

MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO NA BACIA DO ALTO-MÉDIO RIOS MOGI GUAÇU E PARDO - MG

Mapping of flood susceptibility in the upper-medium basin Mogi Guaçu e Pardo rivers - MG

Italo Mira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Brasil

italo.mira14@gmail.com

Márcio Silva

Doutor em Geologia pela Universidade estadual de Campinas – Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (Campus Inconfidentes), Brasil

marcio.silva@ifsuldeminas.edu.br

Recebido: 25.01.2023

Aceito: 06.06.2023

Resumo

O conhecimento sobre as áreas suscetíveis à inundação constitui meio extremamente importante para a implementação de políticas públicas de planejamento e gestão territorial e ambiental, permitindo a adoção de práticas de corretas de uso e manejo da terra e possibilitando a minimização de impactos ambientais causados pelos eventos hidrológicos críticos. O presente artigo tem como objetivo mapear e analisar as áreas de maior suscetibilidade à inundação na Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG, pelo método AHP, com validação pelos índices de influência. A metodologia compreendeu interpolações geoestatísticas, processamento digital de imagens e álgebra de mapas. As áreas com maior suscetibilidade à inundação foram obtidas pela ponderação das variáveis declividade, hipsometria e uso e ocupação da terra, após aplicação do método de processo analítico hierárquico (AHP). O mapeamento das áreas suscetíveis à inundação propiciou a identificação de diversos fatores relacionados à ocorrência desses eventos, resultando na determinação de áreas de altíssimo risco (8%), alto risco (36%), risco médio (50%) e baixo risco (6%) na Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG, bacia hidrográfica de importância estratégica para o Estado de Minas Gerais e de São Paulo. As áreas de maiores riscos à inundação, localizadas em regiões altimetricamente inferiores a 900 metros e com declividades menores que 20%, possuem alta influência da ação antrópica e apresentam relação diretamente proporcional com as porções de alta densidade de drenagem e de canais com maior hierarquia fluvial. O método AHP, validado pelos fatores de influência (hierarquia fluvial, densidade de drenagem, índice de potência de escoamento, índice de transporte de sedimento, índice topográfico de umidade e índice de rugosidade do terreno), constitui abordagem eficiente nos estudos de eventos hidrológicos críticos (inundações).

Palavras-chave: Geoprocessamento; Processo analítico hierárquico; Indicadores de influência; Uso e manejo da terra; Desastres naturais.

Abstract

Knowledge about areas susceptible to flooding is an extremely important means for implementing public policies for territorial and environmental planning and management, allowing the adoption of correct land use and management practices and enabling the

minimization of environmental impacts caused by hydrological events critics. This article aims to map and analyze the areas of greatest susceptibility to flooding in the Upper-medium Sub-basin of the Mogi Guaçu and Pardo Rivers – MG, using the AHP method, with validation using the influence indices. The methodology comprised geostatistical interpolations, digital image processing and map algebra. The areas with the greatest susceptibility to flooding were obtained by weighting the variables slope, hypsometry, land use, and occupation after applying the analytical hierarchical process method (AHP). The mapping of areas susceptible to flooding allowed the identification of several factors related to the occurrence of these events, resulting in the determination of areas of very high risk (8%), high risk (36%), medium risk (50%) and low risk (6 %) in the Upper-Medium Sub-basin Mogi Guaçu and Pardo Rivers – MG, hydrographic basin of strategic importance for the State of Minas Gerais and São Paulo. The areas with the greatest risk of flooding, located in regions with altitudes lower than 900 meters and slopes of less than 20%, are highly influenced by anthropic action and are directly proportional to portions of high drainage density and channels with greater river hierarchy. The AHP method, validated by influencing factors (fluvial hierarchy, drainage density, runoff power index, sediment transport index, topographic humidity index and terrain roughness index), constitutes an efficient approach to studying critical hydrological events (flooding).

Keywords: Geoprocessing; Analytical hierarchical process (AHP); Indicators of influence; Land use and management; Natural disasters.

1. INTRODUÇÃO

A degradação ambiental e as alterações e ocupações do território, de forma irregular, resultam em desequilíbrios temporários ou permanentes causando a instabilidade do meio, o qual resulta em áreas cada vez mais vulneráveis e suscetíveis a sofrerem desastres naturais, com danos à saúde, ao bem-estar e à segurança da população (ROSS, 2012; SILVA; SILVA; LIMA, 2020; ROSA; FERREIRA, 2021).

Segundo Correia *et al.* (2015) os desastres naturais associam-se aos termos perigo, risco e vulnerabilidade, no qual, de modo geral, risco é a probabilidade de um perigo se tornar desastre. Neste cenário, um grave problema com consequências de ordem social, ambiental e econômica, atualmente, são as inundações (LONDE *et al.*, 2014; SAMANTA *et al.*, 2018), consideradas desastres naturais de caráter hidrológicos pelo Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (2022).

Embora as inundações sejam evidenciadas na literatura como fenômenos naturais associadas a condições ambientais específicas (TUCCI, 2003; LONDE *et al.*, 2014), o crescimento desordenado das cidades, sem o planejamento adequado, altera os padrões naturais, intensificando a magnitude e frequência das inundações (CARNEIRO; MIGUEZ, 2011).

Na busca de soluções, a utilização das geotecnologias possibilita uma análise integrada da paisagem, propiciando o processamento de variáveis ambientais e permitindo aplicações de modelagens ambientais (NUNES; LEITE, 2017; BARBOSA *et al.*, 2020). Partindo desse pressuposto, a representação e a delimitação das áreas suscetíveis à inundação se apresentam como uma relevante aplicação para a compreensão dos diversos parâmetros ambientais, fundamentais no processo de planejamento, execução, ocupação e gestão territorial das áreas urbanas brasileiras (FERREIRA *et al.*, 2020; FREITAS *et al.*, 2020; BELEM; CABRAL, 2021; ROSA; FERREIRA; 2021).

Assim, o presente artigo teve como objetivo o mapeamento das áreas suscetíveis à inundação na Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG pelo processo analítico hierárquico (AHP), validando-o pelos índices de fatores de influência.

Nas últimas décadas, tem aumento, de forma exponencial, os pontos de alagamentos na Sub-bacia, gerando interdições em rodovias e estradas e provocando inundações que vêm afetando, sobretudo, os municípios de Inconfidentes, Jacutinga, Monte Sião, Munhoz, Poços de Caldas e Santa Rita de Caldas (FONTÃO, 2014; SARDINHA *et al.*, 2016; CAETANO; BARBOSA, 2019; AMARAL, 2022; CEZAR, 2023).

A determinação das áreas suscetíveis à inundação na Sub-Bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG se traduz em pesquisa importante não somente para o Estado de Minas, mas também para o Estado de São Paulo, dado que no território paulista o leito do Rio Mogi constitui a maior planície fluvial do interior do Estado. Além disso, o conhecimento sobre a montante e a porção média constitui requisito fundamental para se compreender a dinâmica espaço temporal de toda e qualquer bacia hidrográfica.

Dessa forma, o mapeamento das áreas inundáveis consistirá em mecanismo de subsídio para a implementação de políticas públicas para a prevenção e mitigação de impactos relativos a eventos hidrológicos críticos (inundações), além de contribuir no processo de planejamento urbano que privilegie a utilização correta e consciente dos recursos naturais, numa proposta de conservação e preservação do meio.

2. SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO

Inundações e enchentes (cheias) são fenômenos naturais de caráter hidrometeorológico ou hidrológico que fazem parte da dinâmica natural ocorrendo com periodicidade nos cursos d'água, deflagrado por chuvas fortes e prolongadas (TOMINAGA *et al.*, 2012), e que se intensificam pelas alterações ambientais e intervenções urbanas produzidas pelo homem, como impermeabilização do solo, retificação dos cursos d'água e

redução dos canais devido a obras e engenharia. É em função disto que tais eventos ocorrem nos centros urbanos, potencializados principalmente ao modelo de urbanização, ocupação e impermeabilização de planícies (IPT, 2007).

Apesar de serem conceitos tidos como similares, a inundação é o extravasamento de água pelo leito maior do rio ou planície de inundação ou várzea (IPT, 2007), ao passo que a enchente corresponde à elevação do nível d'água do canal devido ao aumento da vazão, atingindo a cota máxima, sem extravasamento (AMARAL; RIBEIRO, 2009) (Figura 1). Segundo Riccomini *et al.* (2009) as inundações constituem um dos principais e mais destrutivos tipos de acidentes geológicos e ocorrem quando a descarga do rio se torna elevada e excede a capacidade do canal, extravasando suas margens e alagando as planícies adjacentes. Constituem um dos fenômenos naturais mais ocorrentes do mundo, afetando numerosas populações em todos os continentes (ARRIGHI, 2021).

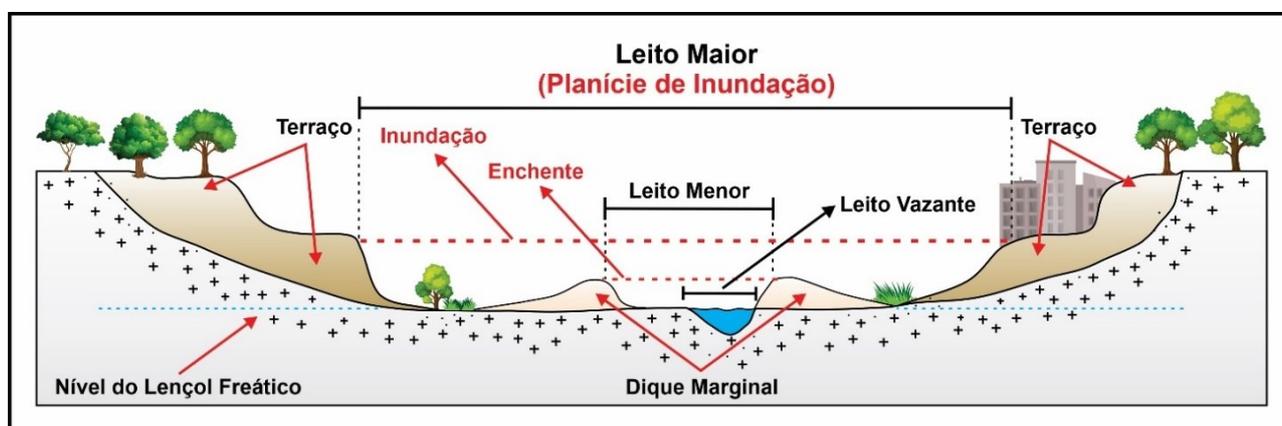


Figura 1 – Perfil transversal de canal fluvial, com representação do leito de vazante, leito menor e leito maior do canal, evidenciando o limite de ocorrência da enchente (cheia) e inundação.

Fonte: Elaborado pelos autores (2023), baseado no IPT (2007), Tucci (2008), Petersen *et al.* (2011) e Huggett (2017).

As inundações, tema central do estudo, ocorrem quando a quantidade de água que chega simultaneamente ao rio é superior à sua capacidade de drenagem, sendo influenciadas tanto por fatores naturais quanto antrópicos (RICCOMINI *et al.*, 2009). Entre as condicionantes naturais destacam-se as variações climáticas, geológicas, hidrológicas e oceanográficas, enquanto que as antrópicas abrangem as mudanças no uso e ocupação da terra, modificações na rede de drenagem e no balanço sedimentar. Tais fatores impactam na capacidade de infiltração da água e no escoamento superficial, sendo importantes para entender a suscetibilidade à inundação na bacia hidrográfica (COOKE; DOORNKAMP, 1990; TOMINAGA *et al.*, 2012; MARTH *et al.*, 2016).

Não obstante as inundações sejam eventos naturais, ações humanas podem agravá-las. Santos (2012) ratifica que embora ocorram, em geral, devido a condicionantes do meio físico, as inundações podem ser potencializadas pela ocupação das bacias hidrográficas. Portanto, ao examinar as conexões entre a sociedade e os fenômenos críticos de inundação, torna-se evidente que a expansão urbana em constante crescimento transforma, cria e destrói estruturas anteriormente equilibradas com os sistemas naturais, resultado da negligência da população e do poder público (TUCCI, 2003; LATRUBESSE, 2010).

No Brasil, a falta de práticas sustentáveis de manejo e uso da terra, combinada com a falta de monitoramento, planejamento e conhecimento das áreas suscetíveis à inundação, contribuem para tornar tais eventos desastres naturais, afetando cidades e causando prejuízos à população (HORA; GOMES, 2009). Para Riccomini *et al.* (2009), a alternativa mais racional para minimizar o efeito das enchentes se traduz no adequado planejamento da ocupação territorial, particularmente das áreas inundáveis, mediante a identificação de áreas de risco e o estabelecimento de regras específicas para seu uso.

Nesse contexto, os mapas de suscetibilidade à inundação são extremamente importantes na compreensão dos eventos de inundação, por indicarem as áreas mais propícias de serem afetadas por esse fenômeno. Além disso, é importante considerar que as vazões naturais dos canais fluviais sofrem variações temporais e espaciais relacionadas diretamente aos fatores que influenciam a ocorrência das inundações (SUMMERFIELD, 1991). Acrescenta-se que o modelo de suscetibilidade à inundação serve para apresentar tendências das áreas mais susceptíveis a tais eventos, considerando o uso da terra pela sociedade (BRITO; BASTOS, 2021).

Na Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG, os estudos de suscetibilidade à inundação permitem avaliar o comportamento dos sistemas ambientais face às pressões oriundas de intervenções antrópicas, servindo, também, de base para tomadas de decisões quanto ao uso e ocupação da terra.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudo

A Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, localizada no Sul de Minas Gerais e integrante da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG), abrange 19 municípios mineiros (Figura 2). Essa sub-bacia, de 8ª ordem hierárquica e com área de 5.169,26 km²,

possui formato alongado, alta densidade de drenagem e de rios, padrão de drenagem predominantemente dendrítico e morfologia fluvial meandrante a retilínea (CARVALHO *et al.*, 2022).

As paisagens naturais da Sub-bacia dos Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG, herança de processos fisiográficos e biológicos pretéritos e importantes patrimônios coletivos difusos, segundo Ab'Sáber (2003), vêm se constituindo, praemissa venia, desde o final do Cretáceo, quando o território brasileiro experimentou longa estabilidade tectônica, permitindo o estabelecimento de vastas superfícies geomórficas e a consolidação dos sistemas hidrológicos, e propiciando condições ideais para as formações das primeiras classes pedológicas, datadas do Paleogeno. No entanto, estas paisagens, “heranças de processos de atuação antiga, remodelados e modificados por processos de atuação recente” (AB’SÁBER, 2003, p. 9) vem se tornando mais frágeis, devido às ações antrópicas, com intervenções pouco planejadas, no processo de uso e ocupação da bacia.

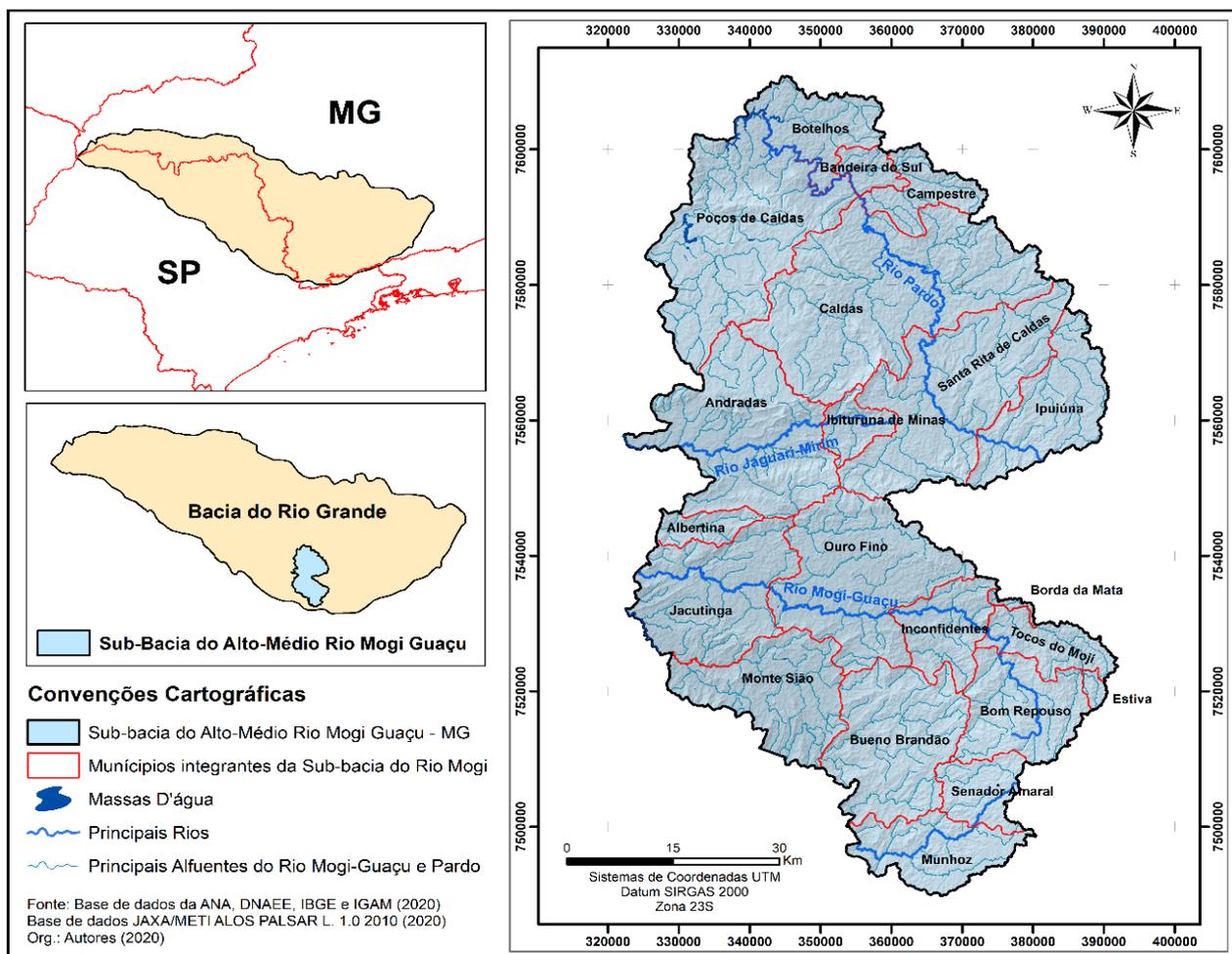


Figura 2 – Mapa de localização da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG.

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

A geologia da sub-bacia possui litologias representadas em sua maior parte por rochas ígneas e metamórficas, com idades arqueanas, proterozóicas, mesozóicas e cenozóicas. A maior parte do território sul mineiro, região onde se situa a sub-bacia, se encontra em formações geológicas resultantes de dobramentos antigos ocorridos no Brasil. No entanto, embora a estrutura geológica seja bastante antiga (rochas arqueanas, proterozóicas e mesozóicas), as formas delas resultantes, modeladas por agentes externos, são mais recentes (Neógeno e Quaternário).

A geomorfologia da bacia compreende domínios morfoesculturais de patamares, planícies, planaltos e serras, modeladas sobre unidades morfoestruturais arqueanas e proterozóicas. Os planaltos e, sobretudo, as serras são constituídas pelos relevos de morros (AB'SABER, 2003), compreendendo os mares de morros, morros paralelos e morros com serras restritas. Em nível de mesoforma ou morfológico, percebe-se que o relevo se constitui, de certa forma, pelas unidades de mares de morros, com modelado de vertentes côncavas e vales encaixados, intercalados com planícies fluviais (SOUZA; SILVA, 2016; CARVALHO *et al.*, 2022), resultantes de processos de dissecação.

A maioria das coberturas superficiais são representadas pelos Latossolos, Cambissolos e Argissolos. Quanto aos Latossolos, que correspondem a 2.239,350 km² e representam 43% da Sub-bacia, há o predomínio dos Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos, ambos distróficos (CARVALHO *et al.*, 2022).

3.2. Aquisição e tratamento de dados

Para a elaboração dos mapas-base que resultaram no mapa final de suscetibilidade à inundação, foram utilizadas imagens do Satélite *Sentinel-2* e imagens da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) – Missão Topográfica de Radar Transportado – que geraram os Modelos Digitais de Elevação (MDE) com pixel de 30 metros de resolução espacial (CARVALHO; BAYER, 2008), dados provenientes do projeto TOPODATA. Além disto, utilizou-se da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE), Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES). Os mapas utilizados neste estudo foram desenvolvidos com o auxílio do *software ArcGIS Pro 2.8* da *Environmental Systems Research Institute* – ESRI (2021).

3.3. Uso e ocupação da terra

A elaboração do mapa de uso e ocupação da terra se deu pela utilização de imagens ortorretificadas do Satélite *Sentinel-2* no nível 1C, com resolução espacial de 20 metros e temporal de 5 dias, adquiridas em 5 de janeiro de 2021. As imagens são produtos do programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) ou programa de monitoramento global de segurança ambiental, uma iniciativa conjunta da Comissão Europeia (CE) e da Agência Espacial Europeia (ESA).

Posteriormente às correções, elaborou-se a composição de banda B11 (*SWIR 1*), B8A (*Redge Edge 4*) e B04 (*Red*), para análise de vegetação e, a partir disso, definiu-se as classes. A opção pela composição de análise de vegetação se justifica pelo fato de atender aos objetivos de processamento digital de imagens, que reside na identificação e quantificação das áreas urbanas com solo exposto (classe 1), gramíneas e pastagens (classe 2), vegetação nativa (classe 3), culturas diversas (classe 4) e recursos hídricos (classe 5). As amostragens das referidas classes foram realizadas por regiões e por pixels: 28 amostras para classe 1, 29 para a classe 2, 27 para a classe 3, 27 para a classe 4 e 15 para a classe 5.

Foi utilizada a técnica estatística multivariada *Maxver* (máxima verossimilhança ou *Maximum Likelihood*) para a classificação supervisionada. As cinco classes de uso e ocupação da terra foram vetorizadas e individualizadas. Por fim, essas cinco classes foram validadas em campo, através de observações realizadas em vários pontos da Sub-bacia.

3.4. Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC)

A elaboração do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC), foi concebida em duas etapas: obtenção de MDE com resolução espacial de 30 metros (TOPODATA) e geração do MDEHC, com o objetivo de eliminar as depressões espúrias, que residem em depressões cercadas por células de maiores valores de elevação (CHAVES, 2002) e possibilita que o escoamento superficial chegue ao seu canal sem interrupções.

3.5. Declividade

As classes de declividade, obtidas a partir do MDEHC, foram 0-2%; 2-6%; 6-20%; 20-50% e >50%. Essas cinco classes clinográficas foram definidas por Mira *et al.* (2022), considerando as características morfológicas do relevo da Sub-bacia.

A clinografia desempenha um papel crucial nas taxas de escoamento superficial das águas pluviais, nos processos de erosão do solo, no assoreamento dos rios e, conseqüentemente, na ocorrência das inundações (KOFFLER, 1994).

3.6. Hipsometria

Foram definidas cinco classes hipsométricas, extraídas a partir do MDEHC e considerando a metodologia preconizada por Carvalho *et al.* (2022).

De acordo com Magalhães *et al.* (2011) a hipsometria influencia na suscetibilidade à inundação em função do acúmulo de água nas regiões de baixa altitude.

3.7. Atribuição de valores

Os valores foram atribuídos de acordo com o grau de suscetibilidade aos processos de inundação e alagamento, variando de 1 (menor suscetibilidade à inundação) a 5 (maior suscetibilidade à inundação) (SCHMIDT; BARBOSA, 2016). Santos *et al.* (2010) afirmam que a fase de atribuição de valores é considerada uma das mais importantes durante o processo de confecção dos mapas de inundação, pois tais valores atribuídos interferem diretamente no resultado obtido. Os graus de suscetibilidade à inundação foram adaptados à área de estudo, com base em revisões literárias que exploram a temática e utilizam o método AHP. Para isso, foram consideradas as características naturais da paisagem, como relevo e vegetação nativa, bem como as intervenções humanas na região da Sub-bacia (Tabela 1).

Tabela 1: Graus de suscetibilidade à inundação para cada classe de cada variável.

Variável	Classes	Grau de Suscetibilidade à Inundação
Uso e Ocupação da Terra	Corpos hídricos	5
	Área urbanizada com solo exposto	4
	Culturas diversas	3
	Gramíneas e pastagens	2
	Vegetação nativa	1
Declividade	0 - 2 %	5
	2 - 6 %	4
	6 - 20 %	3
	20 - 50 %	2
	> 50%	1
Hipsometria	<900 m	5
	900 - 1.100 m	4
	1.100 - 1.300 m	3
	1.300 - 1.500 m	2
	> 1.500 m	1

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

3.8. Determinação do processo analítico hierárquico (AHP) e dos fatores de influência

O Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é definido pelo *Decision Support Systems Glossary* (DSS, 2006) como aproximações para tomadas de decisão que envolvem estruturas de multicritérios de escolha numa hierarquia. De acordo com Silva (2007) a ideia central da teoria de análise hierárquica introduzida por Saaty (1977) é a redução do estudo de sistemas a uma sequência de comparações aos pares, minimizando suas falhas.

Nesse sentido, a elaboração da matriz de decisão utilizou a escala fundamental de Saaty (1977) (Tabela 2), que define, de forma linear, a hierarquia de importância entre os fatores utilizados (uso e ocupação da terra, declividade e hipsometria).

Tabela 2: Escala de comparadores.

Valores	Importância Mútua
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante que
3	Moderadamente mais importante que
5	Fortemente mais importante que
7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que

Fonte: Modificado de Saaty (1977).

Tomando como base tal escala de comparação, através da plataforma online *AHP Priority Calculator*, desenvolveu-se a matriz de comparação pareada (Tabela 3), no qual cada elemento na matriz indica quanto o fator da coluna da esquerda é mais importante em relação a cada fator correspondente na linha superior. Logo, quando um fator é confrontado com ele mesmo, o único resultado possível é 1, pois possui igual importância (SOARES, 2018).

Nesse sentido, a declividade foi definida como o fator mais importante entre os três considerados (uso e ocupação da terra, declividade e hipsometria), devido ao seu impacto direto nas taxas de escoamento da água da chuva e no acúmulo da água em áreas de baixa clinografia, conforme indicam Oliveira e Vieira (2017), Santos *et al.* (2018) e Soares (2018). As características morfológicas da Sub-bacia (CARVALHO *et al.*, 2022), compreendidas por relevos de mares de morros com vertentes côncavo-convexas também ratificam a primazia emprestada à declividade. Os perfis longitudinais dos principais rios da Sub-bacia (Rio Mogi Guaçu e Rio Pardo), apresentaram alto gradiente de declividade (CARVALHO *et al.*, 2022).

Tabela 3: Matriz de comparação dos fatores.

Fatores	Declividade	Hipsometria	Uso da Terra	Pesos
Declividade	1	3	2	0,55
Hipsometria	0,33	1	1	0,21
Uso da Terra	0,5	1	1	0,24

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Após a obtenção dos pesos de cada fator, procedeu-se ao modelo matemático afim de encontrar as zonas mais suscetíveis a inundação, conforme a equação 1 (Eq. 1), onde D, H e U indicam, respectivamente, a declividade, a hipsometria e uso e ocupação da terra:

$$\text{Suscetibilidade à Inundação} = 0,55D + 0,21H + 0,24U \quad \text{Eq. 1}$$

Por fim, na geração do mapa de suscetibilidade à inundação da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG, foi utilizado o modelo na calculadora *raster* do *software ArcGIS Pro 2.8*, processando as informações contidas nos *shapefiles* criados.

Diversos fatores influenciam na suscetibilidade à inundação e cada um deles contribui de forma particular para a ocorrência do evento (RAHMATI *et al.*, 2015). Nesse sentido, afim de verificar a confiabilidade, precisão e a coerência dos resultados obtidos no mapa de suscetibilidade à inundação, foram também elaborados os mapas dos seguintes fatores de influência (RAHMATI *et al.*, 2015; CHAVES *et al.*, 2021): hierarquia fluvial, índice de potência de escoamento (*stream power index* – SPI), índice de transporte de sedimento (*sediment transport index* – STI), índice topográfico de umidade (*topographic wetness index* – TWI) e o índice de rugosidade do terreno (*terrain roughness index* – TRI) (Tabela 4).

Esses fatores de influência (hierarquia fluvial, SPI, STI, TWI e TRI), associado com a densidade de drenagem guardam uma correlação com as características morfológicas, morfogenéticas e morfodinâmicas da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, em Minas Gerais (CARVALHO *et al.*, 2022; MIRA *et al.*, 2022). O mapa e grau da densidade de drenagem seguiu a metodologia indicada por Carvalho *et al.* (2022).

Tabela 4: Fatores de influência determinantes na validação da análise de suscetibilidade à inundação.

Fatores	Descrição	Equação	Legenda
Hierarquia Fluvial	A hierarquia fluvial é importante na análise da paisagem e dinâmica da bacia hidrográfica, refletindo o comportamento do escoamento e evidenciando fatores como clima e vegetação. (CURY <i>et al.</i> , 2021). Classificada pelo método de Strahler (1952), o qual dois canais tributários de ordem menor se unem e formam canais de ordem maior, e assim sucessivamente.	-	-
SPI	Índice hidrológico que avalia o potencial de erosão disponível em um fluxo de água, escoamento superficial, em uma bacia hidrográfica (MOORE <i>et al.</i> , 1991; KHOSRAVI <i>et al.</i> , 2016). Nos estudos de inundação é utilizado como indicador de suscetibilidade a tal evento, pois altos valores de SPI podem indicar locais onde o fluxo da água é mais intenso e, portanto, mais propenso a causar inundações.	$\alpha \tan \beta$	α = Área da bacia (m ²) β = Gradiente de inclinação (em graus)
STI	Índice aplicado aos estudos de erosão e na convergência e divergência dos fluxos de água, tendo efeito na ocorrência de inundações (KHOSRAVI <i>et al.</i> , 2019). Nos estudos de inundação, tal índice é utilizado para avaliar a quantidade de sedimentos que um fluxo de água pode transportar em uma bacia hidrográfica. Assim, quanto mais alto os valores de STI, maior a quantidade de sedimento transportados durante uma inundação, o que pode aumentar o risco das mesmas (MOORE <i>et al.</i> , 1991).	$\left(\frac{\alpha}{22,13}\right)^{0,6} \left(\frac{\sin \beta}{0,0896}\right)^{1,3}$	α = Área da bacia (m ²) β = Gradiente de inclinação (em graus)
TWI	Índice que combina a área de contribuição a montante de uma determinada célula com o declive dessa mesma célula, o que descreve sua tendência em acumular água (LIMA <i>et al.</i> , 2020). A quantidade de fluxo a se acumular em qualquer ponto da área da Sub-bacia pode ser calculada pelo TWI e pela tendência da água de descer a encosta usando a força da gravidade (MOORE <i>et al.</i> , 1991).	$\ln\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)$	α = Área da bacia (m ²) β = Gradiente de inclinação (em graus)
TRI	Índice topográfico morfométrico usado em modelagens de suscetibilidade à inundação, o qual expressa heterogeneidade da superfície da área de estudo (KORZENIOWSKA <i>et al.</i> , 2017). Assim, quanto mais uniforme for o relevo em uma área, menor é o índice de rugosidade e, portanto, menor é a capacidade de infiltração, maior é a velocidade de escoamento e maior é o risco à inundação.	$\sqrt{\left(\sum x_{ij} - x_{00}\right)^2}$	X_{00} = Célula Central X_{ij} = Média das células vizinhas em uma vizinha de 3x3 pixels.

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise do uso e ocupação da terra

As classes de uso e ocupação da terra da Sub-bacia (Figura 3) demonstraram que a maior parte do território é ocupada por culturas diversas (30,6%), seguida por áreas

urbanas com solo exposto (29,6%), que reflete o rápido processo de urbanização e a demanda crescente por áreas agricultáveis.

Como praticamente 60% do território ocupado por empreendimentos agrícolas e urbanos, torna-se extremamente necessária a adoção de práticas mais sustentáveis de manejo e conservação para a melhor gestão territorial da Sub-bacia, num viés de preservação que possa garantir o equilíbrio entre desenvolvimento e conservação ambiental.

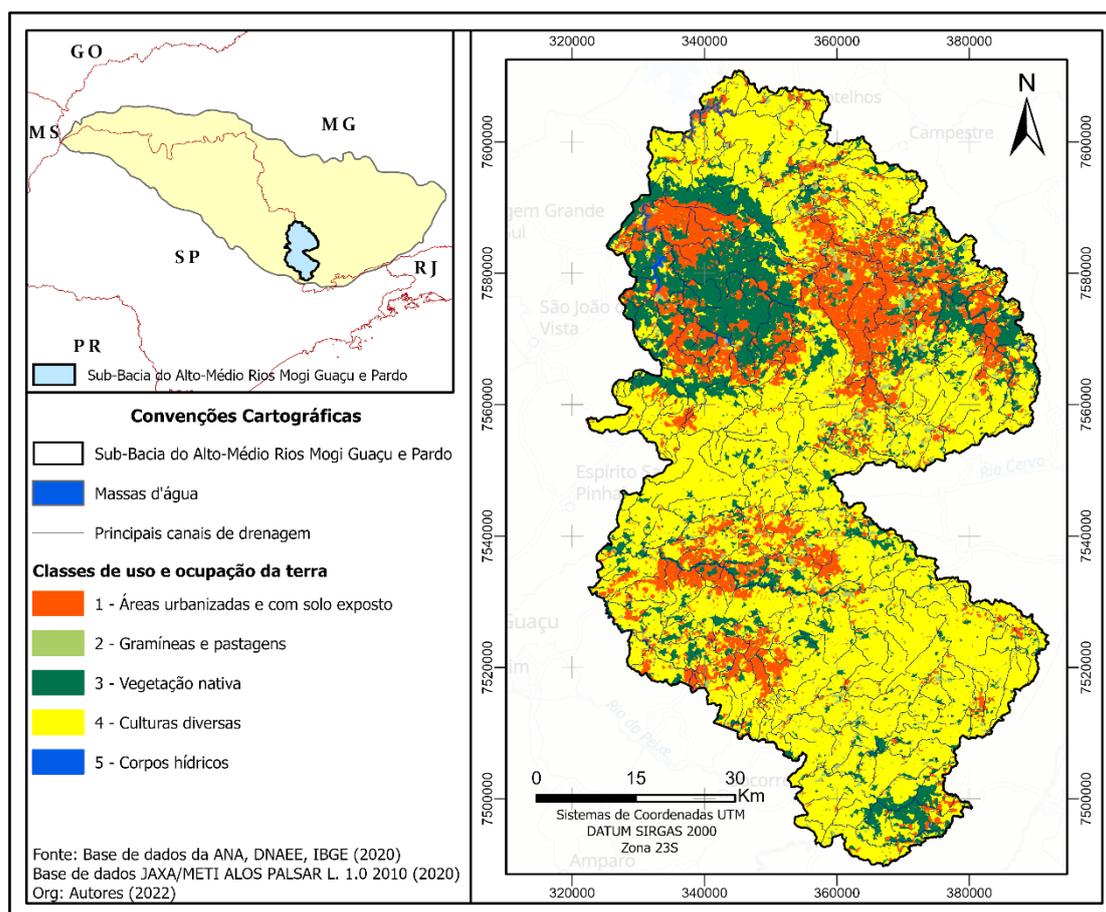


Figura 3 – Mapa de classes de uso e ocupação da terra da Sub-bacia.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

As atividades antrópicas tiveram um impacto significativo na cobertura vegetal e no sistema fluvial da Sub-bacia. A expansão das culturas temporárias e o processo de urbanização resultaram em grandes áreas de solo descoberto durante períodos do ano, o que contribui para o aumento do escoamento superficial (MARTH *et al.*, 2016). Além disso, em locais que a vegetação natural foi retirada há um maior depósito de partículas finas provenientes do escoamento superficial, que tendem a se depositar entre os poros do solo,

diminuindo a taxa de infiltração da água (SANTOS *et al.*, 2018), resultando no acúmulo da mesma e aumentando a suscetibilidade à inundação nessas porções da Sub-bacia.

Reis *et al.* (2015) salientam que o conhecimento e a delimitação das diferentes unidades de uso e ocupação da terra de áreas suscetíveis a inundarem são importantes para que o poder público e a sociedade civil possam executar medidas que mitiguem os efeitos das inundações. Além disto, práticas de planejamento ambiental oferecem subsídios para que ocorra a preservação do meio, o qual reflete conseqüentemente na conservação e proteção do sistema natural (CREPANI *et al.*, 2001; LEAL, 2012).

Face ao exposto, destaca-se a necessidade de adoção de práticas que visem à sustentabilidade, manutenção e recuperação do solo, uma vez que grande parte da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, em Minas Gerais, possui usos vinculados às práticas de culturas diversas e pecuária.

4.2. Análise clinográfica e hipsométrica

As classes de declividade e hipsométricas da área de estudo são apresentadas nas figuras 4 e 5.

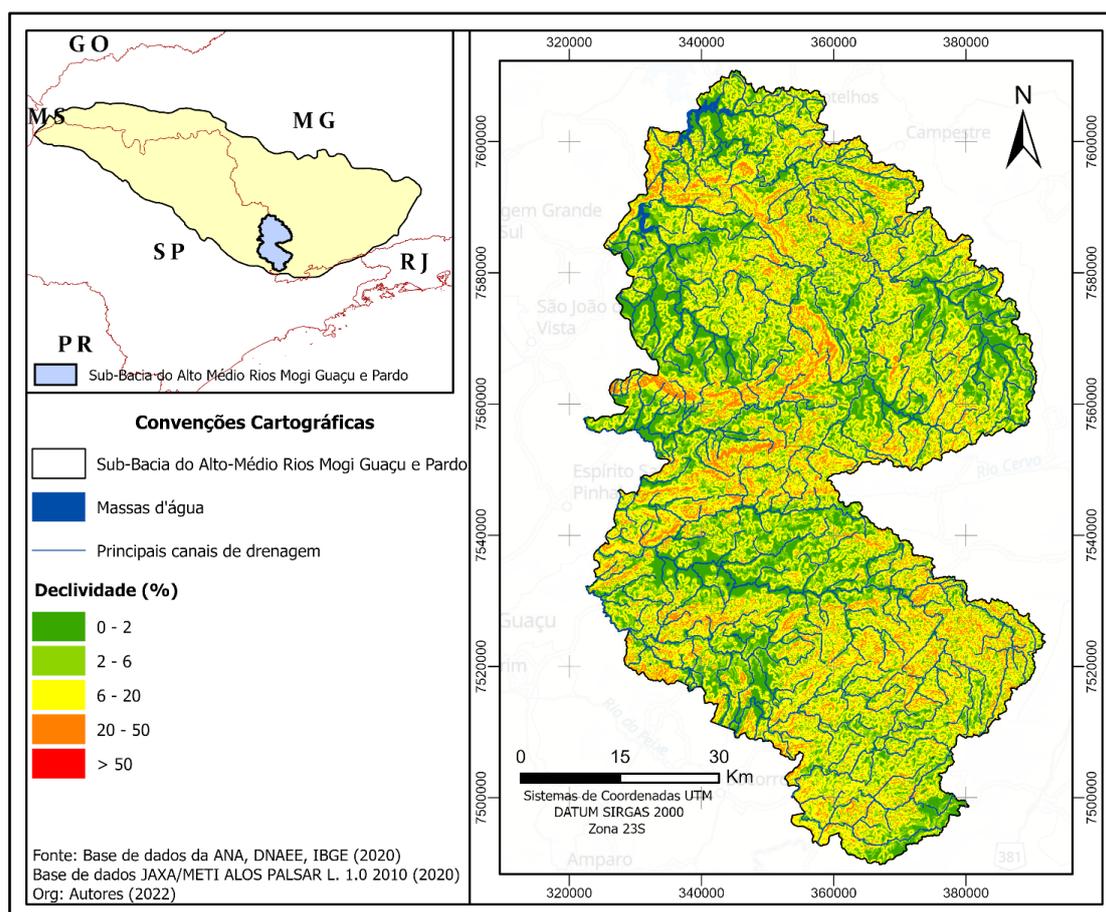


Figura 4 – Mapa das classes clinográficas da Sub-bacia.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A declividade influencia diretamente no acúmulo de água no terreno, visto que em áreas mais planas ocorrem maiores probabilidades de suscetibilidade à inundação (OLIVEIRA; VIEIRA, 2017). Isto ocorre porque as áreas planas possuem escoamento pluvial mais lento, resultando no acúmulo de água devido à rápida saturação do solo (SANTOS *et al.*, 2018; SOARES, 2018).

A altimetria relaciona-se diretamente com a declividade, pois influencia diretamente no risco à inundação principalmente em função do acúmulo de água nas regiões de baixa hipsometria (MENEGASSO, 2019).

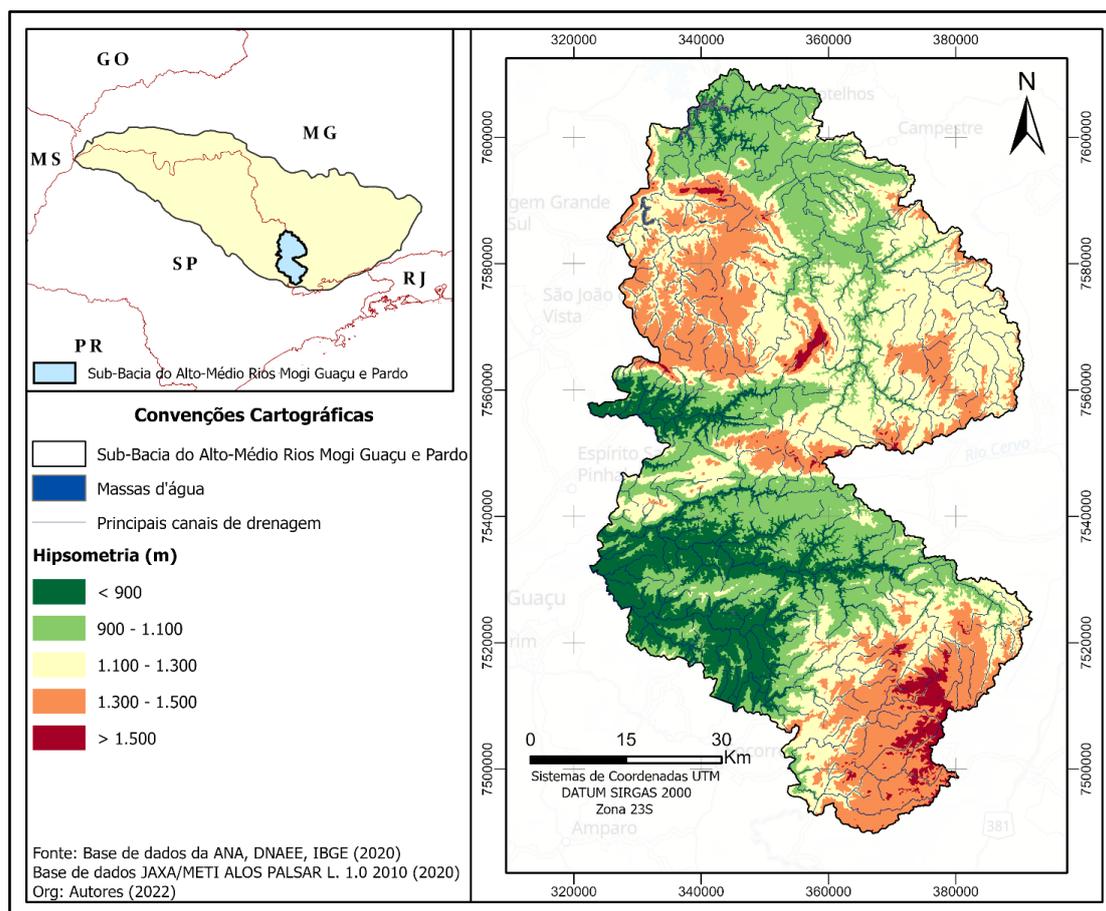


Figura 5 – Mapa das classes hipsométricas da Sub-bacia.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Extensas porções da Sub-bacia se encontram em áreas mais planas, com declividades entre 2 a 20% (Figura 4) e cotas altimétricas menores que 900 m (Figura 5), fatores que propiciam maiores probabilidades de ocorrência de enchentes e inundações.

4.3. Análise da suscetibilidade à inundação

O mapa de suscetibilidade, resultante da equação (Eq. 1), se encontra na figura 6.

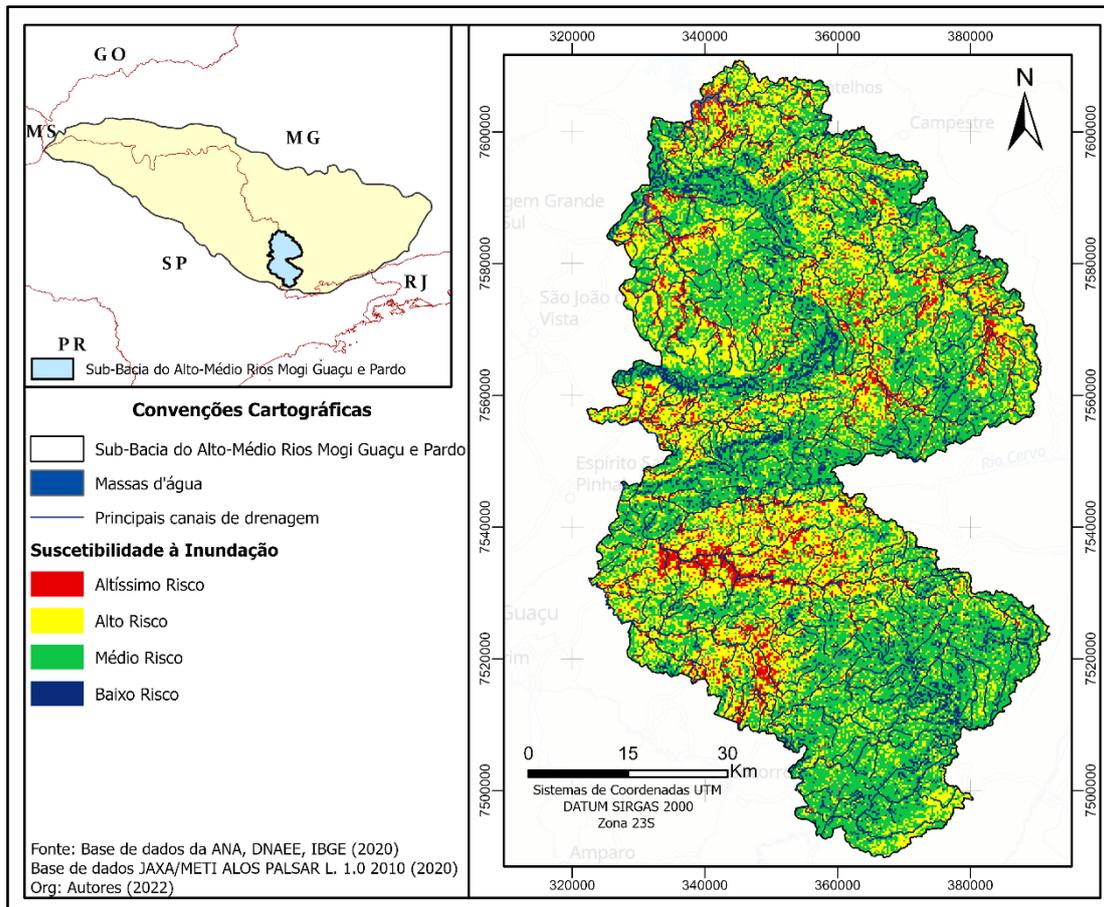


Figura 6 - Mapa de suscetibilidade à inundação da Sub-bacia.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A aplicação da equação possibilitou a determinação de quatro classes de suscetibilidade à inundação: altíssimo risco, alto risco, médio e baixo risco (Figura 6, Tabela 5). O mapa de suscetibilidade demonstrou que 8% da Sub-bacia possui classe de risco altíssimo, 36% de alto risco e 50% de risco médio de inundação (Figura 6, Tabela 5). Apenas 6% da área total da Sub-bacia apresentou risco baixo de suscetibilidade à inundação (Tabela 5).

Tabela 5: Porcentagem das classes de suscetibilidade à inundação da Sub-bacia.

Classe de Suscetibilidade à Inundação	Porcentagem (%)
Altíssimo Risco	8%
Alto Risco	36%
Médio Risco	50%
Baixo Risco	6%

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Na comparação dos mapas de declividade, hipsométrico e de uso e ocupação da terra com o mapa de suscetibilidade à inundação, verificou-se que as áreas de altíssimo e alto risco à inundação se relacionaram, diretamente, com as morfologias de relevo mais suaves, com graus de declividade abaixo de 2% e cotas altimétricas menores que 900m, fatores intrinsecamente vinculados à regiões de menor capacidade de escoamento superficial e maior acúmulo de água, dado que quanto maior o grau de declividade e altimetria, menor a suscetibilidade de ocorrência do fenômeno natural (PETRI; OLIVEIRA, 2018). Salienta-se que essas áreas com altíssima e alta suscetibilidade se relacionaram com as porções da Sub-bacia que passaram por processos de remoção da cobertura natural do solo, devido ao processo de urbanização e utilização das terras para agricultura.

Quanto às áreas com médio risco, apesar de sua grande parte possuir solo exposto, essas, em sua maioria, se concentram em locais com declividades entre 6 e 20% e posições altimétricas acima de 1.100 metros, o qual diminui a suscetibilidade a inundações.

As classes de baixo risco à inundação situaram-se em áreas com declividade entre 20 a 50%, altimetrias acima de 1.500m e classes de uso e ocupação da terra representadas por coberturas vegetais (mata nativa ou gramíneas). Devido ao fato de apresentarem maiores índices de permeabilidade e relevo ondulado, a possibilidade de ocorrência de inundação é mínima. Entretanto, tais áreas podem se tornar geradoras potenciais de fluxo superficial que, drenado para as partes mais baixas ou fundos de vales, contribuem para a ocorrência de inundações nessas porções (REZENDE; MARQUES, 2017).

Em estudos morfométricos realizados na mesma área de estudo, os parâmetros areais demonstraram que a sub-bacia possui uma área extensa com rede de drenagem bem distribuída e formato alongado (índice de circularidade de 0,22), indicativo de baixa possibilidade às enchentes e às inundações, considerando a bacia como um todo (CARVALHO *et al.*, 2022). Bacias mais alongadas, com índice de circularidade (I_c) menores que 0,51 apresentam escoamento baixo a moderado, ao passo que aquelas cujas formas são mais circulares ($I_c > 0,51$) possuem um escoamento reduzido, com alta probabilidade de ocorrência de cheias e inundações (ALVES e CASTRO, 2003). Dessa forma, deduz-se que o uso e ocupação da Sub-bacia, associado com as classes hipsométricas e clinográficas constituem fatores determinantes nos processos de alagamentos das planícies fluviais, com ocorrência de inundações nas áreas de altíssimo e alto risco à suscetibilidade.

Portanto, ao relacionar o mapa de suscetibilidade à inundação (Figura 6) ao de uso e ocupação da terra (Figura 3), ficou explícito que o risco de inundação é mais alto em áreas impermeáveis, associados as áreas urbanizadas com solo exposto e utilizadas para

agricultura. Assim, impõe-se maior atenção aos órgãos gestores da Sub-bacia quanto ao uso e ocupação da terra, para que se busquem padrões de manejo e obras de engenharia mais sustentáveis.

4.4. Análise da hierarquia fluvial e da densidade de drenagem

Considerando a base de dados (imagens de radar com resolução espacial de 30m), o mapa de hierarquia fluvial da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG apresentou canais de até 7ª ordem, obtidos através do método preconizado por Strahler (1952) (Figura 7).

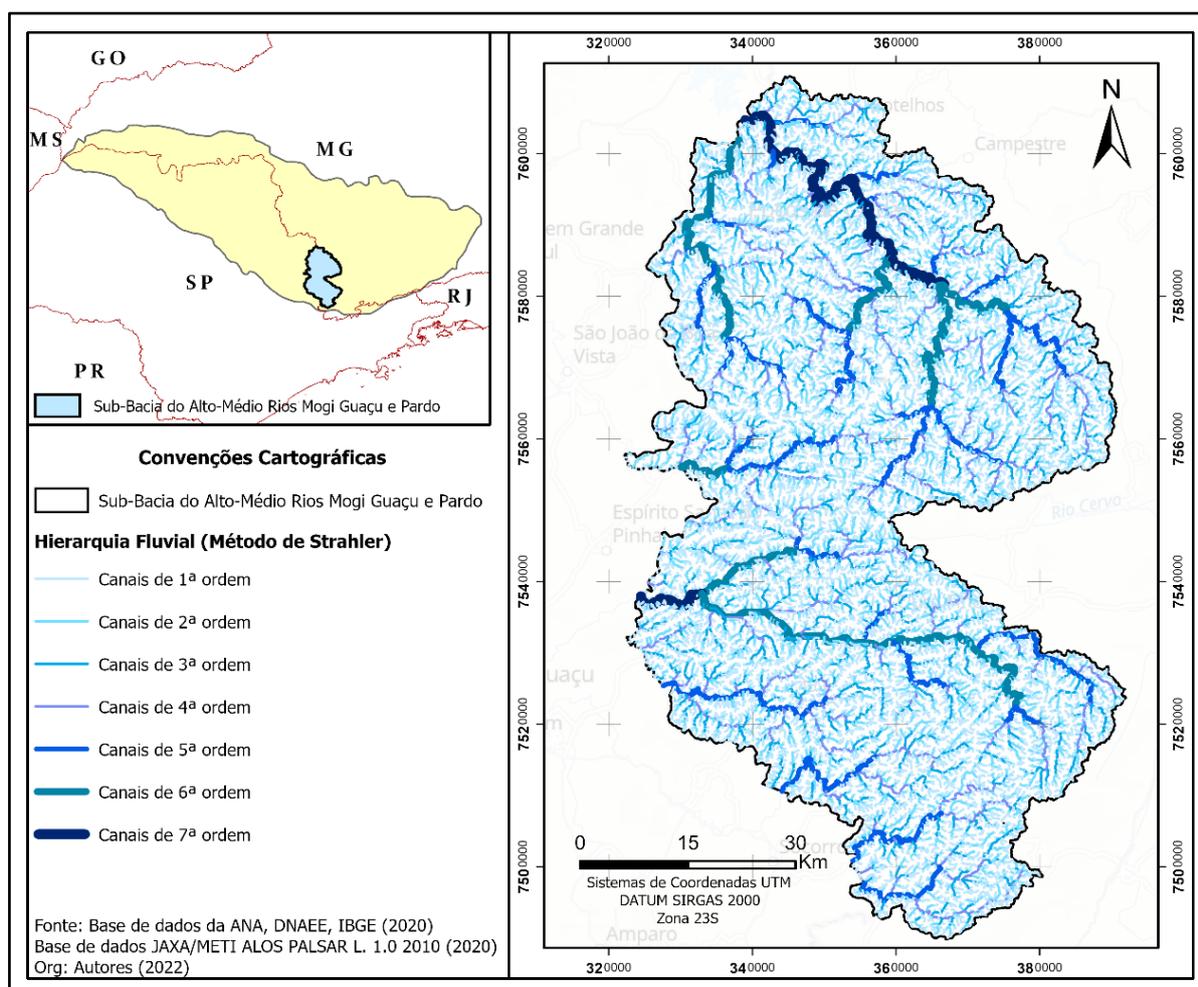


Figura 7 - Mapa da hierarquia fluvial da Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG.
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Associando o mapa de suscetibilidade à inundação ao de hierarquia fluvial, verificou-se que os locais mais suscetíveis a inundarem são aqueles que apresentaram maior ordem fluvial. Isto se justifica porque os canais fluviais principais (Rio Mogi Guaçu e Rio Pardo)

possuem muitos tributários de pouca extensão, fazendo com que o escoamento da água superficial chegue rapidamente aos rios de maiores ordens, resultando em acúmulo excessivo de água e extravasamento dos cursos regulares dos rios.

A comparação do mapa de hierarquia fluvial com o de uso e ocupação da terra, demonstrou que os canais de maior ordem se localizam, em sua grande parte, em zonas urbanas, os quais em uma situação de inundação podem resultar em perdas sociais, ambientais e econômicas, necessitando assim, maior visibilidade pelos órgãos gestores da Sub-bacia afim de evitar tais desastres.

A Sub-bacia apresentou densidade de drenagem (D_d) de $4,89 \text{ km/km}^2$ (CARVALHO *et al.*, 2022), fator que a classifica bacia de alta densidade de drenagem (VILLELA; MATTOS, 1975; TONELLO *et al.*, 2006). O mapa da densidade de drenagem demonstrou que os pontos com maior concentração se situam na porção norte e oeste da sub-bacia (Figura 8). As áreas de maiores densidades (400 a 420) guardaram uma relação direta com as áreas de altíssima a alta suscetibilidade à inundação (Figuras 6 e 8).

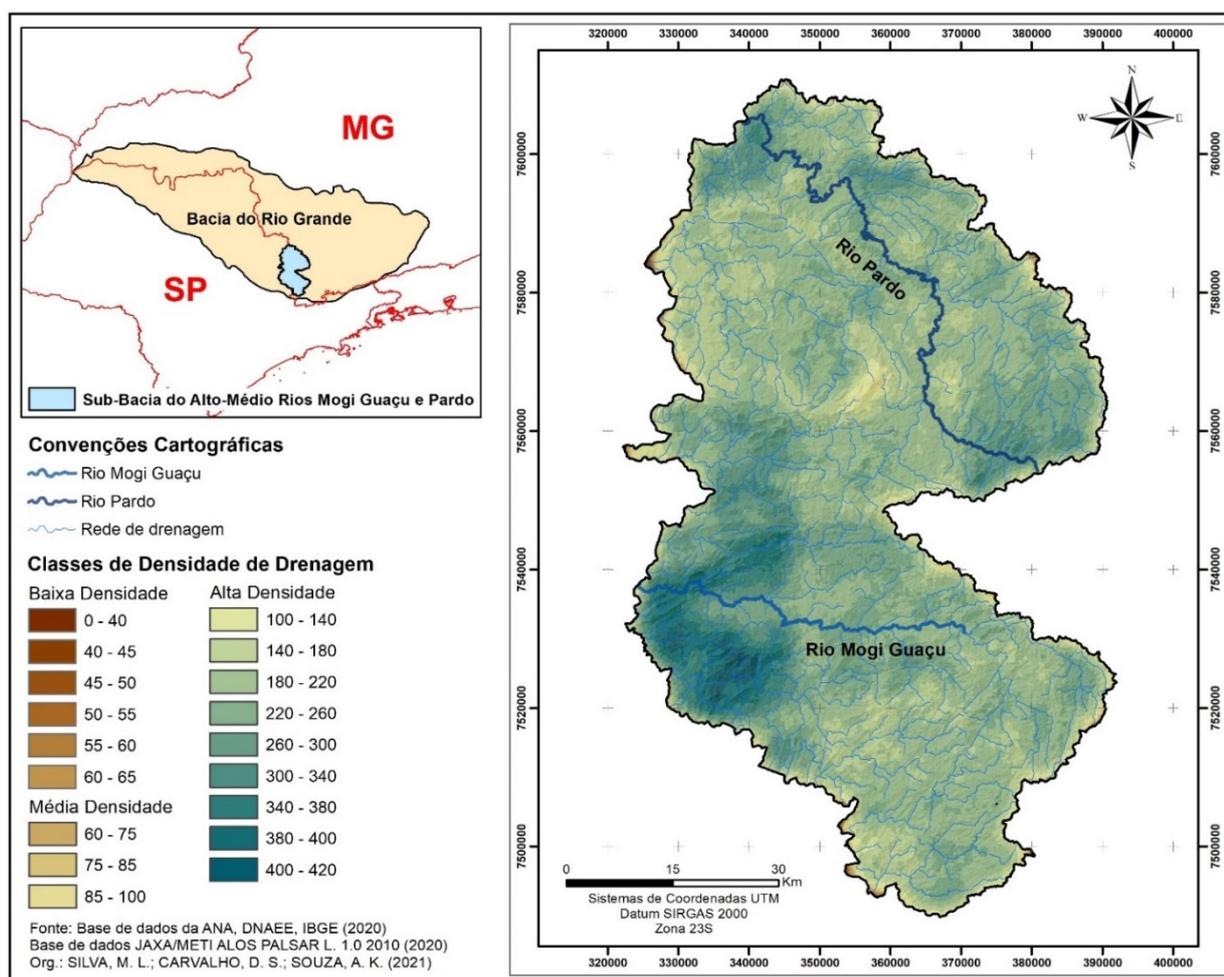


Figura 8 - Classes de densidade de drenagem da Sub-bacia.

Fonte: Carvalho *et al.* (2022).

4.5. Análise dos fatores de influência

A técnica de análise dos fatores de influência foi utilizada para identificar padrões e entender como as variáveis observadas se relacionam entre si, a fim de auxiliar na compreensão das áreas mais suscetíveis à inundação.

Ao comparar os resultados obtidos nos mapas de cada índice com o mapa de suscetibilidade à inundação, foi possível identificar padrões que se relacionaram entre si, o que aumentou a veracidade e acurácia dos resultados (HAIR *et al.*, 2019).

O fator SPI (Figura 9) concentra-se, em sua grande parte, ao longo do leito dos rios de maiores ordens, apresentando o valor de 15,2389 em seu ponto mais alto e valores mais baixos no restante da área da Sub-bacia.

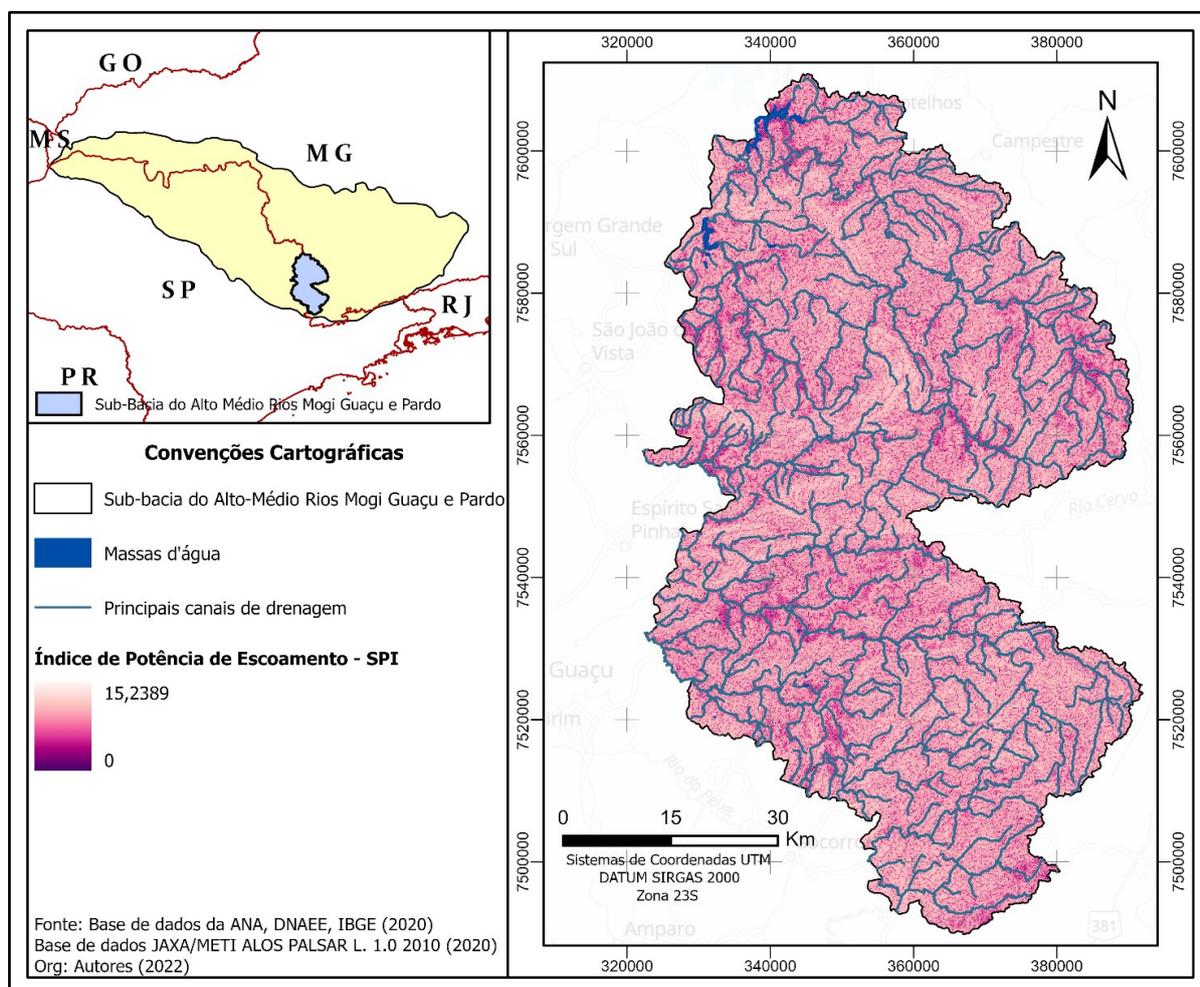


Figura 9 – Mapa do Índice de potência de escoamento (SPI) da Sub-bacia.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Comumente, áreas com valores mais baixos de SPI são regiões com maior suscetibilidade à inundação, uma vez que valores mais altos de SPI se encontram em locais

com declividades maiores e áreas mais íngremes, onde as inundações são inexistentes (MOJADDADI *et al.*, 2017).

Quanto ao fator TRI, o mapa evidenciou maiores valores nas áreas de encosta da Sub-bacia (Figura 10), os quais são locais de declividade e escoamento superficial maior, que desembocam nos rios e córregos da bacia. Os menores valores de TRI correspondem a locais mais suscetíveis a se inundarem, por apresentarem menor rugosidade do terreno.

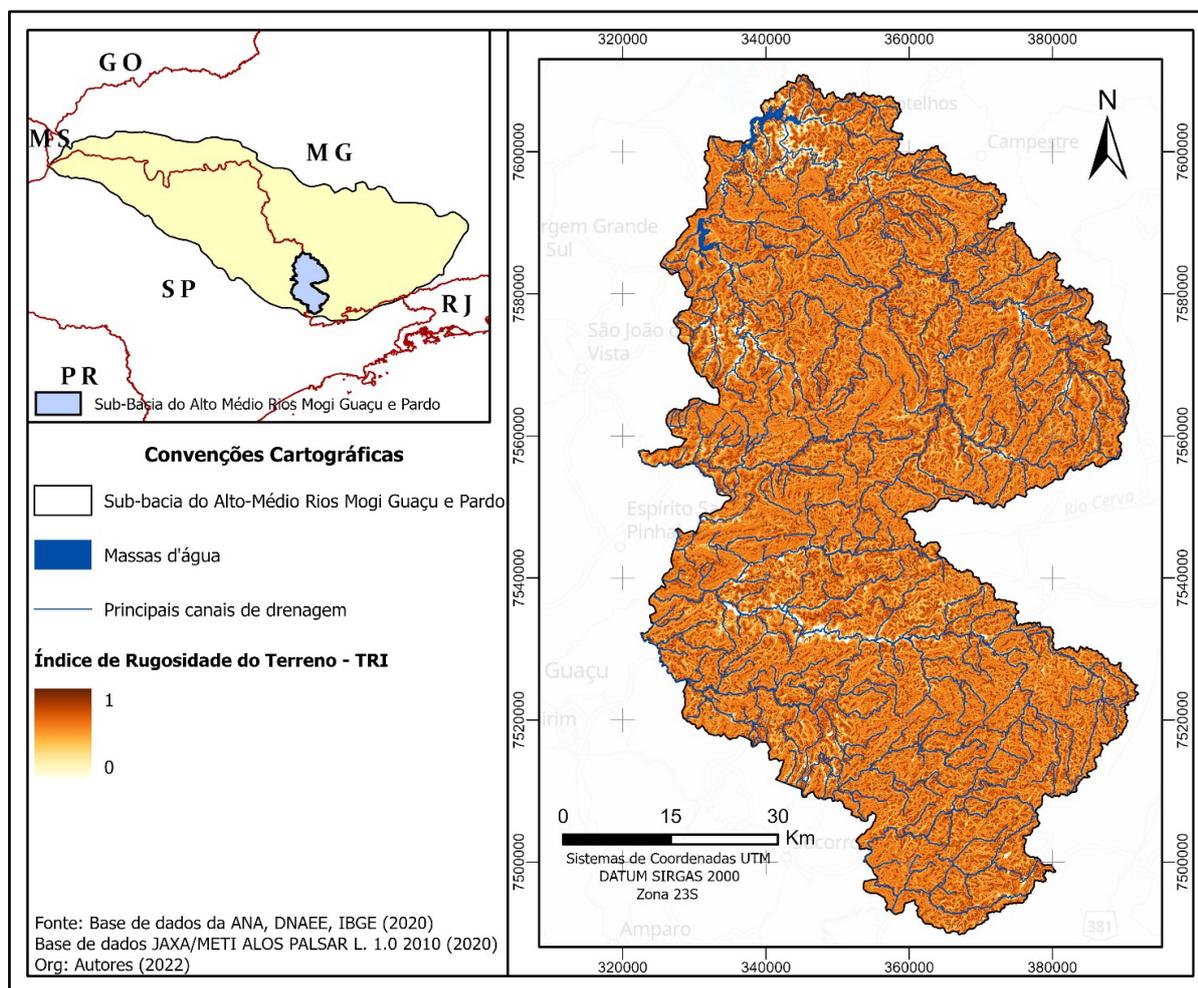


Figura 10 – Mapa do Índice de rugosidade do terreno (TRI) da Sub-bacia.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

As áreas com menores valores do fator STI (Figura 11) localizaram-se em porções mais planas, nas quais encontram-se os leitos dos rios e córregos da Sub-bacia. Outrossim, são zonas onde o depósito de sedimentos é intenso, resultando na maior possibilidade de inundação nestas porções.

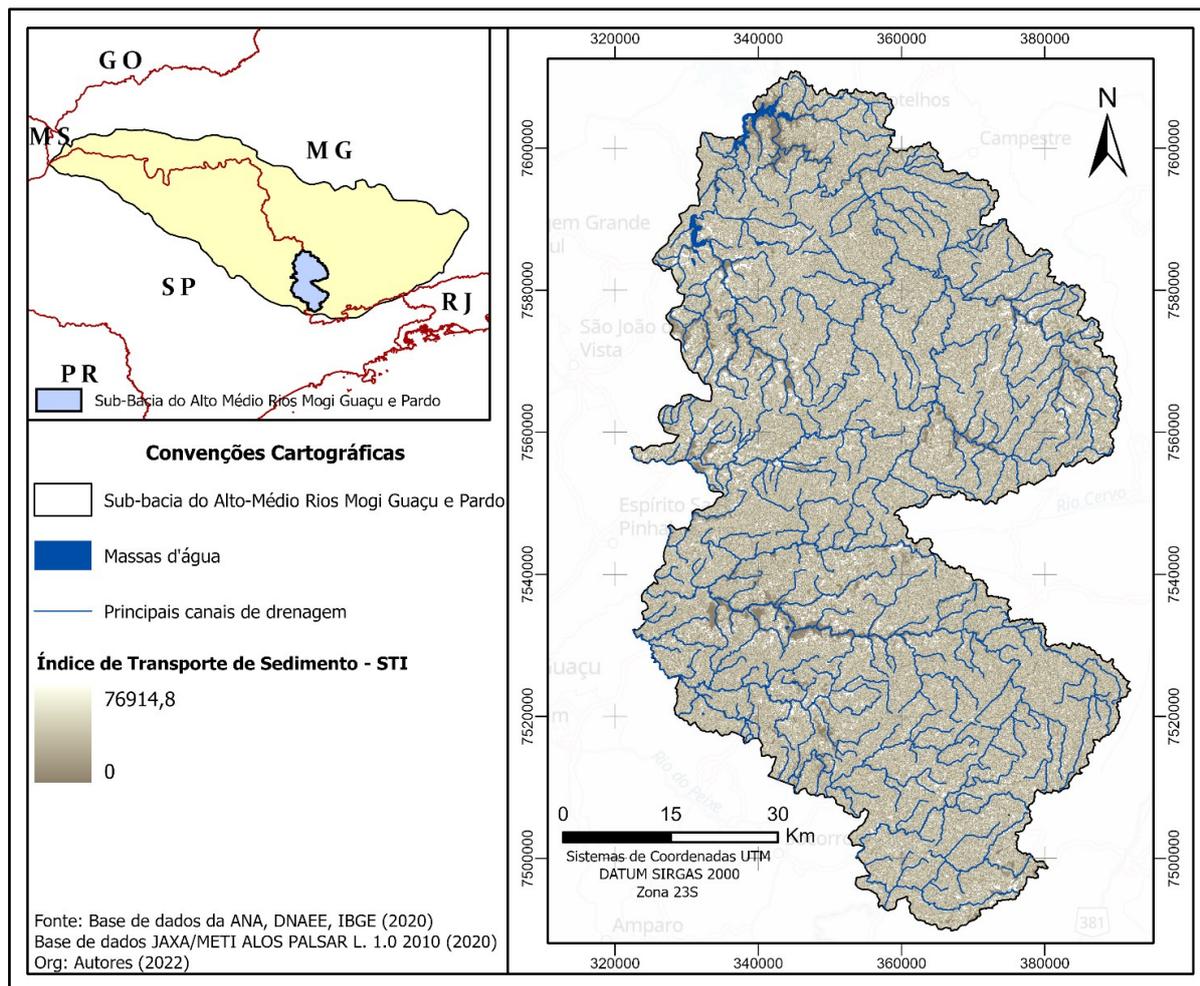


Figura 11 – Mapa do Índice de transporte de sedimento (STI) da Sub-bacia.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Referente ao fator TWI, este apresentou valores mais altos (32,7891) em locais com maior umidade (Figura 12), próximos aos leitos dos rios e nas áreas mais planas Sub-bacia, zonas com maiores probabilidades às inundações.

Ao correlacionar os mapas dos indicadores com o mapa de suscetibilidade, foi possível verificar que as áreas com maior probabilidade de inundação são aquelas que possuem maior ordem de rios, fator que aumenta a possibilidade de acumulação de água. Essas áreas de altíssimo e alto risco à inundação apresentaram menor potência de escoamento e menor rugosidade no terreno, indicando um relevo mais plano. Outro fator de influência na suscetibilidade à inundação foi a presença de depósito de sedimentos e maior umidade no solo, porções de maior infiltração.

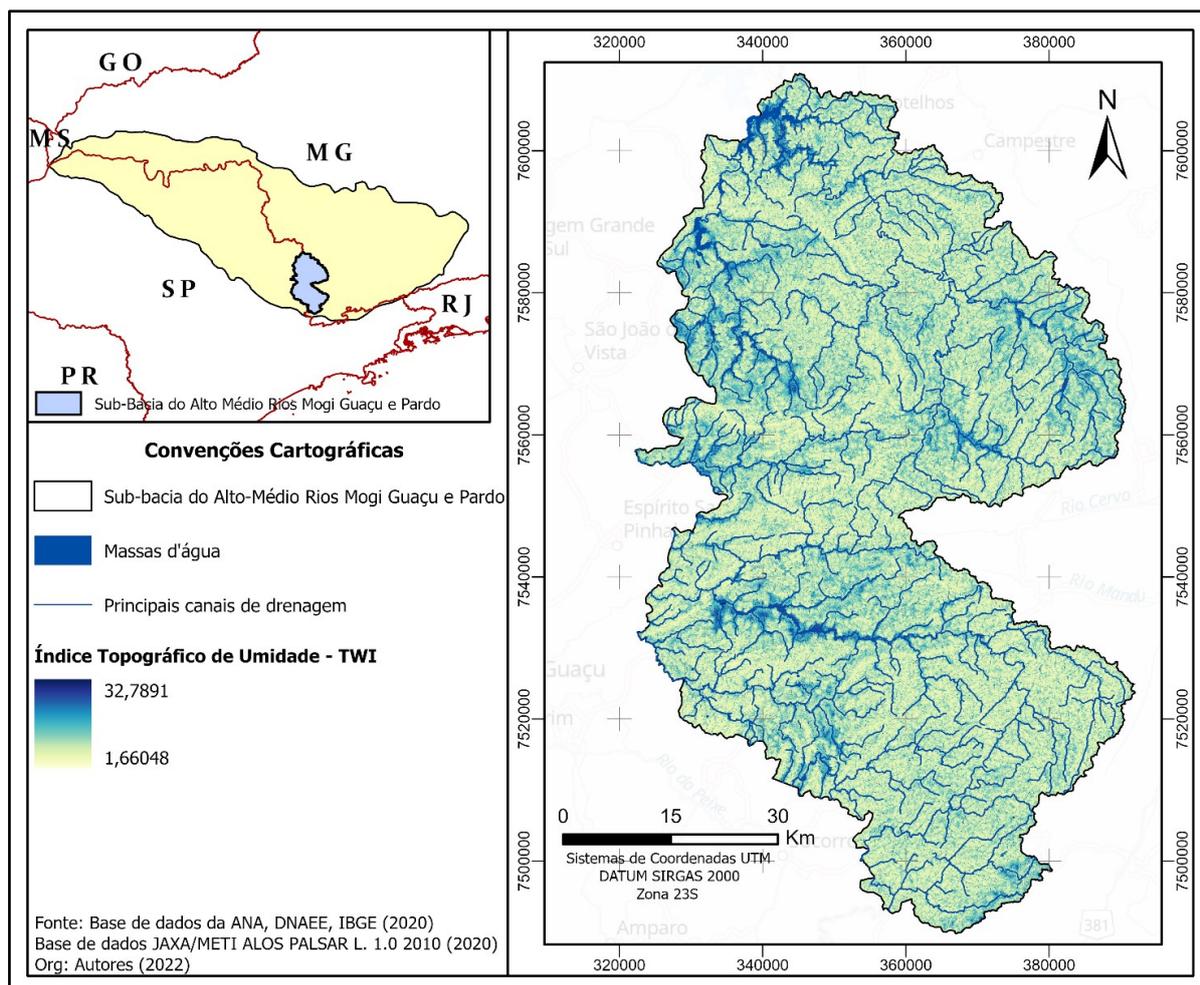


Figura 12 – Mapa do Índice de topográfico de umidade (TWI) da Sub-bacia.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Assim, foi possível afirmar que o mapa de suscetibilidade à inundação gerado pelo método AHP apresentou precisão e acurácia, uma vez que ao comparar cada fator individualmente com o mapa, verificou-se uma convergência dos índices com os eventos hidrológicos críticos.

5. CONCLUSÃO

O mapeamento das áreas suscetíveis à inundação permitiu identificar diversos fatores relacionados à ocorrência desses eventos, resultando na delimitação de áreas de altíssimo risco (8%), alto risco (36%), risco médio (50%) e baixo risco (6%) na Sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo - MG.

As áreas que apresentaram maiores riscos à inundação possuem alta influência dos fatores antrópicos e se localizam em regiões altimetricamente mais baixas da Sub-bacia, exigindo, assim, maior atenção e medidas de mitigação por parte dos órgãos gestores competentes. Essas áreas apresentaram relação diretamente proporcional com as porções

de alta densidade de drenagem e regiões de canais com maior hierarquia fluvial, declividade entre 2 a 20% e posições altimétricas menores que 900 metros.

Nas áreas com risco médio de suscetibilidade à inundação, que corresponde a 50% da área da Sub-bacia, frisa-se a importância de adoção de práticas de manejo adequadas, pelos órgãos públicos e sociedade civil, para que estas porções não se tornem de alto risco aos eventos hidrológicos críticos. Assim, para promover um ordenamento territorial adequado e assegurar a utilização e preservação sustentável dos recursos naturais, é necessário a intensificação de políticas públicas específicas para a fiscalização e o monitoramento ambiental da Sub-bacia.

Embora existam outras abordagens para o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação, o método AHP demonstrou ser altamente eficaz neste estudo. O mapa das áreas de risco determinado por esse método foi coerente com os mapas de cada fator condicionante, ratificando-se a validade da abordagem adotada com os índices dos fatores de influência.

Assim, o emprego de geotecnologias foi fundamental para o sucesso da execução e consolidação desta pesquisa, pois permitiu o manuseio de informações digitais e de análise multicritério.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Núcleo Institucional de Pesquisa e Extensão do IFSULDEMINAS – *Campus* Inconfidentes (NIPE), ao IFSULDEMINAS e ao CNPq pela contribuição e apoio financeiro. Agradecem também aos Grupos de Estudos “Solos, Paleossolos, Depósitos e Evolução das Paisagens” e “Geoprocessamento, Meio Ambiente, Direito e Planejamento Urbano”. Por fim, agradecem aos docentes D.Sc. Lilian Vilela Andrade Pinto e M.Sc. Leonardo José Lopes pelas valiosas contribuições.

REFERÊNCIAS

AB' SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 3. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 162p.

ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência das feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 117-124, 2003.

AMARAL, G. C. **Levantamento do banco de dados de desastres em Poços de Caldas – MG**. 2022. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, 2022.

ARRIGHI, C. A global scale analysis of river flood risk of UNESCO world heritage sites. **Frontiers in Water**, v. 3, p. 1-12, 2021.

BARBOSA, I. C. C. *et al.* Variáveis físico-geográficas e as implicações sobre vulnerabilidade ambiental na Sub-bacia do Rio Guamá, Pará, Brasil. **RICA - Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 3, p. 264-291, 2020.

BELEM, F. L.; CABRAL, J. B. P. Estudo de vulnerabilidade ambiental da Sub-bacia do reservatório da Usina Hidrelétrica de Ferreira Gomes (AP). **Revista Geoaraguaia**, v. 11, n. 1, p. 307-337, 2021.

BRITO, E. R. de.; BASTOS, F. de H. Susceptibilité aux inondations et contributions à la planification urbaine - L'étude de la ville de Crato/Ceará/Brésil. **Confins**, v. 53, p. 3, 2021.

CAETANO, A. L.; BARBOSA, F. S. Probabilidade de ocorrência de chuvas extremas para região de Inconfidentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 537–548, 2019.

CARNEIRO, P. R. F.; MIGUEZ, M. G. **Controle de inundações em bacias hidrográficas metropolitanas**. 1. ed. São Paulo: Annablume, 2011. 300p.

CARVALHO, T. M.; BAYER, M. Utilização dos produtos da 'Shuttle Radar Topography Mission' (SRTM) no mapeamento geomorfológico do Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.9, n.1, p. 35-41, 2008.

CARVALHO, D. S. *et al.* Análise morfométrica da Bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo, Sul de Minas Gerais. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 5, p. 337-352, 2022.

CESAR, P. H. V. **Planejamento urbano e a pavimentação asfáltica em município de pequeno porte**: estudo de caso de Inconfidentes - MG. 2023. 69 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

CHAVES, H. L. O. *et al.* Mapeamento de suscetibilidade à inundação utilizando método da razão de frequência aplicado à Bacia do Riacho Fundo – Distrito Federal. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 9, n. 1, p. 148 -166, 2021.

CHAVES, M. A. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistente para a Sub-bacia Amazônica**. 2002. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

COOKE, R. U.; DOORNKAMP J. C. Drainage basins and sediment transfer. In: COOKE, R. U.; DOORNKAMP, J. C. (Orgs.). **Geomorphology in environmental management**. A new introduction. New York: Clarendon Press, 1990. p. 93-121.

CORREIA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C. Modelagem hidrológica da Sub-bacia hidrográfica do Rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de

geotecnologias na definição de áreas de risco de inundação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, p. 1183-1202, 2015.

CREPANI, E. *et al.* **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001. 103p.

CURY, M. D. *et al.* Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação como informação para o planejamento e a gestão territorial em bacia hidrográfica. **Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 83, p. 160-175, 2021.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS Desktop: Release 2.8**. Redlands: ESRI, 2021.

FERREIRA, A. M. *et al.* Vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na Sub-bacia do Ribeirão do Cipó – Poços de Caldas/MG. **Acta Ambiental Catarinense**, v. 17, n. 1, p. 133-147, 2020.

FONTÃO, P. A. B. **Ritmo das chuvas na Bacia do Pardo (SP / MG): reflexos na vazão dos Rios Pardo e Mogi - Guaçu**. 2014. 127 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.

FREITAS, S. J. N. *et al.* Vulnerabilidade aos processos erosivos relacionada com a sazonalidade no município de Barcarena, Pará. **RICA - Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 7, p. 448-462, 2020.

HAIR, J. F. *et al.* **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2019. 688p.

HORA, S. B.; GOMES, R. L. Mapeamento e avaliação do risco a inundação do rio cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA. **Sociedade & Natureza**, v. 21, n. 2, p. 57-75, 2009.

HUGGETT, R. J. **Fundamentals of geomorphology**. 4. ed. New York: Routledge, 2017. 536p.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Banco de dados geomorfométricos do Brasil - TOPODATA**. São José dos Campos, 2018. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 05 abr. 2023.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades, 2007.

KHOSRAVI, K. *et al.* GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. **Natural Hazards**, n. 83, p. 947-987, 2016.

KHOSRAVI, K. *et al.* A comparative assessment of flood susceptibility modeling using multi-criteria decision-making analysis and machine learning methods. **Journal Of Hydrology**, v. 573, p. 311-323, 2019.

KOFFLER, N. F. Carta de declividade da bacia do Rio Corumbataí para análise digital (SIG). **Geografia**, v. 19, n. 2, p. 167-182, 1994.

KORZENIOWSKA, K.; PFEIFER, N.; LANDTWING, S. Mapping gullies, dunes, lava fields, and landslides via surface roughness, **Geomorphology**, v. 301, p. 53-67, 2017.

LATRUBESSE, E. M. A. Latin America perspective on geomorphologic hazards and related disasters. **Natural Hazards and Human-Exacerbated Disasters in Latin America**, v. 13, p. 445-448, 2010.

LEAL, A. C. Planejamento ambiental de Sub-bacias hidrográficas como instrumento para o gerenciamento de recursos hídricos. **ENTRE-LUGAR**, v. 3, n. 6, p. 65-84, 2012.

LIMA, I. F.; FERNANDES, N. F.; VARGAS JUNIOR, E. A. Análise morfométrica em Sub-bacias afetadas por fluxos de detritos na Região Serrana do Rio de Janeiro. **Rev. Bras. Geomorfol.**, v. 21, n. 2, p. 399-419, 2020.

LONDE, L. R. *et al.* Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 4, p. 133-152, 2014.

MAGALHÃES, I. A. L. *et al.* Uso de Geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: Uma análise comparativa entre dois métodos. **Caderno de Geociências**, v. 8, p. 63-70, 2011.

MARTH, J. D.; MOURA, N. S. V.; KOESTER, E. Estudo da suscetibilidade à inundação com base em análise geomorfológica, Sub-bacia Hidrográfica do Arroio Santa Isabel, região costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista do Instituto Geológico**, v. 37, n. 1, p. 13-28, 2016.

MENEGASSO, J. D. **Mapeamento do risco de inundação na Sub-bacia hidrográfica do Rio Belo, Orleans, SC.** 2019, 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais.) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2019.

MIRA, I. R. C. *et al.* Vulnerabilidade ambiental da Sub-Bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 03, p. 1352-1370, 2022.

MOJADDADI, H. *et al.* Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1080- 1102, 2017.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling, a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrol. Process**, v. 5, n. 1, p. 3-30, 1991.

NUNES, A. B.; LEITE, E. F. Geoprocessamento aplicado ao estudo de caracterização física e ambiental da Sub-bacia hidrográfica do Rio Areias no Estado do Tocantins, Brasil. **Espaço em Revista**, v. 19, n. 2, p. 104-127, 2017.

OLIVEIRA, N. G.; VIEIRA, C. V. Soil loss estimate in the Cubatão do Norte river hydrographic basin, northeast of Santa Catarina, Brazil. **International Journal of Development Research**, v. 7, p. 13887-13895, 2017.

PETERSEN, J. F.; SACK, D.; GABLER, R. E. **Fundamentals of physical geography**. Brazil: Cengage Learning, 2011. 496p.

PETRI, C. A.; OLIVEIRA, L. M. Criação e avaliação de mapas de suscetibilidade a inundação para o município de Iguape, estado de São Paulo. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 4, p. 289-305, 2018.

POWER, D. J. **Decision Support Systems Glossary**. 2006. Disponível em: <http://DSSResources.COM/glossary/>. Acesso em: ago. 2022.

RAHMATI, O.; POURGHASEMI, R. H.; ZEINIVAND, H. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. **Geocarto International**, v. 31, n. 1, p. 42-70, 2015.

REIS, C. H.; AMORIM, R. R.; FERREIRA, C. Caracterização do uso e ocupação das terras de áreas com risco à inundação em Cardoso Moreira e Italva, Rio De Janeiro. **Revista Caminhos da Geografia**, v. 16, n. 55, p. 01-17, 2015.

REZENDE, P. S.; MARQUES, D.V.; OLIVEIRA, A. L. Construção de modelo e utilização do método de processo analítico hierárquico – AHP para mapeamento de risco a inundação em área urbana. **Caminhos da Geografia**, v. 18, p. 01-18, 2017.

RICCOMINI, C.; GIANNINI, P. C. F.; MANCINE, F. Processos fluviais e lacustres e seus registros. In: TEIXEIRA, W. *et al.* (Orgs.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 306-333.

ROSA, R. M.; FERREIRA, V. O. Vulnerabilidade natural à perda de solos na unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos afluentes mineiros do baixo Paranaíba – MG. **Revista Geoaraguaia**, v. 11, p. 107-131, 2021.

ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. esp., p. 38-51, 2012.

SAATY. T. H. A scaling method form priority in hierarquical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v.15, n. 3, p. 234-281, 1977.

SAMANTA, R. K. *et al.* Flood susceptibility mapping using geospatial frequency ratio technique: a case study of Subarnarekha River Basin, India. **Modeling Earth Systems and Environment**, n. 4, p. 395-408, 2018.

SANTOS, A. R.; LOUZADA, F. L. R. O.; EUGENIO, F. C. **ArcGIS 9.3 total: aplicações para dados especiais**. 2. ed. Vitória: CAUFES, 2010, 180p.

SANTOS, C. L. *et al.* Análise da suscetibilidade a ocorrência de enchentes e inundações na Sub-bacia do rio Jaguaribe – João Pessoa/PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 5, p. 1876-1888, 2018.

SANTOS, K. R. Inundações urbanas: um passeio pela literatura. **Élisée**, v. 1, n. 1, p. 177-190, 2012.

SARDINHA, D. S. *et al.* Base de dados de desastres naturais no município de Poços de Caldas / MG: ferramenta para o planejamento e gestão territorial. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 8, n. 3, p. 318–331, 2016.

SCHMIDT, M. A. R.; BARBOSA, G. R. Uso de redes neurais artificiais na ponderação inicial da técnica AHP em análises de vulnerabilidade de bacias hidrográficas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 3, p.511-525, 2016.

SILVA, D. M. R. **Aplicação do método AHP para avaliação de projetos industriais**. 2007. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, M. V. S.; SILVA, B. C. S.; LIMA, I. F. Análise de vulnerabilidade ambiental do município São João da Ponta, Pará: O uso do geoprocessamento na gestão de unidades de conservação. **Revista Cerrados**, v. 37, n. 1, p. 159-188, 2020.

SOARES, C. J. M. **Zoneamento de áreas vulneráveis a inundação e alagamento em Rio Claro - SP, pelo método AHP**. 2018. 59 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo, 2018.

SOUZA, A. C. C.; SILVA, M. L. Geoprocessamento aplicado ao levantamento de solos no município de Inconfidentes - MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, p. 200-214, 2016.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans. American Geophysical Union**, v. 38, n. 6. p. 920, 1952.

SUMMERFIELD, M. A. **Global geomorphology: an introduction to the study of landforms**. 1. ed. New York: Wiley, 1991. 560p.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J. A. R. (Org.). **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. Instituto Geológico/Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.igeologi-co.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>. Acesso em: ago. 2022.

TONELLO, K. C. *et al.* Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.5, p.849-857, 2006.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

_____. Inundações e drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Eds.). **Inundações urbanas na América do Sul**. São Paulo: ABHR 2003. p. 36-37.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 430p.