.2.5 Modelo de Risco a Inundações

Os modelos gerados nas etapas anteriores foram processados gerando o modelo de risco a inundações da BHRC, no qual as áreas de risco foram classificadas em três níveis de risco: Alta, Médio e Baixo. Em cada nível de risco foi descrito as características fisiográficas e hidrológicas que condicionam o processo de inundação e vulnerabilidade, com o intuito de fornecer informação de forma sucinta e rápida.

O processamento foi realizado em ambiente SIG, ArcGIS 10.8, através da técnica álgebra de mapas que consistiu no cruzamento dos modelos morfométrico, potencial de escoamento superficial, vulnerabilidade social e vulnerabilidade sanitária, recortados espacialmente de acordo com a mancha de áreas inundáveis gerada na simulação de inundações.

O Cruzamento destes modelos permitiu a hierarquização de riscos em três classes denominadas de: baixo risco, médio risco e alto risco. Entretanto neste trabalho a classe de baixo risco não foi apresentada, devido o alto grau de vulnerabilidade e suscetibilidade que a BHRC apresentou, limitando-a a médio e alto risco.

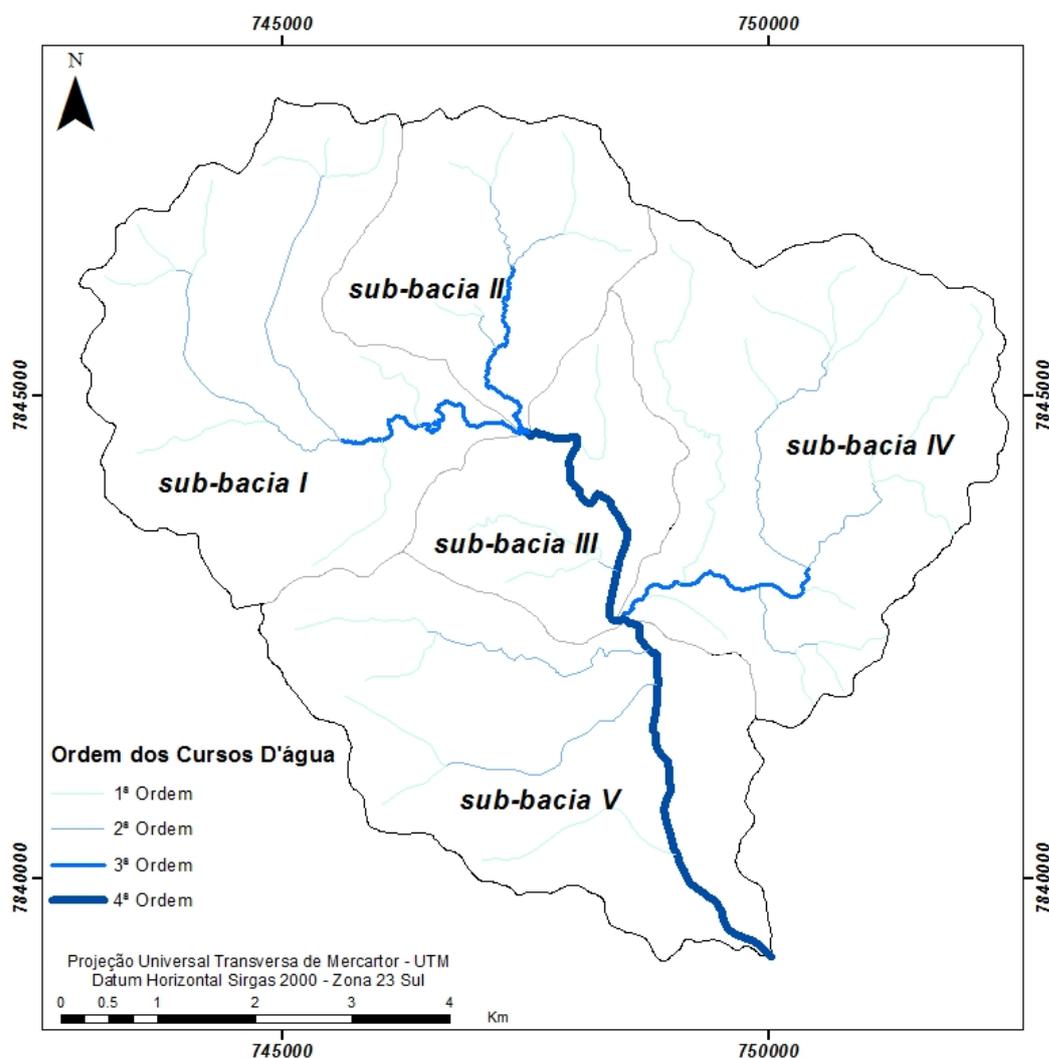
Ressalta-se que além da hierarquização de risco, apresentaram-se neste trabalho as áreas suscetíveis em ambiente rural, denominadas neste trabalho como Áreas suscetíveis não edificadas, pois se julga importante apresenta-la para auxiliar nas atividades de ordenamento territorial do município como forma de evitar a formação de novas áreas de risco.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise do Modelo Morfométrico

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão possui uma rica rede de drenagem com aproximadamente 71 km de extensão dispersa em 53 km² de área, no qual para uma análise espacial mais aprofundada foi necessário discretizá-la em cinco sub-bacias através da avaliação da rede de drenagem que as conecta, utilizando o ordenamento dos cursos d'água proposta por Strahler (1964) (Mapa 6).

Mapa 6 - Sub-bacias Hidrográficas e Ordenamento da Rede de Drenagem da BHRC através do método de Strahler



Fonte: Autor, 2020.

A avaliação das cinco sub-bacias discretizadas resultou nos parâmetros e índices morfométricos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros e Índices Morfométricos das sub-bacia Hidrográfica compreendidas na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão

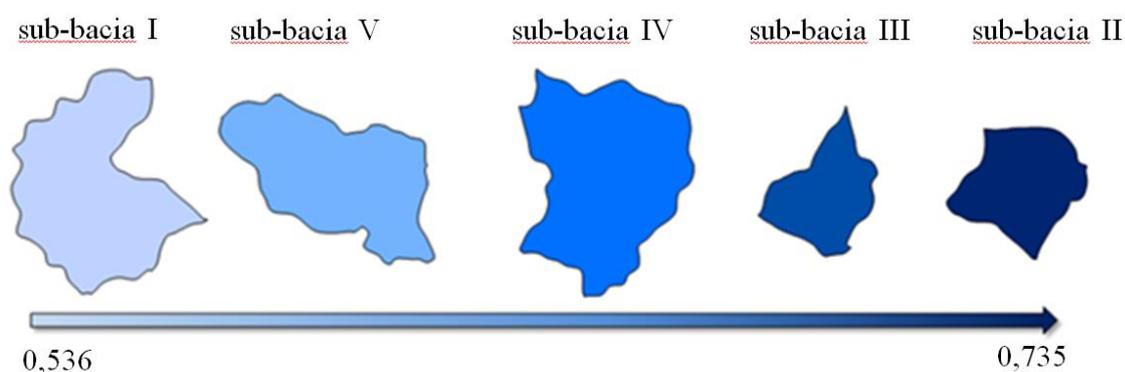
Sub-bacias	Área (km ²)	Perímetro (km)	Comp. do Rio Principal (km)	Comp. Axial (km)	Índice de Circularidade	Índice de Sinuosidade
I	13,239	17,614	7,051	3,845	0,536	45,47
II	7,136	11,046	4,078	1,334	0,735	67,29
III	5,303	10,356	3,096	3,404	0,622	9,95
IV	14,260	17,061	4,817	3,626	0,616	24,72
V	13,138	16,757	4,165	3,626	0,588	12,94

Fonte: Autor, 2020.

O índice de circularidade proposto por Miller (1953) relaciona a área da bacia à de um círculo de mesmo perímetro, sendo que valores superiores a 0,51 indicariam bacias de formatos mais circulares e logo favorecendo rápida concentração da água escoada no curso d'água principal, em menor tempo (CHRISTOFOLETTI, 1980; MOURA, 2012; COUTINHO e NASCIMENTO, 2013).

Com base nos valores de índice de circularidade na tabela 3, nota-se que todas sub-bacias em análise apresentaram valores acima de 0,510, logo todas possuem um formato mais próximo ao circular, indicando maior tendência a processos de inundações.

Figura 7 - Índice de Circularidade e Tendência a Inundações por sub-bacias



Fonte: Autor, 2020

Na Figura 7 percebe-se que a sub-bacia II com índice de circularidade de 0,735, consiste na sub-bacia com maior índice de circularidade, ou seja, com maior tendência entre as demais sub-bacias.

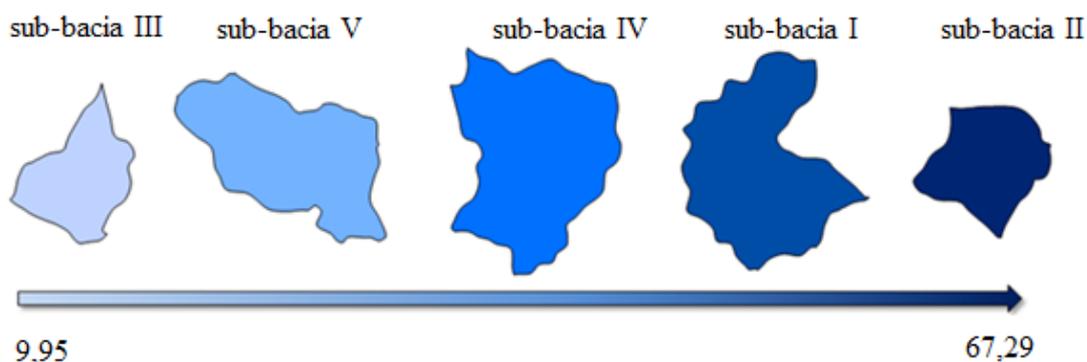
O índice de sinuosidade adaptado por Mansikkaniemi (1970) correlaciona o comprimento do canal principal à distância vetorial entre a nascente e a foz, no qual os valores resultantes são apresentados em porcentagem e classificam a rede de drenagem da bacia em canal Muito Reto para valores abaixo de 20%, Reto (20%-29,9%), Divagante (30%-39,9%), Sinuoso (40%-49,9%) e Muito Sinuoso para valores acima de 50% (CHRISTOFOLETTI, 1980; MOURA, 2012; COUTINHO e NASCIMENTO, 2013).

Observando na tabela 3 os índices de sinuosidade para as sub-bacias em estudo, percebe-se que a sub-bacia II se destaca das demais apresentando um índice de sinuosidade de 67,29 % o que indicaria cursos d'água sinuosos e muito sinuosos.

Moura (2012) ao avaliar a predisposição a enchentes em pequenas bacias hidrográficas, afirma que quanto maior o índice de sinuosidade, menor a velocidade do escoamento e conseqüentemente maior a retenção de água no interior da sub-bacia.

Logo, torna-se evidente que o índice de sinuosidade possui uma relação direta com a velocidade do escoamento do canal principal, sendo que altos índice de sinuosidade influenciam na formação de áreas inundáveis (Figura 8).

Figura 8 - Índice de Sinuosidade e Tendência a Inundações por sub-bacias



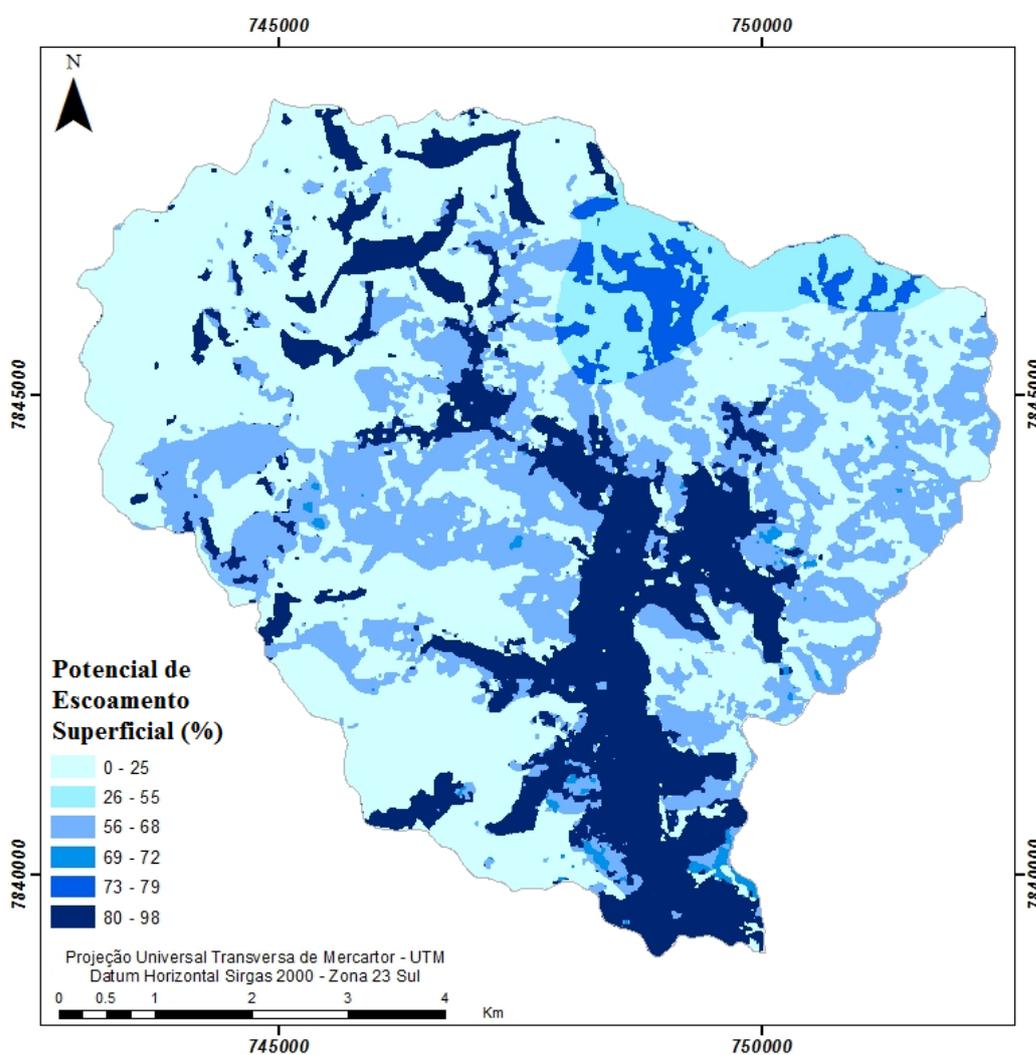
Fonte: Autor, 2020.

Entretanto nota-se que as sub-bacias discretizadas são interdependentes, logo o grau de impacto das inundações nas sub-bacias III e V estão condicionadas ao volume de água retido e a velocidade de escoamento das sub-bacias localizadas a montante.

4.2 Análise do Modelo Potencial de Escoamento Superficial

O modelo potencial de escoamento superficial consistiu na espacialização do parâmetro CN - *Curve Number*, através da associação do tipo hidrológico do solo e das condições de uso e ocupação da BHRC e segue representado pelo Mapa 7, no qual as áreas com tonalidades de azul escuro indicam áreas com os valores mais altos para o CN, enquanto que as tonalidades de azul claro indicam os menores valores, logo quanto maior o valor, maior será o escoamento superficial.

Mapa 7 - Potencial de Escoamento Superficial da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão



Fonte: Autor, 2020

Através da espacialização do parâmetro CN pode-se observar certa diversificação dos valores que variaram entre 25 e 98, explicados pelo tipo de ocupação da bacia, no qual prevalece um alto valor de CN na parte central, caracterizada por área urbanizada e baixos valores em seu entorno caracterizada por cobertura vegetal diversificada.

Segundo Tucci (2001) áreas edificadas são caracterizadas por alta impermeabilização que favorecem o escoamento superficial até o canal principal.

As informações obtidas através da espacialização do parâmetro CN foram sintetizadas na Tabela 4, que apresenta a descrição do uso e ocupação do solo quanto ao grupo hidrológico, seguido de suas respectivas áreas em hectares e porcentagem, para cada parâmetro CN identificado.

Tabela 4 - Características de uso, ocupação e tipo de solo da BHRC baseando no parâmetro Curve Number (CN), com indicação da área em hectares e percentual de ocupação.

CN	Uso e ocupação e tipo de solo quanto ao grupo hidrológico	Área (Hectares)	Área (%)
0 - 25	Florestas com boa cobertura em solos do grupo hidrológico A – com baixo escoamento superficial e alta infiltração.	2501,55	47,1
26 - 55	Florestas com boa cobertura em solos do grupo hidrológico B - arenoso com permeabilidade superior à média.	253,31	4,8
56 - 68	Pastagens ou terrenos sem condições de manejo adequado, em solos do grupo hidrológico A – com baixo escoamento superficial e alta infiltração.	1336,15	25,2
69 - 72	Arruamento e estradas – terra, solo exposto em solos do grupo hidrológico A – com baixo escoamento superficial e alta infiltração.	29,90	0,6
73 - 79	Pastagens ou terrenos sem condições de manejo adequado em solos do grupo hidrológico B - arenoso com permeabilidade superior à média.	129,82	2,4
80 - 98	Arruamentos e estradas asfaltadas com drenagem de águas pluviais, em solos do grupo hidrológico A e B – com baixo escoamento superficial e alta infiltração.	814,12	15,3
80 - 98	Zonas rochosas impermeáveis	244,42	4,6

Fonte: Adaptado de Tucci (2001, p. 406)

Observa-se que 51,9% da BHRC mantém uma cobertura florestal densa, no qual 47,1% ocorrem em solos com baixo potencial de escoamento superficial, tais áreas estão situadas nos limites da bacia e possuem características de declividade acentuada, impossibilitando o avanço do processo de urbanização que ocorre de forma acentuada na bacia em estudo.

As áreas de pastagens e terrenos sem condições de manejo adequado consistem em áreas degradadas caracterizadas por vegetação rasteira com árvores espaçadas no terreno e apresentam 27,6% de ocupação da bacia. Tais áreas possuem valores de CN entre 56-68 e 73-79, que apesar da predominância do tipo hidrológico A para solos, apresenta um potencial maior de escoamento superficial em relação às áreas de cobertura florestal.

Nota-se que as pastagens (CN 56-68 e 73-79) e florestas (CN 0-55) representam 79,5% da bacia com cobertura vegetal, entretanto não se pode confirmar um estado de conservação, pois 34,7% da cobertura vegetal seriam as áreas de pastagens (CN 56-68 e 73-79) apresentam-se como áreas abandonadas em processo de degradação, o que influenciaria no aumento do escoamento superficial na BHRC.

As áreas urbanas (15,3%), assim como as áreas rochosas (4,6%) da BHRC concentram-se na parte central da bacia, ocupando um percentual total de 19,9%. Tal valor não pode ser considerado expressivo para considerar tal bacia com alta impermeabilização do solo, no entanto, a impermeabilização existente, com parâmetro CN elevado (CN 80-98), associada à localização próxima a cursos d'água, indicam segundo Tucci (2001), tendência de acúmulo de águas pluviais da bacia, nas áreas urbanas.

Com o crescimento desordenado e acelerado das cidades, principalmente na segunda metade deste século, as áreas de risco considerável, como as várzeas inundáveis, foram ocupadas, trazendo como consequência prejuízos humanos e materiais de grande monta. Os prejuízos ocorrem devido à falta de planejamento do espaço e o conhecimento do risco das áreas de inundações (TUCCI, 2005).

As informações obtidas através da espacialização do parâmetro CN, também foram sintetizadas na Figura 9 e a Tabela 5 que apresentam informações comparativas sobre o potencial de escoamento superficial para as cinco sub-bacias da BHRC.

Tabela 5 - Parâmetro Curve Number (CN), com indicação da área em hectares e percentual de ocupação por sub-bacias

CN	Sub-bacia I		Sub-bacia II		Sub-bacia III		Sub-bacia IV		Sub-bacia V	
	Área (Ha)	Área (%)	Área (Ha)	Área (%)	Área (Ha)	Área (%)	Área (Ha)	Área (%)	Área (Ha)	Área (%)
0 - 25	885,55	66,5	354,37	50,9	137,37	25,4	482,13	33,9	642,13	48,7
26 - 55	0,00	0,0	57,04	8,2	31,62	5,8	164,65	11,6	0,00	0,0
56 - 68	323,17	24,3	121,67	17,5	225,61	41,6	491,06	34,5	174,64	13,3
69 - 72	2,85	0,2	0,15	0,0	1,67	0,3	6,82	0,5	18,41	1,4
73 - 79	0,00	0,0	28,25	4,1	7,12	1,3	94,45	6,6	0,00	0,0
80 - 98	120,58	9,0	134,09	19,3	138,40	25,6	183,61	12,9	481,86	36,6

Fonte: Autor, 2020.

Diante da Tabela 5, nota-se que as sub-bacias I e V possuem grandes porcentagens de ocupação florestal, respectivamente 66% e 48,7%, entretanto a sub-bacia V diferencia-se da sub-bacia I, ao apresentar uma maior taxa de impermeabilização, ou seja, 36,6% em comparação a 9% da sub-bacia I.

Ressalta-se que as sub-bacias I e V estão localizadas em solos classificados pela FEAM, UFV, CETEC e UFLA (2010) como Latossolo Vermelho-Amarelo, ambos, conforme Sartori et al. (2005) são classificados hidrologicamente como solos do Tipo A, que consistem em solos profundos à muito profundos, com altas taxas de infiltração.

Apesar disto, a alta taxa de impermeabilização do solo eleva o potencial de escoamento superficial da sub-bacia V em comparação a sub-bacia I, tornando-a suscetível a escoamento pluvial rápido.

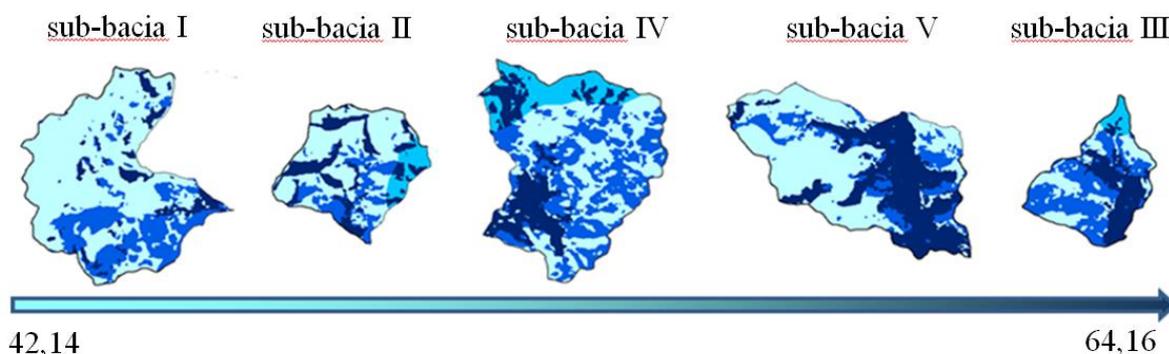
Na sub-bacia III, nota-se a presença de pastagens que ocupam 42,9% da sub-bacia e se apresentam em estado de abandono e sem condições de manejo adequado, o que contribui para a ampliação do seu potencial de escoamento superficial, tornando-o superior ao da sub-bacia V, apesar desta última, apresentar uma taxa de impermeabilização superior ao da sub-bacia em questão.

Já na sub-bacia IV encontra-se o Latossolo Amarelo e o Latossolo Vermelho (base de dados da FEAM, UFV, CETEC e UFLA, 2010), que de acordo com Sartori et al. (2005) são respectivamente classificados hidrologicamente como solos do tipo A, profundos a

muito profundos com alta taxa de infiltração, e B, profundos com moderadas taxas de infiltração. Entretanto esta sub-bacia apresenta-se altamente degradada devido à substituição de sua cobertura florestal por pastagens em más condições de conservação (41,1%) que associadas às áreas impermeáveis (12,9%) ampliariam o potencial de escoamento superficial da sub-bacia, não sendo superiores as sub-bacias III e V.

Diante do volume de dados expresso na Tabela 5 e da necessidade de se classificar a bacia quanto ao escoamento superficial, adotou-se a média aritmética ponderada que resultou na seguinte classificação:

Figura 9 - Tendência de escoamento superficial por sub-bacias



Fonte: Autor, 2020.

Nota-se que a sub-bacia III possui um valor CN médio de 64,16, valor superior às demais sub-bacias que apresentam parâmetros de 58,07 (sub-bacia V), 56,54 (sub-bacia IV), 51,26 (sub-bacia II) e 42,14 (sub-bacia I).

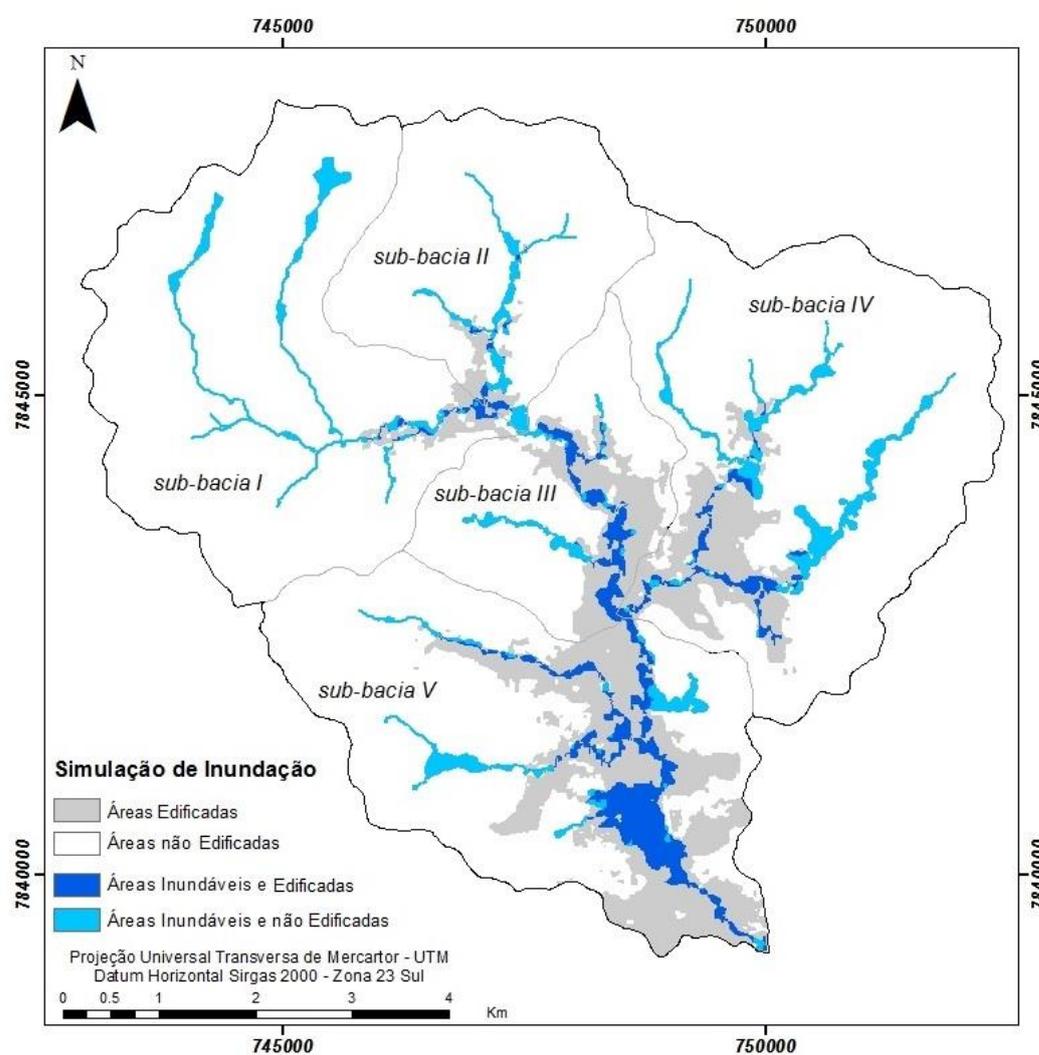
Segundo Tucci (2001) as condições artificiais da bacia, representadas pelas áreas desmatadas e impermeabilizadas pela urbanização, produzem acelerado escoamento superficial das águas pluviais favorecendo um aumento da frequência de inundações.

Analisando o modelo de escoamento superficial observa-se que a sub-bacia III e V possuem maior potencial ao escoamento superficial, indicando maior tendência a inundações, enquanto que a sub-bacia I com menor potencial ao escoamento superficial possui a menor tendência.

4.3 Simulação de Inundação

A simulação da inundação consistiu na aplicação do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (M-HAND), desenvolvido por Nobre *et al.* (2011) e disponibilizado no software livre Terra View 4.2.2, sobre a BHRC, levando em consideração a mancha de ocupação urbana espacializada pelo modelo de uso e ocupação do solo (Mapa 8).

Mapa 8 - Mapa produzido a partir da simulação de inundação na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão, baseado no modelo Height Above the Nearest Drainage (M-HAND)



Fonte: Autor, 2020

As informações obtidas através da simulação das áreas inundáveis da BHRC foram sintetizadas na Tabela 6, que apresenta as categorias representadas, seguidas de suas respectivas áreas em hectares e porcentagem.

Tabela 6 - Distribuição espacial das áreas atingidas na simulação de inundação da BHRC

Distribuição das áreas durante possível evento de inundações	Área (Ha)	Área (%)
Áreas Edificadas	648,13	12,21
Áreas não Edificadas	4.346,16	81,89
Áreas Inundáveis e Edificadas	166,17	3,13
Áreas Inundáveis e não Edificadas	147,14	2,77

Fonte: Autor, 2020

A simulação através do M-HAND possibilitou verificar que 5,90% (313,31 ha) da bacia em estudo poderiam ser inundadas, sendo que 2,60% (147,14 ha) ocorreriam em áreas não edificadas e 3,30% (166,17 ha) em áreas edificadas. Ressalta-se que 25,64% das áreas edificadas são suscetíveis a inundações.

Em relação às sub-bacias hidrográficas da BHRC as informações obtidas através do M-HAND foram sintetizadas resultando na Tabela 7 que apresenta a distribuição espacial em termos de área e porcentagem das áreas potencialmente inundáveis para cada sub-bacia.

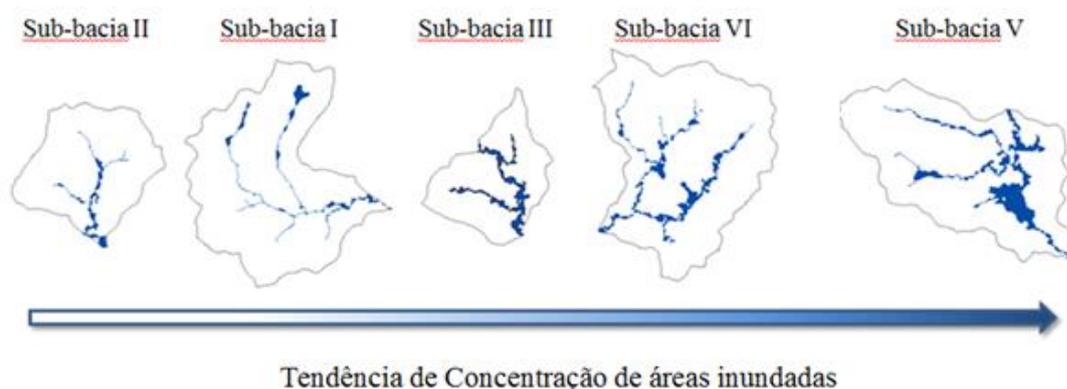
Tabela 7 - Quantificação das áreas atingidas na simulação de inundação para cada sub-bacia

Sub-bacias	Áreas Edificadas		Áreas não Edificadas		Áreas Inundáveis e Edificadas		Áreas Inundáveis e não Edificadas	
	Área (Ha)	Área (%)	Área (Ha)	Área (%)	Área (Ha)	Área (%)	Área (Ha)	Área (%)
I	27,1	4,18	1257,14	28,93	6,18	3,72	33,48	22,75
II	21,71	3,35	667,39	15,35	5,37	3,23	19,13	13,00
III	107,72	16,62	380,70	8,76	30,47	18,34	11,41	7,76
IV	156,36	24,05	1189,76	27,37	27,04	16,27	52,84	35,91
V	335,24	51,57	851,17	19,58	97,11	58,44	30,28	20,58
Total	648,13	100,00	4346,16	100,00	166,17	100,00	147,14	100,00

Fonte: Autor, 2020

A classificação das sub-bacias da BHRC em relação à tendência de concentração de áreas inundáveis totais está apresentada na Figura 10.

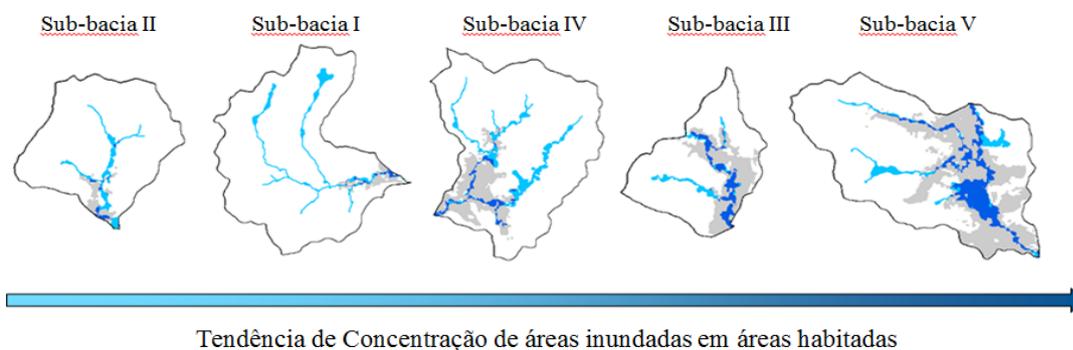
Figura 10 - Classificação das sub-bacias da BHRC em relação à tendência de concentração de áreas inundáveis totais



Fonte: Autor, 2020.

Comparando a distribuição espacial das áreas inundáveis entre as sub-bacias da BHRC, nota-se que as sub-bacia V, IV e III possuem maior tendência de concentração de áreas inundáveis, entretanto a sub-bacia V possui a maior taxa de ocupação (59,13%) destas áreas, ou seja, possui maior área urbana suscetível aos efeitos diretos das inundações na BHRC.

Figura 11 - Classificação das sub-bacias da BHRC em relação à tendência de concentração de áreas inundáveis edificadas



Fonte: Autor, 2020.

Quanto à classificação das sub-bacias da BHRC em relação à tendência de concentração de áreas inundáveis edificadas, apresentadas na Figura 11, nota-se que a sub-bacia V com 59,13 % (97,11 ha) ainda se apresenta em destaque, entretanto a sub-bacia III compreende 18,56 % (30,47 ha) de áreas inundáveis edificadas, ou seja, a sub-bacia III apesar de possuir baixa extensão territorial, em relação às demais sub-bacias, também demonstra, assim como a sub-bacia V, uma alta concentração de áreas inundáveis em sítio urbano.

As sub-bacias I e II apresentaram baixa tendência de concentração de áreas inundáveis, tanto em áreas edificadas como em áreas não edificadas, tal fato pode ser explicado pelo relevo acidentado que tais sub-bacias apresentam que por sua vez inviabilizam a ocupação urbana.

Destaca-se que sub-bacia IV necessita de maior atenção quanto às políticas públicas de ocupação, devido possuir 35,91% das áreas inundáveis passíveis de ocupação, que podem gerar num futuro próximo, áreas urbanas passíveis de inundação.

Recomenda-se aos gestores públicos uma atualização do Plano Diretor do município, visando apresentar medidas restritivas e de fiscalização do uso e ocupação do solo nas áreas inundáveis. Entretanto são imprescindíveis que tais medidas estejam em conformidade e complemente as orientações do novo Código Florestal, em especial as áreas de preservação permanente de curso d'água.

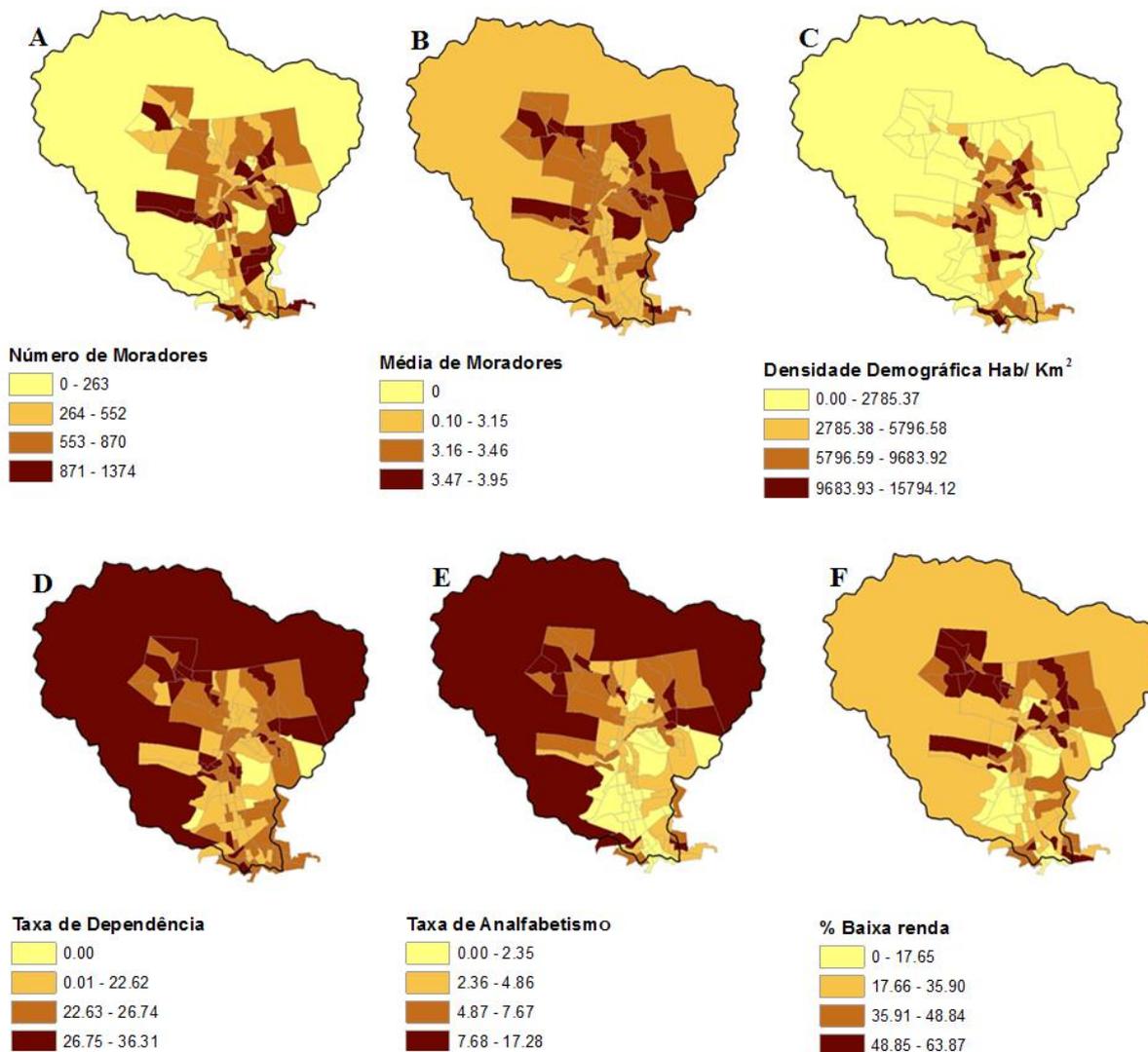
É importante ressaltar que a simulação da inundação através da aplicação do modelo Height Above the Nearest Drainage (M-HAND), permitiu a identificação das áreas inundáveis de forma remota, permitindo a redução de custos e aumento da produtividade durante a pesquisa, logo se torna uma ferramenta imprescindível na identificação da suscetibilidade a inundações.

4.4 Análise do Modelo de Vulnerabilidade Social

O modelo de vulnerabilidade social consiste na representação espacial das condições socioeconômicas da população local, que quando associadas e analisadas descreveram a capacidade de resiliência da comunidade, durante eventos de inundações. A metodologia adotada é baseada na proposta por Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012), que utiliza variáveis do censo demográfico de 2010 e representam as dimensões: população (número de moradores, média de moradores por setor e densidade demográfica), taxa de dependência (porcentagem da população abaixo de 12 e acima de 65 anos), educação (porcentagem de

peças analfabetas acima de 12 anos) e renda (porcentagem dos responsáveis sem rendimento e com rendimento de até 1 salário mínimo) (Figura 12).

Figura 12 - Distribuição espacial das variáveis do censo demográfico de 2010, selecionadas para elaboração de modelo de vulnerabilidade social



Fonte: Autor, 2020.

Na Figura 12A, percebe-se que a maior parte das áreas limítrofes da BHRC, de características rurais, apresentam número de moradores de 0 à 263 habitantes, enquanto a parte central da bacia, caracterizada por um núcleo urbano apresenta de 264 à 1374 habitantes, sendo que os setores censitários com maior número de moradores encontram-se

dispersos pelo núcleo urbano, demonstrando uma tendência de dispersão da população das áreas centrais, caracterizadas por áreas comerciais e bairros mais antigos.

Entretanto na Figura 12B observa-se que a média de moradores da BHRC se subdivide em dois grupos, no qual o primeiro grupo que varia de 3,16 a 3,95 moradores, concentra-se na porção Sul da bacia, que possui características residenciais e poucos empreendimentos comerciais. O segundo grupo, com média de moradores entre 0,10 à 3,15, apresenta-se distribuído na parte Sul da bacia, caracterizada como uma região mais antiga e comercial, localizada na porção limítrofe da bacia, como dito anteriormente com características rurais.

Em relação à densidade demográfica representada pela Figura 12C, observa-se que na porção central da bacia existe uma concentração de habitantes em torno de 2785,38 a 9683,92 hab/Km², enquanto que nas áreas periféricas do núcleo urbano, apesar de baixa densidade demográfica, localizam-se algumas comunidades altamente densificadas na ordem de 9683,93 a 15794,12 hab/Km².

Pode-se comparar a espacialização descrita nos parágrafos anteriores, referentes à dimensão população, com a variável taxa de dependência (Figura 12 D), no qual se verifica que a população concentrada nos setores centrais, zona rural e sul da bacia, apresenta alta taxa de dependência (26,75-36,31%), que pode ser explicado pela presença numerosa de habitantes idosos.

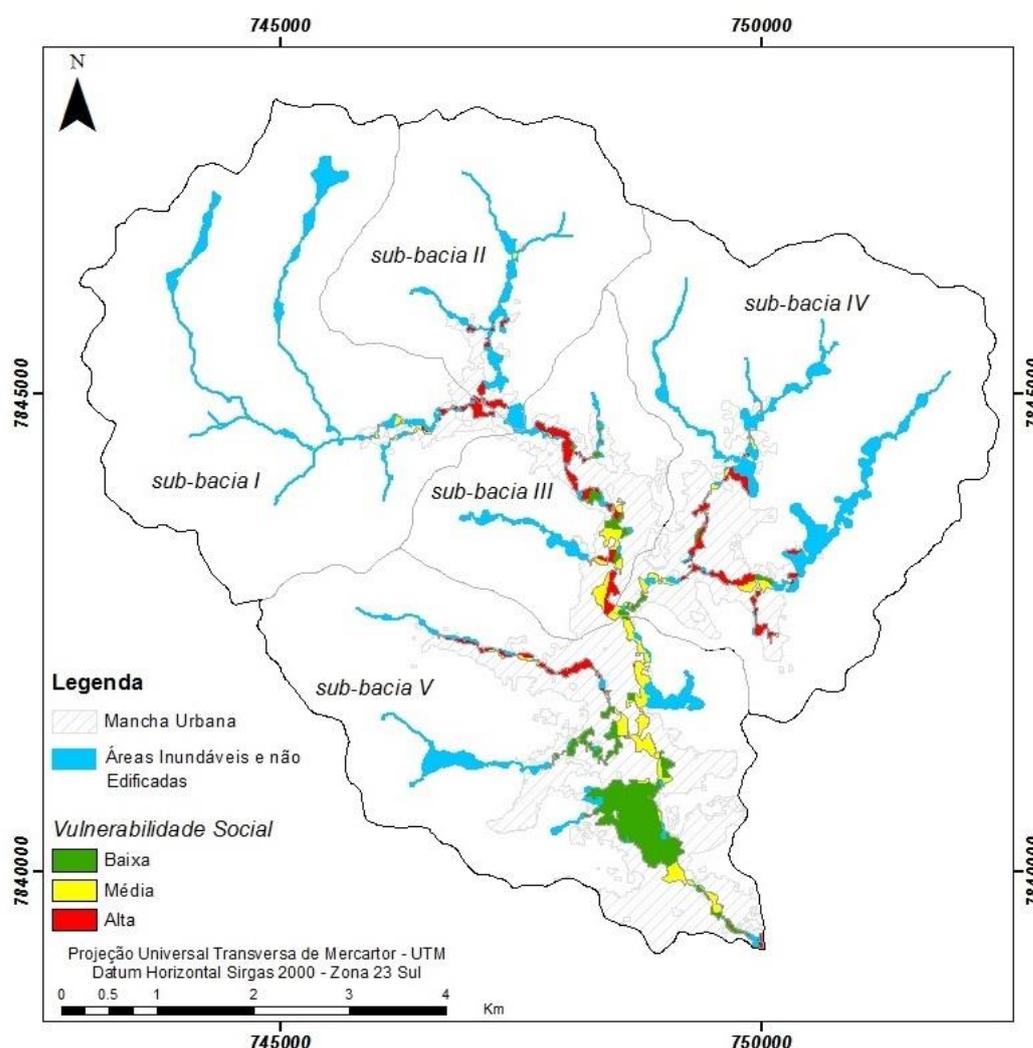
Entretanto deve-se destacar que as altas taxas de dependência nos setores localizados na porção norte do núcleo urbano da BHRC são caracterizados por dependentes abaixo de 12 anos de idade.

A taxa de analfabetismo apresenta-se concentrada e com altos índices (7,68 a 17,28) nos setores limítrofes da bacia, bem como também se apresenta em áreas periféricas do núcleo urbano, especificamente na porção norte da bacia, limitando-se com áreas rurais, enquanto as menores taxas de analfabetismo (0 a 2,35) concentram-se na parte sul e central do núcleo urbano da BHRC.

Na Figura 12F observa-se alta porcentagem de famílias de baixa renda, no qual são caracterizadas como famílias que possuem chefes de família que recebem menos de um salário mínimo. Estas famílias estão concentradas na porção norte da bacia, em setores periféricos do núcleo urbano, definidos como áreas de expansão urbana com predominância de características rurais.

Os parâmetros analisados individualmente não são suficientes para identificar e classificar as áreas de maior vulnerabilidade social, sendo necessário ser analisados em conjunto e associados à mancha de áreas inundáveis e edificadas, gerada no processo de simulação de inundações. Diante disto os dados foram associados e processados em conjunto gerando o modelo de vulnerabilidade social da BHRC (Mapa 9).

Mapa 9 - Vulnerabilidade Social na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão



Fonte: Autor, 2020.

O modelo de vulnerabilidade social apresenta a espacialização da segregação socioeconômica e ambiental de um espaço geográfico, logo é capaz de fornecer a identificação de áreas prioritárias para implementação de políticas públicas para melhoria da qualidade de vida da população local e conseqüentemente o gerenciamento de desastres no

espaço geográfico avaliado (GOERL, KOBİYAMA e PELLERIN, 2012; OLÍMPIO E ZANELLA, 2017).

As informações obtidas através do modelo de vulnerabilidade social espacializado através do mapa 9, foram sintetizadas na Tabela 8 que apresenta distribuição espacial das classes de vulnerabilidade social por sub-bacias.

Tabela 8 - Distribuição espacial das classes de vulnerabilidade social por sub-bacias

Classes	Sub-bacia I	Sub-bacia II	Sub-bacia III	Sub-bacia IV	Sub-bacia V
	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
Baixa	0,00	0,00	0,00	3,82	62,97
Média	2,27	0,47	7,10	7,67	25,66
Alta	3,90	4,92	23,42	15,60	8,56
Total	6,17	5,39	30,52	27,09	97,19

Fonte: Autor, 2020.

Diante do Mapa 9 e Tabela 8 percebe-se que a classe de baixa vulnerabilidade foi apresentada de forma concentrada na sub-bacia V, especificamente nos 62,97 hectares de áreas inundáveis desta sub-bacia. Tal fato é explicado devido às boas condições socioeconômicas da população nos setores compreendidos na sub-bacia V.

Apesar da sub-bacia IV também compreender uma classe de baixa vulnerabilidade, os 3,82 hectares apresentados não são equiparáveis a área de baixa vulnerabilidade compreendida pela sub-bacia V. Entretanto consiste em um valor expressivo quando se comparado com as demais sub-bacias, que nem se quer apresentaram este nível de vulnerabilidade.

A classe de média vulnerabilidade social novamente esta apresentada de forma concentrada na sub-bacia V com 25,66 hectares das áreas inundáveis desta sub-bacia, enquanto as demais sub-bacias apresentam valores inferiores a 8 hectares.

Entretanto é importante ressaltar que as sub-bacias III e IV que também possui uma classe de média vulnerabilidade, compreendem um grande contingente populacional de baixa renda, com altas taxas de dependência e analfabetismo, enquanto que a sub-bacia V apresenta baixa densidade demográfica e melhores condições socioeconômicas.

As áreas mais extensas de alta vulnerabilidade sociais localizam-se nas sub-bacias III, com 23,42 hectares e sub-bacia IV com 15,60 hectares e sub-bacia V com 8,56 hectares.

Devido à alta densidade demográfica, demonstradas nas sub-bacias III e IV, fica evidente que o número de atingidos durante um potencial evento de inundações extremas, seria maior do que na sub-bacia V, apesar dos efeitos serem os mesmos.

Diante das informações apresentadas, nota-se que em quase sua totalidade a BHRC caracteriza-se com alto potencial para desastres sociais, quando desencadeados por eventos externos, logo é prioritário a implementação de políticas públicas relacionadas à qualidade de vida da população localizada nas áreas de maior vulnerabilidade social.

O cadastro da população em alto risco, pelo poder público, seria fundamental para a aplicação das políticas públicas para melhoria de qualidade de vida.

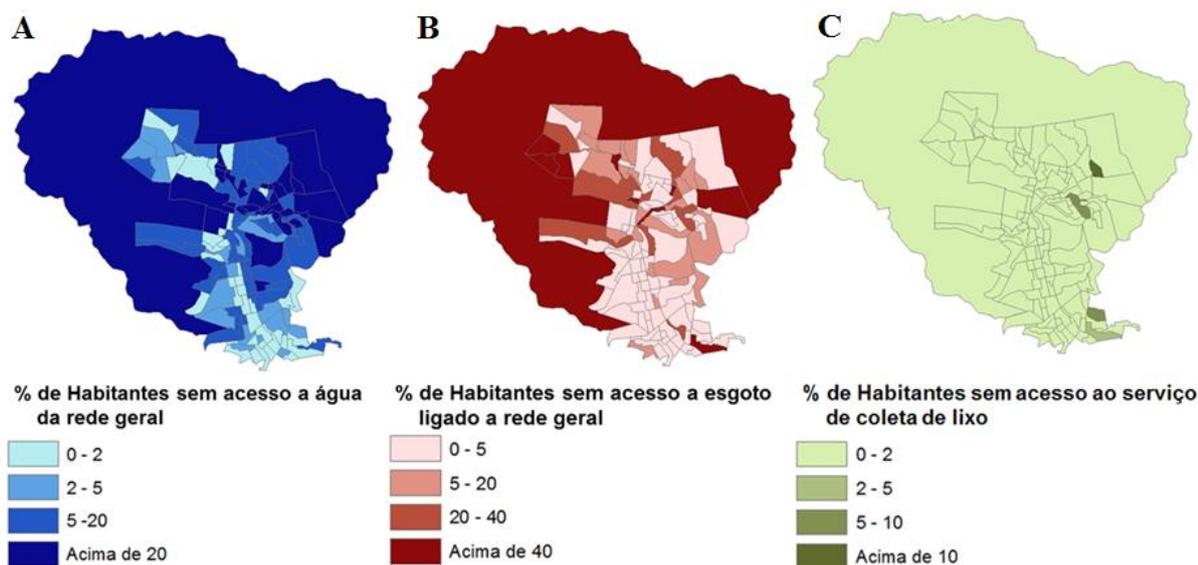
Programas sociais atuais do Governo federal como benefício emergencial, benefícios de prestação continuada e bolsa família seriam recursos essenciais que reduziriam o impacto econômico durante os eventos de inundações e ampliaria as oportunidades de acesso ao mercado de trabalho pela população em vulnerabilidade.

4.5 Análise do Modelo de Vulnerabilidade Sanitária

O modelo de vulnerabilidade sanitária consiste na representação espacial das condições sanitárias da comunidade que durante e após os eventos de inundações na BHRC ficariam mais expostas ou não, a contaminação por doenças hídricas. Logo este modelo representa a capacidade do poder público de garantir serviços de infraestrutura para proteção e qualidade de vida da comunidade.

A metodologia adotada é uma adaptação da proposta de Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012) e Furlan e Murara (2018), na qual as variáveis utilizadas consistem do censo demográfico de 2010 e representam as dimensões: Porcentagem de habitantes sem água da rede geral, porcentagem de habitantes sem esgoto da rede geral, porcentagem de habitantes sem coleta de lixo (figura 13).

Figura 13 - Distribuição espacial da população da BHRC em relação aos serviços de saneamento básico, considerados essenciais.



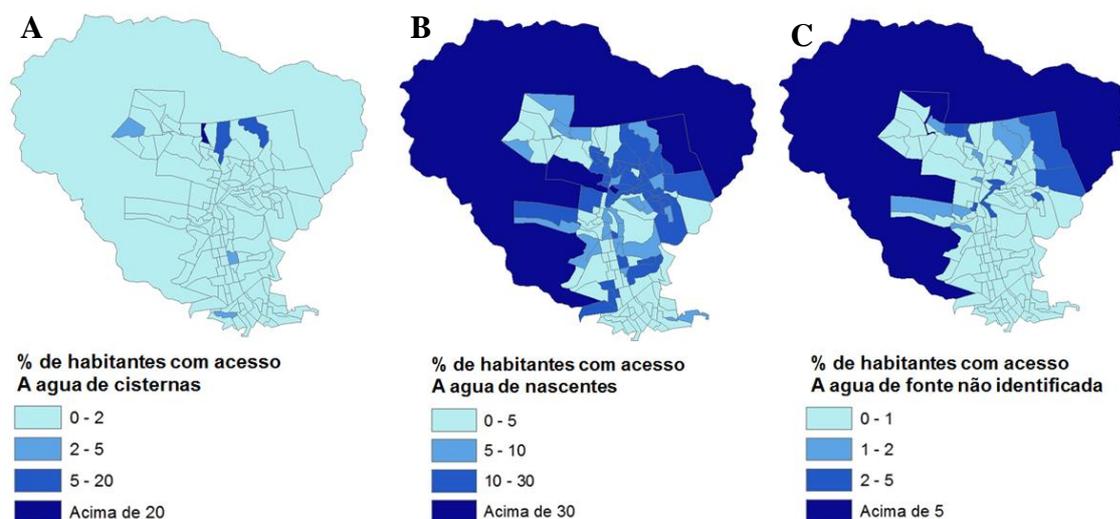
Fonte: Autor, 2020.

Conforme a Figura 13A mais de 20% dos habitantes da BHRC não possuem acesso à água da rede geral e concentram-se nas áreas limítrofes da bacia, ou seja, nas áreas rurais, enquanto que os setores com porcentagem mais baixa com até 2% de habitantes, apresentam-se distribuídos na porção norte e sul do núcleo urbano.

Destaca-se que os setores localizados nas áreas periféricas do núcleo urbano apresentaram porcentagem entre 5% à 20% dos habitantes sem abastecimento de água pela rede geral.

Mesmo que alguns habitantes não tenham acesso à água da rede geral, outras formas de abastecimento são utilizadas, dentre elas: o abastecimento por poço ou nascente com maior incidência nas áreas rurais, o abastecimento por cisterna em alguns setores na porção norte e sul do núcleo urbano e outras formas de abastecimento não identificado (Figura 14).

Figura 14 - Distribuição espacial da população da BHRC em relação ao tipo de abastecimento de água, com exceção da rede geral de abastecimento.



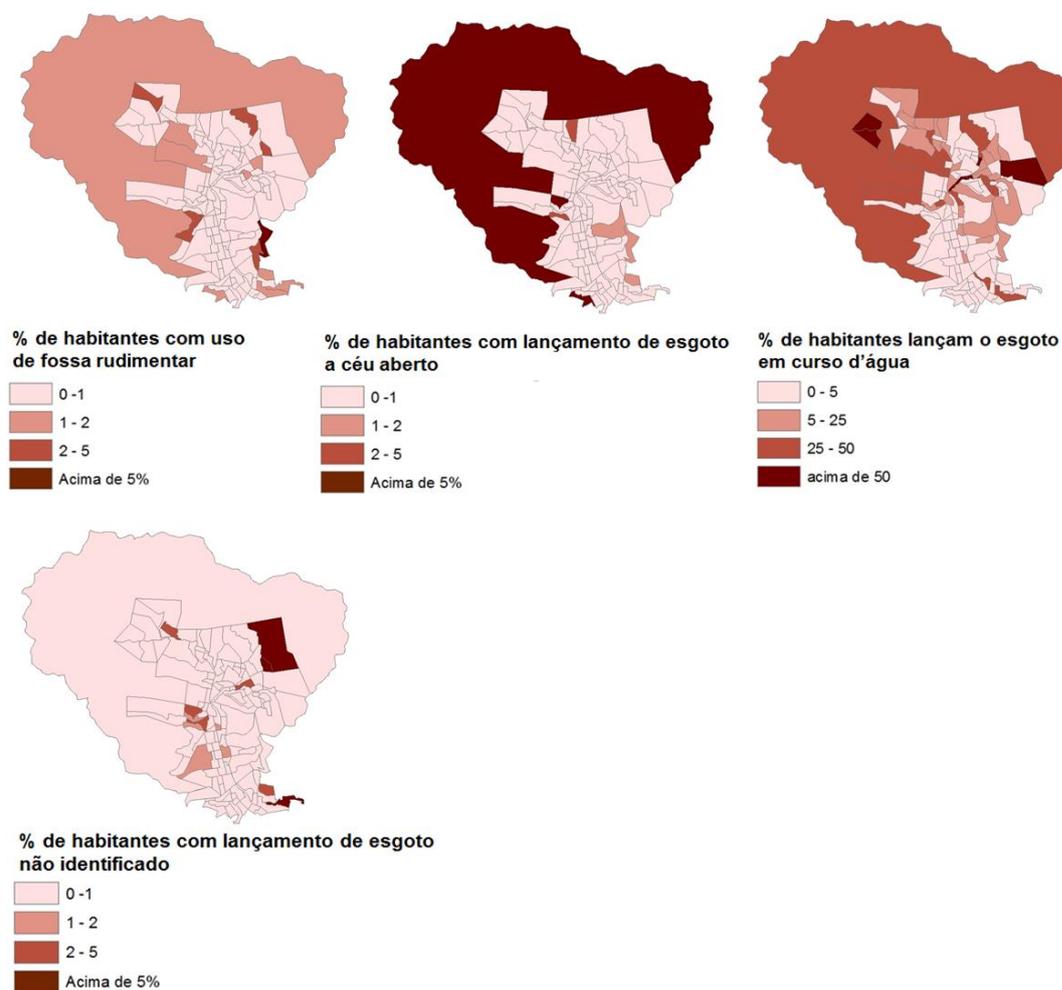
Fonte: Autor, 2020.

Em relação à figura 14B, observou-se que acima de 40% dos habitantes da BHRC, não possuem o sistema de esgoto adequado às normas sanitárias e estão localizados na zona rural. Já na zona urbana nota-se o predomínio de uma porcentagem inferior, em torno de 5%.

Apesar da baixa porcentagem de habitantes no núcleo urbano sem um sistema de esgoto adequado, nota-se que alguns setores isolados e posicionados na porção central do núcleo urbano apresentam alta incidência, acima de 40%, de habitantes sem um sistema de esgoto adequado as normas sanitárias. Estes setores estão situados nas margens do ribeirão caladão, principal curso d'água da BHRC.

Um sistema de esgotamento sanitário adequado fundamenta-se na conexão dos domicílios a rede geral de esgoto ou o uso do esgotamento via fossa séptica que consiste em uma das alternativas utilizadas na BHRC, principalmente nas comunidades rurais. Entretanto outras formas de esgotamento com características contraditórias com as normas sanitárias foram identificadas no censo demográfico de 2010, dentre elas: o esgotamento via fossa rudimentar, via lançamento in natura em curso d'água, via céu aberto e outras não identificadas (Figura 15).

Figura 15 - Distribuição espacial da população da BHRC em relação ao tipo de disposição das águas residuais domésticas com exceção da rede geral de esgoto



Fonte: Autor, 2020.

Nota-se que os habitantes, do percentual de 5%, sem acesso a rede de esgotamento adequada, estão concentrados em alguns setores situados de forma isolada nas áreas periféricas do núcleo urbano e utilizam como forma de esgotamento sanitário a fossa rudimentar e o lançamento de esgoto a céu aberto (Figura 15).

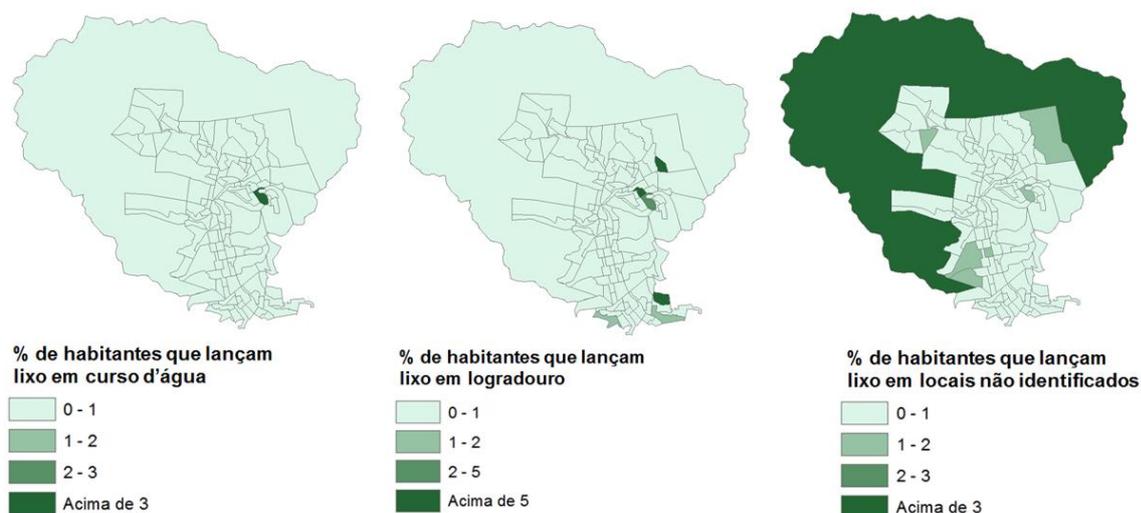
Entretanto, destaca-se uma alta porcentagem entre 25% e 50%, dos habitantes sem acesso a esgotamento sanitário adequado, localizados em setores situados nas proximidades do ribeirão caladão e apresentam como forma de esgotamento sanitário a disposição dos efluentes via lançamento in natura no curso d'água.

Em relação a figura 13C, a mesma apresenta a porcentagem de habitantes sem acesso ao serviço de coleta de lixo, no qual se pode perceber que os setores acima de 5% estão

localizados na porção leste do núcleo urbano da bacia, enquanto maior parte da bacia apresenta-se com baixas porcentagens sem acesso ao serviço.

Entretanto o censo demográfico de 2010 identificou outras formas de disposição do resíduo doméstico dentre elas: disposição em curso d'água, disposição em logradouro e disposição em locais não identificados (Figura 16).

Figura 16 - Distribuição espacial da população da BHRC em relação ao tipo de disposição resíduos domésticos com exceção aos serviços de coleta de lixo

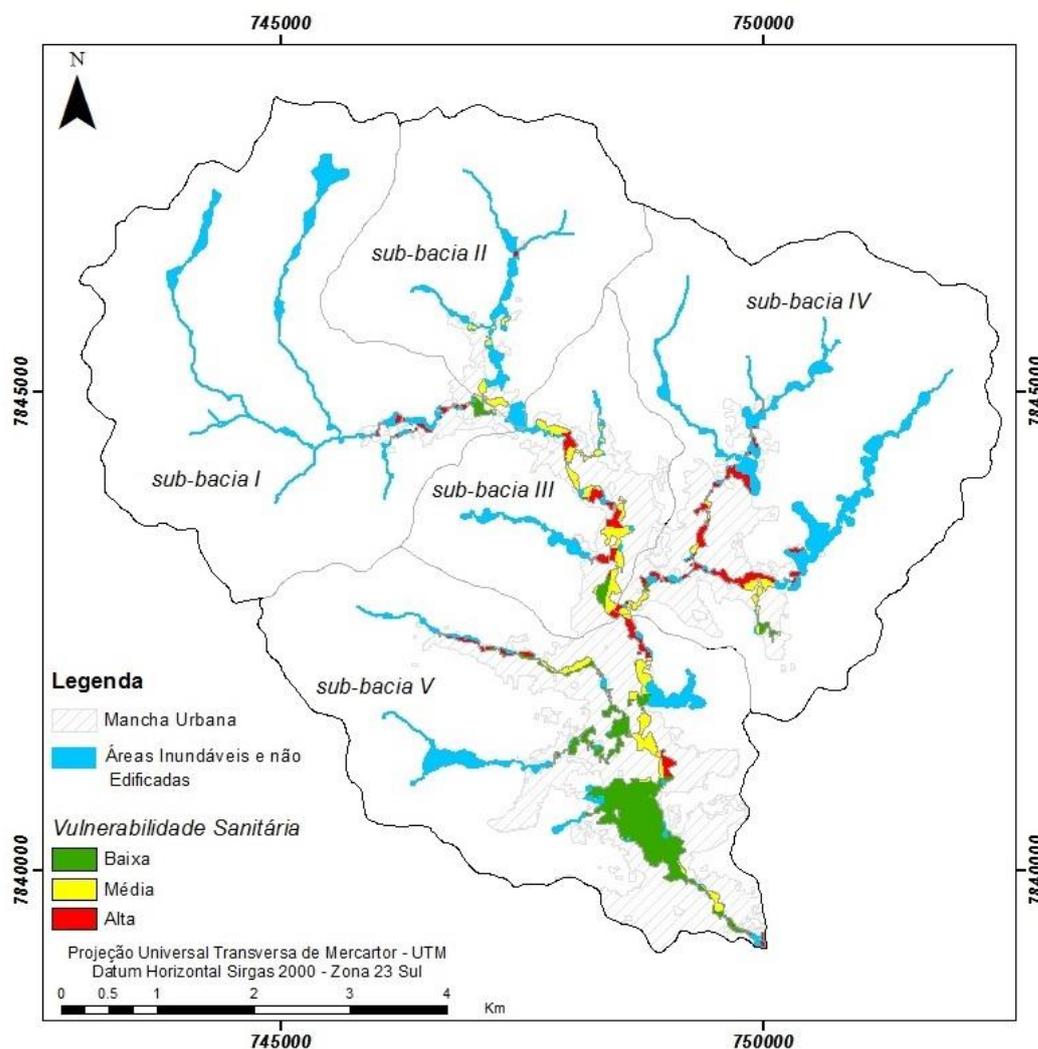


Fonte: Autor, 2020.

Através da Figura 16 observa-se que os habitantes que dispõem seus resíduos domésticos em curso d'água e em logradouros estão apresentados de forma inexpressiva, acima de 3%, na porção leste do núcleo urbano da BHRC.

Entretanto, os habitantes que dispõem seus resíduos domésticos de outra forma inapropriada e não definida, concentraram-se na zona rural na classe acima de 3% de habitantes.

Associando as variáveis sanitárias com à mancha de áreas inundáveis e não edificadas, gerada na simulação de inundações, pode-se gerar o modelo de vulnerabilidade sanitária que permite identificar os setores mais vulneráveis a doenças de veiculação hídrica após eventos de inundação (Mapa 10 e Tabela 9).

Mapa 10 - Vulnerabilidade Sanitária na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão

Fonte: Autor, 2020

Tabela 9 - Distribuição espacial das classes de vulnerabilidade sanitária por sub-bacias

Classes	Sub-bacia I	Sub-bacia II	Sub-bacia III	Sub-bacia IV	Sub-bacia V
	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
Baixa	2,39	0,08	2,82	2,34	71,69
Média	0,17	4,84	17,45	7,13	16,05
Alta	3,61	0,47	10,25	17,62	9,45
Total	6,17	5,39	30,52	27,09	97,19

Fonte: Autor, 2020.

Diante do Mapa 10 e Tabela 9 percebe-se que a classe de baixa suscetibilidade foi apresentada de forma concentrada na parte sul da BHRC, especificamente distribuídos na sub-

bacia V, com 71,69 hectares, enquanto as demais sub-bacias valores inferiores a 3 hectares. Tal fato pode ser explicado pelo poder socioeconômico apresentado pela sub-bacia V que garantem acesso à rede de água geral, esgotamento sanitário e disposição de resíduos domésticos adequadamente.

Nota-se que as sub-bacias III com 17,45 hectares e a sub-bacia V com 16,05 hectares se destacam entre as demais sub-bacias quando são comparadas as áreas inundáveis em nível médio de vulnerabilidade sanitária.

Apesar da baixa vulnerabilidade social presente nestas sub-bacias, as mesmas possuem alta densidade demográfica, logo seria necessária uma maior atenção na manutenção do sistema de saneamento e abastecimento, a fim de evitar possíveis epidemias em caso de colapso deste sistema.

Na classe de alta vulnerabilidade sanitária destaca-se a sub-bacia IV com 17,62 hectares, a sub-bacia III com 10,25 hectares e a sub-bacia V com 9,45 hectares. Estas sub-bacias são caracterizadas por alta porcentagem de habitantes sem acesso a esgotamento sanitário adequado e água potável da rede geral, se tornando evidente a difusão de doenças de veiculação hídrica, após um potencial evento de inundações extremas.

Ressalta-se que o município de Coronel Fabriciano possui um índice de 95% de saneamento, coleta de resíduos e abastecimento de água potável, afastando-se assim de altos índices de epidemia relacionada a doenças de veiculação hídrica.

Entretanto nas áreas e sub-bacias indicadas nesta pesquisa, existe a possibilidade de contaminação de forma pontual, logo se torna necessário à implementação de políticas públicas relacionadas à manutenção do sistema de saneamento e abastecimento, a fim de evitar calamidades públicas após eventos extremos de inundações.

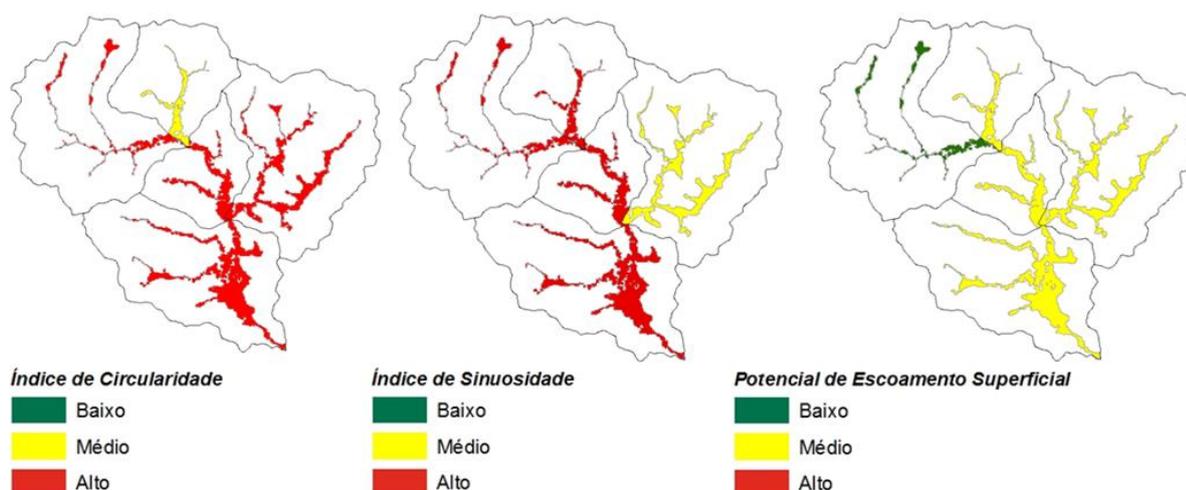
É importante mencionar que os recursos para ampliação e manutenção do sistema de saneamento e abastecimento são adquiridos via:

Governo Federal através do Orçamento Geral da União (não onerosos) e recursos provenientes do FGTS e do FAT (onerosos). Também estão disponíveis fontes externas de recursos com financiamento, por exemplo, do BIRD e do BID. Os recursos do FGTS são operados pela Caixa Econômica Federal por meio do Programa Saneamento para Todos e os do FAT pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (BORJA, 2014).

4.6 Análise do Modelo de Risco

O modelo de risco a inundações na BHRC consistiu no cruzamento das diversas modelagens geradas referentes ao quadro de suscetibilidade, representadas pelos modelos morfométricos (índice de circularidade e índice de sinuosidade) e potencial de escoamento superficial e o quadro de vulnerabilidade representada pelos modelos de vulnerabilidade social e vulnerabilidade sanitária, com posterior recorte espacial através das áreas com potencial a inundações, simuladas através do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (M-HAND) (figuras 17 e 18).

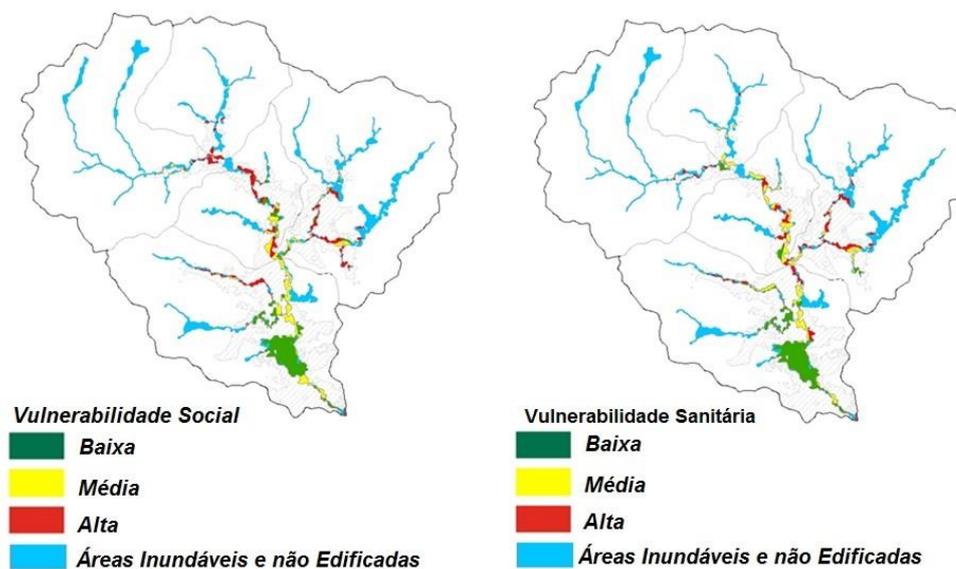
Figura 17 - Recorte espacial dos modelos do quadro de suscetibilidade a inundações da BHRC através do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (M-HAND)



Fonte: Autor, 2020.

A associação dos modelos do quadro de suscetibilidade visa incorporar no modelo de risco dados sobre a dinâmica hidrológica da bacia na ótica das condições fisiográficas, visando auxiliar na determinação do grau de risco e conseqüentemente descrever a forma de ocorrência da inundações diante de uma possível situação de perigo.

Figura 18 - Recorte espacial dos modelos do quadro de vulnerabilidade a inundações da BHRC através do modelo Height Above the Nearest Drainage (M-HAND)



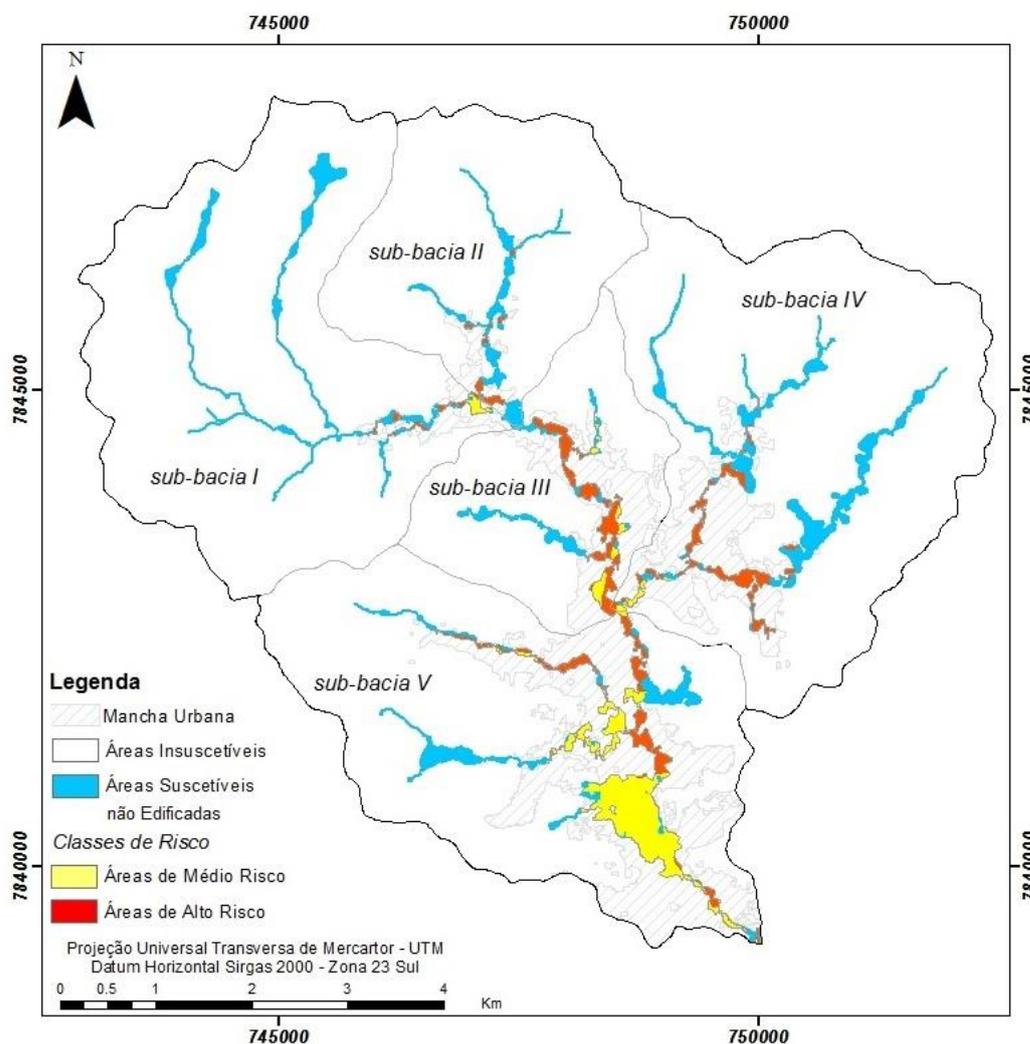
Fonte: Autor, 2020.

O quadro de vulnerabilidade seguiu a mesma linha de raciocínio do quadro de suscetibilidade, ou seja, auxiliar na determinação do grau de risco, visando espacializar as condições socioeconômicas e sanitárias da população local, identificando comunidades vulneráveis diante de uma possível situação de perigo causado por inundações.

Através da técnica de álgebra de mapas, disponível no software ArcGIS 10.8, estes seis modelos, que representam os quadros de suscetibilidade, vulnerabilidade e simulação de áreas inundáveis foram processados visando apresentar um modelo de risco a inundações para a BHRC.

O modelo resultante consistiu na representação das áreas de risco classificando-as conforme o tipo de impacto e as condições de vulnerabilidade da população local, sendo, subdividida em duas classes denominadas de classe alta e classe média. As áreas suscetíveis não edificadas² e as áreas insuscetíveis também foram apresentadas no modelo, visando informar as áreas em potencial de risco caso não seja tomadas medidas restritivas de uso e ocupação. (Mapa 11).

² Áreas sujeitas a inundações sem danos a população e infraestrutura urbana, localizadas em zona rural, mas com potencial de risco em caso de futuros parcelamentos de solo visando ocupação urbana.

Mapa 11 - Áreas de Risco a inundações na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão

Fonte: Autor, 2020.

A espacialização das áreas de risco possibilitou verificar que as áreas sujeitas a inundações equivalem a 313,31 ha, ou seja, 5,90% da área total da BHRC, distribuindo-se em duas categorias denominadas: áreas suscetíveis não edificadas, que consistem em áreas sujeitas a inundações sem danos a população e infraestrutura urbana, com 147,14 ha (2,77%) da área total da bacia e áreas suscetíveis em risco, que consiste em áreas sujeitas a inundações associado a variados graus de vulnerabilidade da população local diante do evento, com 166,17 ha (3,30%).

As informações obtidas através da espacialização das áreas de risco foram sintetizadas na Tabela 10, que apresenta a quantificação das áreas em hectares e porcentagem para cada classe de risco presente na sub-bacia I da BHRC.

Tabela 10 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia I

Classes	Área (Ha)	Área (%)
Áreas Suscetíveis não edificadas	33,48	84,42
Áreas de Médio Risco	2,39	6,03
Áreas de Alto Risco	3,79	9,56
Total	39,66	100,00

Fonte: Autor, 2020.

Analisando a Tabela 10 observa-se que na sub-bacia I 84,42% (33,48 ha) da mancha de inundação corresponde a áreas suscetíveis a inundação sem risco a estrutura urbana e comunidades (áreas suscetíveis não edificadas), enquanto que 15,59% (6,18 ha) da mancha de inundação restante correspondem a áreas suscetíveis em risco, no qual predominam áreas de alto risco com 9,56% (3,79 ha) e de médio risco com 6,03% (2,39 ha).

As inundações nesta sub-bacia estão associadas às cheias do córrego Melo Viana, caracterizado por um canal de drenagem muito sinuoso que influencia na baixa energia cinética do curso d'água, favorecendo inundações que se expandem lentamente pelas áreas mais planas próximas ao curso d'água onde predominam uma população de baixa renda, com altas taxas de analfabetismo e habitantes dependentes, além de péssimas condições sanitárias.

Tal situação leva esta sub-bacia a uma condição de média a alta vulnerabilidade social e sanitária, no qual implicaria ao poder público, mais atenção e esforços no combate de possíveis doenças endêmicas de veiculação hídrica e auxílio para recuperação socioeconômica das comunidades existentes no local.

Tabela 11 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia II

Classes	Área (Ha)	Área (%)
Áreas Suscetíveis não edificadas	19,13	78,08
Áreas de Médio Risco	0,00	0,00
Áreas de Alto Risco	5,37	21,92
Total	24,50	100,00

Fonte: Autor, 2020.

Observa-se que na tabela 11 a mancha de inundação compreendida na sub-bacia II incorpora 78,08% (19,13 ha) de áreas suscetíveis a inundações sem risco a estrutura urbana e comunidades (áreas suscetíveis não edificadas) e 21,92% (5,37 ha) de áreas suscetíveis de alto risco.

Os eventos de inundações nesta sub-bacia possuem condições próximas às descritas para sub-bacia I, ou seja, de baixa energia cinética, concentrada nas planícies fluviais, nos quais são ocupadas por comunidades de baixa renda com altas taxas de dependência e analfabetismo, ou seja, com elevado índice de vulnerabilidade social.

Em relação à vulnerabilidade sanitária porcentagens consideráveis de habitantes destes bairros não possuem acesso à água da rede geral de abastecimento, optando pelo uso da água proveniente de nascentes e outras fontes, bem como não possuem acesso à rede geral de esgoto, optando pelo lançamento das águas residuais no curso d'água. Tais características os enquadram em média vulnerabilidade sanitária, entretanto existe um potencial para ocupações irregulares que sem as devidas condições de infraestrutura sanitária podem desencadear doenças por veiculação hídrica após eventos de inundações.

Tabela 12 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia III

Classes	Área (ha)	Área (%)
Áreas Suscetíveis não edificadas	11,41	27,24
Áreas de Médio Risco	6,04	14,42
Áreas de Alto Risco	24,43	58,33
Total	41,88	100,00

Fonte: Autor, 2020.

Na sub-bacia III as áreas suscetíveis a inundações sem risco a estrutura urbana e comunidades (áreas suscetíveis não edificadas) equivalem a 27,24% (11,41 ha), enquanto que as áreas suscetíveis com risco equivalem a 72,75% (30,47 ha), sendo que a classe de alto risco possui 58,33% (24,43 ha) e a classe de médio risco 14,42% (6,04 ha) (Tabela 12).

Nesta sub-bacia predominam-se cursos d'águas sinuosos associados a trechos retificados do ribeirão caladão, caracterizados por canais de baixa profundidade, em torno de 2 metros. Tais condições perante alta precipitação influenciariam no acúmulo de água

formando inundações rápidas nos trechos sinuosos e inundações lentas nos trechos retificados, atingindo praticamente todos os bairros da sub-bacia (Figura 19).

Figura 19 - Inundação do Ribeirão Caladão no Bairro Surinan



Fonte: Adaptado InterTV dos Vales, 2015.

Apesar de apresentar melhores condições socioeconômicas e sanitárias, esta sub-bacia também apresenta um alto contingente populacional associado a altas taxas de vulnerabilidade, no qual se destacam os habitantes do bairro Santo Antônio.

O bairro Santo Antônio consiste em uma comunidade de baixas condições socioeconômicas e altas taxa de dependência, no qual seus habitantes não possuem acesso a água da rede geral e esgotamento sanitário adequado. Logo, consiste em uma área com população altamente vulnerável aos eventos de inundações e doenças de veiculação hídrica pós-desastres.

Tabela 13 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia IV

Classes	Área (ha)	Área (%)
Áreas Suscetíveis não edificadas	52,84	66,15
Áreas de Médio Risco	2,80	3,51
Áreas de Alto Risco	24,24	30,35
Total	79,88	100,00

Fonte: Autor, 2020.

Em relação à sub-bacia IV as áreas de inundações sem risco a estrutura urbana e comunidades (áreas suscetíveis não edificadas) consistem em 66,15% (52,84 ha), enquanto que as áreas suscetíveis e com risco consistem em 33,86% (27,04 ha), sendo classificadas em áreas de médio risco com 3,51% (2,80 ha) e áreas de alto risco com 30,35% (24,24 ha), esta última considerada a classe mais expressiva desta sub-bacia (Tabela 13).

As áreas sujeitas a inundações são caracterizadas por áreas as margens de cursos d'águas retilíneos na porção leste da sub-bacia, extremamente dissecada pela ação fluvial, associadas a trechos sinuosos localizados nas proximidades da confluência com o ribeirão Caladão, no qual reside maior parte da população desta sub-bacia.

Além de apresentar variados níveis de vulnerabilidade social, ressalta-se que 50% dos habitantes desta sub-bacia despejam suas águas residuais no curso d'água local, elevando o grau de vulnerabilidade sanitária e conseqüentemente aumentando a probabilidade de contaminação por doenças de veiculação hídrica, após eventos de inundações.

Em relação à sub-bacia V 23,77%, ou seja, 30,28 ha das áreas suscetíveis a inundações foram consideradas sem risco a estrutura urbana e comunidades, entretanto 76,23% (97,11 ha) apresentaram-se como áreas suscetíveis em risco, no qual se predominam a classe de médio risco com 55,47% (70,66 ha), classe mais representativa da sub-bacia, seguida da classe de alto risco com 20,76% (26,45 ha) (Tabela 14).

Tabela 14 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia V

Classes	Área (ha)	Área (%)
Áreas Suscetíveis não edificadas	30,28	23,77
Áreas de Médio Risco	70,66	55,47
Áreas de Alto Risco	26,45	20,76
Total	127,39	100,00

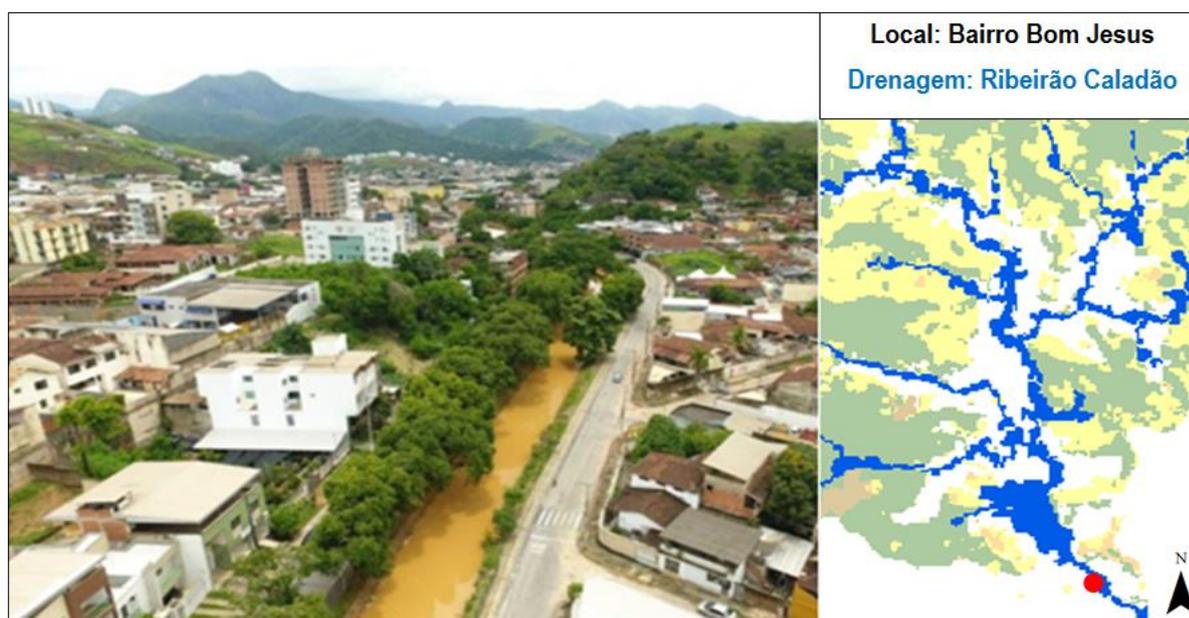
Fonte: Autor, 2020.

Observa-se no mapa 11 que as áreas classificadas como de alto risco estão em sua maioria localizadas a montante da sub-bacia no entorno do ribeirão Caladão e do córrego São Domingos, enquanto que pequenas glebas localizam-se mais próximo da jusante nos bairros Santa Terezinha e Bom Jesus.

Destaca-se que nestes bairros o ribeirão Caladão passou por obras de macrodrenagem que retificaram o curso d'água com aprofundamento do seu canal, facilitando o escoamento rápido das águas (Figura 20).

Entretanto, em situações esporádicas, em que o curso d'água atinge a cota máxima no período de cheias, as áreas inundáveis nestes bairros são consideradas de alto risco.

Figura 20 - Cheia do Ribeirão Caladão no Bairro Bom Jesus

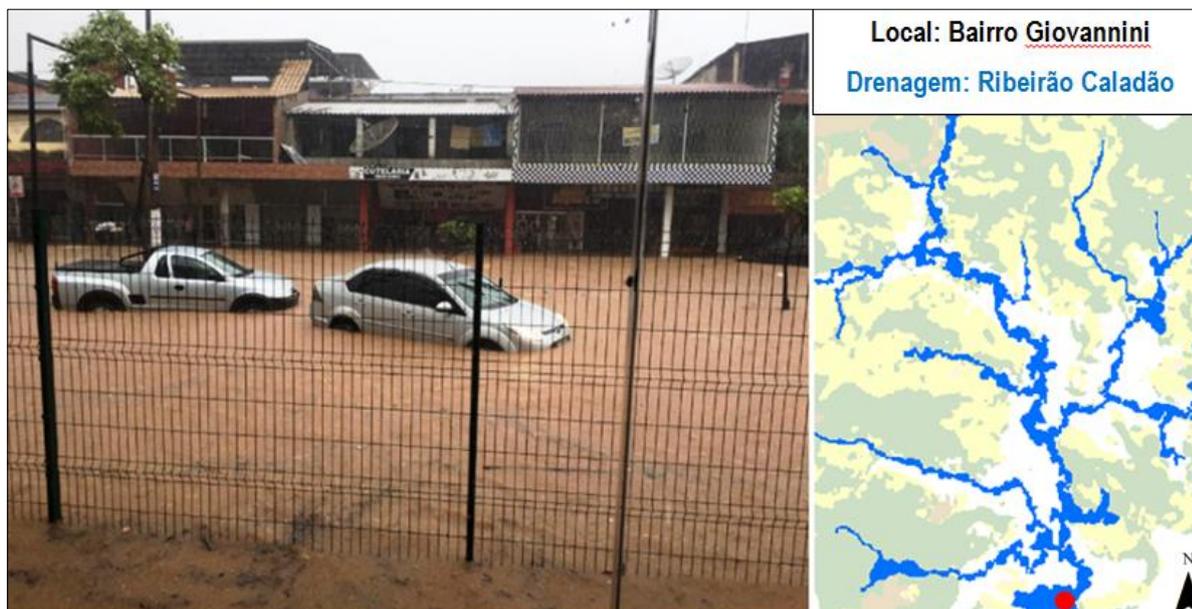


Fonte: Adaptado de Diário do Aço, 2020.

Os bairros Recanto Verde e São Domingos, ambos localizados a montante da sub-bacia V, são caracterizados por áreas com uma população altamente vulnerável, predominando uma população numerosa e de baixa renda com alta taxa de habitantes sem acesso a rede de esgoto.

Entretanto, os bairros Julia Kubistchek, Giovannini e Melo Viana, também compreendidos na sub-bacia V, são caracterizados por uma população de média vulnerabilidade social, com baixa densidade demográfica associada a uma densa estrutura comercial (Figura 21).

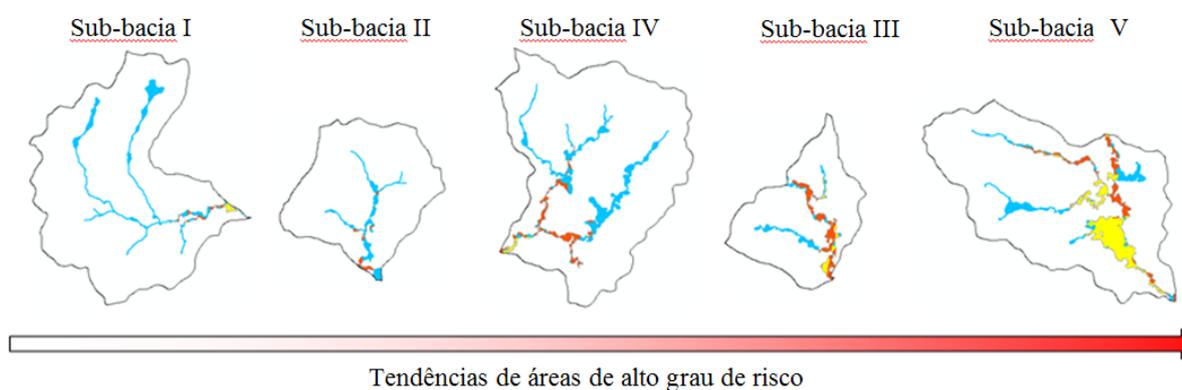
Figura 21 - Inundação do Ribeirão Caladão no Bairro Giovannini



Fonte: Adaptado de Jornal Diário do Aço, 2017.

Diante das informações apresentadas, nota-se que as sub-bacias V com 26,45 ha, a sub-bacia III com 24,43 ha e a sub-bacia IV com 24,24 ha, compreendem as maiores áreas de alto grau de risco, enquanto que a sub-bacia I, menos representativa, compreende 3,79 ha de áreas inundáveis de alto risco (Figura 22).

Figura 22 - Classificação das sub-bacias quanto à tendência de áreas de alto grau de risco

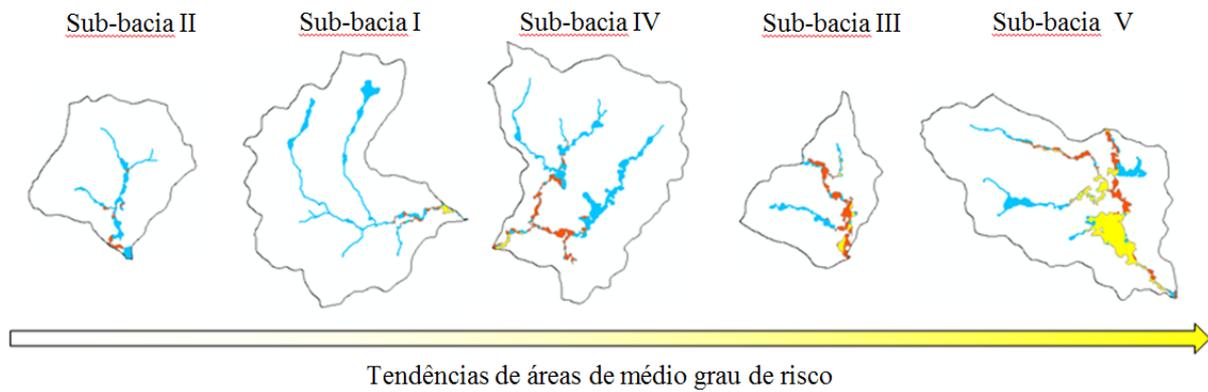


Fonte: Autor, 2020.

Classificando as sub-bacias quanto ao grau médio de risco, nota-se que as sub-bacias V com 70,66 ha (55,47%) e III com 24,43 ha (58,33%) apresentam maiores tendências,

enquanto que a sub-bacia II consiste na sub-bacia menos representativa, devido não apresentar nenhuma área em médio grau de risco (Figura 23).

Figura 23 - Classificação das sub-bacias quanto à tendência de áreas de médio grau de risco



Fonte: Autor, 2020.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa apresentou uma metodologia para mapeamento de áreas de risco de fácil aplicação, utilizando-se da modelagem de variáveis do quadro de suscetibilidade e vulnerabilidade em ambiente de geotecnologia SIG.

O banco de dados referente ao quadro de suscetibilidade favoreceu o reconhecimento preliminar das características fisiográficas da BHRC e suas sub-bacias, facilitando o conhecimento do seu comportamento hidrológico. Entretanto a análise isolada dos variáveis morfológicas não foi capaz de explicar a dinâmica hidrológica da bacia, sendo necessária uma combinação que resultou na análise integrada destas variáveis, através da modelagem em ambiente SIG.

Ressalta-se que a modelagem das variáveis consistiu em processo lento devido à quantidade de dados a serem processados e organizados para a montagem do banco de dados, mas nas etapas posteriores notou-se que os resultados foram apresentados de forma ágil e eficaz demonstrando o alto desempenho da utilização desta tecnologia para avaliação dos fenômenos de inundações.

Em relação ao banco de dados referentes ao quadro de vulnerabilidade, observou-se, através da produção do referencial teórico, que a utilização dos dados dos setores censitários é essencial no desenvolvimento de estudos destinados vulnerabilidade a inundações, pois estes dados favorecem na avaliação dos impactos socioeconômicos durante e pós-eventos de inundações, logo, consistindo na informação mais precisa e atualizada sobre os municípios brasileiros.

A metodologia da avaliação da vulnerabilidade baseada na associação da proposta metodológica de Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012) com a proposta de Furlam e Murara (2018) se tornou fundamental, pois favoreceu simultaneamente no mapeamento e avaliação dos impactos socioeconômicos e qualidade de vida da população local durante e pós-eventos de inundações, principalmente no pós-eventos, quando indica as comunidades mais vulneráveis a epidemias de veiculação hídrica.

A modelagem aplicada na definição da suscetibilidade e vulnerabilidade demonstrou-se adequada aos objetivos propostos nesta pesquisa, entretanto a análise se torna generalizada sem a delimitação do fenômeno da inundação, logo se tornou imprescindível o recorte espacial destes dados através do M-HAND, que favoreceu na identificação espacial da

área potencial a ocorrência de inundação e avaliação das condições hidrológicas de ocorrência, impacto e consequência sócio sanitárias.

O modelo de risco gerado a partir da integração dos softwares de geotecnologias ambientadas em SIG, neste caso Terraview e ArcGIS, se tornou fundamental para a pesquisa, pois deste modo foi possível associar as avaliações da dinâmica hidrológica das áreas suscetíveis a inundações com as avaliações de vulnerabilidade sócio sanitárias favorecendo a identificação e classificação das áreas de risco.

Mediante a análise das áreas de risco de inundação na BHRC, evidencia-se que a ocorrência do fenômeno está vinculada a ocupação urbana acelerada nas planícies fluviais, afetando as condições de escoamento superficial que por sua vez sobrecarrega o sistema de drenagem local.

Reconhece nesta pesquisa que o poder público local tem solucionado pontualmente os problemas de inundação, entretanto as obras de macrodrenagem têm sido mais eficientes nas áreas mais nobres do município, não atingindo a população mais vulnerável que apesar de possuir a previsibilidade do fenômeno, não possui condições de resiliência após os eventos, sofrendo grande parte das consequências deste fenômeno.

A modelagem aplicada confirmou o potencial das geotecnologias ambientadas em SIG, no mapeamento das áreas de risco a inundações e simultaneamente garantiu a elaboração de um banco de dados robusto e produtos cartográficos para estudos posteriores com referência ao planejamento e gestão territorial diante fenômenos de inundação.

Como perspectivas para trabalhos futuros recomenda-se um levantamento pedológico mais preciso da área de estudo, bem como o cadastro das populações vulneráveis visando a melhoria dos modelos de suscetibilidade e vulnerabilidade.

Além disso, recomenda-se a padronização em nível municipal na avaliação do fenômeno de inundação, visando o abastecimento do banco de dados de informações mais coerentes e precisas, bem como a expansão da metodologia, adotando-se variáveis de importância estratégicas no ordenamento territorial do município, compatibilizando o mapa de risco a inundações com toda a base de dados municipal.

REFERÊNCIAS

- BITAR, O.Y.. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações : 1:25.000 (nota técnica explicativa)**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2014.
- BORJA, P.C.. **Política pública de saneamento básico: uma análise da recente experiência brasileira**. Revista Saúde e Sociedade, Vol. 26, Nº 2, 2014.
- BRASIL. Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2007.
- BRASIL. Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). **Capacitação em Mapeamento e Gerenciamento de Risco**. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, Florianópolis, 2004.
- BRASIL. **Instrução Normativa nº 1, 24 de agosto de 2012**. Estabelece procedimentos e critérios para a decretação de situação de emergência ou estado de calamidade pública pelos Municípios, Estados e pelo Distrito Federal, e para o reconhecimento federal das situações de anormalidade decretadas pelos entes federativos e dá outras providências. Diário Oficial da União, DF, seção 1, p. 30-39, 30 de ago. de 2012.
- CAJAZEIRO, J.M.D. **Análise da Susceptibilidade à formação de inundações nas bacias e áreas de contribuição do Ribeirão Arrudas e Córrego da Onça em termos de índices morfométricos e impermeabilização**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- CÂMARA, G.. **Análise espacial e geoprocessamento**. In: CÂMARA G.; MONTEIRO, A. M.; MEDEIROS, J. S. de. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos, INPE, 2004.
- CARVALHO, M.B.de. **Mapeamento das suscetibilidades a inundações e movimentos de massa usando SIG no município de Itajubá, MG**. Dissertação (Mestrado em Ciências Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2018.
- CASTRO, A. L. C. **Manual de Desastres: desastres naturais**. Brasília: Imprensa Nacional, 1998. 182 p.
- CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais**. Secretaria Nacional de Defesa Civil e Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres: CEPED, UFSC. Florianópolis. 2013.
- COELHO. **Compartimentação Geomorfológica da Bacia do Rio Doce: uma atualização**. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia – Geomorfologia Tropical e Subtropical: processos métodos e técnicas. Goiânia, 2006.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. **Projeto Leste: Folha Coronel Fabriciano – SE-23-Z-D-V, escala 1:100.000.** SEME/COMIG/CPRM, Belo Horizonte, 2000.

CONGALTON, R. G., GREEN, K.. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and practices.** CRC Press – Taylor & Francis Group, New York, 1999.

COUTINHO, L. M., NASCIMENTO, K. A.. **Influência de padrões morfométricos sobre as ocorrências de inundações na bacia do Córrego Cobiça, Cachoeiro de Itapemirim-ES.** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Censuriamento Remoto - SBSR, INPE, Foz do Iguaçu, PR 2013.

CRISTOFOLETTI, A.. **Geomorfologia.** São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

CUTTER, S. L. **A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores.** Revista Crítica de Ciências Sociais, Coimbra, n. 93, p. 59-69, 2011.

DANTAS, C. G. **Experiências e aprendizado: Rio Aricanduva: prevenção, resposta e mitigação. In: Melhor prevenir: Olhares e saberes para a redução de risco de desastre.** SULAIMAN, S. N.; JACOBI, P. R. São Paulo: IEE-USP, 2018.

JORNAL DIÁRIO DO AÇO. [Inundações]. **Chuva forte inunda pontos em Coronel Fabriciano.** Ipatinga, 11 dez. 2017. Disponível em <<https://www.diariodoaco.com.br/noticia/0055218-chuva-forte-inunda-pontos-em-coronel-fabriciano>> Acesso em: 19 jun. 2020.

JORNAL DIÁRIO DO AÇO. [Inundações]. **Coronel Fabriciano soma 293 pessoas desalojadas por causa das chuvas.** Ipatinga, 27 jan. 2020. Disponível em <<https://www.diariodoaco.com.br/noticia/0075300-coronel-fabriciano-soma-293-pessoas-desalojadas-por-causa-da-chuva>> Acesso em: 19 jun. 2020.

JORNAL INTERTV DOS VALES. [Inundações]. **Chuva forte provoca alagamentos em Coronel Fabriciano, MG.** Ipatinga, 01 dez. 2015. Disponível em <<http://g1.globo.com/mg/vales-mg/noticia/2015/12/chuva-forte-provoca-alagamentos-em-coronel-fabriciano-mg.html>> Acesso em: 19 jun. 2020.

FEAM - UFV - CETEC - UFLA. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p.

FITZ, P. R.. **Geoprocessamento sem Complicação.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Plano de desenvolvimento Integrado do aglomerado Urbano do Vale do Aço - Sítio Natural.** Belo Horizonte-MG, 1978.

FURLAM, A.; MURARA, P.. **Análise de risco a partir do setor censitário na área urbana de Erechin, Rio Grande do Sul, Brasil.** Revista de Geografia e Ordenamento do Território, nº 13, p. 177 -201, 2018.

GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M.; PELLEIN, J. R. G. M. **Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: Estudo de caso do município de Rio Negrinho - SC.** In: Boletim de Geografia, Maringá, v. 30, n. 1, p. 81-100, 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). **Censo Demográfico - 2010.** Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em 30 de março de 2019.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil (1981-2010).** Disponível em <www.inmet.gov.br> Acesso em janeiro de 2020, Brasília, DF, 2020.

JULIÃO, R. P.; NERY, F.; RIBEIRO, J. L.; BRANCO, M. C.; ZÊZERE, J. L. **Guia Metodológico para Produção de Cartografia Municipal de Risco e para Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de base Municipal.** Porto/Portugal: Autoridade Nacional de Proteção Civil. 2009.

K JHA, A.; BLOCH, R.; LAMOND, J. **Cidades e Inundações: Um guia para a Gestão Integrada do Risco de Inundação Urbana para o Século XXI.** Brasília: Banco Mundial, 2012, p. 53 p. Disponível em: <https://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/cidades_e_inundacoes.pdf>. Acesso em: 19 Ago. 2019.

KOBİYAMA, M.; CHECCHIA, T.; SILVA, R.V.; SCHRÖDER, P.H.; GRANDO, A.; REGINATTO, G.M. P. **Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p.834-846.

KOBİYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. de O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MORELLI, G. S. F.; RUDORFF, F. de M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos.** Florianópolis: Organic Trading, 2006. 109 p. Disponível em: <[http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/Livro%20\(Prevencao%20de%20Desastres%20Naturais\).pdf](http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/Livro%20(Prevencao%20de%20Desastres%20Naturais).pdf)>. Acesso em: 19 Ago. 2019.

LANDIS, J. R.; KOCH, G.G.. **The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data.** Source: Biometrics, Vol. 33, No. 1, 1977.

LUIZ, C. H. P.. **Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem: Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço.** Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, UFMG, Belo Horizonte. 2014.

MANSIKKANIEMI, H. **The sinuosity of rivers in northern Finland.** Publicationes Instituti Geographici Universitatis Turkuensis, v. 52, p. 16-32, 1970.

MARANDOLA JUNIOR, E. **As escalas da vulnerabilidade e as cidades: interações trans e multiescalares entre variabilidade e mudanças climáticas.** OJIMA, R; MARANDOLA JUNIOR, E.. São Paulo: BLUCHER, 2013.

MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos.** São José dos Campos: INPE, 2008.

MENDONÇA, F.; DESCHAMPS, M.; LIMA, M. D. V.. **A cidade e as mudanças globais (intensificação?) Riscos e vulnerabilidades socioambientais na RMC – Região Metropolitana de Curitiba/PR.** OJIMA, R; MARANDOLA JUNIOR, E.. São Paulo: BLUCHER, 2013.

MENEGASSO, J. D.. **Mapeamento do risco de inundação na bacia hidrográfica do Rio Belo, Orleans, SC.** Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma-SC, 2019.

MENEZES, J. P. C. et al. **Morfometria e evolução do uso do solo e da vazão de máxima em uma micro bacia urbana.** Revista Brasileira de Geomorfologia v. 15, nº 4, 2014.

MENGUE, V. P.; SCOTTÁ, F. C.; SILVA, T. S. da.; FARINA, F. **Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai.** Pesquisas em Geociências, Porto Alegre, v. 43, n. 1, p.41-53, jan./abr. 2016.

MOURA, C.A. **Análise morfométrica como instrumento na identificação de tendência a enchentes.** In: IX SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia, 9, 2012, Rio de Janeiro. Anais Geomorfologia Fluvial. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

MOURA, R. B.. **Angra dos Reis Resiliência pós-desastre de 2009/2010.** SULAIMAN, S. N; JACOBI, P. R. São Paulo: IEE-USP, 2018.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia Estatística.** CPRM, 2007.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. **Height above the Nearest Drainage, a hydrologically relevant new terrain model.** Journal Hydrology. v. 404, n. 1-2, p.13–29, 2011. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.051.

OLÍMPIO, J. L., ZANELLA, M. E.. **Riscos naturais: conceitos, componentes e relações entre natureza e sociedade.** Revista Raega - UFPR – vol.40 - Curitiba, 2017.

PNUD. **Relatório do Desenvolvimento Humano 2014 Sustentar o Progresso Humano: Reduzir as Vulnerabilidades e Reforçar a Resiliência.** Washington DC, EUA: Communications Development Incorporated, 2014. 231 p. Disponível em: <http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr2014_pt_web.pdf>. Acesso em: 19 Ago. 2019.

PREFEITURA DE CORONEL FABRICIANO. Limite de Bairro. Drenagem Urbana – Proteção contra cheias. Retirado em: <<https://www.fabriciano.mg.gov.br/>> Acesso em: 26/10/2019.

RENNÓ, C.D., A.D. NOBRE, L.A CUARTAS, J.V. SOARES, M.G. HODNETT, J. TOMASELLA and M.J. WATERLOO. **HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia.** Remote Sensing of Environment 112: 3469-81, 2008.

RIGH, E.. **Metodologia para zoneamento de risco a inundações graduais.** Dissertação (Mestrado em Ciências Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Ciências,

Programa de Pós-Graduação Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2016.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F. GENOVEZ, A. M.. **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos– vol.10, n.4 - São Paulo, 2005.

SANTOS, Milton. **Por uma outra Globalização**. São Paulo: Record, 2000.

SANTOS, F. M.; LOLLO J. A. **Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 21, n. 4, p. 663-675, 2016.

SENTINEL-2_TEAM. **Imagem de satélite**. European Space Agency, 2015. Disponível em: <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/sentinel-data-access>> Acesso em 07 jun. 2019.

S2iD (2015) **Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres - S2iD**. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil – SEDEC. Disponível em: <<http://S2iD.mi.gov.br/>> Acesso em 20 abr. 2020.

SIRANGELO, F. R.. **Relação entre a ocorrência de inundações e enxurradas e os índices morfométricos das sub-bacias hidrográficas da região hidrográfica do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil 2014**. Programa de Pós-Graduação em Censoriamento Remoto, UFRGS, Rio Grande do Sul. 2014.

SOUZA, C. R. G.. **Suscetibilidade morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras**. Revista Brasileira de Geomorfologia, Ano 6, Nº 1, 2005.

SPECKHANN, G. A.. **Uma proposta de mapeamento de risco de inundação na bacia do Rio Itajaí utilizando descritores de terreno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-PR, 2018.

STRAHLER, A. N. **Hypsometric analysis of erosion topography**. Bulletin of the Geological Society of America, v. 63, n. 11, 1952, pp. 1117-1142, 1952.

TEODORO, V. L. I. et. al. **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. Araraquara: Revista Uniara, n. 20, 2007, p. 137-155.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do. (Org). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. Instituto Geológico, São Paulo, 2009.

TUCCI, C. (2008). **Águas urbanas**. Estudos Avançados, 22(63), 97-112. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10295>> Acesso em: 20 abr. 2019.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Ministério das Cidades – Global Water Partnership - World Bank – Unesco 2005.

TUCCI, C. E. M., SILVEIRA, A. L. L. (orgs). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.

TUCCI, C.E.M. **Água no meio urbano**, in: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA,B.; TUNDISI, J.G.. **Águas Doces No Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação**, São Paulo: Escrituras, 2014.

UNISDR – UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION. **Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives**. Vol. II – Annexes. Geneva: UNISDR, 2004.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE-SOIL CONSERVATION SERVICE – USDA-SCS. **National engineering handbook, hydrology section**. Washington, D.C.: USDA-SCS, 1972.

VILLELA, M.S.; MATTOS, A.. **Hidrologia aplicada**. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1975.

