

CAPÍTULO 6

**PROPOSTA METODOLÓGICA
PARA IDENTIFICAÇÃO
DE ÁREAS DE RISCO EM
AMBIENTES URBANOS
A PARTIR DA ANÁLISE
MORFOMÉTRICA
DO RELEVO¹²**

¹² Este capítulo deve ser referenciado como Ferreira et al. (2023c).

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 em 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 (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2022), 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 (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 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 a 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 regiões menos desenvolvidos (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 (Defesa Civil de Santa Catarina, s.d.). Para isso, o conhecimento do

meio da sua dinâmica é etapa fundamental para, posteriormente, implementar medidas de redução do risco (Defesa Civil de Santa Catarina, s.d.; Jacobi; Sulaiman, 2018; Kobiyama *et al.*, 2006). Com isso, 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 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. Entretanto, vale pontuar que modelos não são a representação de toda a realidade da paisagem, mas uma estrutura simplificada dela (Chorley, 1967; Christofolletti, 1999; Lopes, 2023).

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. Mesmo sendo de fundamental importância, tornam-se uma etapa do planejamento que fica aquém das necessidades essenciais e emergenciais para uma efetiva implementação.

Desse modo, o objetivo deste capítulo é contribuir com uma proposta metodológica que utiliza modelos de custo reduzido através de índices morfométricos. 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.

O processo resultou em dois modelos passíveis de utilização no planejamento urbano, sendo um de suscetibilidade à inundação e outro, a movimentos em massa. Ambos foram validados em campo e apresentaram pertinência com as características do meio físico e os registros de ocorrência de inundações e movimentações em

massa da cidade de São João del-Rei. A partir disso, em um segundo momento, o modelo de suscetibilidade à ocupação e às variáveis de caráter socioeconômico, cultural e estrutural do Censo Demográfico (IBGE, 2010) foram associados a fim de identificar os graus de perigo e risco, respectivamente.

6.1 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 1 m) e informações censitárias do IBGE. As particularidades e os usos desses materiais serão descritos separadamente nas seções a seguir:

- **Base topográfica:** as curvas de nível de 1 em 1 metro foram extraídas do arquivo vetorial planimétrico da cidade de São João del-Rei. O material, de fonte secundária, foi elaborado em escala de 1:1.000¹³ e disponibilizado em formato Autodesk's Design Web Format (DWF) com os topônimos: curvas de nível mestras, curvas intermediárias, vias pavimentadas e não pavimentadas, algumas edificações e rios perenes, intermitentes e canalizados (São João del-Rei, 2015b). Como a base não contempla a totalidade do limite urbano estabelecido pelo IBGE (2021), apenas 95% dele, a fig. 60 ilustra a área de estudo (limite da mancha urbana/cidade) referência para esse capítulo, bem como as porções não contempladas;
- **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 (1 m de resolução espacial no modo pancromático e 4 m 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.; EMBRAPA, s.d.).

¹³ Material público elaborado e validado em campo sob processo licitatório n. 103/2015 pela empresa Despro Engenharia.

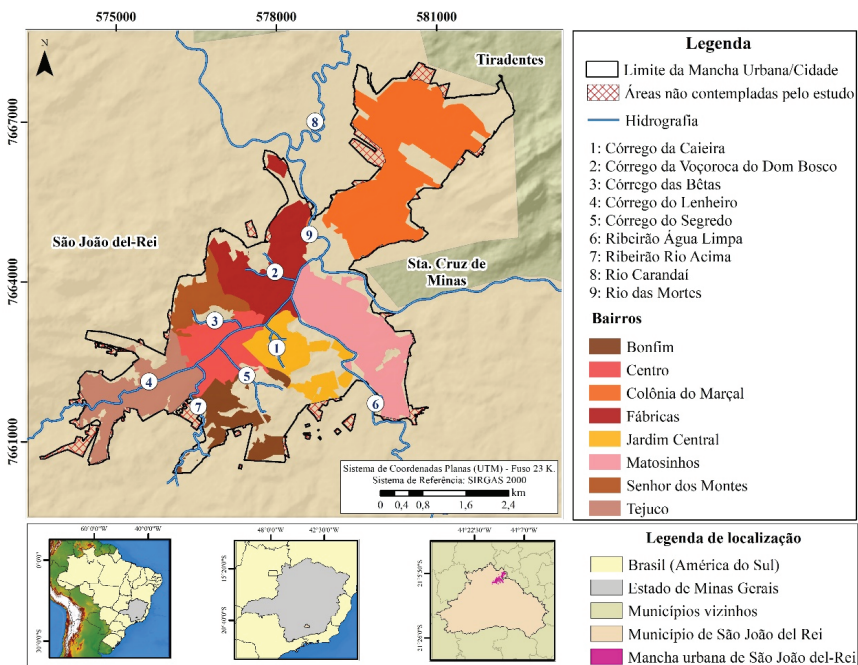


Fig. 60 - Área de estudo para o desenvolvimento do estudo proposto no Capítulo 6
 (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

- **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 (ANA). 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 informações socioeconômicas foram adquiridos por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, com base no Censo Demográfico de 2010. As informações socioeconômicas foram obtidas conforme o seguinte fluxo: <http://www.ibge.gov.br> > Download > Estatísticas > Censos Demográficos > Censo 2010 > Resultado do Universo > Agregados por Setores Censitários. O repositório contém 26 arquivos em formato *Comma-Separated Values* (CSV) e da “Base de Informações por Setor

Censitário Censo 2010 – Universo”, a qual apresenta a descrição das variáveis contidas nos demais arquivos. A Malha de Setores foi obtida por meio do acesso à base de organização e estrutura territorial do IBGE.

6.2 Métodos

Os procedimentos metodológicos empregados neste estudo partem, inicialmente, do entendimento de que o risco resulta da existência concomitante do perigo e da vulnerabilidade (Ferreira; Rossini-Penteado, 2011; Rebelo, 2003) (Equação 4).

$$R = P \times V \quad (4)$$

Em que:

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

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 em massa serão descritos individualmente nas seções a seguir.

6.2.1 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), além da Hipsometria. Todos esses parâmetros foram elaborados a partir da base topográfica da área de estudo.

Para maior clareza, os procedimentos foram organizados em subseções separadas. O fluxograma abaixo ilustra e sintetiza o procedimento (fig. 61).

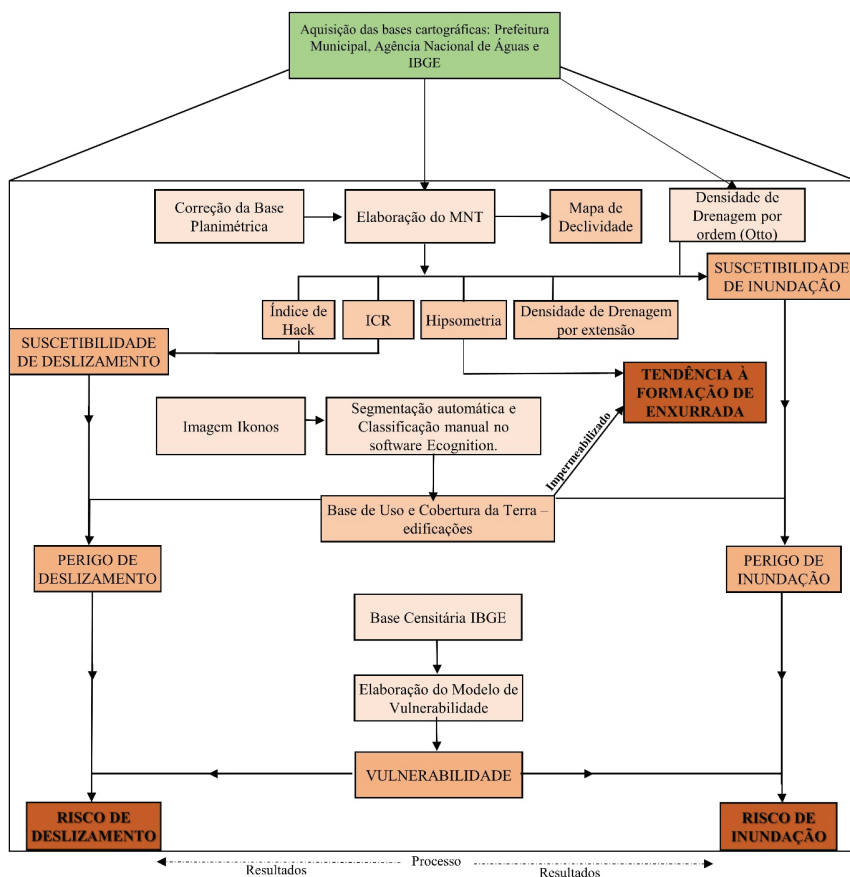


Fig. 61 - Fluxograma e síntese metodológica (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

6.2.1.1 Elaboração do Modelo Numérico de Terreno

Modelo Numérico de Terreno pode ser considerado base principal para a elaboração dos demais produtos já mencionados e que serão descritos a seguir. Sua elaboração foi possível a partir da interpolação dos vetores de Curvas de Nível. Para isso, utilizou-se a ferramenta Create Triangulated Irregular Network (TIN), no ArcMap. O *plugin* tem a função de conectar os vértices a partir de uma série de

arestas para, assim, formar uma rede de triangulações que representam a superfície do terreno (fig. 62).

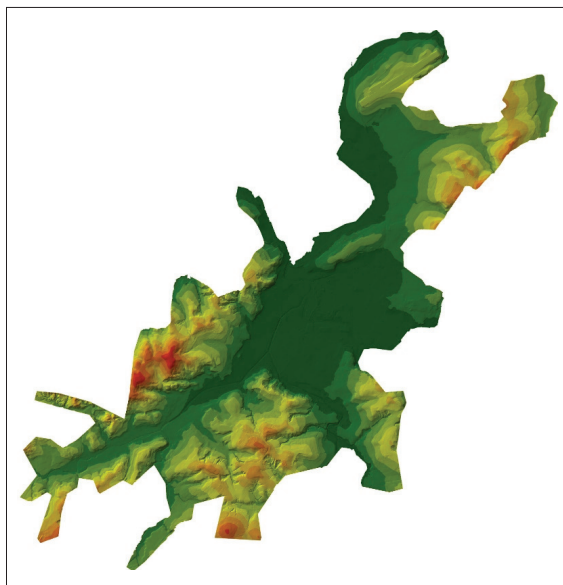


Fig. 62 - Triangular Irregular Networks (TIN) (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

A partir dessa rede triangulada, o arquivo TIN for convertido em *raster*, adotando resolução espacial de 1 m (fig. 63).

6.2.1.2 Elaboração da Base Hipsométrica

Com o Modelo Numérico de Terreno em formato *raster*, foi elaborada a base hipsométrica para composição do Modelo de Suscetibilidade à Inundação. Essa variável possui papel fundamental na identificação da suscetibilidade à inundação, pois influencia no nível de água alcançado por esse processo. A relação está associada à própria ação da Lei da Gravidade, que direciona a água para as regiões mais baixas. Assim, quanto menor a altitude, maior a tendência de inundação em uma determinada região, enquanto as maiores altitudes tendem a uma menor probabilidade (Conceição; Simões, 2021; Tucci, 2009; Vasconcelos, 2018).

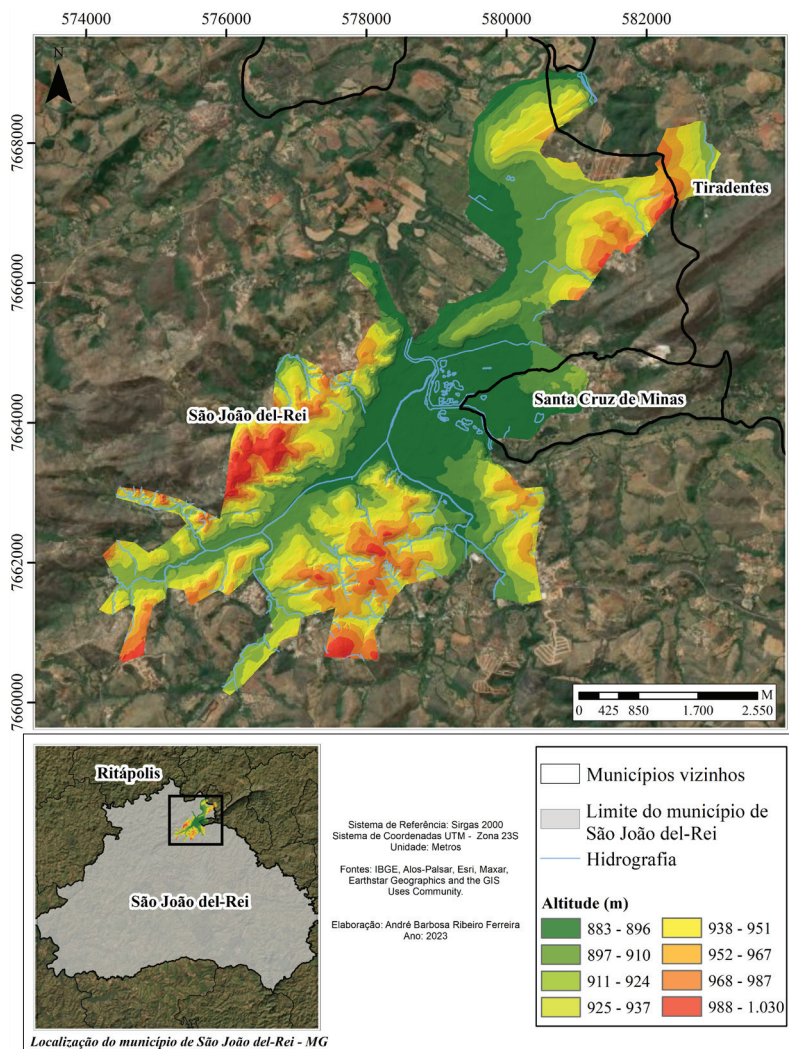


Fig. 63 - Raster: Modelo Numérico de Terreno (Mapa de Hipsometria de São João del-Rei)
 (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

No caso de São João del-Rei, para a elaboração da base de cotas altimétricas suscetíveis, empregou-se a reclassificação do Modelo Numérico de Terreno (TABELA III), conforme os registros de cotas da inundação, do ano de 2012, delimitados pelo CPRM e pela Defesa Civil (São João del-Rei, 2013, 2015a).

TABELA III – Reclassificação da hipsometria.

Reclassify	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: Adaptada de Defesa Civil de São João del-Rei, 2015.

6.2.1.3 Elaboração da Base de Declividade

Ainda com o arquivo TIN, foi elaborada a base de declividade, parâmetro de fundamental importância para a temática deste estudo. Segundo Guerra (1993), a declividade é a inclinação maior ou menor do relevo em relação ao horizonte, ou seja, é o grau de inclinação que uma superfície apresenta em relação ao plano. Logo, vertentes com declividades mais preponderantes são mais suscetíveis aos processos de movimentações gravitacionais de massa (Lupinacci; Oliveira; Souza, 2018). Já planícies ou depressões com baixo grau de inclinação tendem a acumular fluxos d'água, sejam eles de enxurradas ou inundações. Devido a isso, a declividade compõe o aspecto legal de uso e parcelamento do solo urbano a partir da Lei Federal n. 6.766 (Brasil, 1979), a qual determina que não é permitido o parcelamento do solo urbano em áreas com declividades superiores a 30%, bem como em terrenos alagadiços e sujeitos à inundação.

Desse modo, o mapa de declividade corresponde a uma ferramenta relevante para planejamento urbano, obras de engenharia, instalação de usinas, aterros e tendências de urbanização e desenvolvimento agrícola, pois possibilita analisar a dinâmica do espaço (Barros; Polidoro; Takeda, 2009). Além disso, é por meio da declividade que se torna possível a elaboração de importantes índices relacionados à dinâmica ambiental, como o Índice de Hack e o Índice de Concentração da Rugosidade, dentre outros. Para a elaboração da base de declividade, efetuou-se a renderização do TIN por inclinação da rampa (fig. 64).

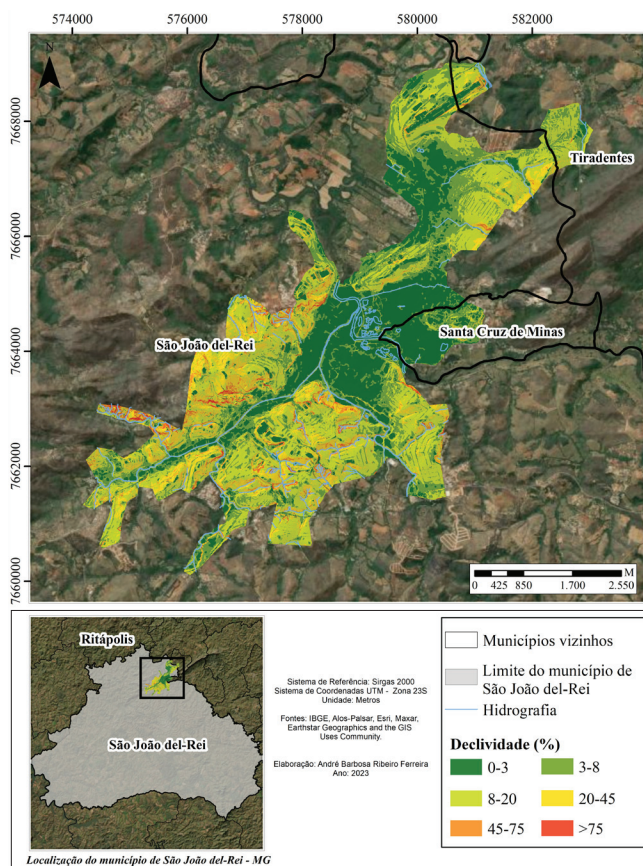


Fig. 64 - Mapa de declividade de São João del-Rei (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

6.2.1.4 Índice de Concentração da Rugosidade

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). O índice vem sendo empregado em diversas pesquisas e oferece bases para a identificação de áreas potencialmente instáveis expostas aos diferentes processos erosivos e de degradação, dentre outros (Fernandes; Pereira Neto, 2012).

Neste estudo, 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 uma matriz que, posteriormente, foi convertida em uma nuvem de pontos. Sobre a nuvem de pontos, aplicou-se o estimador de densidade de Kernel, com raio de 150 m para a área de estudo. Segundo 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.

6.2.1.5 Índice de Hack

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 em massa. De um modo geral, relevos com a presença de canais com grande energia tendem a apresentar zonas com intensos processos de morfogênese (movimentos em 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 5):

$$H = \Delta H / \text{Log}_e \Delta L \quad (5)$$

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 em 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 10 m. 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 indicou autocorrelação entre os pontos mensurados e os preditos, isto é, entre os *knickpoints* e a superfície de extrapolação gerada pela interpolação.

6.2.1.6 Densidade de Drenagem

A Densidade de Drenagem é reconhecida como um dos mais importantes parâmetros da análise morfométrica de bacias hidrográficas (Hiruma; Ponçano, 1994). Definida 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 6).

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 energético aumenta o tempo de concentração. Do mesmo modo, Alves, Cavalcanti e Nóbrega (2013) afirmam que, quanto maior o número de canais contribuintes e a 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 da extensão *knickpoint* acima mencionada. Em seguida, os vetores obtidos foram interpolados a partir da densidade de Kernel, com raio de 200 m, 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 (1957). 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.

6.2.1.7 Álgebra de Mapas

Tendo constituído esse conjunto de dados morfométricos, todas as bases foram normalizadas de 0 a 1 (Equação 7), para permitir comparações e combinações para a aplicação da análise multicritério (Jankowski; Moura, 2016) e para 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 suscetibilidade 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 suscetíveis serão os terrenos. A inversão numérica do dado elimina essa relação inversa, deixando a análise coerente.

$$f(x) = (x - \text{Mín}) * 1 / (\text{Máx} - \text{Mín}) \quad (7)$$

Em que:

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

Após a normalização, as bases foram justapostas, 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 (Hipsometria, ICR, IH e DD unificada [DD1 + DD2]), cada uma com peso de 25% (fig. 65).

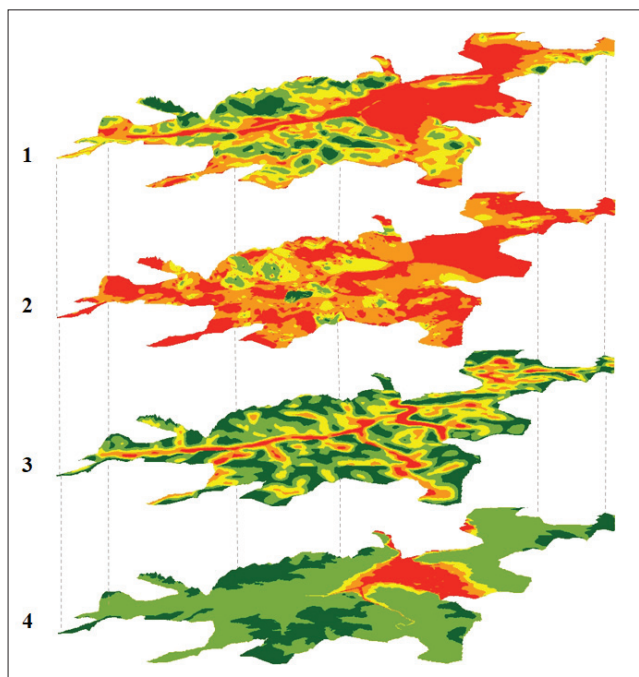


Fig. 65 - Composição do Modelo de Suscetibilidade à Inundação.

Legenda: 1 = ICR; 2 = IH; 3 = DD unificada; 4 = Hipsometria (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

Já para o Modelo de Suscetibilidade a movimentos em 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 (fig. 66). 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 do ICR corresponde ao aumento da suscetibilidade ao movimento em massa.

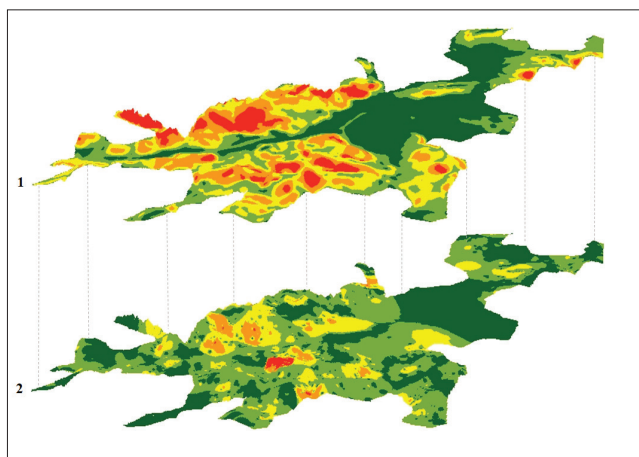


Fig. 66 - Composição do Modelo de Suscetibilidade a movimentos em massa.
Legenda: 1 = ICR; 2 = IH (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

Os resultados obtidos nas justaposições foram validados em campo, utilizando o aplicativo Avenza Maps, 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.

6.2.2 Modelo de Perigo

Para elaboração do Modelo de Perigo, foi empregada uma álgebra de mapas entre o Modelo de Suscetibilidade e Uso da Terra, sendo 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 (subseção a seguir 6.3.2.1) e suporte visual do Imagery Basemap da ESRI e do Google Earth Pro.

Após a classificação da imagem, as classes foram convertidas em *raster*, por meio da ferramenta *Classification >> Samples >> Create TTA Mask from Samples*. Em seguida, foi efetuada a exportação do produto por meio do processo: *Classification >> Save TTA Mask >> Format Tif Geocoded*. O *raster* salvo foi adicionado ao aplicativo ArcMap, onde foi reclassificado (atribuído o nome à classe) e convertido em polígonos, os quais foram unidos, de acordo com a respectiva classe, a partir da função *Merge*. O fluxograma da fig. 67 sintetiza o processo:

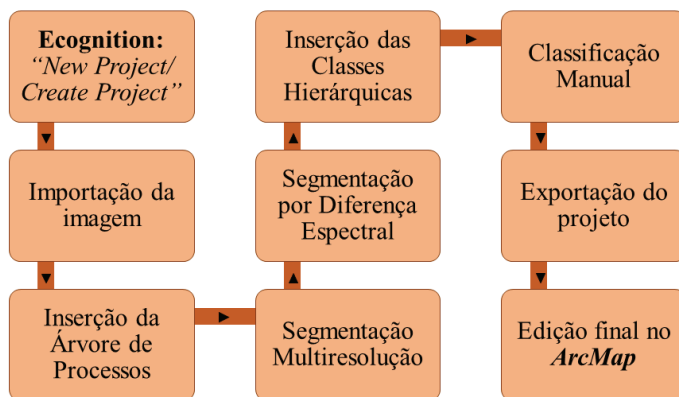


Fig. 67 - Fluxograma síntese da classificação do UCT (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

Ao todo, foram classificados 11 tipos de uso e cobertura da terra, sendo: edificações; água; asfalto; vias semipermeáveis; gramínea; arbusto/arbóreo; solo exposto; cicatriz de deslizamento; afloramento; pontes e voçorocas vegetadas. Apesar

de categorizar esses diferentes usos, 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. Ou seja, as edificações são adotadas como infraestruturas que o ser humano habita, abriga-se e tem como referência de lugar. As outras classes não possuem relação com o perigo, mas, sim, influência sobre a suscetibilidade (natural), atenuando-a ou intensificando-a.

Desse modo, o atributo/classe “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 (restante da área).

Para determinar o grau de perigo, cada um dos dois Modelos de Suscetibilidade (inundação e movimentos em massa) foi justaposto ao Uso da Terra (fig. 68), ambos com a mesma importância (50%).

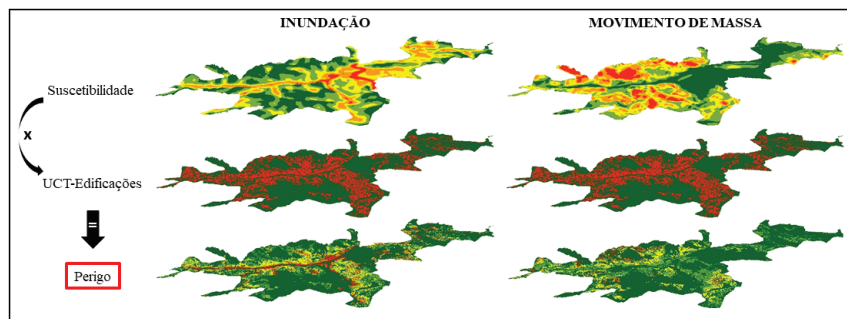


Fig. 68 - Composição dos Modelos de Perigo (Fonte: Ferreira et al., 2023c).

6.3.2.1 Trabalhos de campo

Os trabalhos de campo foram efetuados em cinco etapas:

- 1) Reconhecimento e análise crítica das características geomorfológicas e estruturais de São João del-Rei. Ressalta-se que, nesta etapa, o conhecimento prévio e a experiência do lugar foram de suma importância. Período: 29/05/2019 a 04/06/2019.
- 2) Trabalho efetuado em grupo, visando a ampliação da análise e sistematização da situação natural e estrutural da área de estudo. Período: 15/03/2020 a 19/03/2020.

- 3) Validação dos modelos de suscetibilidade a inundações, movimentação em massa e UCT; levantamentos históricos registrados em jornais, revistas e afins. Período: 30/08/2021 a 07/09/2021.
- 4) Revisão e correção de levantamentos histórico-bibliográficos e fotográficos. Período: 25/10/2021 a 29/10/2021.
- 5) Apresentação do material produzido à Defesa Civil municipal, ao Corpo de Bombeiros e à Secretaria de Planejamento e Patrimônio. Período: 12/12/2022 a 15/12/2022.

Ressalta-se que, durante as cinco etapas, foram efetuados investigações e levantamentos junto aos moradores de áreas de encosta e planícies de inundação, bem como a estudiosos locais que pudessem contribuir com informações e/ou materiais.

6.3.2.2 Validação dos modelos de inundação e movimentação em massa

A validação dos modelos foi realizada a partir da sobreposição das áreas delimitadas pela Defesa Civil, inventários de eventos e os referidos trabalhos de campo. Estes possibilitaram a observação e análise da paisagem, infraestrutura urbana e indícios como: marcas de água, comportas, degraus, calçadas elevadas, taludes, contrafortes, afloramentos, aterros, rastejamento e outros. Para direcionar a validação em campo, os dois modelos gerados (inundação e movimentação em massa) foram inseridos no aplicativo Avenza Maps.

O aplicativo gratuito pertence à empresa canadense Avenza Systems e permite carregar e usar mapas georreferenciados, elaborados em ambiente SIG, possibilitando uma navegação *off-line* com sinal do Global Positioning System (GPS) do dispositivo móvel. Desse modo, permite rastrear a localização, marcar pontos e percursos com fotografia, além de anotações (Bisognin; Cruz; Lanza Nova, 2019) (fig. 69).

A utilização do aplicativo em conjunto aos registros de eventos e análise das características estruturais e naturais (ausência de sistema de drenagem, marcas d'água, portões e placas de vedação, rastejamento e outros), permitiram atribuir efetividade ao modelo. Além disso, todos os polígonos delimitados pela Defesa Civil

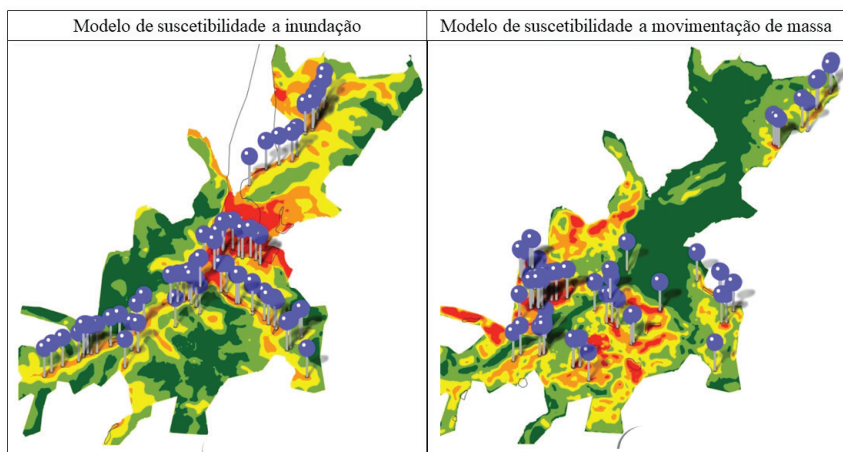


Fig. 69 - Validação das áreas de suscetibilidade em campo (Avenza Systems)
(Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

municipal, bem como os vetores de taludes, coincidiram com as delimitações do modelo. Por fim, ressalta-se que há polígonos que estendem a delimitação por áreas que a base topográfica não contempla, no entanto, estão fora do recorte espacial que é a cidade de São João del-Rei.

6.2.3 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 IV) 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 IV – 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		
	V056	Domicílios com lixo acumulado nos logradouros	>
	V058		
	V060		

* Nome dos arquivos conforme a nomenclatura do IBGE, sem espaço e sem acentos (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

Empregada e referida a organização, as nove variáveis entre 0 e 1 foram normalizadas e justapostas com igual importância (Equação 8), resultando em uma base global de vulnerabilidade.

$$\begin{aligned}
 &(\text{Renda mensal} * 0,111) + (\text{Pessoas Analfabetas} * 0,111) + (\text{Densidade} \\
 &\text{populacional} * 0,111) + (\text{Pessoas menores de 10 anos e maiores de 60} \\
 &\text{anos} * 0,111) + (\text{Domicílios com cinco ou mais moradores} * 0,111) + \\
 &(\text{Domicílios com lixo enterrado} * 0,111)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 &(\text{Domicílios em áreas sem boca de lobo no entorno} * 0,111) + (\text{Domi-} \\
 &\text{cílios com esgoto a céu aberto} * 0,111) + (\text{Domicílios com lixo acu-} \\
 &\text{mulado nos logradouros} * 0,111)
 \end{aligned}$$

6.2.4 Modelo de Risco

O Modelo de Risco foi elaborado considerando que $R = P \times V$, conforme a Equação 4 (Ferreira; Rossini-Penteado, 2011; Rebelo, 2003). Portanto, a partir da justaposição individual da base de perigo de cada processo à vulnerabilidade, têm-se um modelo de risco de inundação e outro de movimentos em massa, conforme sintetiza o QUADRO V.

QUADRO V – Síntese dos procedimentos que compuseram o risco.

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

*Todos normalizados entre 0 e 1, e pesos distribuídos igualmente. Fonte: Ferreira *et al.* (2023c).

6.3 A identificação de áreas de suscetibilidade, perigo e risco em ambientes urbanos a partir da análise morfométrica: resultados e discussões

Os resultados obtidos por meio dos procedimentos metodológicos descritos 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 em 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) (fig. 70). 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).

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 em massa, o Modelo de Inundação representou as particularidades espaciais do processo em São João del-Rei (fig. 71). 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, o Ribeirão Água Limpa e o Rio das Mortes. Nos dois primeiros, as inundações ocorrem, geralmente, de forma mais brusca. São rios, respectivamente, de 5ª e 6ª ordem (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

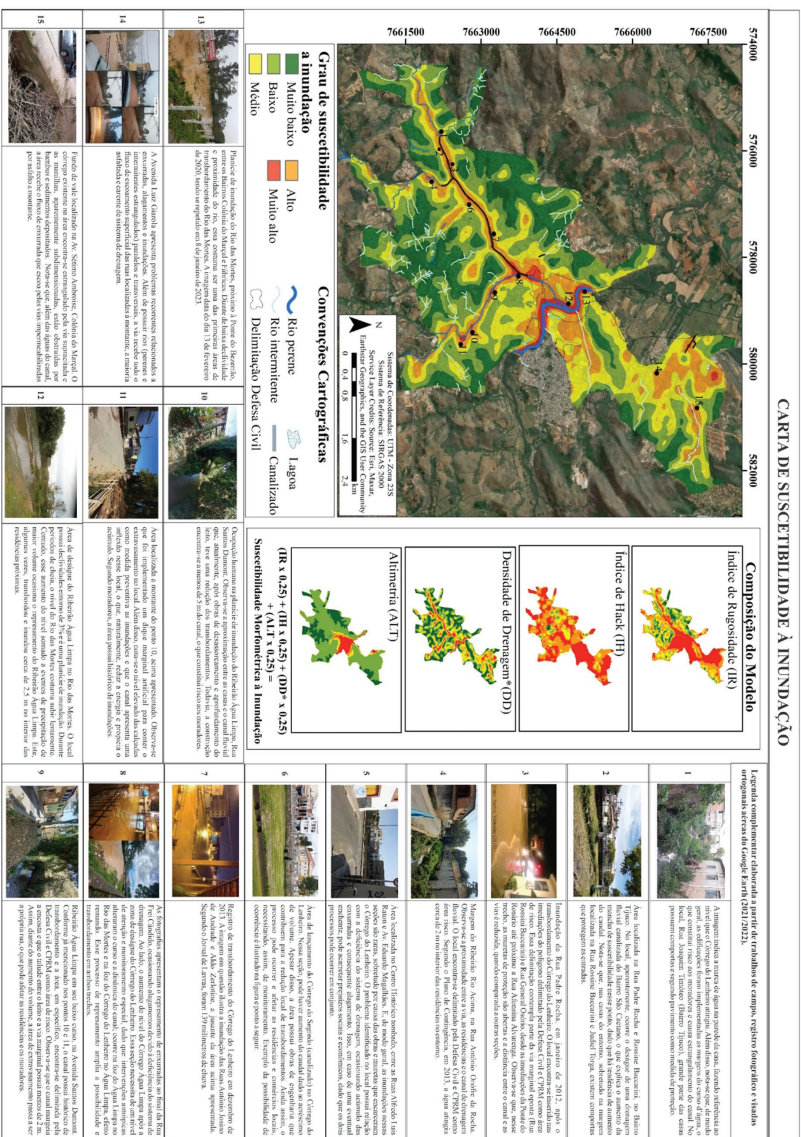


Fig. 71 - Carta de suscetibilidade à inundação (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

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 950 mm (Campos; Costa; Pereira, 2014).

Considerando tais características, observa-se que, no Modelo de Inundação, 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 consequente 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, 2015a).

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 (fot. 46), sobretudo no bairro Tejuco.

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 1ª e 2ª ordem, exceto o Rio Carandaí (6ª 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.



Fot. 46 - Comportas protetoras de inundação/alagamento
(Fotografia de Ferreira *et al.*, 2023c)

Apesar das referidas características, esses canais de pequeno porte, perenes e intermitentes, encontram-se canalizados, estrangulados ou aterrados (Zacharias *et al.*, 2021). Tal condição, somada à impermeabilização do solo, à consequente 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 (fig. 72).

A partir da identificação e análise dessas áreas suscetíveis à inundação e aos movimentos em massa, ambos os modelos, justapostos ao Uso da Terra (edificações) (fig. 73), propiciaram a classificação do grau de perigo (fig. 74 e 75). Esse determinante resulta da interação ou existência humana no meio suscetível e, quando acrescido do fator vulnerabilidade (fig. 76), passa a ser um indicativo do grau de risco a que os sujeitos estão expostos.

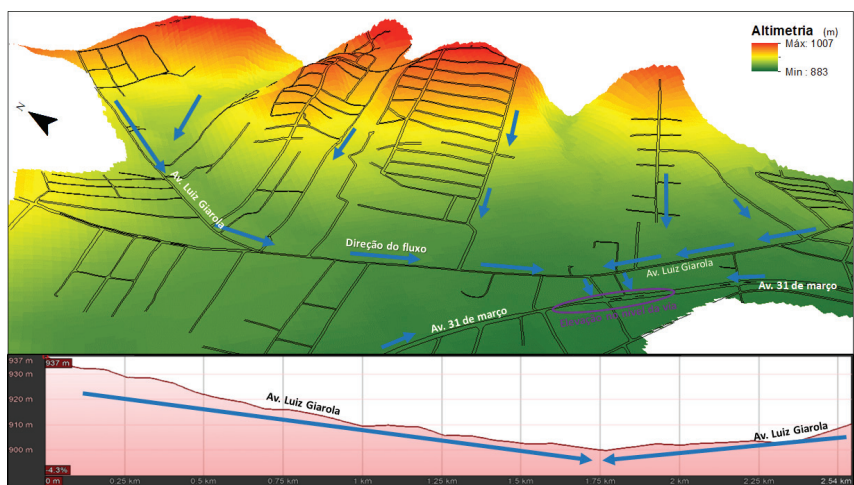


Fig. 72 - Geometria urbana e relevo da Colônia do Marçal (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

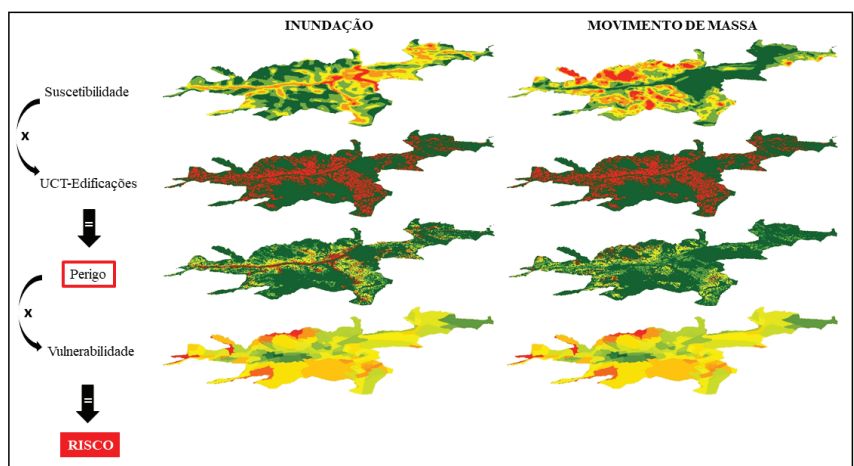


Fig. 73 - Composição do risco (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

Diante desse entendimento, observa-se que, frente a um evento de inundação, as áreas com maior grau de risco (fig. 77) 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

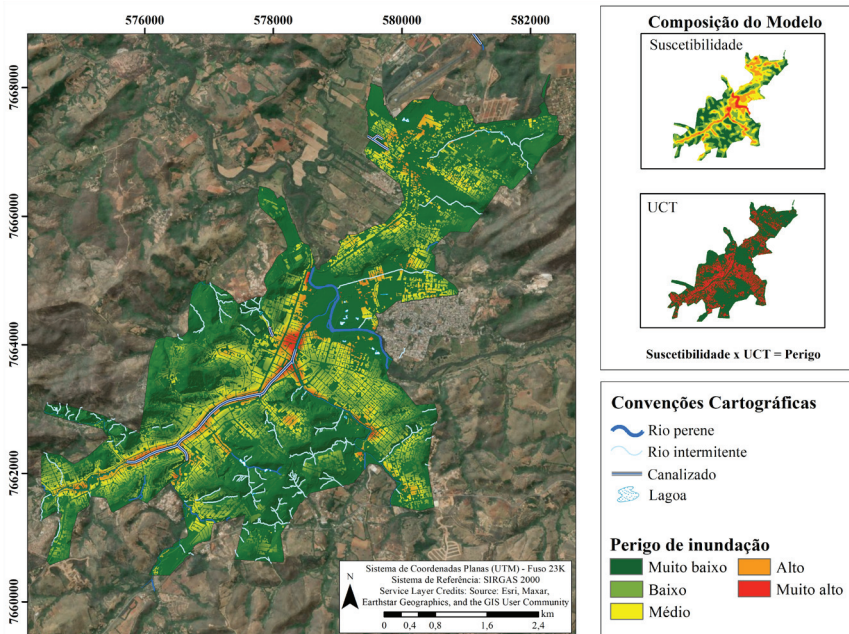


Fig. 74 - Mapa de Perigo de inundação (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

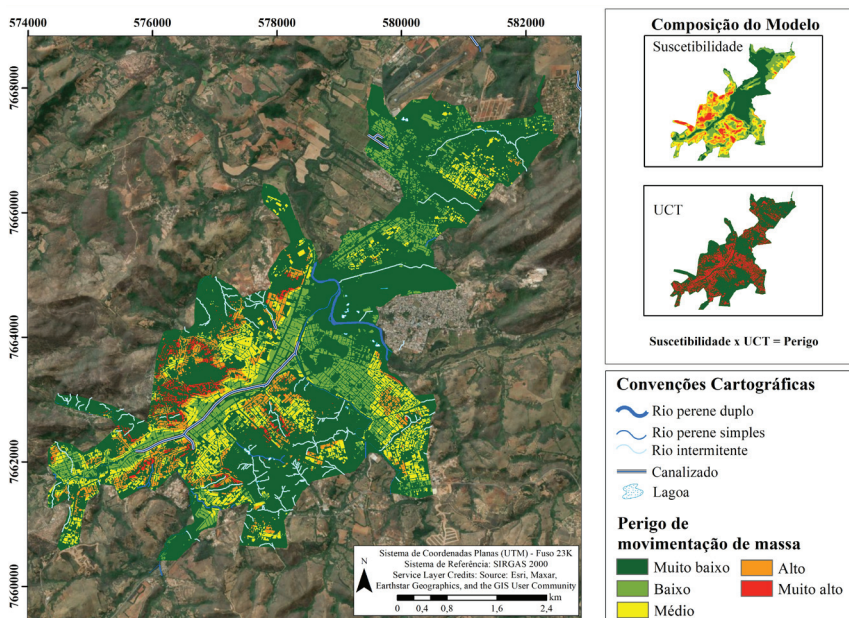


Fig. 75 - Mapa de Perigo de movimentação em massa (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

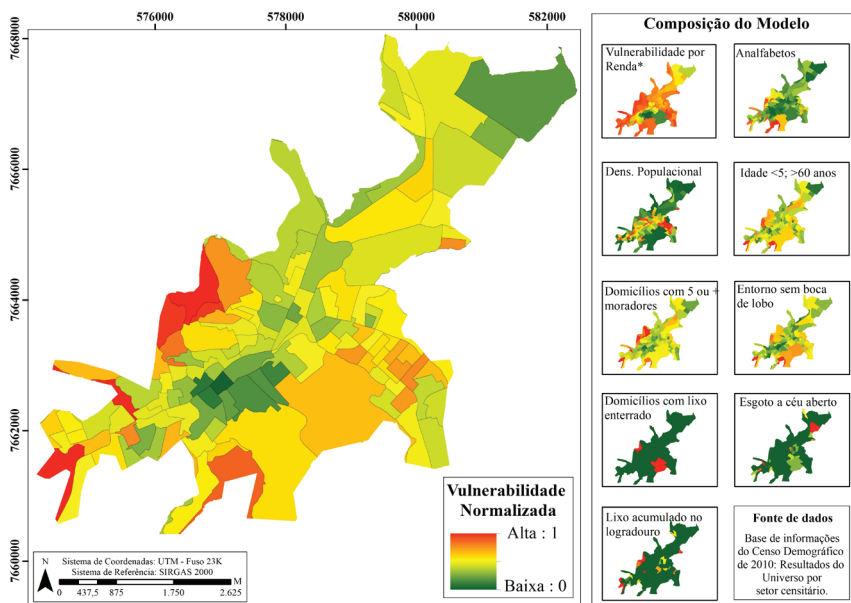


Fig. 76 - Mapa de Vulnerabilidade da cidade de São João del-Rei
(Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

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.

Do mesmo modo, nota-se que, frente ao perigo de movimentação em massa, o bairro Senhor dos Montes é o que tem maior grau de risco (fig. 78), seguido dos bairros Tejuco (sub-bairro Guarda-Mor), Bonfim, Jardim Central (sub-bairro Caieira) e Fábricas, 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.

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,

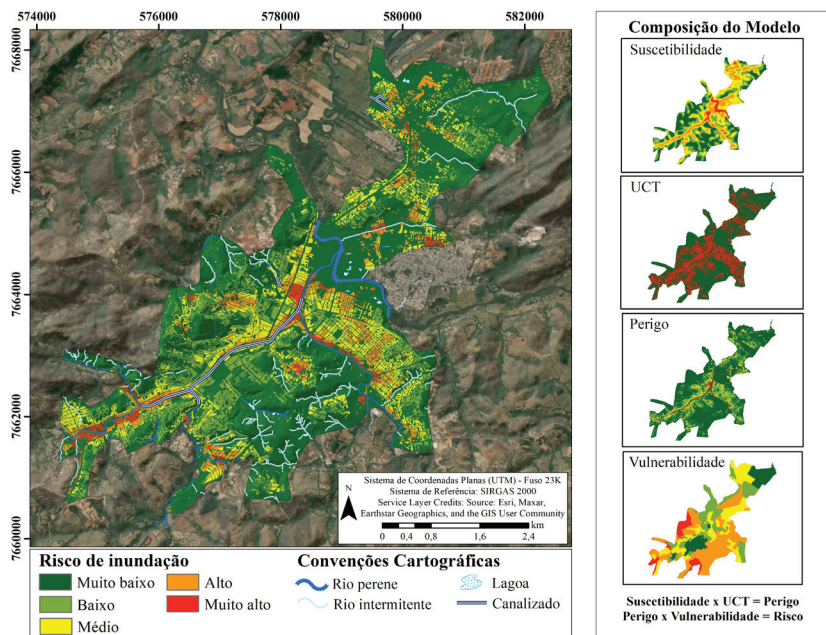


Fig. 77 - Mapa de Risco de inundação (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

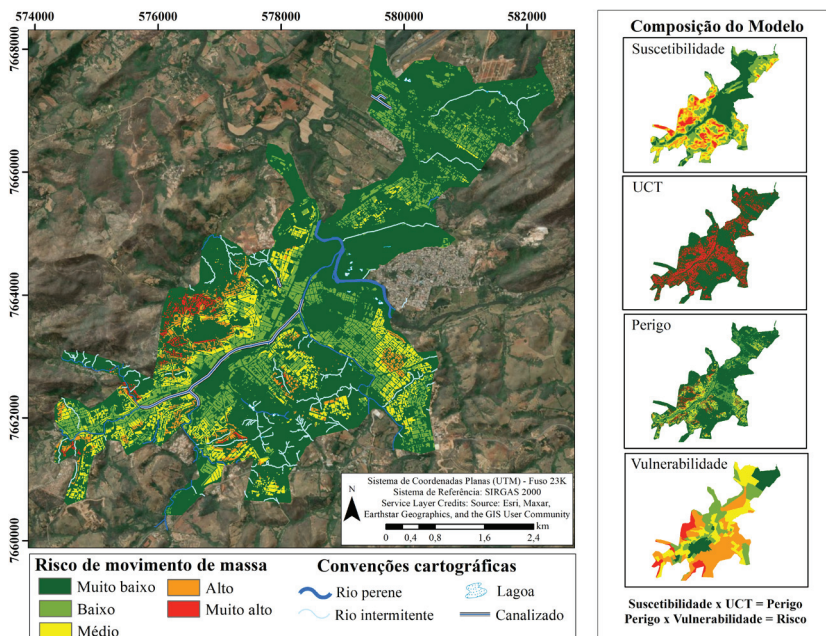


Fig. 78 - Mapa de Risco de movimentação em massa (Fonte: Ferreira *et al.*, 2023c).

respectivamente, suscetibilidades à inundação classificadas como “muito alta” e “alta”. Já em relação à suscetibilidade à movimentação em 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.

6.4 Considerações gerais

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 em 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 em 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 em 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.