

MODELAGEM AMBIENTAL DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO E AOS MOVIMENTOS DE MASSA: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA COM ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE SÃO JOÃO DEL-REI, MINAS GERAIS, BRASIL

Environmental modelling of areas susceptible to flooding and mass movements: a methodological proposal with a case study in the city of São João del-Rei, Minas Gerais, Brazil

André Barbosa Ribeiro Ferreira

Doutorando em Geografia pela Universidade Estadual Paulista – Unesp Rio Claro - SP, Brasil.

andreribeirogeo@gmail.com

Andréa Aparecida Zacharias

Profa. Dra. do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro - SP, Brasil.

andrea.zacharias@unesp.br

Bráulio Magalhães Fonseca

Prof. Dr. do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte -MG, Brasil.

brauliomagalhaes@gmail.com

Francielle da Silva Cardozo

Profa. Colaboradora do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ, São João del-Rei - MG, Brasil.

franciellecardozo@ufs.edu.br

Bruno Zucherato

Prof. Dr. do Instituto de Ciências Humanas e Sociais da Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, Campus Araguaia – MT, Brasil

bzucherato@gmail.com

Recebido: 14.03.2023

Aceito: 14.08.2023

Resumo

A partir dos últimos anos da década de 1970, houve um aumento significativo do número de desastres ocasionados por inundações e movimentos de massa em ambientes urbanos, reforçando a necessidade da prevenção como política pública de planejamento territorial, urbano e de gestão de riscos. Diante disso, este trabalho objetiva apresentar uma proposta metodológica para a identificação de áreas suscetíveis a esses processos, adotando como área de estudo-piloto a cidade de São João del-Rei, Minas Gerais (Brasil). A metodologia parte da utilização do Modelo Numérico de Terreno (MNT) para a elaboração dos índices morfométricos de concentração de rugosidade, hack, densidade de drenagem e hipsometria, os quais foram combinados por meio da álgebra de mapas, conforme sua relação com os processos supracitados. A proposta resultou em dois modelos passíveis de utilização no planejamento urbano, sendo um de suscetibilidade à inundação, e outro, a movimentos de massa. Ambos foram validados e apresentaram pertinência com a realidade de campo e com as ocorrências registradas. Desse modo, os

resultados indicaram que 35,7% da área de estudo é suscetível aos processos de inundação ou movimentação de massa.

Palavras-chave: Riscos, geoprocessamento, planejamento.

Abstract

Since the end of the 1970s, there has been a significant increase in the number of disasters occurring through flooding and mass movements in urban environments, reinforcing the need for prevention through public policy for urban land planning and risk management. Thus, this study aims to present a methodological proposal for identifying areas susceptible to these processes, using São João del-Rei, Minas Gerais (Brazil), as a pilot study area. The methodology uses the Digital Terrain Model (DTM) for elaborating morphometric indices of rugosity, drainage density, and hypsometry, which were combined through map algebra according to their relationship with the abovementioned processes. The proposal resulted in two models suitable for urban planning, one modelling susceptibility to flooding and the other susceptibility to mass movements. Both models were validated and demonstrated relevance to the field reality and recorded occurrences. As such, the results indicate that 35.7% of the study area is susceptible to flooding and mass movements.

Keywords: Risk, geoprocessing, planning.

1. INTRODUÇÃO

Nos centros urbanos, a expansão das cidades, somada à falta de planejamento e à ocupação de áreas suscetíveis, amplia a existência do perigo e, conforme o grau de vulnerabilidade da população, o risco. Assim, têm-se configurado desastres naturais que afetam bilhões de pessoas e ambientes, causando grandes perdas humanas e econômicas (BAO *et al.*, 2021; EMAMI *et al.*, 2020).

A maioria desses desastres naturais é causada por fenômenos como inundações e movimentos de massa do tipo deslizamento. Juntos, os desastres causados por esses fenômenos são os mais numerosos e afetam mais pessoas do que qualquer outro tipo de desastre natural (ADLER *et al.*, 2007). Conforme o Banco de Dados Internacional de Desastres (*Emergency Events Database*, ou EM-DAT), os referidos eventos foram responsáveis por 20% do total de desastres naturais ocorridos no planeta entre os anos de 1900 e 2022. Nesse período, 2,5 bilhões de pessoas foram afetadas, 4,4 milhões de mortes foram registradas, e o prejuízo ultrapassou a quantia de 830 bilhões de dólares (EM-DAT, 2022). Esses números se tornam ainda mais significativos se levarmos em conta que o EM-DAT considera como desastre apenas os eventos ou acidentes que ocasionam 10 ou mais mortes e que afetam 100 ou mais pessoas. Desse modo, os eventos que não atingem tais números não são contabilizados por esse sistema.

Apesar de as inundações e os deslizamentos serem fenômenos naturais e estarem relacionados ao volume e à intensidade de precipitações, topografia e tempo, as ações e ocupações antrópicas podem induzir e intensificar sua ocorrência a partir de intervenções no relevo. Com isso, amplia-se o número de desastres, os quais, na maioria das vezes, atingem de forma mais aguda os países e as regiões menos desenvolvidas (ADLER *et al.*, 2007). Isso porque a infraestrutura, a capacidade de suporte e o enfrentamento da população são reflexos das condições econômicas e sociais inerentes. Assim, diante da exposição ao perigo, uma população mais vulnerável apresenta maior probabilidade de ser afetada, por estar mais exposta e, portanto, apresentar maior risco.

Dessa forma, a prevenção de desastres se torna uma etapa fundamental do planejamento urbano e da gestão de risco. Essa prevenção implica, primeiramente, em saber onde os riscos podem ocorrer, ou se existe a probabilidade de serem produzidos (PEDROSA, 2012). Para isso, o conhecimento do meio e sua dinâmica são etapas fundamentais para, posteriormente, implementar medidas de redução do risco (KOBAYAMA *et al.*, 2006; SULAIMAN; JACOBI, 2018; DEFESA CIVIL DE SANTA CATARINA, s.d). Desse modo, compreende-se que a etapa de análise espacial sobre uma base de dados cartográficos consistentes e em escala adequada é fase basilar da prevenção, pois fundamenta as tomadas de decisão.

A partir da evolução das geotecnologias surge a possibilidade de sobrepor, relacionar e combinar as referidas informações geoespaciais em ambiente computacional. Com isso, diversos modelos foram desenvolvidos para tentar representar o mundo real em outros domínios, por meio do universo matemático (CÂMARA; MEDEIROS, 2005). Esses modelos são utilizados nas mais diversas áreas da ciência e, no caso das geociências, tornam-se fundamentais para a análise ambiental, o planejamento territorial e a identificação e a representação de processos dinâmicos, tais como os de encosta e inundação.

A elaboração desses modelos e o levantamento dos dados que os compõem nem sempre possuem custo acessível aos municípios, uma vez que demandam uma série de levantamentos primários, como topográficos e topobatimétricos, análises de séries históricas de dados climáticos, hidrológicos e geotécnicos, além de análises dos meios físico, social e econômico, conduzidas por equipe multidisciplinar. Situação que, mesmo sendo de fundamental importância, torna-se uma etapa do planejamento que fica aquém das necessidades essenciais e emergenciais para uma efetiva implementação.

Desse modo, o objetivo deste estudo é contribuir com uma proposta metodológica, que utiliza modelos de custo reduzido, por meio de índices morfométricos. Assim, a partir disso, em um segundo momento, propõe-se a associação do modelo de suscetibilidade à ocupação e às variáveis de caráter socioeconômico, cultural e estrutural do Censo Demográfico (IBGE, 2010), para, com isso, identificar os graus de perigo e risco, respectivamente.

Ressalta-se que a proposta não substitui o trabalho do profissional geotécnico e as demais análises em campo dos agentes de Defesa Civil na minuciosa elaboração de fichas técnicas de áreas específicas. Porém, trata-se de uma proposta primária, que identifica áreas prioritárias para o planejamento, a atenção, a gestão e a elaboração das cartas de risco de inundação e movimentos de massa.

Para o desenvolvimento deste estudo, foi escolhida, como área-piloto, a cidade de São João del-Rei (Minas Gerais), por apresentar relevo peculiar à ocorrência dos processos em questão, bem como histórico secular de ocorrência destes. Além disso, São João del-Rei possui uma lacuna em relação a trabalhos, mapeamentos e análises espaciais acerca da temática em escala de detalhe, fato que se torna um entrave ao planejamento e à gestão de risco.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O município de São João del-Rei (Figura 1) está localizado na Região Centro-Sul do estado de Minas Gerais, na Mesorregião do Campo das Vertentes. A população municipal, conforme estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é de 90.897 habitantes e é majoritariamente urbana (2021). O histórico de formação da cidade data do final do século XVII e está relacionado à busca e exploração mineral do período (IBGE, 2021).

A geomorfologia peculiar de São João del-Rei compõe, inicialmente, a formação histórica da cidade, que é descrita como “encravada entre vales e encostas”, elementos referenciais da formação do núcleo urbano (BRASILERO; DANGELO; LEMOS, 2013). Atualmente, o sítio urbano se estende entre encostas da Serra do Lenheiro e parte da Serra de São José – áreas mais elevadas do relevo, com aproximadamente 1.025 m de altitude. Já as áreas mais rebaixadas e aplainadas estão localizadas a cerca de 883 m de altitude, próximo à confluência entre o ribeirão Água Limpa e o rio das Mortes.

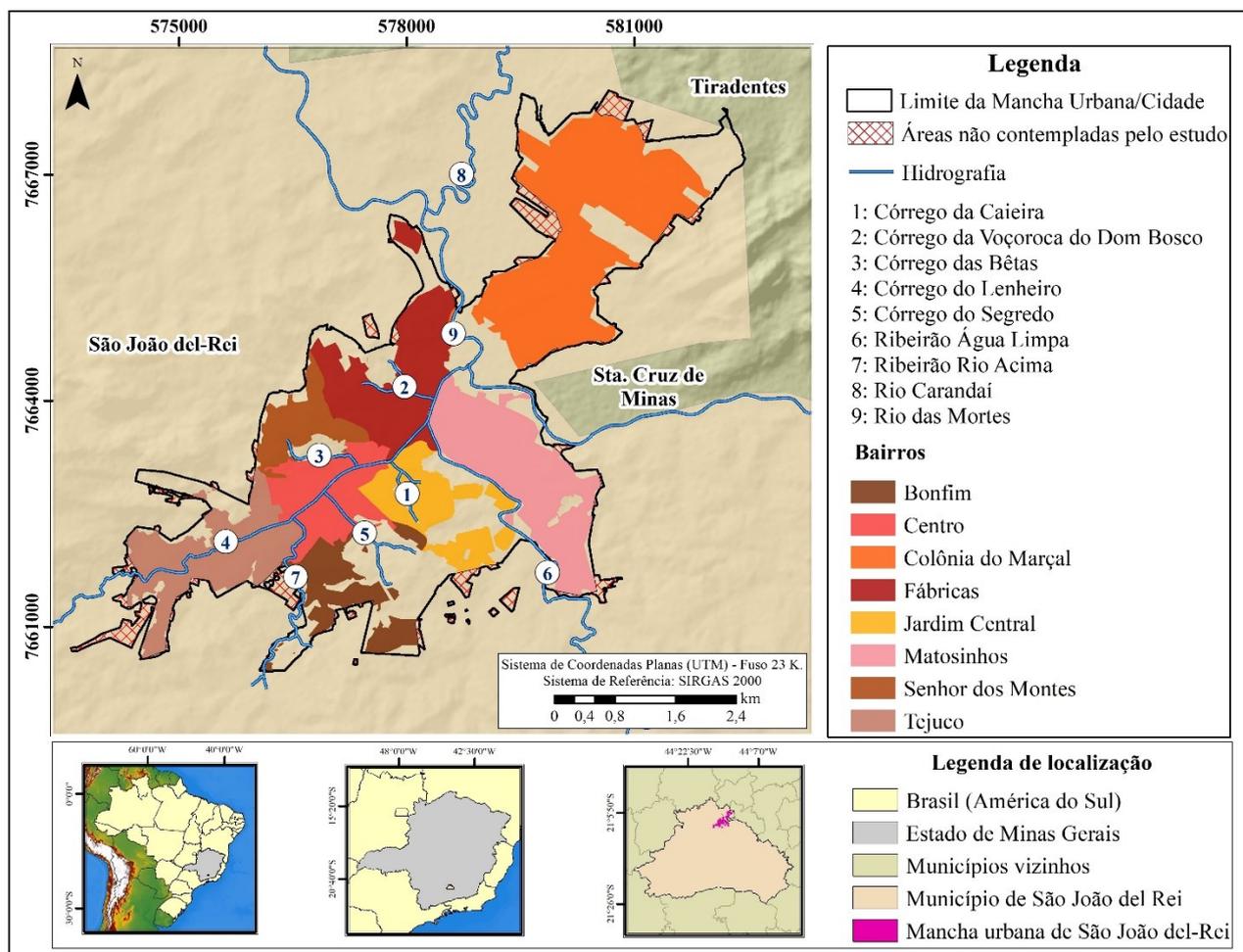


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

A posição geográfica da cidade, as características pluviométricas do verão chuvoso, com precipitações médias de 750mm, entre dezembro e fevereiro (BARUQUI *et al.*, 2006), o uso mal planejado da terra e a carência de políticas e regulamentações efetivas se tornam, em São João del-Rei, fatores que contribuem com a ampliação do escoamento e dos problemas oriundos das águas urbanas.

2.2. Materiais

Os materiais utilizados para a composição do produto foram: base topográfica na escala de 1:1.000, imagem do satélite Ikonos (resolução espacial de 1m) e informações censitárias do IBGE (2010). As particularidades e os usos desses materiais serão descritos separadamente nas seções a seguir:

- **Base topográfica:** as curvas de nível de 1 em 1m foram extraídas do arquivo vetorial planimétrico da cidade de São João del-Rei datado de 2015. O material possui escala

de elaboração de 1:1000¹, foi disponibilizado em formato *Autodesk's Design Web Format* (DWF) e contém topônimos como: curvas de nível mestras, curvas intermediárias, vias pavimentadas e não pavimentadas, algumas edificações e rios perenes, intermitentes e canalizados (SÃO JOÃO DEL-REI, 2015a).

- **Imagem Ikonos:** a ausência de imagens de alta resolução por parte do Poder Público Municipal fez com que se utilizasse como referência, para esta pesquisa, uma imagem Ikonos do ano de 2008, adquirida pelo Departamento de Geografia da Universidade Federal de São João del-Rei. O satélite Ikonos, lançado em 1999, destaca-se por ser o primeiro satélite de alta resolução espacial (1m de resolução espacial no modo pancromático e 4m no multiespectral). Até 2007, era o satélite mais ágil da indústria, com a capacidade de gerar imagens de grandes seções da Terra a cada três dias (APOLLO MAPPING, s.d.; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, s.d.).
- **Base Hidrográfica Ottocodificada:** os vetores de drenagem ottocodificados (rede hidrográfica em trechos entre os pontos de confluência dos cursos d'água) foram adquiridos a partir de acesso à plataforma de dados espaciais da Agência Nacional de Águas (ANA²). O produto apresenta escala de 1:50.000 e foi elaborado a partir do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente Derivado dos dados do Projeto ASTER-DTM (ANA, 2018).
- **Setores censitários IBGE:** os limites setoriais e as informações socioeconômicas foram adquiridos por meio de acesso ao *site* do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), na aba "Censo Demográfico" de 2010³. O repositório contém 26 arquivos em formato *Comma-separated values* (CSV), além da "Base de informações por Setor Censitário Censo 2010 – Universo", a qual apresenta a descrição das variáveis contidas nos demais arquivos.

2.3. Métodos

Os procedimentos empregados neste estudo partem, inicialmente, do entendimento de que o risco resulta da existência concomitante do perigo e da vulnerabilidade (REBELO, 2003; FERREIRA; ROSSINI-PENTEADO, 2011) (Equação 1).

$$R = P \times V \quad (1)$$

Em que:

P: é dado pela presença humana em área suscetível, ou seja, suscetibilidade x presença humana;

¹ Material elaborado sob processo licitatório n. 103/2015 pela empresa Despro Engenharia.

² <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b13fa102-148d-4c4a-b7cd-02f23027e5c1>

³ <http://www.ibge.gov.br> > Download > Estatísticas > Censos Demográficos > Censo 2010 > Resultado do Universo > Agregados por Setores Censitários.

V: corresponde ao grau de sensibilidade e fragilidade dessa população humana presente na área suscetível.

Assim, o primeiro passo é a identificação das áreas de suscetibilidade para, posteriormente, identificar a existência do perigo e do risco. Desse modo, para melhor compreensão e organização, os procedimentos de identificação da suscetibilidade, do perigo e do risco de inundação e dos movimentos de massa serão descritos individualmente nas seções a seguir.

2.3.1. Modelo de suscetibilidade

Para a elaboração do modelo de suscetibilidade, utilizaram-se parâmetros físicos do relevo, como altimetria e índices morfométricos, que respondem tanto aos processos de planície como aos de vertente, sendo eles: Índice de Concentração da Rugosidade (ICR); Índice de Hack (IH); e Densidade de Drenagem (DD). Todos esses parâmetros foram elaborados a partir do modelo numérico de terreno, resultante da conversão das curvas de nível em um modelo matricial em formato raster (resolução espacial de 1m).

O ICR pode ser considerado uma análise da variação espacial das declividades do relevo, que possui relação com os processos de morfogênese, conduzidos pela incisão vertical dos canais de drenagem, e com a retração das vertentes (AUGUSTIN; SAMPAIO, 2014; FONSECA; PIZANI; SOUZA, 2017). Desse modo, o ICR constitui um indicador de zonas com altas concentrações de rugosidades, sujeitas a movimentos gravitacionais de massa, bem como de zonas com baixas concentrações de rugosidades, sujeitas ao acúmulo dos fluxos hídricos e lento escoamento, favorecendo, assim, as inundações.

O primeiro passo foi calcular os valores de declividade por pixel, em porcentagem, resultando em um arquivo matricial que, posteriormente, foi convertido em uma malha de pontos. Sobre esses pontos, aplicou-se o estimador de densidade de Kernel, com raio de 150m (0,07km²), possibilitando que feições morfológicas de pequenas dimensões fossem facilmente identificadas e delimitadas por meio de uma matriz menos generalizada, capaz de representar as variações topográficas da área de estudo. Conforme Augustin e Sampaio (2014), o raio de estudo para a interpolação dos pontos de declividade, que resultam no ICR, deve ter relação com o tamanho da área de estudo, de modo a não falsear, com raios muito grandes, eventuais fenômenos de variação de declividades.

O segundo parâmetro utilizado na composição da suscetibilidade foi o Índice de Hack, também denominado “Relação Declividade-Extensão” (ETCHEBEHERE *et al.*,

2004). Esse índice estabelece uma relação entre a declividade e a extensão das redes de drenagem (FONSECA, 2010; HACK, 1973). Dessa forma, entende-se que, quando um rio está em equilíbrio, sua energia está igualmente distribuída ao longo do seu canal. Caso contrário, há variações de energia ao longo do canal, influenciadas por quebras ou rupturas de relevo – os *knickpoints*.

Portanto, quanto maior a energia do canal, menor a chance de acúmulo dos fluxos hídricos e, então, menor a possibilidade de ocorrência de inundações; mas, por outro lado, maior a propensão para movimentação de massa. De um modo geral, relevos com a presença de canais com grande energia tendem a apresentar zonas com intensos processos de morfogênese (movimentos de massa).

O cálculo empregado para sua determinação pode ser efetuado para toda a extensão do rio ($SL_{total} = K$) ou para um segmento (SL_{seg}).

O IH é calculado pela equação simplificada (Equação 2):

$$IH = \Delta H / \text{Log}_e \Delta L \quad (2)$$

Em que:

ΔH = variação altimétrica do segmento; ΔL = comprimento do segmento de drenagem hierarquizado; Log_e = logaritmo natural.

No presente trabalho, foram utilizados os valores de IH para cada segmento hierarquizado, conforme Strahler (1957). Os resultados de IH por segmento refletem melhor as variações locais de energia do canal e, conseqüentemente, as zonas com maior susceptibilidade a movimentos de massa.

Para essa aplicação, usou-se a extensão *knickpoint finder*, um *plugin* do *ArcMap* disponibilizado no *site* da Universidade Federal do Paraná pelo grupo Neotectônica. A extensão utiliza o MNT (*input*) para gerar os pontos de ruptura de declive e a rede de drenagem, os quais foram processados com parâmetro de detalhe 1:6.000 e equidistância de 10m. Ressalta-se que esses valores não indicam ou se referem à escala cartográfica, são apenas parâmetros de controle para a obtenção da malha de pontos e da distância entre eles.

Tendo efetuado o processamento, a malha de pontos foi interpolada pelo *Inverse Distance Weighted (IDW) – Geostatistical Analyst* –, com base na coluna de Relação Declividade-Extensão por Segmento (RDEs) e na vizinhança mínima e máxima de 10 e

15, respectivamente. O coeficiente de correlação do interpolador IDW, gerado automaticamente no relatório do processamento, indicou autocorrelação entre os pontos mensurados e os preditos, isto é, entre os *knickpoints* e a superfície de extrapolação gerada pela interpolação.

O último parâmetro, a densidade de drenagem, é reconhecido como um dos mais importantes parâmetros da análise morfométrica de bacias hidrográficas (HIRUMA; PONÇANO, 1994). Definido inicialmente por Horton (1945), a Densidade de Drenagem considera a relação entre o comprimento total dos cursos d'água (L) e a área da drenagem (A) (Equação 3).

$$Dd= L/A \quad (3)$$

Conforme Castellarin, Montanari e Pallard (2009), o grau de desenvolvimento de uma rede de drenagem possui relação direta com a formação de fluxos que convergem em uma inundação. Assim, a densidade de drenagem exerce controles e efeitos significativos sobre os picos de inundação, pois um fluxo mais enérgico aumenta o tempo de concentração. Do mesmo modo, Alves, Cavalcanti e Nóbrega (2013) afirmam que, quanto maior o número de canais contribuintes e da sua densidade, maior a suscetibilidade da área a inundações de maiores proporções.

Para processar a Densidade de Drenagem, foi extraída a malha de drenagem do MNT, também por meio do *plugin knickpoint*, acima mencionado. Em seguida, os vetores obtidos foram interpolados a partir da densidade de Kernel, com raio de 200m, resultando em uma matriz com as densidades mínimas e máximas.

De modo a complementar e calibrar o produto gerado, atribuindo maior peso aos canais de ordem superior na hierarquia fluvial, foi elaborada uma segunda Densidade de Drenagem, considerando a ordem, conforme Strahler (1956). A elaboração se deu da mesma forma, porém tomou como referência a coluna "Ordem" da Base Hidrográfica Ottocodificada da Agência Nacional de Águas, a qual já possui a classificação da hierarquia fluvial.

Além de ICR, IH e DD, a altimetria compôs o modelo de suscetibilidade. Assim, o raster do MNT foi reclassificado (Tabela 1), conforme os registros de costas da inundação do ano de 2012, de acordo com as delimitações da CPRM e da Defesa Civil de São João del-Rei (SÃO JOÃO DEL-REI, 2013; 2015b).

Tabela 1: Reclassificação da hipsometria.

Reclassificação	Faixas altimétricas	Justificativa
5	883 – 887	2 m de talude do canal até o nível da rua + 2 m que a água atingiu dentro das casas localizadas no entorno dessa faixa altimétrica
4	887 – 889	Faixa intermediária
3	889 – 891	Limite do sopé da encosta do <i>campus</i> Dom Bosco
2	891- 947,898	Automático
1	947,898 - 1025	Automático

Fonte: CPRM e Defesa Civil de São João del-Rei, 2015. Adaptado pelos autores, 2023.

Tendo constituído esse conjunto de dados morfométricos, todas as bases foram normalizadas de 0 a 1 (Equação 4), para permitir comparações e combinações para a aplicação da análise multicritério (JANKOWSKI; MOURA, 2016) e indicar a influência sobre o processo. No caso do modelo de suscetibilidade à inundação, o ICR e o IH foram invertidos (multiplicados por -1 e, novamente, normalizados). Esse procedimento visou adequar a intensidade do fenômeno no sentido do objetivo da análise – ou seja, pensando em inundação, quanto menor o valor de IH, menor o potencial energético do canal e maior a susceptibilidade à inundação.

A inversão dos valores numéricos do dado se faz necessária para que não tenhamos variáveis sendo relacionadas com a escala de valores numéricos invertidos em relação ao objetivo central da análise. Por exemplo, os valores de ICR variam do menor para o maior valor e representam menor e maior rugosidade do relevo. No entanto, quando a variável é analisada sob a ótica dos processos de inundação, percebe-se que, quanto menor o valor de rugosidade do relevo, mais susceptíveis serão os terrenos à inundação. A inversão numérica do dado elimina essa relação inversa, deixando a análise coerente.

$$f(x) = (x - \text{Mín}) * 1 / (\text{Máx} - \text{Mín}) \quad (4)$$

Em que:

X corresponde ao *raster* dividido pela diferença de seus valores máximo e mínimo.

Após a normalização, as bases foram combinadas, por meio da álgebra de mapas e da análise multicritério, atribuindo pesos iguais às variáveis normalizadas, de modo a somar 100%. Assim, para o modelo de suscetibilidade à inundação, foram utilizadas as quatro variáveis apresentadas acima (Altimetria, ICR, IH e DD unificada [DD1 + DD2]), cada uma com peso de 25% (Figura 2).

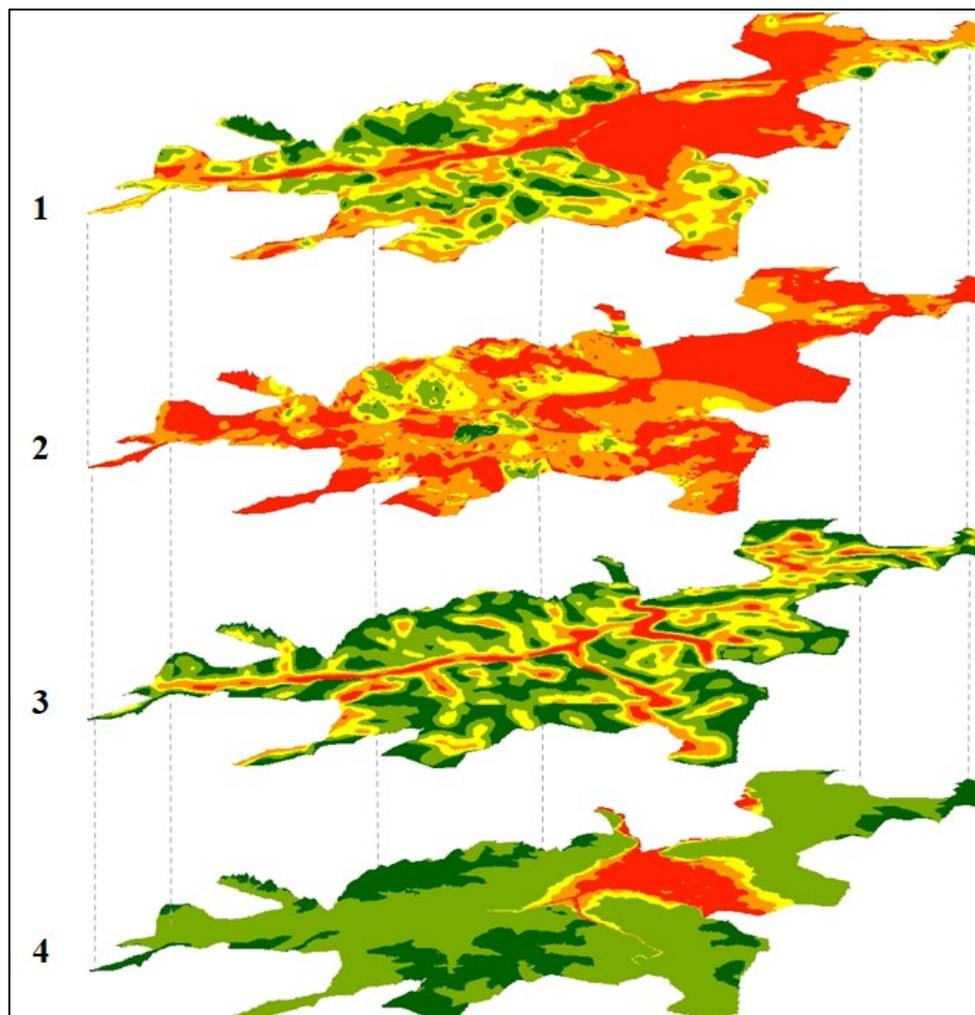


Figura 2 – Composição do modelo de suscetibilidade à inundação.

Legenda: 1 = ICR. 2 = IH; 3 = DD-unificada; 4 = Hipsometria.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

Já para o modelo de suscetibilidade a movimentos de massa, foram utilizados e somados o Índice de Hack (*0,50) e o Índice de Rugosidade (*0,50), ambos em seus processamentos normais, sem nenhuma inversão de valores (Figura 3). Nesse caso, a inversão de valores da escala numérica do dado não foi necessária, uma vez que o aumento ou a diminuição da intensidade do fenômeno mapeado está no mesmo sentido do objetivo central da análise. Logo, o aumento ou a diminuição do IH e ICR corresponde ao aumento da suscetibilidade ao movimento de massa.

Os resultados obtidos nas superposições foram validados em campo, utilizando o aplicativo Avenza Maps⁴ (2020) versão 4.2.2, com interpretação da paisagem e registros históricos e sobrepostos às delimitações de áreas de risco identificadas pela Defesa Civil Municipal e pelo Serviço Geológico do Brasil, apresentando coerência.

⁴ <https://store.avenza.com/pages/app-features>

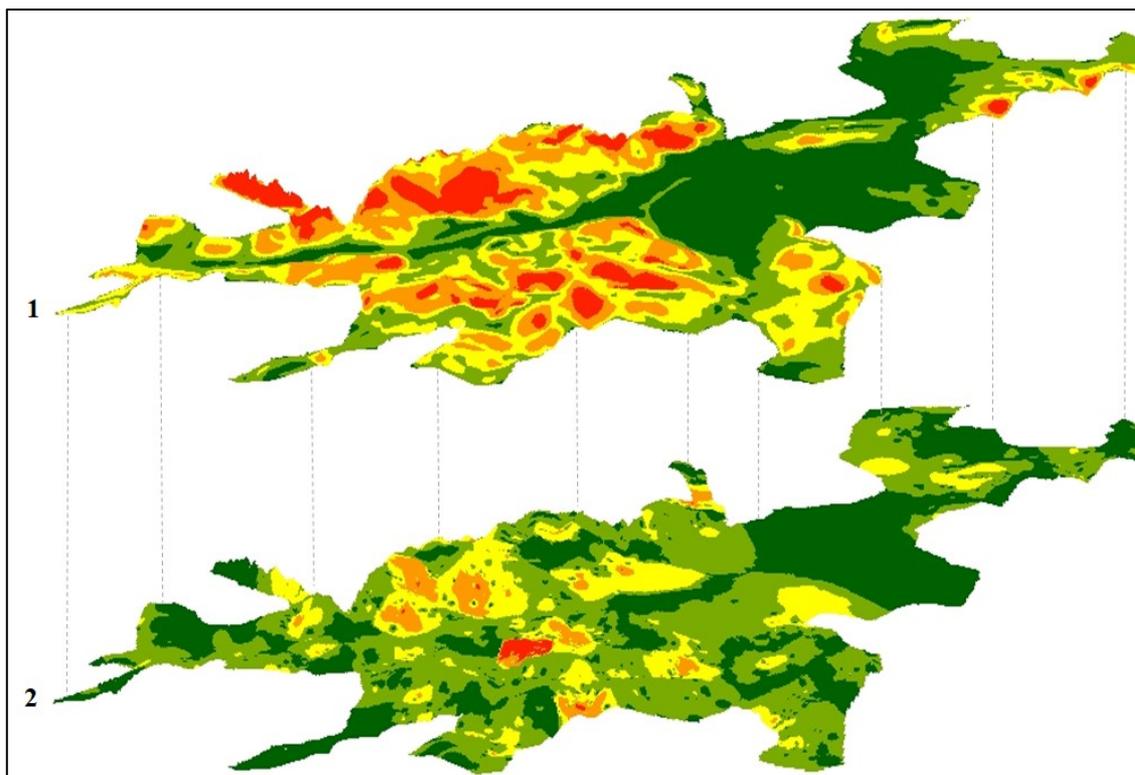


Figura 3 – Composição do modelo de suscetibilidade a movimentos de massa.
 Legenda: 1 = ICR; 2 = IH. **Fonte:** Elaborada pelos autores, 2023.

2.3.2. Modelo de perigo

Para elaboração do modelo de perigo, foi empregada uma álgebra de mapas entre o modelo de suscetibilidade e uso da terra, que foi classificado manualmente a partir da segmentação da imagem Ikonos, capturada em 2008, no *software* Ecognition Developer. Nesse processo, após testes de segmentação, adotou-se o parâmetro de escala 10 e diferença espectral 3, o que possibilitou a separação e/ou o agrupamento dos polígonos, conforme suas semelhanças e diferenças de resposta espectral.

A atribuição desses parâmetros de segmentação máxima gerou um alto número de polígonos (2.853.556), pequenos e representativos, o que permitiu que a classificação fosse efetuada, atualizando as modificações ocorridas entre a data da imagem Ikonos e o momento atual (2020/2021). Para isso, foram utilizados trabalhos de campo e suporte visual do *Imagery Basemap* da ESRI e Google Earth Pro.

Apesar de categorizar diferentes usos, como áreas verdes, pavimentação, solo exposto e outros, para essa metodologia e elaboração do modelo de perigo, considerou-se apenas a classe edificações, pautando-se no entendimento de que o perigo é inerente à presença humana. Assim, o atributo “edificações” foi convertido em *raster* (pixel 1 m), exportado para o aplicativo ArcMap e normalizado entre 0 e 1, sendo o valor máximo

referente às áreas edificadas, e o mínimo, às não edificadas. Desse modo, para determinar o grau de perigo, cada um dos dois modelos de suscetibilidade (inundação e movimentos de massa) foi associado ao uso da terra (Figura 4), ambos com a mesma importância (50%).

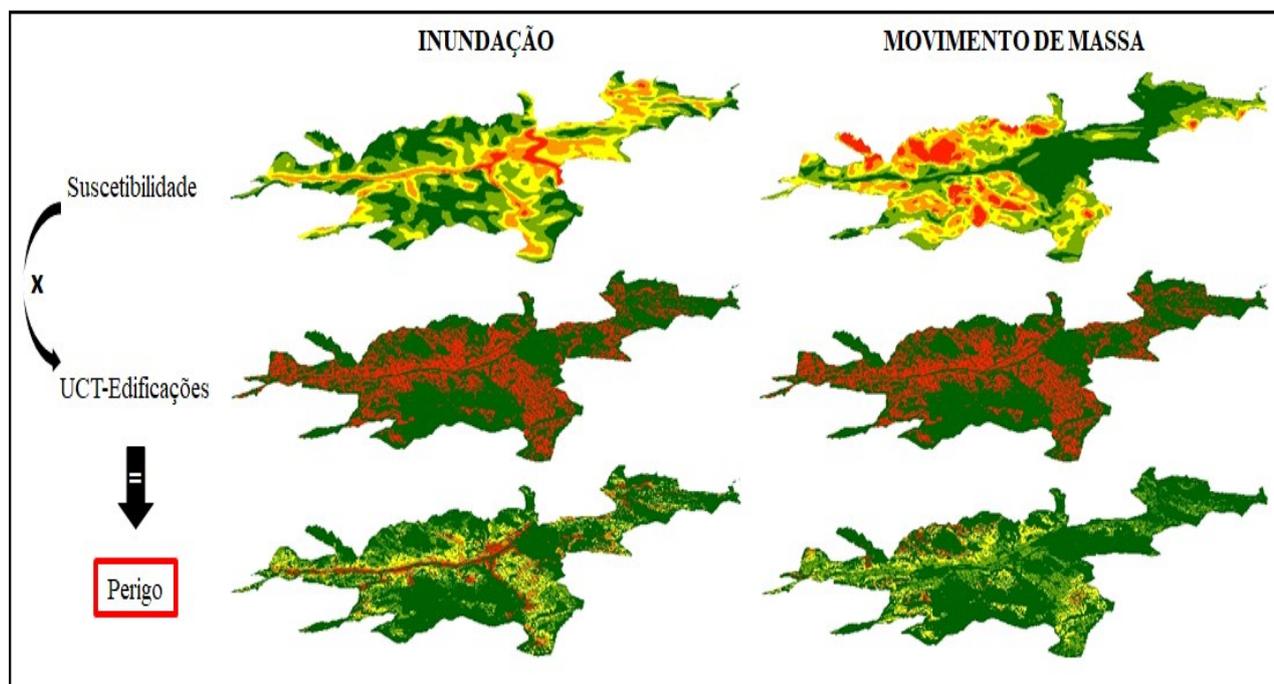


Figura 4 – Composição dos modelos de perigo

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

2.3.3. Base e modelo de vulnerabilidade

A base de vulnerabilidade contou com nove atributos dos Setores Censitários de São João del-Rei, disponíveis no Catálogo IBGE Cidades. Desses, cinco foram sociodemográficos, e quatro estruturais. A escolha das variáveis utilizadas foi parcialmente embasada na metodologia da Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte (ARMBH, 2021) e nos estudos de Bonetti e Lima (2018), ambos na temática de riscos, desastres e eventos extremos.

Desse modo, os componentes das planilhas de “Agregados por Setores Censitários” (Quadro 1) foram importados para a tabela de atributos do *shapefile*, relativa aos Setores Censitários, conforme o *Geocode* de referência e os combinados. A partir disso, cada um dos nove componentes foi exportado no formato *raster* e normalizado entre 0 e 1. No caso da renda, os valores foram invertidos (*-1) e normalizados, indicando que maior renda infere menor vulnerabilidade.

Quadro 1: Componentes da vulnerabilidade e relação com a exposição ao perigo.

Componentes da vulnerabilidade – Base Universal do IBGE		Relação	
Arquivo*	Código*	Quanto maior/mais	Vulnerabilidade
Basico1_MG	V005	Renda mensal	<
Pessoa01_MG	V001	Pessoas analfabetas	>
Pessoa03_MG	V001	Densidade populacional	>
Pessoa13_MG	V022 a V044	Pessoas menores de 10 anos e maiores de 60 anos	>
	V094 a V134		
Domicilio01_MG	V054 a V059	Domicílios com cinco ou mais moradores	>
	V039	Domicílios com lixo enterrado na propriedade	>
Entorno01_MG	V033	Domicílios em áreas sem boca de lobo no entorno	>
	V035		
	V037		
	V050	Domicílios com esgoto a céu aberto	>
	V052		
	V054	Domicílios com lixo acumulado nos logradouros	>
	V056		
	V058		
V060			

*Nome dos arquivos conforme a nomenclatura do IBGE, sem espaço e sem acentos.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Empregada e referida a organização, as nove variáveis entre 0 e 1 foram normalizadas e combinadas com igual importância (Equação 5), resultando em uma base global de vulnerabilidade.

$$\begin{aligned}
 & (\text{Renda mensal} * 0,111) + (\text{Pessoas Analfabetas} * 0,111) + (\text{Densidade populacional} * 0,111) + \\
 & (\text{Pessoas menores de 10 anos e maiores de 60 anos} * 0,111) + (\text{Domicílios com cinco ou mais} \\
 & \text{moradores} * 0,111) + (\text{Domicílios com lixo enterrado} * 0,111) \\
 & (\text{Domicílios em áreas sem boca de lobo no entorno} * 0,111) + (\text{Domicílios com esgoto a céu aberto} * \\
 & 0,111) + (\text{Domicílios com lixo acumulado nos logradouros} * 0,111)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

2.3.4. Modelo de risco

O modelo de risco foi elaborado considerando que $R = P \times V$, conforme a Equação 1 (REBELO, 2003; FERREIRA; ROSSINI-PENTEADO, 2011). Portanto, a partir da superposição individual da base de perigo de cada processo à vulnerabilidade, têm-se um modelo de risco de inundação e outro de movimentos de massa, conforme sintetiza o Quadro 2.

Quadro 2 – Síntese dos procedimentos que compuseram o risco.

Atributo*	Composição
Suscetibilidade de inundação	$(\text{Índice de Concentração de Rugosidade_invertido} * 0,25) + (\text{Densidade de Drenagem Unificada} * 0,25) + (\text{Índice de Hack_invertido} * 0,25) + (\text{Hipsometria} * 0,25)$
Suscetibilidade a movimentos de massa	$(\text{Índice de Concentração de Rugosidade} * 0,50) + (\text{Índice de Hack} * 0,50)$
Perigo de inundação	Suscetibilidade de inundação * UCT_Edificações
Perigo de movimento de massa	Suscetibilidade a movimentos de massa * UCT_Edificações
Vulnerabilidade	Componentes sociodemográficos e estruturais
Risco de inundação	Perigo de inundação * Vulnerabilidade
Risco de movimentos de massa	Perigo de movimento de massa * Vulnerabilidade

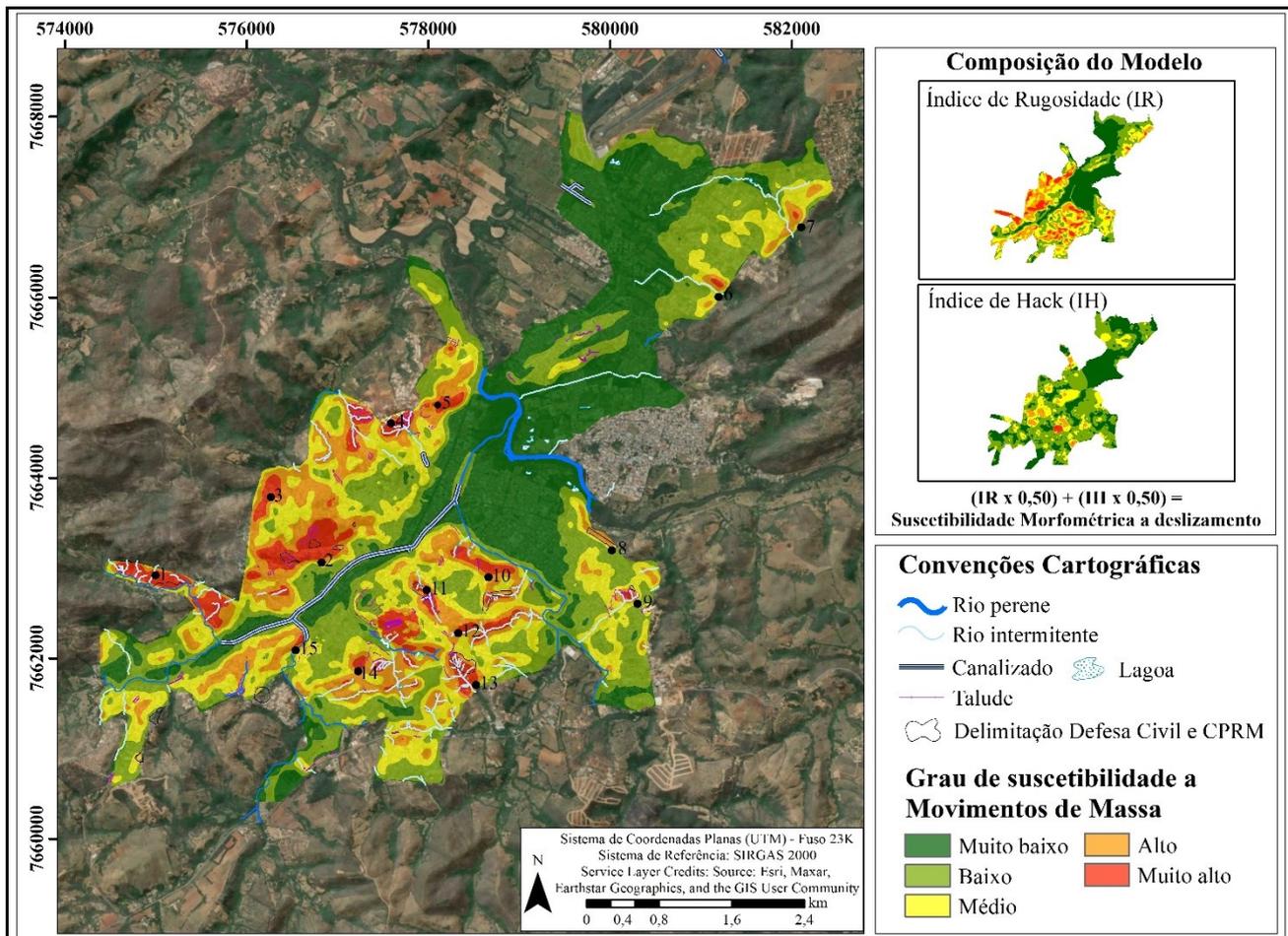
*Todos normalizados entre 0 e 1, e pesos distribuídos igualmente.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos apresentaram conformidade com a dinâmica de fenômenos hidrológicos e gravitacionais de encostas que ocorrem em São João del-Rei. Os produtos foram validados em campo por: geolocalização e interpretação da paisagem; análise de ocorrências, a partir de fotografias e registros escritos; sobreposição às delimitações de áreas catalogadas pela Defesa Civil Municipal; e sobreposição à base cartográfica de taludes urbanos.

Conforme já mencionado, os processos gravitacionais de massa apresentam menor recorrência em São João del-Rei quando comparados com as inundações. No modelo elaborado, observa-se que as áreas mais suscetíveis a esse tipo de movimento de massa se encontram localizadas nas encostas à direita do córrego do Lenheiro, majoritariamente nos bairros Tejuco (1) e Senhor dos Montes (2; 3) e, em menor parte, a noroeste do bairro Fábricas (4; 5) (Figura 5). Historicamente, essas encostas localizadas à direita do rio das Mortes, em São João del-Rei, são caracterizadas por altas declividades e processos de vertente acentuados (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 1984).



Legenda complementar (Figura 5) elaborada a partir de trabalhos de campo, registro fotográfico e visadas ortogonais aéreas do Google Earth (2021/2022)

1		Área localizada no sub-bairro Águas Férreas, no bairro Tijuco. O local já apresenta delimitação de risco gerada pela Defesa Civil e CPRM diante do perigo de queda ou rolamento de bloco rochoso, dado que há, nas proximidades, um maciço rochoso que integra a Serra do Lenheiro. Com sinais de desintegração e intervenção antrópica, em determinados pontos da área, o maciço possui taludes de aproximadamente 90° e 60 m de altura.
2		A figura apresenta uma visada ortogonal do bairro Senhor dos Montes, o qual está localizado, majoritariamente, em área de encosta. Esta apresenta, em determinadas seções, declividades acima de 30% e 45%, o que não é indicado para ocupação e está sujeita à ocorrência de movimentos de massa. Na área, já existem delimitações efetuadas pela Defesa Civil e CPRM em 2013; entretanto, carecem de atualização e setorização. Ressalta-se que o padrão construtivo da área vai de baixo a médio.
3		O ponto 3 indica a face oposta da encosta do Senhor dos Montes quando comparado ao ponto 2. Apesar de apresentar inclinações menos acentuadas, observa-se a existência de taludes de corte e aterro lançado, o que pode induzir movimentos de massa do tipo deslizamento.
4		A indicação de susceptibilidade muito alta do ponto 4 decorre da existência de uma voçoroca na área em questão. A denominada Voçoroca do Dom Bosco divide os Bairros Fábricas e Cidade Verde. Apesar de a feição apresentar gradativo estágio de revegetação e não corresponder a um tipo de movimento de massa, possui taludes com declividade acima de 45%, os quais podem desagregar e ceder na forma de deslizamento.
5		Localizada no Bairro Fábricas, em seu limite, noroeste. Observa-se que a encosta é um limite natural para a expansão do bairro. Apesar de não ocupada e vegetada, possui declividades acima de 30% e 45% e casas no sopé. Além disso, para uma setorização, indica-se a avaliação da existência e estabilidade de taludes de corte e/ou aterro lançado quando ocupada a média porção da encosta.

6		Ruptura de declive localizada a direita (ou sul) da Avenida Antônia de Almeida Neves – Rua do Solar da Serra. Observa-se que há um desnível acentuado no local, onde a declividade varia de 30% a < que 45%. A ocupação do local apresenta maior rigor de padrão construtivo e respeita um distanciamento da encosta. Todavia, a área carece de monitoramento e fiscalização, dado que os fundos dos imóveis podem ser ampliados ilegalmente em direção ao declive.
7		Área localizada na parte superior da Alameda dos Manacás. Observa-se a existência de um degrau de abatimento e material desagregado. O movimento expôs o perfil lateral do solo e a rocha em processo de decomposição. Acredita-se que o processo tenha sido induzido pela desestabilização do sopé do morrote.
8		Área limite da base topográfica de detalhe. Apesar de classificada como suscetibilidade alta, o local carece de monitoramento, fiscalização e medidas corretivas. Localizada na parte superior da Avenida Sete de Setembro, Bairro Matozinhos/Bom Pastor, a área encontra-se na crista da encosta com declive (>45%) e altitude (desnível > 50m) elevadas. O local está delimitado pela Defesa Civil e CPRM, mas necessita atualização e reavaliação técnica estrutural.
9		Residências localizadas no entorno de voçoroca no Bairro Matozinhos/Bom Pastor. A indicação a suscetibilidade se dá pela existência de declividades acentuadas no interior da feição erosiva. Apesar de não indicar movimentação de massa, o local encontra-se delimitado pela Defesa Civil (2013) pela proximidade com a erosão; mesmo assim, sofreu adensamento populacional, inferindo deficiência de fiscalização por parte do Poder Público Municipal. A área carece de monitoramento, limpeza e cercamento que evite nova ocupação.
10		Encosta localizada nas proximidades da margem esquerda do Ribeirão Água Limpa, limitando o bairro Matozinhos e sub-bairros São Judas e Vila Belizário (Jardim Central). No local, predominam declividades acima de 45% e há, no histórico de imagens do Google Earth, cicatriz de deslizamento (imagem 2016). Desse modo, compreende-se que a área em questão é suscetível à ocorrência do referido processo.
11		O ponto 11 implica suscetibilidade devido à ruptura acentuada de declive no local, onde se formou uma voçoroca que divide os sub-bairros Caiera e Vila Marchet (Jardim Central). Nota-se que, no primeiro, onde a população possui baixo poder aquisitivo, não há nenhuma medida de contenção e sistema de drenagem. Assim, o escoamento da Rua Oswaldo Magald Campos é direcionado para a voçoroca, ampliando o processo de erosão. Já na Vila Marchet, Rua Ilaurina Laudaeres, foi implementado um dissipador jardim dissipador.
12		Área localizada nas proximidades da Av. Dr. José Caetano de Carvalho, possui voçorocas atualmente vegetadas e em aparente controle. Além disso, identificou-se, no registro histórico de imagens do Google, a presença de cicatrizes de deslizamento no local, o que pode ser considerado indício da suscetibilidade.
13		O ponto 13 possui características semelhantes ao 12. Também localizado nas imediações da Av. Dr. José Caetano de Carvalho, a encosta possui feições erosivas do tipo voçoroca, as quais encontram-se aparentemente estáveis e em processo de revegetação avançado. No entanto, a alta declividade originada pelo processo condiciona a ocorrência de deslizamentos que podem ser confirmados pelas cicatrizes existentes no local e imagens anteriores.
14		Área localizada na vertente noroeste da encosta do bairro Bonfim. Observa-se pela imagem que há um declive que limita o fundo das casas localizadas na Rua Tem. Mário César Lopes. Apesar de vegetada e de baixo adensamento, dado que corresponde à Área Militar, o renque de casas delimitado deve ser alvo de atenção quanto a trincas, rastejo ou qualquer outro tipo de movimentação e indício.
15		Área localizada no sub-bairro Guarda-Mor (Jardim Central), na Rua Padre Miguel Afonso de Andrade. Há, no local, um renque de aproximadamente 6 casas edificadas no sopé da encosta. O terreno apresenta taludes de corte (90°) na lateral e nos fundos, com distância < que 2 m da casa; a encosta possui vegetação de porte arbóreo na média seção, declividades > de 45%, solo raso sobre rocha intemperizada e saturação expressiva observada em campo após precipitação.

Figura 5 – Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e quadro síntese.

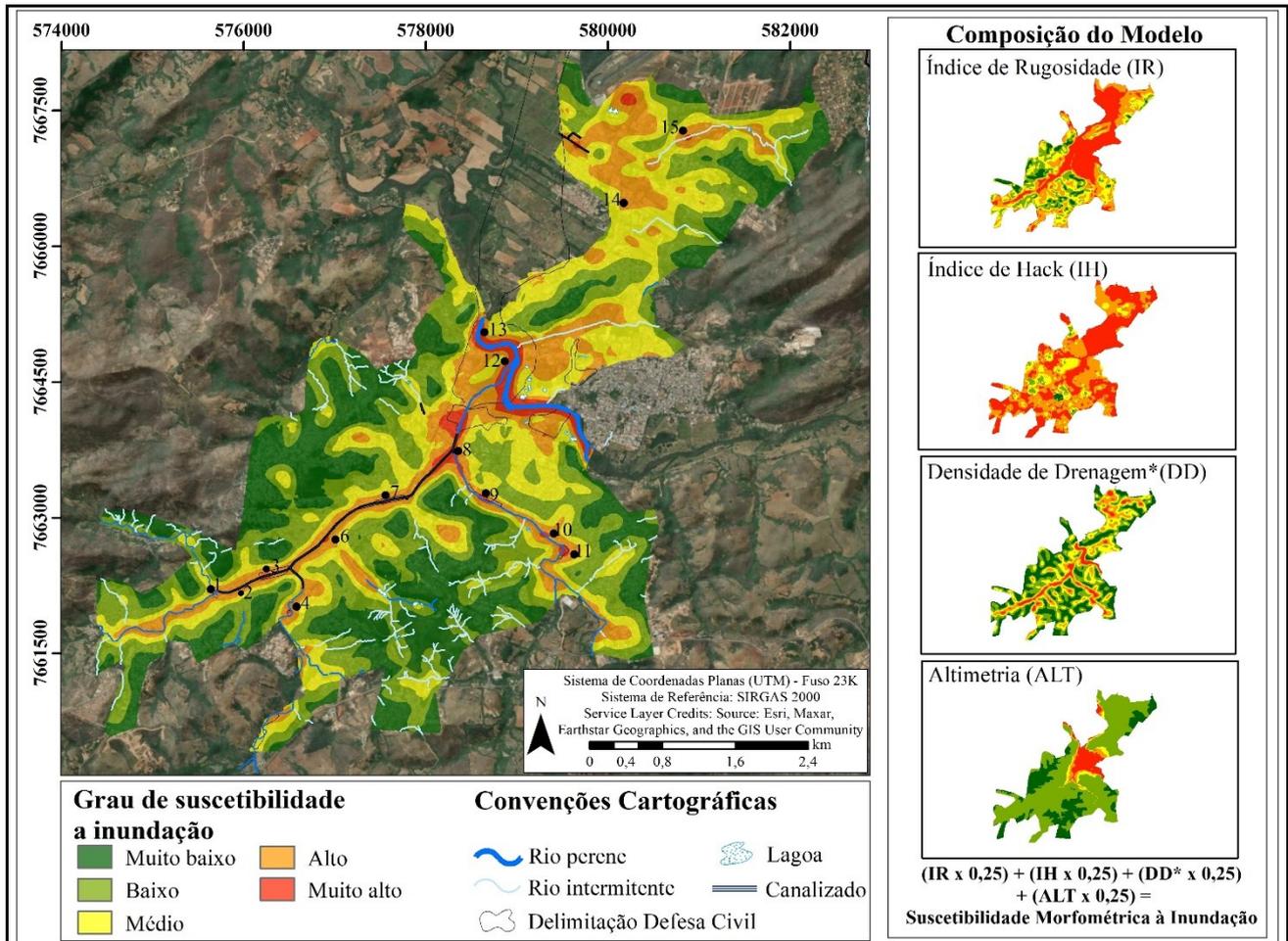
Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

Em menor proporção, encostas localizadas à direita do córrego do Lenheiro também apresentam suscetibilidade elevada, porém possuem declividades menos acentuadas e solos mais profundos, onde predominam processos erosivos e formação de voçorocas. Apesar disso, observou-se que, na face leste da encosta do sub-bairro Guarda-Mor (15), no bairro Tejuco, há ocorrência de solos superficiais sobre rocha alterada, o que, junto ao registro de escorregamento já ocorrido em janeiro de 2000 (GAZETA DE SÃO JOÃO DEL-REI, 2000), torna-se um indício de suscetibilidade. Do mesmo modo, os pontos 10, 12 e 13, localizados em áreas de voçorocas aparentemente em processo de estabilização, também apresentam cicatrizes de deslizamento, identificadas por meio do recurso temporal do Google Earth.

Já no setor nordeste da área de estudo, as declividades são menos acentuadas, e as vertentes suavizadas. Destaca-se, nessa área, a ocorrência de um degrau de abatimento na Alameda dos Manacás (16), provavelmente induzido pela desestabilização do sopé, em que há talude e mobilização de solo.

Assim como o modelo de movimentos de massa, o modelo de inundação representou as particularidades espaciais do processo em São João del-Rei (Figura 6). Como parte da história local, elas são mencionadas em registros que datam do Brasil Colônia e Império (LAET, 1993; MALDOS, 2000; SILVEIRA, 1896).

Os canais que se destacam, nesse sentido, são o córrego do Lenheiro, ribeirão Água Limpa e rio das Mortes. Nos dois primeiros, as inundações ocorrem, geralmente, de forma mais brusca. São rios, respectivamente, de 5ª e 6ª ordem (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS [ANA], 2018), possuem um gradiente altimétrico elevado e cortam superfícies onde a capacidade de percolação da água é menor que a de escoamento, devido à vegetação rarefeita e à presença de maciços rochosos (GUIMARÃES, 1963). Além disso, parte de ambas as bacias é urbana e teve sua morfologia alterada por intervenções antrópicas, como estrangulamento, canalização, retificação e alteração de nível de base.



Legenda complementar (Figura 6) elaborada a partir de trabalhos de campo, registro fotográfico e visadas ortogonais aéreas do Google Earth (2021/2022)

1		A imagem indica a marca de água na parede da casa, fazendo referência ao nível que o Córrego do Lenheiro atingiu. Além disso, nota-se que, de modo geral, as edificações foram implementadas as margens do curso d'água, o que constitui risco aos moradores e causa estrangulamento do canal. No local, Rua Joaquim Timóteo (Bairro Tijuco), grande parte das casas possuem comportas e segundo pavimento como medida de proteção.
2		Área localizada na Rua Padre Rocha e Rossine Baccarini, no Bairro Tijuco. No local, aparentemente, ocorre o deságue de uma drenagem fluvial canalizada do Bairro São Caetano, o que explica o aumento da mancha de suscetibilidade nesse ponto, dado que há tendência de aumento do caudal. Nota-se que, nas casas do entorno, sobretudo na margem localizada na Rua Rossine Baccarini e Judiel Torga, existem comportas que protegem as entradas.
3		Inundação da Rua Padre Rocha, em janeiro de 2012, após o transbordamento do Córrego do Lenheiro. O local encontra-se inserido nas imediações do polígono delimitado pela Defesa Civil e CPRM como área de risco. Essa delimitação contempla parte da via marginal oposta (Rua Rossini Baccarini) e Rua General Osório, desde as imediações da Ponte do Rosário até próximo a Rua Afonsina Alvarenga. Observa-se que, nesse trecho, as muretas de proteção são abertas e a distância entre o canal e as vias é reduzida, quando comparada a outras seções.
4		Margem do Ribeirão Rio Acima, na Rua Antônio Onófre da Rocha. Observa-se a proximidade entre a via, as residências e o canal de drenagem fluvial. O local encontra-se delimitado pela Defesa Civil e CPRM como área risco. Segundo o Plano de Contingência, em 2013, a água atingiu cerca de 2 m no interior das residências no entorno.

5		<p>Área localizada no Centro Histórico tombado, entre as Ruas Alfredo Luís Raton e Av. Eduardo Magalhães. E, de modo geral, as inundações nessas seções são raras, sobretudo por causa das obras e muretas que encarceram o Córrego do Lenheiro. O problema identificado no local possui relação com a deficiência do sistema de drenagem, ocasionando acúmulo das enxurradas e consequente alagamento. Isso, em caso de uma eventual enchente, pode acarretar prejuízos sociais e econômicos, dado que os dois processos pode ocorrer em conjunto.</p>
6		<p>Área de lançamento do Córrego do Segredo (canalizado) no Córrego do Lenheiro. Nessa seção, pode haver aumento do caudal dado ao acréscimo de volume. Apesar disso, a área possui obras de engenharia que contribuem para a redução local de transbordamentos. Ainda assim, o processo pode ocorrer e afetar as residências e comércios locais, necessitando, assim, de monitoramento. Exemplo da possibilidade de ocorrência é ilustrado na figura e ponto a seguir.</p>
7		<p>Registro de transbordamento do Córrego do Lenheiro em dezembro de 2013. A imagem em questão ilustra a inundação das Ruas Antônio Josino de Andrade e Aldo Zerlotine, a jusante da área acima apresentada. Segundo o Jornal de Lavras, foram 139 milímetros de chuva.</p>
8		<p>As fotografias apresentam o represamento de enxurradas ao final da Rua Frei Cândido, ocasionando alagamentos devido à deficiência do sistema de drenagem. Ao lado, o aumento do nível do Córrego Água Limpa após a zona de deságue do Córrego do Lenheiro. Essa seção necessita de um nível de atenção e monitoramento especial, dado que: intervenções antrópicas alteraram o curso e a dinâmica do canal; ocorre na foz do Água Limpa no Rio das Mortes e na foz do Córrego do Lenheiro no Água Limpa, efeito remando. Esse processo de represamento amplia a possibilidade e transbordamento em ambos trechos.</p>
9		<p>Ribeirão Água Limpa em seu baixo curso, na Avenida Santos Dumont. Conforme já mencionado nos pontos 10 e 11, o canal possui histórico de transbordamento e a área, em específico, encontra-se delimitada pela Defesa Civil e CPRM como área de risco. Observa-se que o canal margeia a encosta e que o talude entre o leito e a via marginal possui menos de 2 m. Assim, diante do aumento do volume, a área de extravasamento passa a ser a própria rua, o que pode afetar as residências e os moradores.</p>
10		<p>Ocupação humana na planície de inundação do Ribeirão Água Limpa, Rua Santos Dumont. Observa-se a aproximação entre as casas e o canal fluvial que, atualmente, após obras de desassoreamento e aprofundamento do leito, teve uma redução dos transbordamentos. Todavia, a construção encontra-se a menos de 5 m do canal, o que constitui risco aos moradores.</p>
11		<p>Área localizada a montante do ponto 10, acima apresentado. Observa-se que foi implementado um dique marginal artificial para conter o extravasamento no local. Além disso, nota-se o nível elevado das calçadas como medida preventiva as inundações e que o canal apresenta uma inflexão nesse local, o que, naturalmente, reduz a energia e propicia o acúmulo. Segundo moradores, a área possui histórico de inundações.</p>
12		<p>Área de deságue do Ribeirão Água Limpa no Rio das Mortes. O local possui declividades entorno de 3% e é uma planície de inundação. Durante períodos de cheia, o nível do Rio das Mortes costuma subir lentamente. Contudo, esse aumento do nível somado a eventos de precipitação de maior volume ocasiona o represamento do Ribeirão Água Limpa. Este, algumas vezes, transbordou e inundou cerca de 2,5 m no interior das residências próximas.</p>
13		<p>Planície de inundação do Rio das Mortes, próximo à Ponte do Bezerrão, entre os Bairros Colônia do Marçal e Fábricas. Diante de baixa declividade e proximidade do rio, essa costuma ser uma das primeiras áreas de transbordamento do Rio das Mortes. A imagem data do dia 13 de fevereiro de 2020, tendo se repetido em 8 de janeiro de 2023.</p>

14		<p>A Avenida Luiz Giarola apresenta problemas recorrentes relacionados a enxurradas, alagamentos e inundações. Além de possuir rios (perenes e intermitentes estrangulados) paralelos e transversais, a via recebe todo o fluxo de escoamento superficial das ruas localizadas à montante, a maioria asfaltada e carente de sistema de drenagem.</p>
15		<p>Fundo de vale localizado na Av. Sétimo Ambroise, Colônia do Marçal. O córrego existente na área encontra-se estrangulado pela via supracitada e as manilhas, aparentemente subdimensionadas, estão obstruídas por bambus e sedimentos depositados. Nota-se que, além das águas do canal, a área recebe o fluxo de enxurrada que escoam pelas vias impermeabilizadas por asfalto a montante.</p>

Figura 6 – Carta de suscetibilidade à inundações e quadro síntese.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

Já o rio das Mortes, diferentemente dos mencionados, é um canal de maior porte, extenso e caudaloso. A elevação no nível das suas águas ocorre, geralmente, durante períodos em que o acumulado pluviométrico é maior. Exemplo disso são as inundações do final de dezembro de 2011 e início de janeiro de 2012, ocorridas a partir de um acumulado pluviométrico mensal (dezembro e janeiro) de aproximadamente 950mm (CAMPOS; COSTA; PEREIRA, 2014).

Considerando tais características, observa-se que, no modelo de inundações, as áreas classificadas com maior grau de suscetibilidade se encontram, sobretudo, na confluência do córrego do Lenheiro com o ribeirão Água Limpa e, também, no entorno imediato do rio das Mortes.

Nessa seção de confluência do Lenheiro com o Água Limpa (8), durante eventos chuvosos de maior intensidade, ocorre o acúmulo caudal dos dois canais e o conseqüente remanso. O mesmo processo ocorre nas imediações da foz do Água Limpa – confluência com o rio das Mortes (12) –, afetando, sobretudo, o bairro Nossa Senhora de Fátima, onde, em 2012, inundações atingiram cerca de dois metros de altura no interior das casas (MENEZES, 2015; SÃO JOÃO DEL-REI, 2015b).

Outros pontos de suscetibilidade graduada como “muito alta” se destacam no entorno do ribeirão Água Limpa, próximo à Avenida Santos Dumont (9; 10; 11). São trechos onde o leito do canal é delimitado por taludes de corte menos demarcados ou inflexões. Somando-se a essas características do canal, a área recebe o fluxo de enxurradas de vias impermeabilizadas a montante, sentido Matosinhos, ampliando o caudal.

Já ao longo do córrego do Lenheiro, há pontos específicos classificados como de “muito alta” suscetibilidade (3; 6; 7), os quais ocorrem devido ao aumento do caudal por contribuição de afluentes – por exemplo, na confluência com os córregos da Caieira, do

Senhor dos Montes, do Segredo e do Rio Acima. No entanto, no entorno do córrego do Lenheiro, predominam classes de alta suscetibilidade, as quais podem ser confirmadas a partir de registros históricos de inundações, comportas de aço instaladas nas portas e elevação das calçadas (Figura 7), sobretudo no bairro Tejuco.



Figura 7 – Comportas protetoras de inundação/alagamento.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

Além do entorno do córrego do Lenheiro, Água Limpa e rio das Mortes, a Colônia do Marçal (nordeste da imagem) também apresentou seções com alta suscetibilidade à inundação (14; 15). De modo geral, o bairro não possui canais de hierarquia fluvial elevada, acima de 1^a e 2^a ordem, exceto o rio Carandaí (6^a ordem) (ANA, 2018). Este, embora situado no bairro e com uma vasta planície de inundação, não foi contemplado na Base Topográfica e se encontra a cerca de 520 m das áreas ocupadas.

Apesar das referidas características, esses canais de pequeno porte, perenes e intermitentes, encontram-se canalizados, estrangulados ou aterrados (FERREIRA *et al.*, 2021). Tal condição, somada à impermeabilização do solo, à conseqüente ampliação do escoamento superficial, ao padrão geométrico das vias e à própria geomorfologia, faz com que, durante eventos chuvosos, a área seja afetada por inundações, enxurradas e alagamentos (Figura 8).

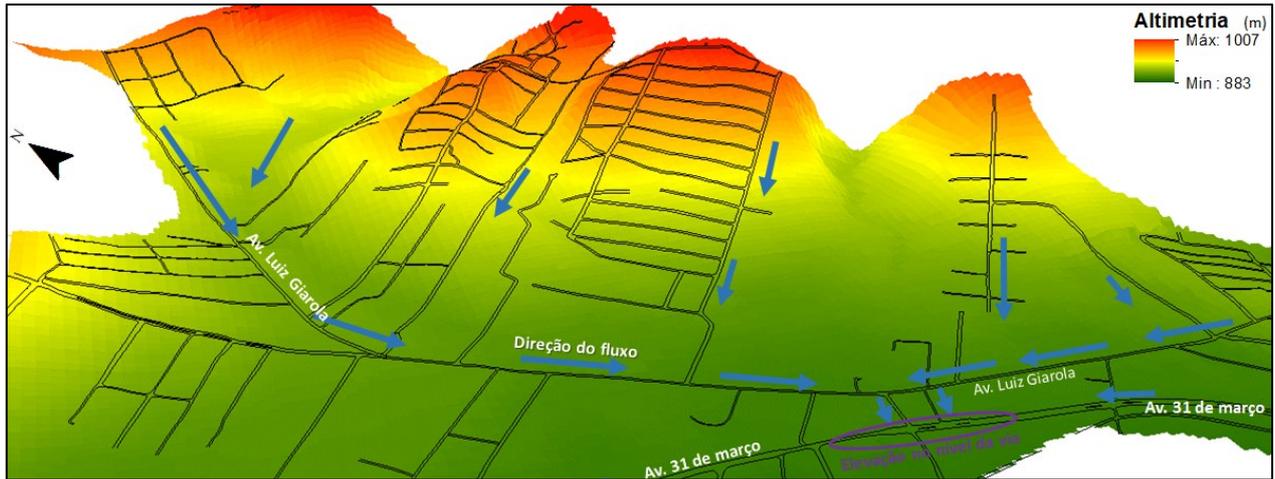


Figura 8 – Geometria urbana e relevo da Colônia do Marçal.
Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

A partir da identificação e análise dessas áreas suscetíveis à inundação e aos movimentos de massa, ambos os modelos, associados ao uso da terra (edificações), propiciaram a classificação do grau de perigo. Esse determinante resulta da interação ou existência humana no meio suscetível e, quando acrescido do fator vulnerabilidade, passa a ser um indicativo do grau de risco a que os sujeitos estão expostos (Figura 9).

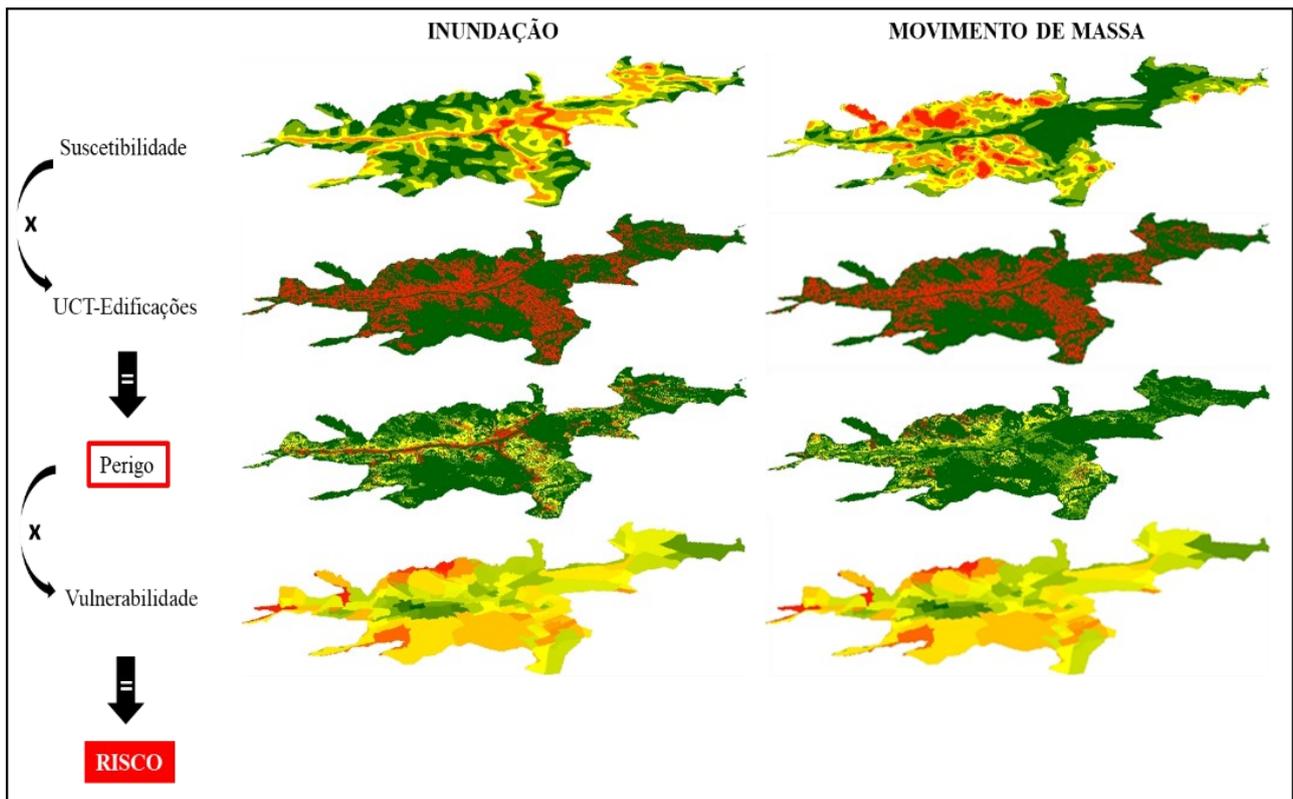


Figura 9 – Composição do risco.
Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

Diante desse entendimento, observa-se que, frente a um evento de inundação, as áreas com maior grau de risco (Figura 10) estão localizadas nos bairros Tejuco e Nossa Senhora de Fátima (próximo à confluência do Lenheiro, Água Limpa e Fábricas). Essas áreas, além de apresentarem suscetibilidade elevada ao referido processo, têm uma população com menor capacidade de suportar os danos ocasionados por ele, seja por questão econômica, sociocultural ou de infraestrutura. Tal realidade e grau de exposição são observados, sobretudo, nas imediações do bairro Tejuco, a montante da confluência do córrego Rio Acima, onde há edificações paralelas ao leito do rio, infraestruturas de estrangulamento e muretas protetoras baixas.

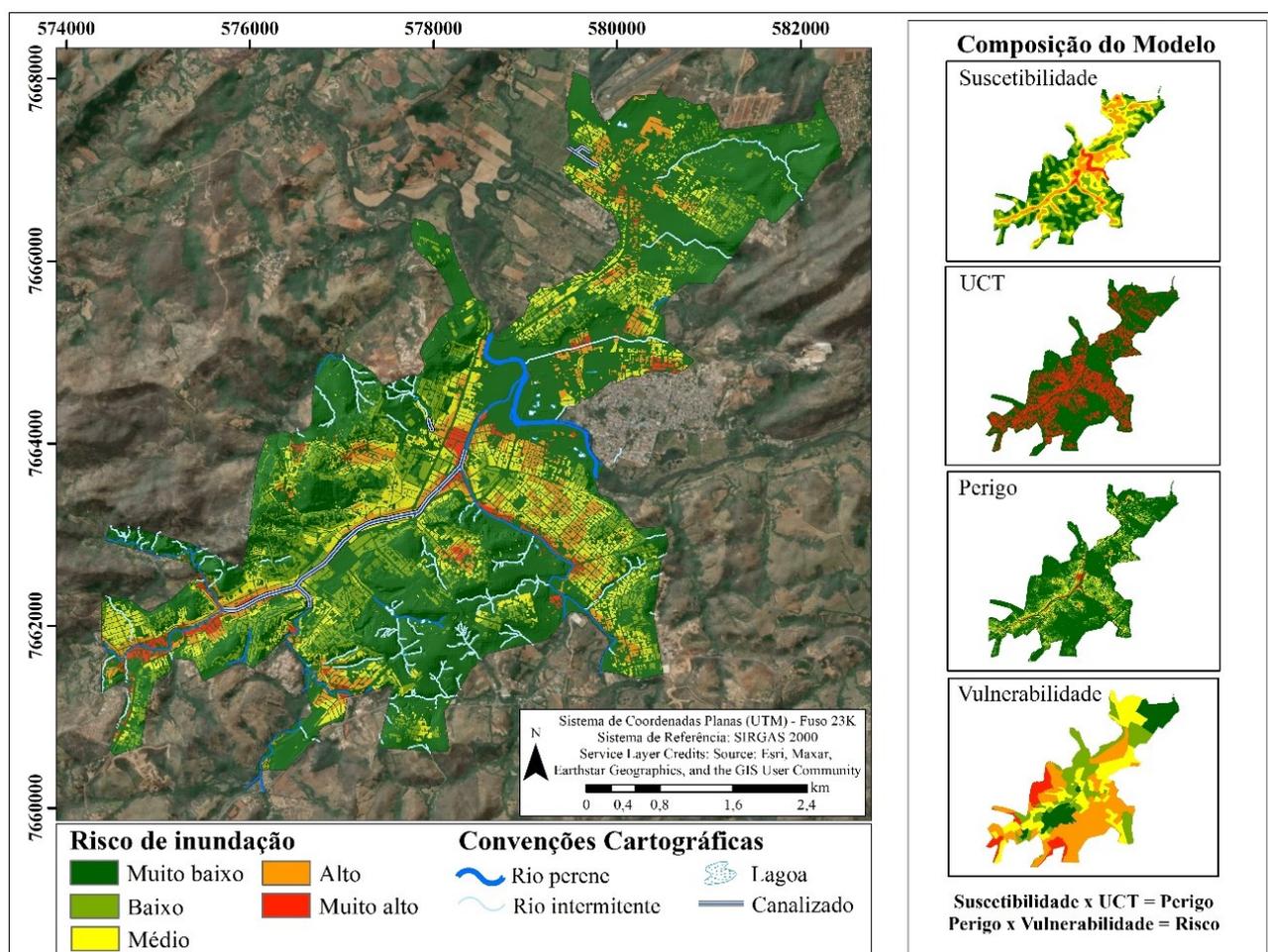


Figura 10 – Mapa de risco de inundação.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

Do mesmo modo, nota-se que, frente ao perigo de movimentação de massa, o bairro Senhor dos Montes é o que tem maior grau de risco (Figura 11), seguido dos bairros Tejuco (sub-bairro Guarda-Mor), Bonfim, Jardim Central (sub-bairro Caieira) e Fábricas. Isso pois são locais específicos em que há, naturalmente, uma predisposição à ocorrência de processos gravitacionais de encosta, conforme apresentado na discussão da

suscetibilidade, bem como uma população com menor capacidade socioeconômica de suportar ou de se recuperar do dano.

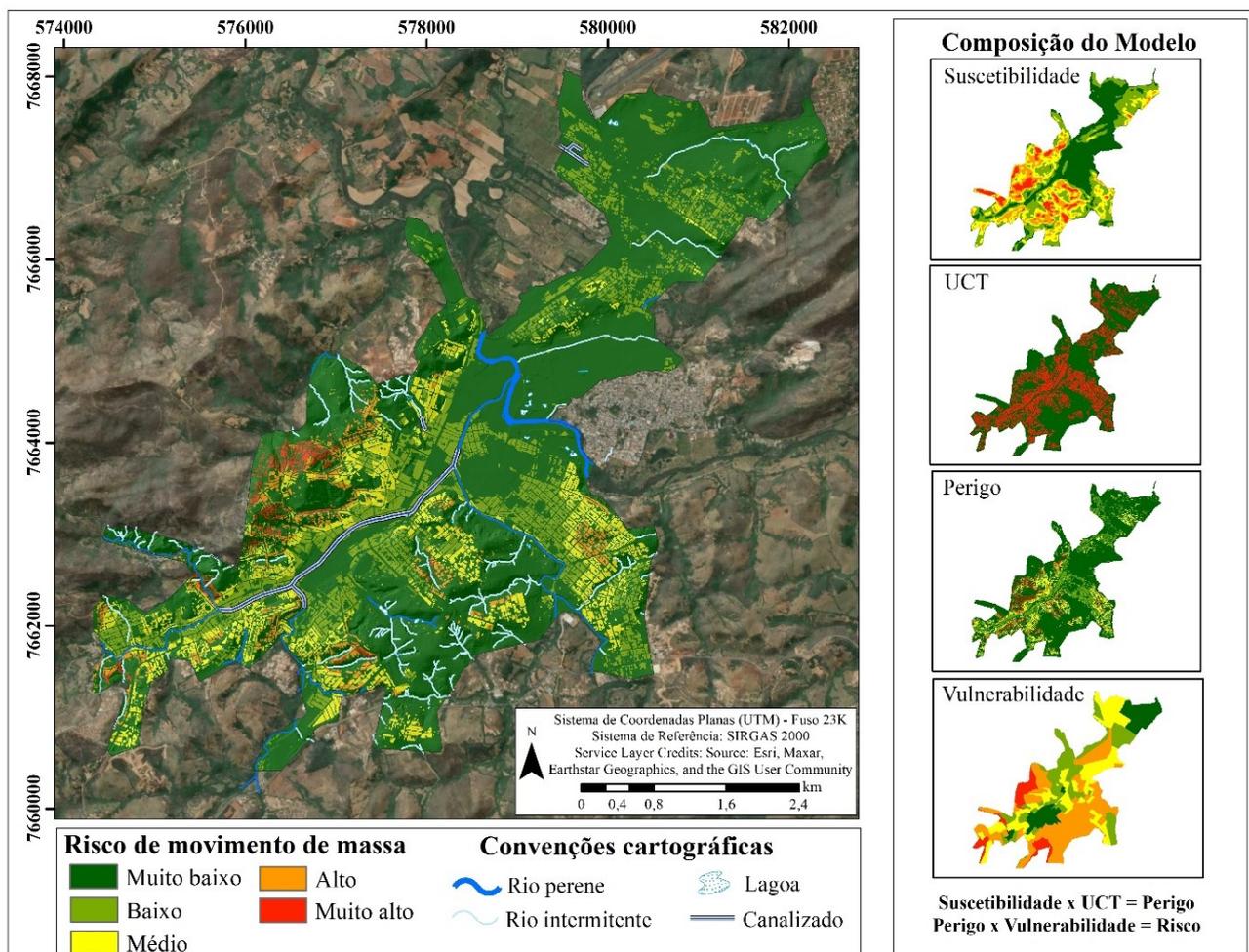


Figura 11 – Mapa de risco de movimentação de massa.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2023.

Tendo em vista esse conjunto de informações geoespaciais, ressalta-se que as áreas classificadas como de “alto” e “muito alto” risco são as que carecem de maior prioridade no planejamento, na gestão e nos sistemas de alerta. Tal prioridade não diminui a necessidade de atenção às classificações menores, as quais podem evoluir para um cenário de maior complicação, caso não sejam assistidas.

Por fim, os modelos aqui apresentados, bem como a metodologia proposta, correspondem a ferramentas úteis ao planejamento territorial e à gestão de riscos, podendo contribuir para tomadas de decisão assertivas e estabelecimento de prioridades por parte do Poder Público Municipal. Por meio deles, identificou-se que 14,7% (3,29 km²) e 2,5% (0,57 km²) da área de estudo apresentam, respectivamente, suscetibilidades à inundação, classificadas como “muito alta” e “alta”. Já em relação à suscetibilidade à

movimentação de massa, 13% (2,9 km²) da área apresentou grau muito alto, e 5,5% (1,2 km²) alto. Ou seja, 35,7% da área estudada apresenta suscetibilidade a processos que oferecem perigo à população.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta metodológica apresentada integrou os índices de Concentração de Rugosidade, Hack, Densidade de Drenagem e Hipsometria para a identificação de áreas suscetíveis à inundação e aos movimentos de massa. Por meio da álgebra de mapas e da combinação das referidas variáveis, obtiveram-se dois modelos indicativos dos graus de suscetibilidade à inundação e movimentação de massa em São João del-Rei.

Os produtos foram validados por meio de trabalhos de campo, histórico de recorrência e sobreposição de bases vetoriais da Defesa Civil e do Serviço Geológico do Brasil. Assim, considera-se que o modelo resultante apresentou pertinência na indicação e representação de áreas suscetíveis. A combinação dessas áreas com a ocupação humana, obtida a partir da classificação de uso e cobertura da terra, viabilizou a identificação de áreas de perigo. Estas, por vez, associadas ao grau de vulnerabilidade socioespacial, elaborado a partir de informações do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010), deram origem às bases de risco de inundação e movimentação de massa. Quanto a isso, é importante salientar que os dados correspondem à uma realidade de doze anos atrás e, quando combinados aos resultados do Censo Demográfico de 2022, apresentarão distribuição espacial diferente.

Desse modo, diante da coerência dos modelos e do baixo custo de aplicabilidade para o Poder Público Municipal, acredita-se que essa proposta pode contribuir para planejamento territorial, gestão e prevenção de riscos para a cidade de São João del-Rei. A utilização desse produto, pela Defesa Civil Municipal e pelos departamentos de planejamento, pode auxiliar nas tomadas de decisão, na definição de prioridades e no ordenamento territorial, além de oferecer possibilidade de replicação para outras áreas. Nesse sentido, é importante que o Poder Público se preocupe com contratação de mão-de-obra qualificada, apta para trabalhar com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e preparada para as análises propostas (a exemplo dos Geógrafos).

Apesar dessa funcionalidade, conforme já ressaltado, os modelos não substituem os mapeamentos e as análises geotécnicas pontuais, portanto não possuem caráter de regularização ou interdição de áreas, demandando estudos mais aprofundados e estruturais.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 88882.434000/2019-1; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) – Processo n.º 158062/2021-3; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Processo nº 15464-1/2022; Prefeitura Municipal de São João del-Rei; Defesa Civil; 2º Pelotão de Bombeiros Militar do município de São João del-Rei e Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

REFERÊNCIAS

ADLER, R. F. *et al.* Flood and landslide applications of near real-time satellite rainfall products. **Natural Hazards**, v. 43, n. 2, p. 285-294, 2007.

AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE. **Aplicação de metodologia simplificada para definição de áreas de ameaça de desastres naturais**. Belo Horizonte: AGRMBH, 2021. n.p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Base Hidrográfica Ottocodificada da Bacia do Rio Paraná 1:50.000/1:100.000: Codificação de Bacias Hidrográficas pelo Método de Otto Pfafstetter. **Agência Nacional de Águas**. Brasília, 17 jul. 2018. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/a7e786e6-9f80-43f4-aaeb-89f019863b60>. Acesso em: 1 nov. 2022.

ALVES, K. M. A.; CAVALCANTI, L. C. S.; NÓBREGA, R. S. Eventos extremos e risco de inundação: uma análise do comportamento evolutivo dos Distúrbios Ondulatórios de Leste em junho de 2010 sobre a bacia do rio Una-Pernambuco. **GeoTextos**, Salvador, v. 9, n. 2, p. 173-189, 2013.

APOLLO MAPPING. **Satélite Ikonos**. Disponível em: https://apollomapping.com/ikonos-satellite-imagery?utm_source=Google&utm_medium=cpc&utm_campaign=1043421005&utm_term=ikonos&utm_content=121025928660&qclid=Cj0KCQjwkZiFBhD9ARIsAGxFX8DRqn1kM4thThJggpeRwAKTLzYLG11bNvnf4bxWeeBJ_6FRSBpjjEaApWNEALw_wcB. Acesso em: 15 nov. 2021.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; SAMPAIO, T. V. M. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 47-60, 2014.

BAO, H. *et al.* Exploring the utility of radar and satellite-sensed precipitation and their dynamic bias correction for integrated prediction of flood and landslide hazards. **Journal Of Hydrology**, v. 603, p. 126964, 2021.

BARUQUI, A. M. *et al.* **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da zona Campos das Vertentes**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 326p.

BRASILERO, V. D.; DANGELO, A. G. D.; LEMOS, C. B. Registros de Memória: Leitura da Paisagem Cultural da Cidade de São João Del-Rei, em Minas Gerais, por meio da Iconografia Histórica. In: ENCONTRO DO CENTRO DE INVESTIGAÇÃO TRANSDISCIPLINAR: CULTURA, ESPAÇO E MEMÓRIA, 3., 2013, Porto. **Atas...** Porto: CITCEM, 2013. s.p.

BONETTI, J.; LIMA, C. O. Proposta metodológica para adequação das informações do Censo Demográfico do IBGE na análise da vulnerabilidade social a eventos extremos na zona costeira. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 63, n. 2, p. 122-140, 2018.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Modelagem de dados em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de Informação Geográfica**: aplicações na agricultura. Brasília: EMBRAPA, 2005. p. 47-66.

CAMPOS, A. C.; COSTA, J. C.; PEREIRA, G. Análise da precipitação no município de São João del-Rei (MG). In: SIMPÓSIO MINEIRO DE GEOGRAFIA, 1., 2014, Alfenas. **Anais...** Alfenas: Universidade Federal de Alfenas, 2014, p. 223-228.

CASTELLARIN, A.; MONTANARI, A.; PALLARD, B. A look at the links between drainage density and flood statistics. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 7, p. 1019-1029, 2009.

DEFESA CIVIL DE SANTA CATARINA. **Gestão de Risco**: o que é. Disponível em: <https://www.defesacivil.sc.gov.br/municipios/gestao-de-risco-o-que-e/>. Acesso em: 1 nov. 2022.

EMAMI, S. N. *et al.* A machine learning framework for multi-hazards modeling and mapping in a mountainous area. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-14, 2020.

EMERGENCY EVENTS DATABASE. **EM-DAT**: The International Disaster Database. Disponível em: <http://www.emdat.be>. Acesso em: 1 nov. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **IKONOS**: Característica dos Satélites IKONOS. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/ikonos>. Acesso em: 1 nov. 2021.

ETCHEBEHERE, M. L. *et al.* Aplicação do índice “Relação Declividade-Extensão-RDE” na bacia do Rio do Peixe (SP) para detecção de deformações neotectônicas. **Geologia USP: Série Científica**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 43-56, 2004.

FERREIRA, A. B. R. *et al.* A cartografia de síntese e as estruturas verticais e horizontais da paisagem em ambientes urbanos suscetíveis à inundação. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 41, n. 1, p. 177-185, 2021.

FERREIRA, J. C.; ROSSINI-PENTEADO, D. Mapeamento de risco a escorregamento e inundação por meio da abordagem quantitativa da paisagem em escala regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 11., 2011, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 2011. p. 1-12.

FONSECA, B. M. **O uso do Sistema de Informações Geográficas na análise morfométrica e morfológica de bacias de drenagem na serra do Espinhaço Meridional-MG.** 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FONSECA, B. M.; PIZANI, F. M. C.; SOUZA, F. E. V. Compartimentação do relevo baseada em parâmetros morfométricos: uma proposta de índice global de dissecação do relevo. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, Campinas, v. 1, p. 5513-5524, 2017.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Diagnóstico de São João del-Rei:** Indicações de Projetos. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 1984. 106p.

GAZETA DE SÃO JOÃO DEL-REI. Chuva deixa população apreensiva. **Gazeta de São João del-Rei.** São João del-Rei, ano 2, n. 76, p. 1, 8 jan. 2000.

GUIMARÃES, F. N. **O município de São João del-Rei aos 250 anos de sua Criação:** 1713 a 1963. São João del Rei: Tipografia Progresso, 1963. 54p.

HACK, J. T. Stream-profile analysis and stream-gradient indices. **Journal of Research of the U. S. Geological Survey**, Reston, v. 1, n. 4, p. 421-429, 1973.

HIRUMA, S. T.; PONÇANO, W. L. Densidade de drenagem e sua relação com fatores geomorfopedológicos na área do alto rio Pardo, SP e MG. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 15, n. 1-2, p. 49-57, 1994.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, McLean, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. **Censo Demográfico 2010:** agregado de Setores Censitários dos Resultados do Universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. n.p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. **IBGE Cidades:** população estimada 2021. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. n.p.

JANKOWSKI, P. L.; MOURA, A. C. M. Contribuições aos estudos de análises de incertezas como complementação às Análises Multicritérios – “Sensitivity Analysis to Suitability Evaluation”. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 4, p. 665-684, 2016.

KOBIYAMA, M. *et al.* **Prevenção de desastres naturais – conceitos básicos.** Ed. Organic Trading, 1. ed. Curitiba, 2006.

LAET, C. **Em Minas.** São Paulo: Globo, 1993. 112p.

MALDOS, R. Formação urbana da cidade de São João del Rei. **São João del-Rei Transparente.** São João del-Rei, 2000. Disponível em: <https://saojoaodelreitransparente.com.br/works/view/605>. Acesso em: 15 abr. 2020.

MAPS, A. **How Avenza Maps Works**. [s.l.] 2020. Disponível em: <https://store.avenza.com/pages/app-features>. Acesso em: 1 set. 2020.

MENEZES, I. P. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes, inundações e movimentos de massa: São João Del Rei, MG**. Rio de Janeiro: CPRM, 2015. 57p.

PEDROSA, A. S. O geógrafo como técnico fundamental no processo de gestão dos riscos naturais. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 32, n. 1, p. 11-30, 2012.

REBELO, F. **Riscos naturais e ação antrópica: estudos e reflexões**. Imprensa da Universidade de Coimbra/Coimbra University Press, 2003. 290p.

SÃO JOÃO DEL-REI. **Base Planimétrica da cidade de São João del-Rei na escala de 1:1000**. São João del-Rei: Secretaria de Obras e Planejamento, 2015a. n.p.

SÃO JOÃO DEL-REI. **Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil de São João del-Rei**. São João del-Rei: Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil, 2013. 167p.

SÃO JOÃO DEL-REI. **Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil de São João del-Rei**. São João del-Rei: Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil, 2015b. 167p.

SILVEIRA, A. A. Estudo meteorológico relativo a São João d'El-Rei. **Boletim da Comissão Geographica de Minas Geraes**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 4, 1896.

STRAHLER, A. N. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 8, n. 6, p. 913-920, 1957.

SULAIMAN, S. N.; JACOBI, P. R. (Org.). **Melhor prevenir: Olhares e saberes para a redução de risco de desastre**. São Paulo: IEE-USP, 134p.2018. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/sites/default/files/anexospublicacao/publicacao-MelhorPrevenir_ebook2.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2023.

Recebido: 14.03.2023

Aceito: 14.08.2023