

MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO A INUNDAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO CALADÃO – CORONEL FABRICIANO/MG

Vlamir Soares Fonseca

Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – UNILESTE, Coronel Fabriciano, MG, Brasil
vlamirsoares@yahoo.com.br

Daniel Brasil Ferreira Pinto

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia, Teófilo Otoni, MG, Brasil
daniel.brasil@ufvjm.edu.br

Caio Mário Leal Ferraz

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia, Teófilo Otoni, MG, Brasil
caio.ferraz@ufvjm.edu.br

Ivan Carlos Carreiro Almeida

Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – IFNMG, Teófilo Otoni, MG, Brasil
ivan.almeida@ifnmg.edu.br

Alexandre Faissal Brito

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Instituto de Ciência, Engenharia e Tecnologia, Teófilo Otoni, MG, Brasil
alexandre.faissal@ufvjm.edu.br

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão (BHRC), localizada no município de Coronel Fabriciano/MG, tem passado desde a década de 60 por uma acelerada ocupação desordenada que associada às condições naturais peculiares formam um arcabouço de condicionantes fisiográficos e antrópicos que resultam em áreas de risco a inundações. Diante deste fato, objetivou-se identificar e classificar as áreas de risco a inundações na BHRC utilizando-se os softwares Terra View Hidro 0.4.5 e ArcGIS 10.8, utilizando-se a técnica de álgebra de mapas para elaboração dos modelos de suscetibilidade e vulnerabilidade delimitados pelo modelo HAND (Height Above Nearest Drainage), resultando no modelo de risco a inundações. Os resultados demonstraram que 53,03% das áreas suscetíveis a inundações 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 presente pesquisa culminou em uma carta de risco a inundações que caracteriza o fenômeno e a condições de vulnerabilidade da BHRC, baseando-se em um método efetivo e de baixo custo que pode ser aplicado em outros municípios brasileiros.

Palavras-chave: Características fisiográficas. Sistema de Informações Geográficas. Suscetibilidade. Vulnerabilidade. Risco.

MAPPING RISK AREAS TO FLOODS USING GIS ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGIES: CASE STUDY OF THE RIBEIRÃO CALADÃO HYDROGRAPHIC BASIN - CORONEL FABRICIANO/MG

ABSTRACT

The Ribeirão Caladão Hydrographic Basin (BHRC), located in the municipality of Coronel Fabriciano / MG, has passed since the 1960 an accelerated disorderly occupation that, associated with the peculiar natural conditions, form a framework of physiographic and anthropic conditions that result in areas at risk of flooding. Given this fact, the objective was to identify and classify the areas at risk of flooding in BHRC using the software Terra View Hidro 0.4.5 and ArcGIS 10.8, using the algebra technique of maps to elaborate the models of susceptibility and vulnerability delimited by the model HAND (Height Above Nearest Drainage), resulting in the flood risk model. The results showed that 53.03% of the areas susceptible to flooding are considered at risk and are located in all sub-basins of BHRC, with sub-basins III and V concentrating the majority of the population in areas of high degree of

risk. The present research culminated in a flood risk letter that characterize the phenomenon and the vulnerability conditions of BHRC, based on an effective and low cost method that can be applied in other Brazilian municipalities.

Keywords: Physiographic characteristics. Geographic Information System. Susceptibility. Vulnerability. Risk.

INTRODUÇÃO

A ocorrência de inundações tem sido frequente em áreas urbanizadas, sendo consequências destrutivas das interações das características fisiográficas e antrópicas de uma bacia. Os desequilíbrios resultantes dessas interações têm origem na carência de políticas públicas de ordenamento territorial, diante de um desenvolvimento urbano acelerado ocorrido nas cidades brasileiras entre as décadas de 1950 e 1980.

Segundo Tucci (2002), as grandes cidades e regiões metropolitanas têm apresentado um desenvolvimento urbano concentrado que tem ampliado 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.

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 o Atlas de Desastres Naturais de Minas Gerais (2013), entre os anos de 1991 e 2012 foram observados 1.155 registros oficiais de inundações bruscas no estado, no qual a mesorregião do vale do Rio Doce apresentou 19% destes registros.

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).

Diante do exposto, fica evidente que 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.

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

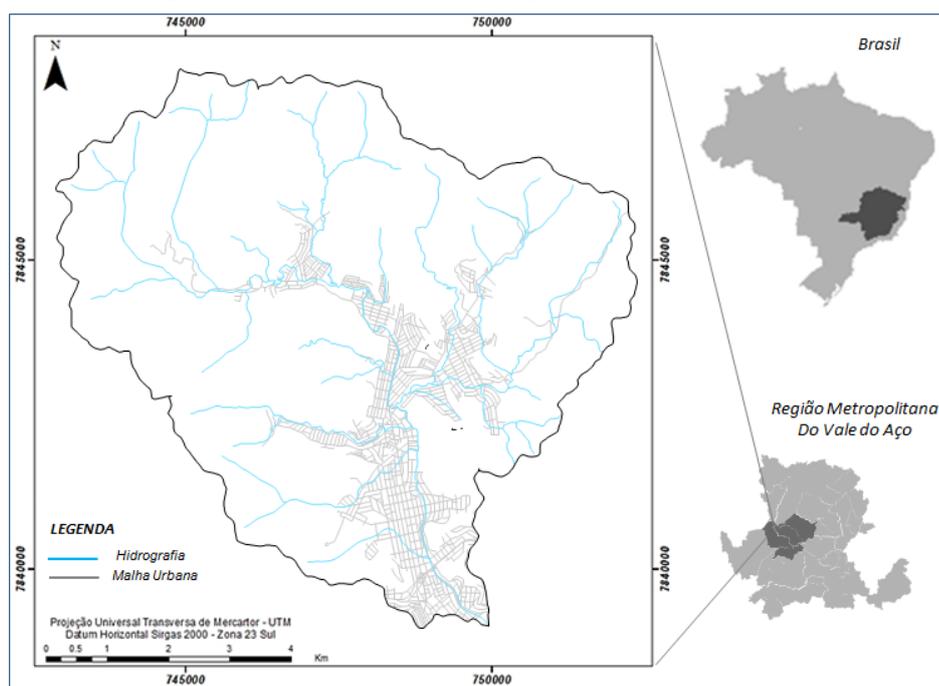
Neste contexto o objetivo deste trabalho é mapear as áreas de risco a inundações na BHRC, utilizando geotecnologias ambientadas em SIG, que consiste em um método efetivo e de baixo custo, no qual se espera tornar um instrumento de gestão de desastres eficiente em âmbito municipal.

MATERIAIS E MÉTODOS

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 estruturalmente direcionado no qual se concentra quase que em sua totalidade a área urbana do município (Figura 1).

Figura 1 - Localização da bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão.



Fonte - Organizado pelos autores, 2020.

Hidrograficamente a BHRC é constituída pelo Ribeirão Caladão e os 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. Desde a década de 60 este núcleo urbano, tem passado por um crescimento populacional acelerado que vem alterando a cobertura do solo e potencializando a formação de áreas de risco a inundações.

Historicamente os desastres ocasionados por inundações 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).

Atualmente a área urbanizada corresponde a 15,3% (812,14 ha) da BHRC, no qual residem 69.448 habitantes concentrados em planícies aluviais modeladas pela deposição escalonada de sedimentos relativamente recentes e altamente suscetíveis a inundações frequentes.

Em relação à ocupação das planícies aluviais, 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.

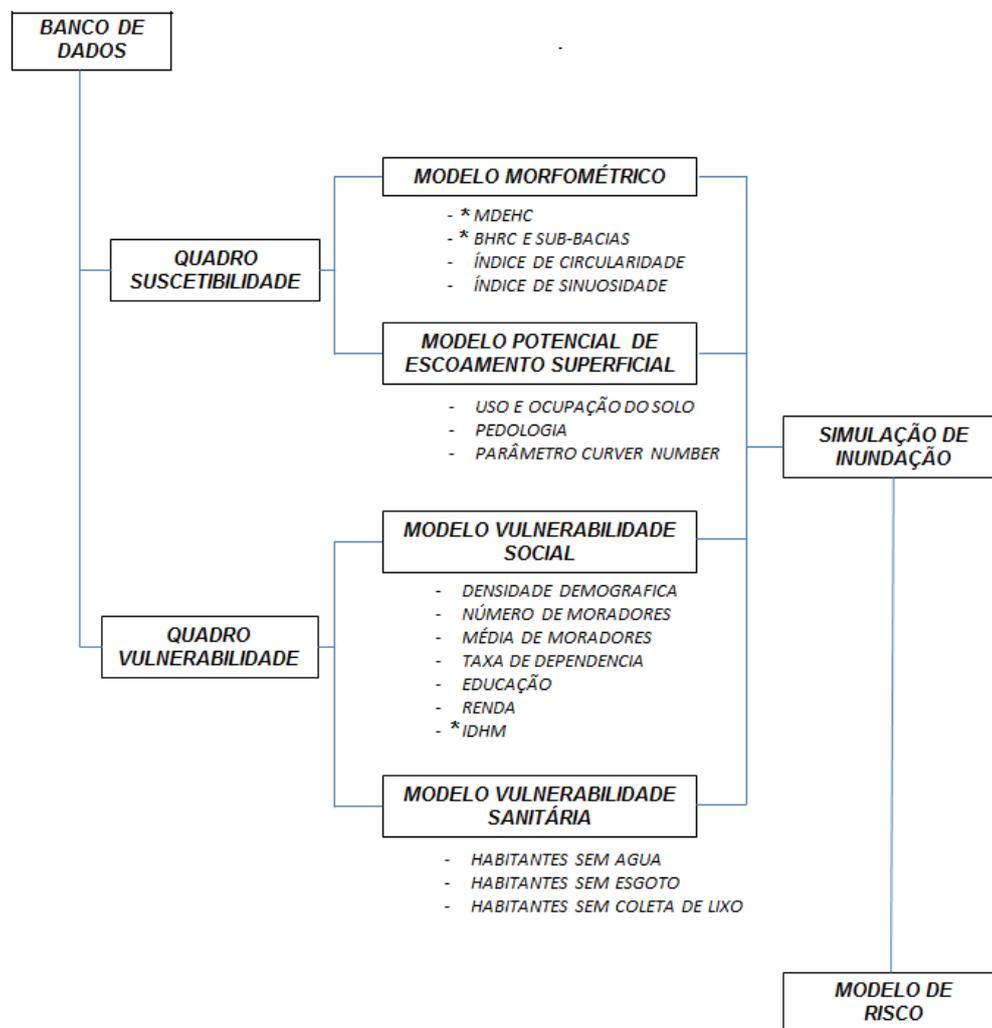
Ressalta-se que as superfícies da BHRC se apresentam profundamente alteradas no contexto hidrológico, visto que em função da expansão da malha urbana causou uma extensa impermeabilização do solo, aumentando assim a parcela de escoamento superficial.

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 representado pela Figura 2:

Figura 2 - Etapas do método de pesquisa.



*MDEHC: Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente; *BHRC: Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão; *IDHM: Índice de Desenvolvimento Humano Municipal.

Fonte - Organizado pelos autores, 2020.

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 conseqüentemente culminou no modelo de risco a inundações.

Quadro de suscetibilidade

O quadro de suscetibilidade a inundações consistiu em identificar as variáveis fisiográficas e antrópicas que influenciam o processo de inundações na BHRC e conseqüentemente explicariam a

dinâmica do fenômeno. Diante das informações foi possível classificar as sub-bacias¹ 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.

Modelo morfométrico

O modelo morfométrico consistiu no resultado do processamento do MDE – modelo digital de elevação associado ao mapeamento da hidrografia por imagens de satélite, em ambiente SIG, visando à identificação das sub-bacias suscetíveis à inundação através da caracterização fisiográfica da BHRC.

O MDE advindo de imagens do sensor PALSAR do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), com resolução espacial de 12,5 metros, foi processado no software ArcGIS 10.8 resultando no Modelo de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC), no qual foi possível determinar os limites da BHRC e suas sub-bacias, através da classificação da hidrografia pelo método de Stralher, descrito em Tucci (2001).

A partir da discretização das sub-bacias, procedeu-se a extração dos parâmetros morfométricos: área (A), Perímetro (P), Comprimento do canal principal (L), distância Vetorial entre pontos extremos do canal (Dv) e na sequência a determinação dos índices morfométricos de circularidade (IC) e de sinuosidade (IS).

Modelo 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 de áreas carentes de dados hidrológicos.

O mapa pedológico consistiu no processamento da base de dados do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais (FEAM, 2010), enquanto que o mapa de uso e ocupação foi elaborado a partir da imagem do satélite Sentinel 2 (ESA, 2019) empregando-se o método de classificação supervisionada por máxima verossimilhança seguido da validação do modelo através do índice Kappa que apresentou uma acurácia de K=0,90.

Em seguida foi realizado o cruzamento dos dados, utilizando a técnica de álgebra de mapas, em ambiente SIG, identificando-se o parâmetro *curve number* (CN) para cada classe de uso e ocupação do solo em conformidade com o grupo hidrológico existente (Quadro 1).

Quadro 1 - Valores de *Curve Number* (CN) para as classes de uso e ocupação do solo

CN	Uso e ocupação do solo quanto ao grupo hidrológico
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).

¹ O distinto comportamento hidrológico em cada porção da BHRC tornou imprescindível para esta pesquisa, adotar unidades menores (sub-bacias) para melhor caracterizar o comportamento das inundações.

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

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 modelo digital *Heigh Above the Nearest Drainage* (HAND).

Para produção do M-HAND, 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.

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 a partir do nível de base.

Quadro de vulnerabilidade

O quadro de vulnerabilidade consistiu em identificar as variáveis socioeconômicas e sanitárias que influenciam na capacidade de resiliência da população local diante de eventos de inundações, resultando nos modelos de vulnerabilidade social e vulnerabilidade sanitária. Empregando-se a técnica de álgebra de mapas, presente no software ArcGIS 10.8, executou-se o cruzamento destes modelos, com posterior recorte espacial através da mancha de áreas inundáveis.

Modelo de Vulnerabilidade Social

Adotou-se o método proposto por Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012), no qual foram selecionadas variáveis do Censo Demográfico 2010, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Quadro 2 - 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	Soma da porcentagem da população acima de 65 e abaixo de 12 anos (TxD)
% da população abaixo de 12 anos	
% de pessoas analfabetas acima de 12 anos	% de pessoas analfabetas acima de 12 anos (E)
% de responsáveis sem rendimento	Soma da porcentagem dos responsáveis sem rendimento e com rendimento de até 1 Salário mínimo (R)
% de responsáveis com rendimento até 1 salário mínimo	

Fonte - Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012, p. 91).

Diante das diversas dimensões e unidades das variáveis selecionadas foi necessário uniformizá-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).

$$V_{\text{escalonado}} = \frac{V_{\text{observado}} - V_{\text{mínimo}}}{V_{\text{máximo}} - V_{\text{mínimo}}} \quad (\text{Eq. 1})$$

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

$$IVS = \frac{Dd + Nm + Mm + TxD + E + R}{IDHM} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: 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) e IDHM: é o Índice de Desenvolvimento Humano do Município.

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 Quantil, com posterior recorte espacial através da mancha de áreas inundáveis gerada na simulação de inundações.

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 3).

Quadro 3 - 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 à 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).

O método adotado 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.

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

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

Onde: IVSA é o Índice de Vulnerabilidade Sanitária, % H é a porcentagem de habitantes sem acesso a rede de água geral, % E é a porcentagem de habitantes sem acesso à ligação do esgoto ligado na

rede geral e % L é a porcentagem de habitantes sem acesso a serviços de coleta de lixo e Total (%) é a porcentagem de habitantes sem acesso aos serviços básicos de saneamento.

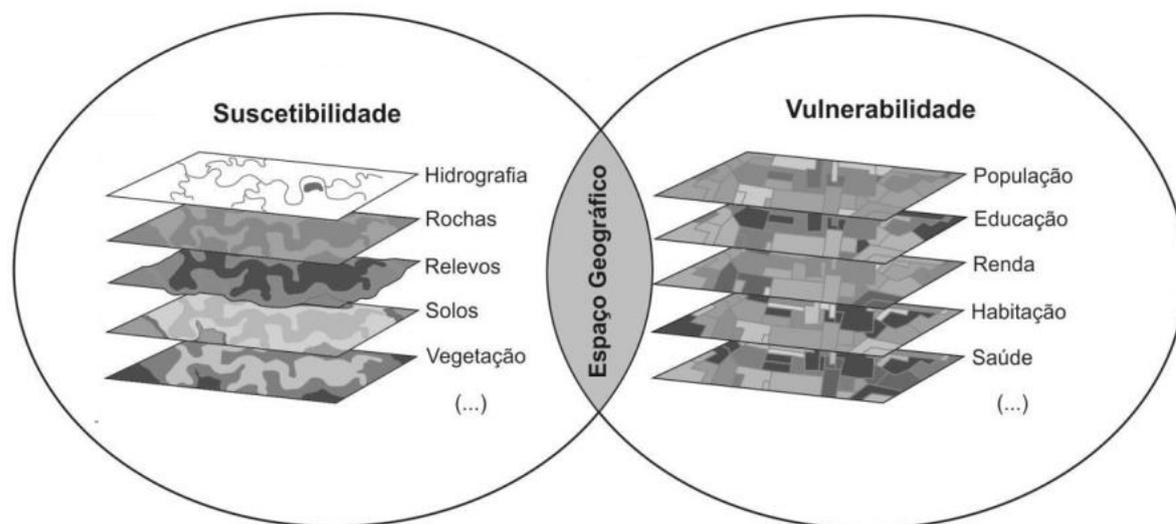
Após o cálculo do índice de vulnerabilidade sanitária de cada setor censitário compreendido nos limites da BHRC, procedeu-se com sua espacialização optando pela sua representação em três classes de vulnerabilidade (baixa, média e alta) definidas em ambiente SIG, utilizando o método Quantil, com posterior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

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, Média e Baixa. 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 morfométricos, potencial de escoamento superficial, vulnerabilidade social e vulnerabilidade sanitária, recortados espacialmente de acordo com a mancha de áreas inundáveis gerada na simulação de inundações (Figura 3).

Figura 3 - Cruzamento de dados na elaboração de mapas de risco via SIG.



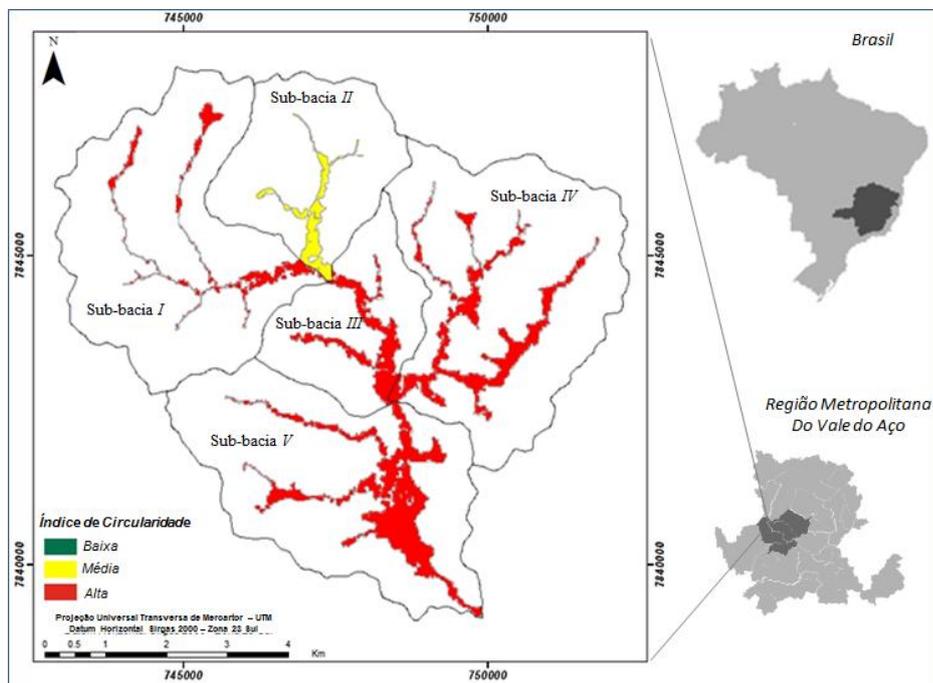
Fonte - Adaptado de Olímpio & Zanella (2017, p. 100).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

A Figura 4 apresenta as sub-bacias da BHRC classificadas conforme o índice de circularidade referente ao modelo morfométrico associado ao recorte espacial do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND).

Figura 4 - Modelo morfométrico (índice de circularidade) das sub-bacias da BHRC, recortados espacialmente através do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND).

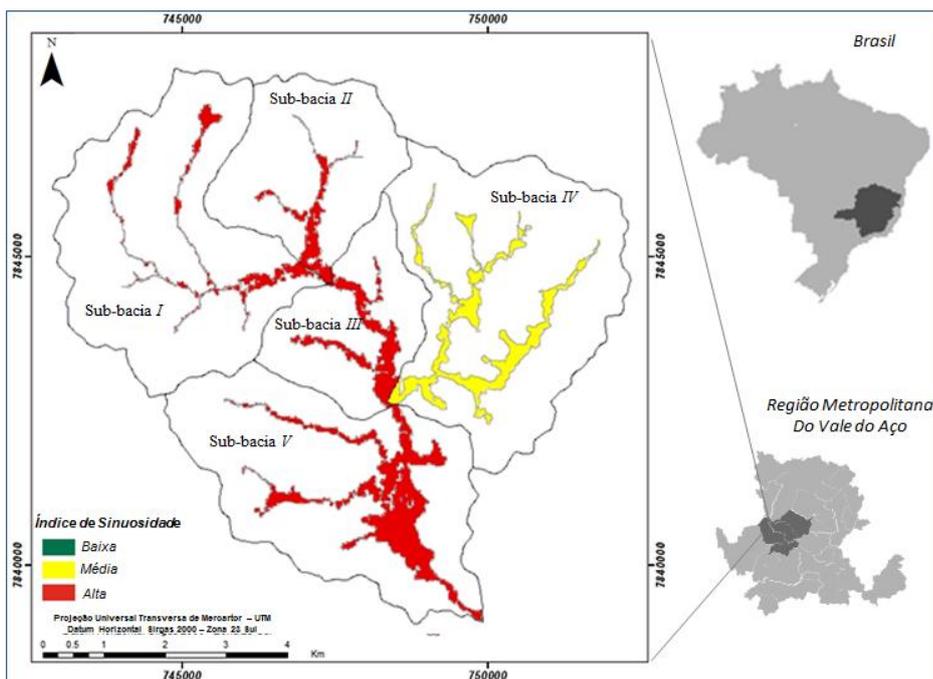


Fonte - Organizado pelos autores, 2020.

Observa-se que a sub-bacia II possui médio grau de suscetibilidade em contraponto as demais sub-bacias que possuem alto grau e que indicam maiores tendências a processos de inundações.

A Figura 5 apresenta as sub-bacias da BHRC classificadas conforme o índice de sinuosidade.

Figura 5 - Modelo morfométrico (índice de sinuosidade) das sub-bacias da BHRC, recortados espacialmente através do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND).

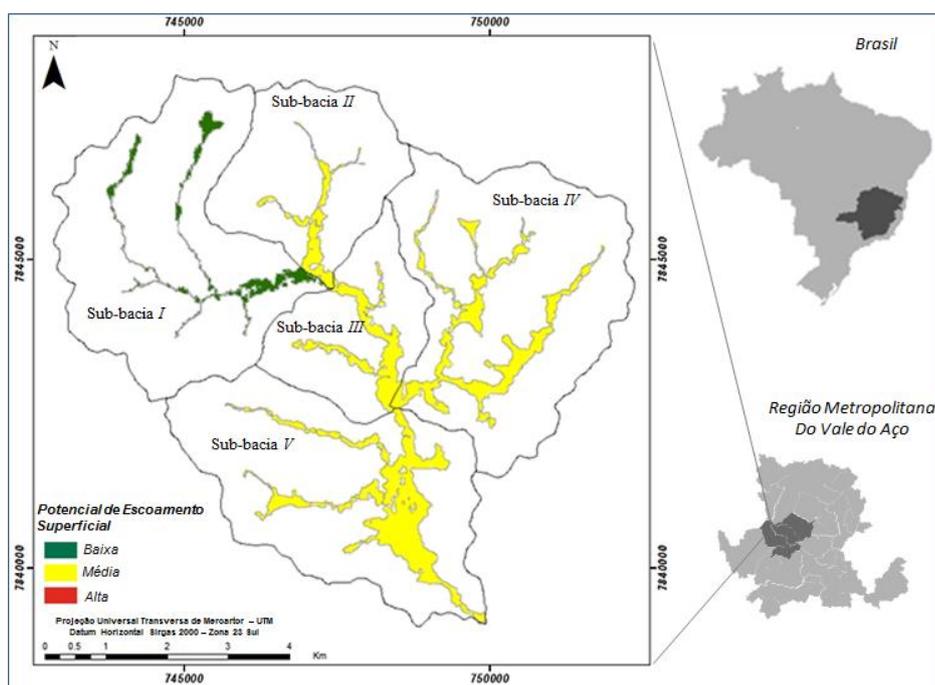


Fonte - Organizado pelos autores, 2020.

O índice de sinuosidade indica que somente a sub-bacia IV apresenta médio grau de suscetibilidade em contraponto com as demais sub-bacias que apresentam alto grau, indicando alta velocidade de escoamento das águas no canal principal destas sub-bacias.

O modelo potencial de escoamento superficial, representado pela Figura 6, 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 seguido de posterior classificação de cada sub-bacia quanto ao seu escoamento superficial total, utilizando a média aritmética ponderada.

Figura 6 - Modelo potencial de escoamento superficial recortados espacialmente através do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND).



Fonte - Organizado pelos autores, 2020.

Analisando o modelo potencial de escoamento superficial, nota-se que somente a sub-bacia I foi representada com baixo grau de escoamento superficial, enquanto as demais sub-bacias foram representadas em médio grau, indicando maiores tendências a inundações decorrentes das alterações antrópicas da bacia.

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

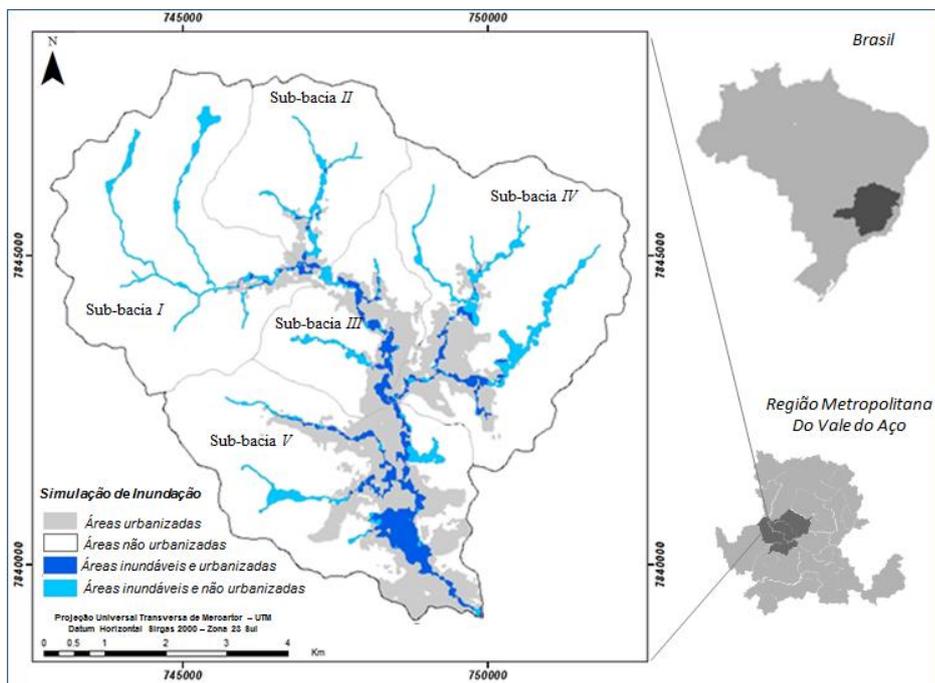
Na BHRC este fato é observado quando identificamos que a área urbana da bacia concentra-se nas sub-bacias III, IV e V garantindo condições de médio grau de escoamento superficial.

Destaca-se que a sub-bacia III tem passado nos últimos 10 anos por um processo intenso de ocupação urbana que vem impermeabilizando as áreas próximas ao canal principal, logo em um futuro próximo, caso se mantenha na mesma intensidade o processo de urbanização, tal sub-bacia poderá alcançar condições de alto grau de escoamento superficial.

Entretanto é importante mencionar que apesar da sub-bacia II não possuir grandes áreas urbanizadas, a mesma apresenta altos índices de impermeabilização, tal fato pode ser explicado pelo relevo acidentado, composto por extensas áreas rochosas impermeáveis.

O modelo de simulação de inundações, representado pela Figura 7, apresenta as áreas inundáveis na BHRC e foi utilizado na delimitação e elaboração dos modelos de suscetibilidade apresentados.

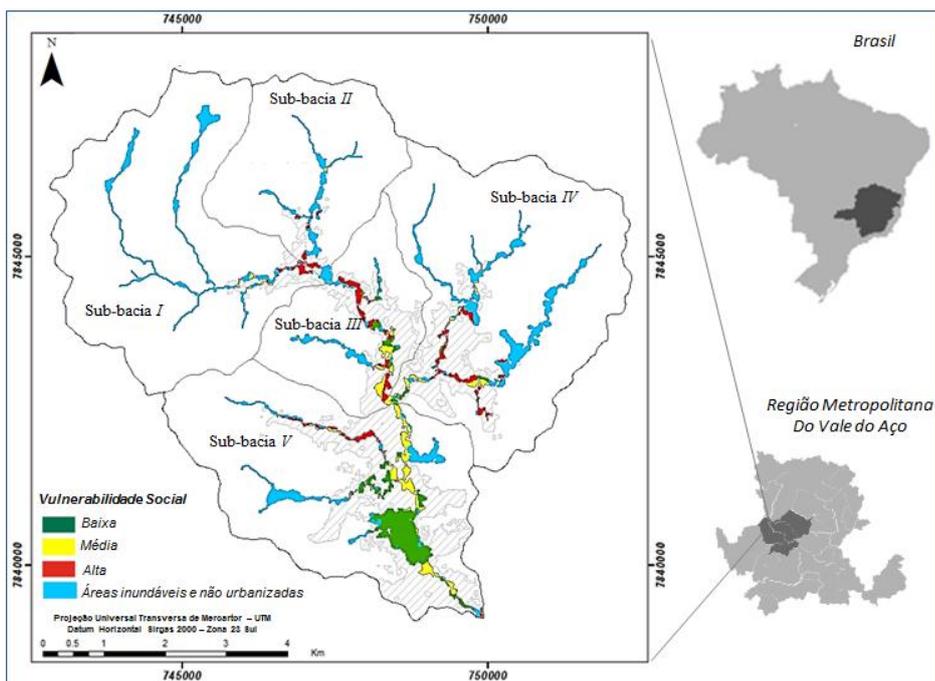
Figura 7 - Modelo de simulação das áreas inundáveis recortados espacialmente através do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND).



Fonte - Organizado pelos autores, 2020.

As sub-bacia V, IV e III tendem a concentrar mais áreas inundáveis, entretanto a sub-bacia V possui a maior área urbana suscetível, necessitando maior atenção quanto às políticas públicas de ocupação. Em relação ao quadro de vulnerabilidade, a Figura 08 apresenta o modelo de vulnerabilidade social.

Figura 8 - Modelo de vulnerabilidade social recortados espacialmente através do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND).



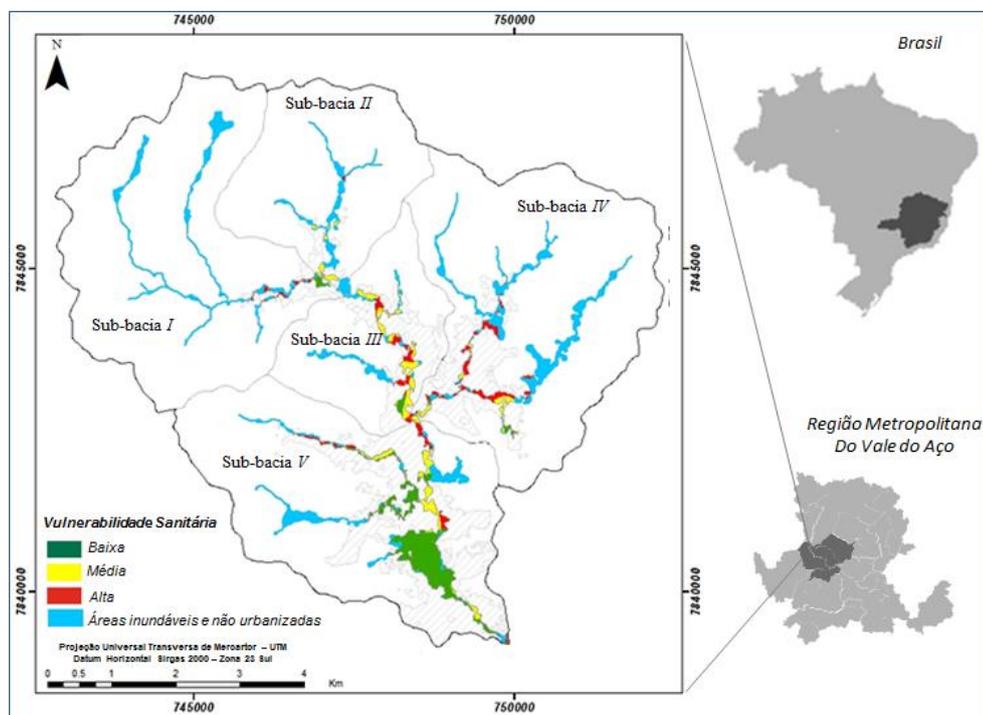
Fonte - Organizado pelos autores, 2020.

As áreas de alta vulnerabilidade social (Figura 8) concentram-se nas sub-bacias III, sub-bacia IV e sub-bacia V. Entretanto, devido à alta densidade demográfica das 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.

Ressalta-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.

Em relação ao modelo de vulnerabilidade sanitária (Figura 9), observou-se a existência de áreas de alto grau de vulnerabilidade, apesar do município de Coronel Fabriciano apresentar um índice de 95% de saneamento, representados pela média das variáveis: coleta de resíduos, abastecimento de água potável e acesso a esgotamento da rede geral.

Figura 9 - Modelo de vulnerabilidade sanitária recortados espacialmente através do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND).



Fonte - Organizado pelos autores, 2020.

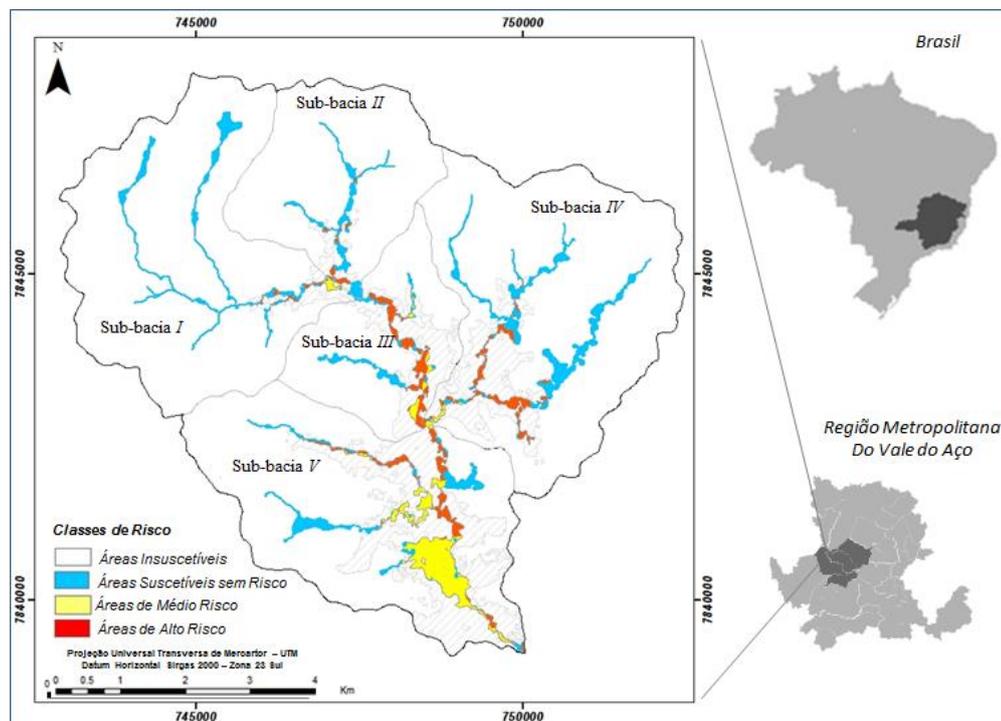
Este alto índice de saneamento reduz a possibilidade de epidemias relacionadas a doenças de veiculação hídrica, entretanto após eventos de inundações casos de contaminação podem surgir nas áreas indicadas como alto grau de suscetibilidade sanitária.

Portanto, torna-se necessário à continuidade de implementação de políticas públicas relacionadas à manutenção e ampliação do sistema de saneamento, principalmente nas áreas de alto grau de suscetibilidade sanitária, a fim de evitar calamidades públicas após eventos extremos de 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, portanto, subdividida em cinco classes denominadas áreas insuscetíveis, áreas suscetíveis sem risco, áreas de médio risco e áreas de alto risco (Figura 10).

Figura 10 - Áreas de Risco a inundações na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Caladão.



Fonte - Organizado pelos autores, 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 sem risco, que consistem em áreas sujeitas a inundações sem danos socioeconômicos, com 147,14 ha (2,77%) da área total da bacia e áreas suscetíveis em risco, que consiste em áreas sujeitas a inundações classificadas em variados graus de vulnerabilidade da população local diante do evento, com 166,17 ha (3,30%).

Analisando a Tabela 1 observa-se que na sub-bacia I com 84,42% (33,48 ha) da mancha de inundação, corresponde a áreas suscetíveis a inundação sem risco a estrutura urbana e comunidades, enquanto que 15,59% (6,18 ha) da mancha de inundação restante correspondem a áreas suscetíveis com risco, no qual predominam áreas de alto risco com 9,56% (3,79 ha) e de médio risco com 6,03% (2,39 ha).

Tabela 1 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia I.

Classes	Área (Ha)	Área (%)
Áreas Suscetíveis sem Risco	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 - Organizado pelos autores, 2020.

As inundações nesta sub-bacia estão associadas às cheias do córrego Melo Viana, caracterizado por um canal de drenagem muito sinuoso que conseqüentemente influencia na baixa energia cinética do curso d'água, favorecendo inundações que se expandem lentamente pelas áreas mais planas

próximas ao curso d'água. Nesta sub-bacia predomina 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 maior atenção e esforços no combate às possíveis doenças endêmicas de veiculação hídrica, bem como auxílio para recuperação socioeconômica das comunidades existentes no local.

Na Tabela 2, nota-se que a mancha de inundação presente na sub-bacia II compreende 78,08% (19,13 ha) de áreas sem risco e 21,92% (5,37 ha) de áreas de alto risco à população local.

Tabela 2 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia II.

Classes	Área (Ha)	Área (%)
Áreas Suscetíveis sem Risco	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 - Organizado pelos autores, 2020.

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, logo, representando 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.

Na sub-bacia III as áreas suscetíveis a inundações sem risco a estrutura urbana e comunidades equivalem a 27,24% (11,41 ha), enquanto que as áreas suscetíveis e 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) das áreas suscetíveis com risco (Tabela 3).

Tabela 3 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia III.

Classes	Área (Ha)	Área (%)
Áreas Suscetíveis sem Risco	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 - Organizado pelos autores, 2020.

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 11).

Figura 11 - Inundação do Ribeirão Caladão no Bairro Surinan.



Fonte - Adaptado InterTV dos Vales, 2015.

Além 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 à 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.

Em relação à sub-bacia IV as áreas suscetíveis a inundações sem risco a estrutura urbana e comunidades 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 4).

Tabela 4 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia IV.

Classes	Área (Ha)	Área (%)
Áreas Suscetíveis sem Risco	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 - Organizado pelos autores, 2020.

As áreas sujeitas a inundações são caracterizadas por áreas as margens de cursos d'água 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 consequentemente 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 5).

Tabela 5 - Quantificação das classes de risco com referência a sub-bacia V.

Classes	Área (Ha)	Área (%)
Áreas Suscetíveis sem Risco	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 - Organizado pelos autores, 2020.

Observa-se 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. 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 12).

Figura 12 - Inundação do Ribeirão Caladão no Bairro Bom Jesus.

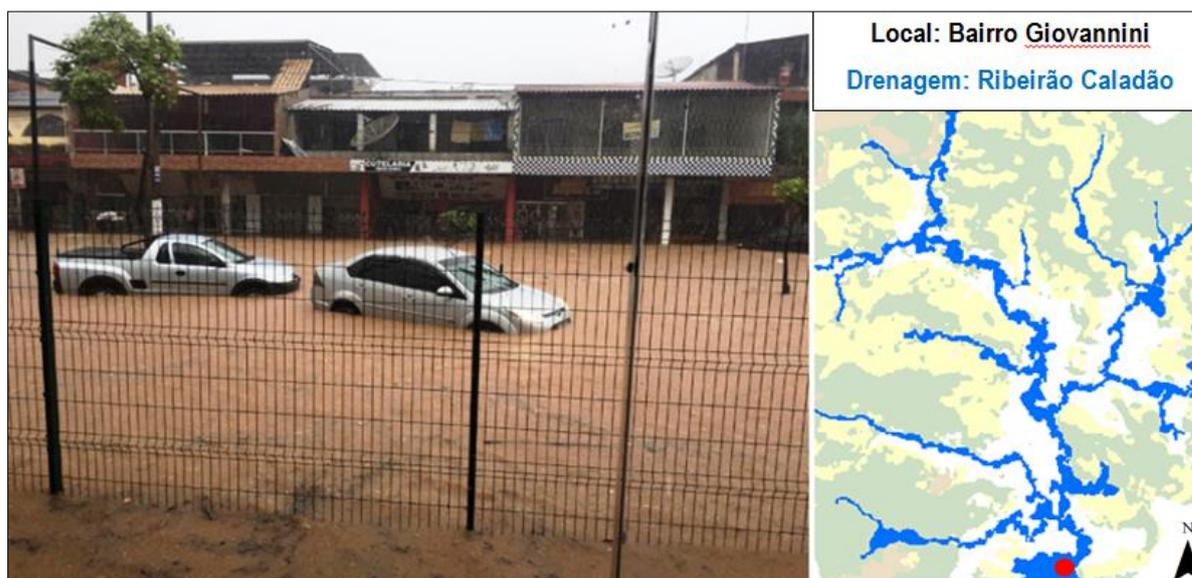


Fonte - Adaptado de Diário do Aço, 2020.

Os bairros Recanto Verde e São Domingos, ambos localizados na porção norte 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, o bairro Julia Kubitschek, bairro Giovannini e bairro 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 13).

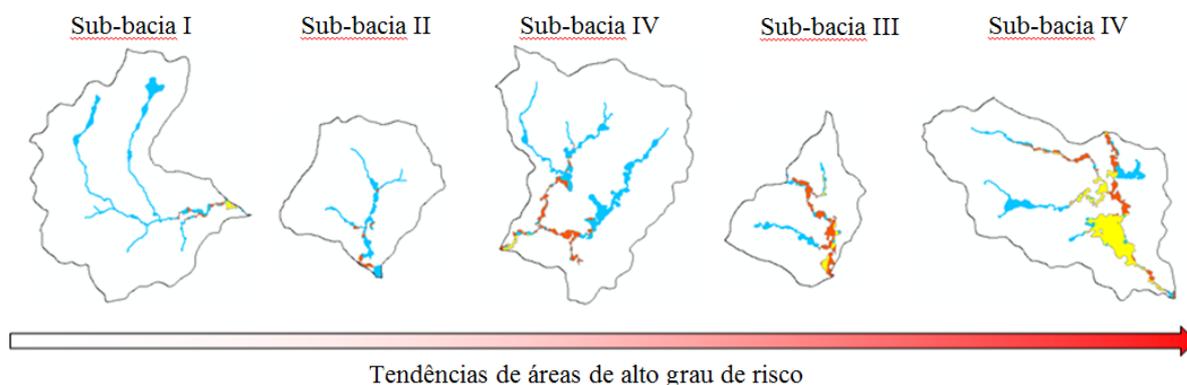
Figura 13 - Inundação do Ribeirão Caladão no Bairro Giovannini.



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 14).

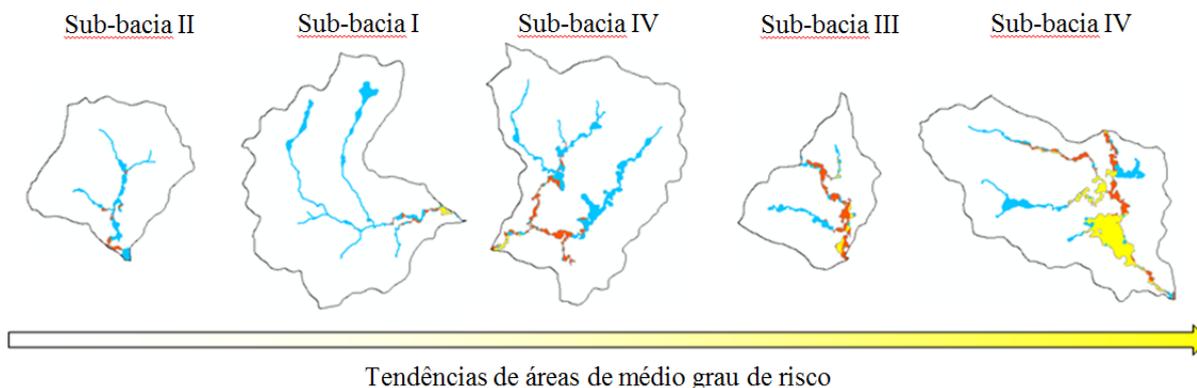
Figura 14 - Classificação das sub-bacias quanto à tendência de áreas de alto grau de risco.



Fonte - Organizado pelos autores, 2020.

Comparando 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 15).

Figura 15 - Classificação das sub-bacias quanto à tendência de áreas de médio grau de risco.



Tendências de áreas de médio grau de risco

Fonte - Organizado pelos autores, 2020.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método aplicado confirmou o potencial das geotecnologias ambientadas em SIG no mapeamento das áreas de risco a inundações, demonstrando-se adequada aos objetivos propostos nesta pesquisa.

Apesar da modelagem das variáveis consistir em um processo lento, devido à quantidade de dados a serem compilados e processados, nota-se que nas etapas posteriores, os resultados foram apresentados de forma ágil e eficaz, demonstrando o alto desempenho da utilização desta tecnologia para avaliação dos fenômenos de inundações.

Ressalta-se que a integração dos softwares TerraViewHidro 0.4.5 e ArcGIS 10.8, favoreceu a geração de um banco de dados robusto, cuja as associações das variáveis descrevem a dinâmica hidrológica e as condições de vulnerabilidade sócio sanitárias das áreas suscetíveis a inundações, favorecendo a identificação, classificação e análise das áreas de risco.

Mediante a análise das áreas de risco de inundações 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 e coloca em risco a população da BHRC, em especial os habitantes localizados na sub-bacia III e V.

Reconhece nesta pesquisa que o poder público local tem solucionado pontualmente os problemas de inundações, 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 associação dos métodos apresentados garantiu um trabalho de baixo custo e alta produtividade, entretanto, recomenda-se para trabalhos a serem desenvolvidos em outros municípios, um levantamento complementar e mais preciso das populações vulneráveis, abordando variáveis de importância estratégica no ordenamento territorial do município, garantindo assim a elaboração de uma modelagem personalizada diante dos anseios da população e governo local.

REFERÊNCIAS

ArcGIS Desktop: release 10.8.1. Redlands, CA: ESRI - Environmental Systems Research Institute, 2018. 1 CD-ROM.

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.

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.

FEAM-Fundação Estadual do Meio Ambiente. Mapa de Solos de Minas Gerais: legenda expandida.

UFV/CETEC/UFLA/FEAM. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010, 49p.

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. <https://doi.org/10.17127/got/2018.13.008>

GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M.; PELLERIN, J. R. G. M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: Estudo de caso do município de Rio Negrinho - SC. **Boletim de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 81-100, 2012. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v30i1.13519>

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

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.

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

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, p. 659 -672, 2014. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i4.597>

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. <https://doi.org/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**, vol.40, p. 94 -109, 2017. <https://doi.org/10.5380/raega.v40i0.45870>

SANTOS, F. M.; LOLLO J. A. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 663-675, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016130053>

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

TerraViewHidro 0.4.5. São José dos Campos: INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2013. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/terraview>>. Acesso em: 07 set. 2019.

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

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. (Coord.) **Águas Doces No Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação**, São Paulo: Escrituras, 2002. p.703-703.

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

Recebido em: 09/12/2020

Aceito para publicação em: 08/06/2021