

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

LUCAS EMANUEL SERVIDONI

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS
VULNERÁVEIS A OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÕES A PARTIR DE PARÂMETROS
GEOMORFOMÉTRICOS**

ALFENAS/MG

2023

LUCAS EMANUEL SERVIDONI

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS
VULNERÁVEIS A OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÕES A PARTIR DE PARÂMETROS
GEOMORFOMÉTRICOS**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências Ambientais na Universidade Federal de Alfenas/ UNIFAL-MG. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato (UNIFAL-MG)

Coorientador: Prof. Dr. Joaquim Ernesto Bernardes Ayer (UNIFACP)

ALFENAS/MG

2023

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Central

Servidoni, Lucas Emanuel.

Proposta metodológica para mapeamento de áreas vulneráveis a ocorrência de inundações a partir de parâmetros geomorfométricos / Lucas Emanuel Servidoni. - Alfenas, MG, 2023.

83 f. : il. -

Orientador(a): Ronaldo Luiz Mincato.

Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2023.

Bibliografia.

1. Desastres naturais. 2. Sensoriamento remoto. 3. Modelo matemático.
I. Mincato, Ronaldo Luiz, orient. II. Título.

LUCAS EMANUEL SERVIDONI

"Proposta Metodológica para Mapeamento de Áreas Vulneráveis a Ocorrência de Inundações a partir de Parâmetros Geomorfométricos"

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Tese apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Aprovada em: 12 de junho de 2023.

Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

Instituição: Universidade de Brasília (UnB)

Prof. Dr. Fernando Shinji Kawakubo

Instituição: Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. Joaquim Ernesto Bernardes Ayer

Instituição: Centro Universitário de Paulínia (UNIFACP)

Prof. Dr. Felipe Gomes Rubira

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Luiz Mincato, Professor do Magistério Superior**, em 12/06/2023, às 17:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1011949** e o código CRC **486D143A**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe Juçara e ao meu pai Ademar por enfrentarem todos os desafios de uma vida humilde e mesmo assim conseguirem proporcionar a seus filhos o privilégio do ensino superior.

Agradeço ao professor, mestre e grande amigo Ronaldo Luiz Mincato por sempre acreditar em meu potencial mesmo quando nem eu mesmo acreditei e jamais me deixar desistir de nada na minha vida.

Agradeço a todos os meus amigos e familiares que compartilharam este momento comigo.

Agradeço a todo o quadro de funcionários da Universidade Federal de Alfenas – MG e em especial a toda a equipe do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UNIFAL – MG.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Obrigado a todos!!!

“O Senhor oculta algumas coisas aos sábios, mas as revela aos pequeninos”

Jesus Cristo.

RESUMO

As inundações são os principais desastres naturais no Brasil, causando perda de vidas e danos socioeconômicos. Este trabalho propõe um modelo para a detecção remota de áreas naturalmente propensas a inundações devido às características morfométricas de seu relevo e redes de drenagem no Alto Rio Sapucaí em Minas Gerais, Brasil. Os parâmetros morfométricos utilizados foram a densidade de drenagem, densidade do rio, relação de relevo, índice de rugosidade, coeficiente de manutenção, fator de forma e comprimento da superfície do córrego. As áreas de risco apresentaram coeficiente de compacidade de 0,75 e fator de forma de 0,56, sendo ambos considerados de alto risco para inundações. Os resultados obtidos permitiram identificar uma equação preditiva significativa que sugeriu um valor de corte de 3,82 para a função discriminante; áreas com valores abaixo desse corte foram consideradas naturalmente mais vulneráveis à ocorrência de enchentes. Essas áreas foram corroboradas com os mapas de risco dos municípios. O mapa obtido pelo modelo proposto foi comparado com o mapa da Defesa Civil, e sua acurácia, segundo o coeficiente Kappa, foi de 0,83, indicando forte similaridade entre os dois mapas. Este trabalho então permitiu identificar uma forma de detecção remota de enchentes reduzindo custos operacionais, podendo cobrir uma grande área mapeada em um curto espaço de tempo. Isto é uma necessidade para um país com dimensões continentais como o Brasil onde constantemente é assolado por enchentes durante a estação chuvosa em praticamente todo o território.

Palavras-chave: desastres naturais; sensoriamento remoto; modelo matemático.

ABSTRACT

Floods are the main natural disasters in Brazil, causing loss of life and socioeconomic damage. This work proposes a model for the remote detection of areas that are naturally flood-prone due to the morphometric characteristics of their relief and drainage networks in the Alto Sapucaí River in Minas Gerais, Brazil. The morphometric parameters used were the drainage density, river density, relief ratio, roughness index, maintenance coefficient, form factor and stream surface length. The risk areas had a compactness coefficient of 0.75 and a form factor of 0.56, and both were considered a high risk for floods. The obtained results allowed the identification of a significant predictive equation that suggested a cutoff value of 3.82 for the discriminant function; areas with values under this cutoff were considered naturally more vulnerable to floods occurrences. These areas were corroborated with the emergency maps of the municipalities. The map obtained by the proposed model was compared with the Civil Defense map, and its accuracy, according to the Kappa coefficient, was 0.83, indicating strong similarity between the two maps. This work then allowed to identify a form of remote detection of floods reducing operational costs, being able to cover a large mapped area in a short period of time. This is a necessity for a country with continental dimensions like Brazil, where it is constantly affected by floods during the rainy season in practically the entire territory.

Keywords: natural disasters; remote sensing; mathematical model.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1 ENCHENTES E INUNDAÇÕES NO BRASIL E NO MUNDO	12
2.2 ANÁLISE MORFOMÉTRICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	14
2.3 MODELAGEM ESTATÍSTICA.....	17
2.4 ATRIBUTOS MORFOMÉTRICOS E HIDROLÓGICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO SAPUCAÍ, MINAS GERAIS	19
2.5 OF VULNERABLE AREAS TO THE OCCURRENCE OF FLOODS IN TROPICAL REGIONS, FROM MORPHOMETRIC ATTRIBUTES	35
2.6 METHODOLOGIAL PROPOSAL TO REMOTE DETECTION AND MANAGEMENT OF AREAS THAT ARE NATURALLY VULNERABLE TO FLOODS.....	47
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
REFERÊNCIAS.....	80
ANEXOS	82

1 INTRODUÇÃO

As inundações são fenômenos que ocorrem naturalmente devido à dinâmica da superfície, principalmente em áreas tropicais e subtropicais. No entanto, o uso e ocupação desordenada do solo contribuem para perdas de vidas e danos materiais. Como o desastre natural mais comum no Brasil, as inundações têm resultado em perdas de milhões de reais, tanto para o capital público quanto para o privado (FERGUSON; FENNER, 2020). Porém, mesmo sendo recorrente, praticamente não existe um plano integrado de combate e prevenção de enchentes no Brasil (FERGUSON; FENNER, 2020).

Os danos causados pelas enchentes estão relacionados ao avanço da urbanização nas áreas fluviais. A impermeabilização de solos urbanos após a retirada da cobertura vegetal tem impacto direto no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, modificando o sistema de drenagem natural e, conseqüentemente, intensificando as inundações. O aumento da velocidade e do volume das águas superficiais potencializa o pico das cheias; ou seja, o escoamento superficial aumenta, promovendo o rápido acúmulo de água em locais alagados em áreas urbanas (ALMEIDA *et al.*, 2017). Isso também ocorre em áreas rurais ocupadas.

A ocupação de áreas vulneráveis a inundações, como várzeas de rios ou pontos mais baixos de áreas urbanas e rurais, onde as águas pluviais e fluviais tendem a se concentrar, é responsável por grandes perdas de vidas e recursos econômicos. O mapeamento dessas áreas faz parte do processo de zoneamento dos planos municipais, mas a fiscalização dessas áreas é ineficiente, permitindo a ocorrência de moradias precárias em locais inadequados (MEDHI *et al.*, 2017).

No entanto, os riscos de inundação se agravaram devido a mudanças na superfície terrestre associadas às mudanças climáticas, os efeitos deletérios desse fenômeno natural são agravados pelas alterações antrópicas nos sistemas hidrossedimentológicos, que se intensificaram tanto em volume quanto em área, levando a um aumento do número de pessoas afetadas e deslocadas por eventos de inundação, principalmente em áreas urbanas (ARANTES *et al.*, 2021; BRASIL, 2023; MOLINA; GONZÁLEZ, 2020; SILVA *et al.*, 2018).

Nesse cenário, as técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto permitem estudos preliminares e piloto para reconhecer áreas propensas a inundações e apoiar o planejamento, desenvolvimento e gestão do uso da terra

(UDIN; MATIN, 2021). Essas técnicas reduzem os custos e esforços de mapeamento e gestão de desastres (ARDAYA *et al.*, 2017). Além disso, a identificação de áreas naturalmente vulneráveis a inundações favorece o estabelecimento de ações de fiscalização, policiamento e controle adequadas às suas realidades socioeconômicas e ambientais (EKMEKCIOGLU *et al.*, 2022). Assim, o desenvolvimento de propostas para analisar e mapear áreas propensas a inundações com base nas características morfométricas de suas redes de drenagem e formas de relevo é uma resposta necessária às mudanças climáticas, que provocam cada vez mais a ocorrência de eventos climáticos extremos (KUNTAMALLA *et al.*, 2018; LIN; BILLA, 2021).

O efeito deletério das enchentes vem se intensificando no Brasil desde 2018 até o presente momento. Em praticamente todas as regiões do país houve impactos significativos das enchentes. Diversas regiões e cidades entraram em estado de calamidade pública devido aos impactos das enchentes. Hoje mais do que nunca em um país com dimensões continentais como o Brasil é necessário o desenvolvimento de técnicas de mapeamento de enchentes que sejam precisas e com custo reduzido. Logo, esse trabalho se justifica por propor uma proposta metodológica de detecção remota de enchentes, podendo ser aplicada de forma econômica e com resultados satisfatórios para auxiliar as autoridades competentes para tomada de decisão envolvendo questões sobre desastres naturais (BRASIL, 2023).

Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver uma proposta metodológica para detecção remota e gerenciamento de áreas naturalmente vulneráveis a inundações, com base em parâmetros morfométricos e hidrológicos de bacias hidrográficas.

A Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí possui histórico de enchentes e inundações recorrentes nas cidades de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí Delfin Moreira, Piranguinho e Piranguçu (BRASIL, 2023). Assim, foram descritas, calculadas e avaliadas as características morfométricas do relevo e da rede de drenagem para auxiliar a gestão de áreas de risco. Visou ainda analisar o comportamento hidrometeorológico a partir das vazões e precipitações de 1994 a 2013, da rede de monitoramento da Agência Nacional de Águas (ANA) e de sensores orbitais. O período de tempo foi selecionado com base nos dados disponíveis nas agências reguladoras. Vale salientar que neste período a área foi recorrentemente vítima de enchentes com sérios prejuízos socioeconômicos e ambientais.

Em Seguida, tais parâmetros foram submetidos a análise de agrupamento para discriminação de áreas propensas a enchentes. Feito isso, foi aplicado no produto da

análise de agrupamentos uma análise de sobrevivência onde foi derivado um modelo matemático para detecção remota de enchentes. Em seguida, tal modelo foi submetido à análise de concordância entre mapeamentos empíricos e os produtos produzidos neste trabalho. Por fim, foi realizada uma discussão sobre gestão de áreas vulneráveis a enchentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENCHENTES E INUNDAÇÕES NO BRASIL E NO MUNDO

As enchentes e inundações são fenômenos que ocorrem de forma natural sobre a superfície terrestre. Caracterizada por uma elevação temporária no nível de drenagens superficiais devido a eventos climáticos curtos de alta intensidade ou chuvas prolongadas. Tais eventos promovem a extravasão do canal de drenagem atingindo leitos superiores dos rios. Devido à falta de planejamento do uso e ocupação do solo ocorre a ocupação indevida de áreas sujeitas a alagamentos. Essas ocupações podem ser empreendimentos comerciais ou habitacionais de alto ou baixo padrão. Todavia, habitações de baixo padrão estão mais sujeitas aos impactos das enchentes e inundações (BRASIL, 2023).

Nos últimos 10 anos o Brasil experimentou um aumento significativo em eventos climáticos extremos causando prejuízos de milhões de reais devido a degradação de obras de infraestrutura, moradias de alto e baixo padrão e ocupações comerciais. Além disso, milhares de pessoas ficam desalojadas, tendo que abandonar suas casas e ir para abrigos públicos. E ainda, outras milhares de pessoas perdem suas vidas cujo valor é inestimável (BRASIL, 2023).

Nos últimos 10 anos o Brasil experimentou um aumento significativo em eventos climáticos extremos causando prejuízos de milhões de reais devido a degradação de obras de infraestrutura, moradias de alto e baixo padrão e ocupações comerciais. Além disso, milhares de pessoas ficam desalojadas, tendo que abandonar suas casas e ir para abrigos públicos. E ainda, outras milhares de pessoas perdem suas vidas cujo valor é inestimável (BRASIL, 2023).

Segundo Brasil (2023) as cidades de Salvador, São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Recife lideram nesta ordem o cenário com o maior número de população submetida em área de risco no Brasil. Porém, o impacto devastador das enchentes e inundações não se limita apenas a grandes metrópoles. Vale destacar o exemplo da cidade de Blumenau em Santa Catarina uma cidade de porte médio que recorrentemente sofre com as enchentes e inundações do Rio Itajaí. Além deste exemplo podemos citar o ocorrido nas cidades de Araraquara e São Carlos, no interior do estado de São Paulo no início de 2023 com enchentes devastadoras causando prejuízos milionários e perdas trágicas de vida (BRASIL, 2023).

Assim como no Brasil, houve um aumento nos números de eventos de enchentes e inundações no mundo e principalmente em regiões de clima tropical e equatorial. Esse aumento de enchentes está associado a mudanças climáticas e a impermeabilização de bacias hidrográficas, consequência direta da expansão urbana acelerada que ocorre desde a década de 70 até os presentes dias. Essa aceleração do crescimento das cidades é feita por diversas vezes sem os devidos estudos técnicos de uso e ocupação do solo. Além disso, a especulação imobiliária nas grandes e médias cidades submete a população carente a ocupações em áreas perigosas sujeitas ao impacto direto das enchentes (EKMEKCIOGLU *et al.*, 2022).

Cabe destacar que a adequação das necessidades humanas aos fenômenos da natureza deve ser feita por parte da sociedade e não o contrário. Para tanto é fundamental que ocorra um esforço dos órgãos públicos para planejar adequadamente o uso e ocupação do solo. Logo uma das etapas fundamentais para concretizar esse objetivo é o mapeamento das áreas vulneráveis a ocorrência de enchentes (LIN; BILLA, 2021).

Existem dois tipos de mapeamento de áreas vulneráveis a alagamentos, mapeamentos empíricos feitos em campo baseados em cota altimétrica e evidências de alagamentos. É um trabalho arduo, demorado e com custos operacionais elevados. Porém, é um produto de escala local eficiente para o planejamento urbano e controle de áreas de risco. O segundo produto parte de técnicas de mapeamento a distância apoiados por imagens de satélites e sensores de radar. Estas podem abranger uma área maior e sua investigação é mais rápida e mais barata. Todavia é preciso se atentar a um controle de qualidade rigoroso na obtenção das informações para não comprometer os resultados analíticos desta forma de mapeamento (KUNTAMALLA *et al.*, 2018).

Logo, o mapeamento de enchentes e inundações tem o objetivo de subsidiar ações emergências e mitigadoras de curto, médio e longo prazo e é fundamental para se exercer um planejamento territorial que vise a qualidade de vida da população submetida a condições desumanas em ocupações vulneráveis em margens de rios e córregos que frequentemente causam transtornos devido a mudanças climáticas (SILVA *et al.*, 2018).

2.2 ANÁLISE MORFOMÉTRICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A análise morfométrica de bacias hidrográficas possui função relevante na Geomorfologia que por sua vez é a ciência que estuda as formas de relevo. Tais formas são a expressão espacial de uma superfície. Ou seja, compõe o conjunto de elementos estáticos e dinâmicos e suas relações com outros sistemas biofísicos da terra, como o clima (CHRISTOFOLETTI, 1969; PUROHIT; PARMAR, 2017).

A análise de formas e processos permite conhecer os aspectos e dinâmicas da topografia que por sua vez influencia diretamente em eventos de enchentes quando relacionada a condições climáticas adversas. Logo a Geomorfologia e a análise de sistemas hidrológicos é um advento para entender do ponto de vista técnico e científico as áreas vulneráveis a alagamentos (HORTON, 1945).

A análise de ambientes fluviais e bacias hidrográficas começaram a se constituir como um ramo do conhecimento técnico e científico a partir de 1945, com a publicação de Rober E. Horton, um engenheiro hidráulico que procurou estabelecer critérios e leis para o desenvolvimento de rios e suas bacias. Horton foi responsável por trazer na abordagem de bacias hidrográficas as questões quantitativas para que a partir de suas ideias novas concepções metodológicas surgissem na área de análise de bacias hidrográficas (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Para tanto ao longo do desenvolvimento da análise quantitativa de bacias hidrográficas uma série de índices morfométricos do relevo e da rede de drenagem foram desenvolvidos com o intuito de conceder informações específicas sobre o comportamento hidrológico de sistemas fluviais. Individualmente os índices trazem informações pontuais, porém, quando combinados ofertam informações poderosas para a gestão territorial (KUNTAMALLA *et al.*, 2018).

A densidade de rios expressa o número de canais de drenagem existentes por unidade de área, indicando o potencial hídrico de uma área de estudo (STRAHLER, 1952).

$$Dh = \frac{n}{A} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: Dh é a densidade de rios; n é o número de canais e A é a área da bacia.

A densidade de drenagem expressa a influência do fornecimento e transporte de material detrítico e indicam graus de antropofização dos canais de drenagem (HORTON, 1945).

$$Dd = \frac{C}{A} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: Dd é a densidade de drenagem; C é o comprimento total dos canais e A é a área da bacia.

A Relação de Relevo apresenta a relação entre a amplitude altimétrica da bacia hidrográfica com o comprimento do canal principal ofertando informações sobre o estágio de desenvolvimento do relevo (STRAHLER, 1952).

$$Rr = \frac{\Delta a}{L} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: $a\Delta$ é a amplitude altimétrica e L é o comprimento do canal.

O Índice de Rugosidade representa a relação entre a declividade do relevo com o comprimento de canais de drenagem indicando o grau de dissecação da bacia hidrográfica (HORTON, 1945).

$$Ir = Hm \times Dd \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: Ir é o índice de rugosidade; Hm é a amplitude altimétrica e Dd é a densidade de drenagem.

O Coeficiente de Compacidade indica o potencial de ocorrência de cheias em uma bacia hidrográfica (HORTON, 1945).

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: Kc é o coeficiente de compacidade; 0,28 é o valor constante; P é o perímetro da bacia em km e \sqrt{A} é a raiz quadrada da área da bacia em km².

O Fator de Forma, assim como o Coeficiente de Compacidade também é aplicado para verificar se uma bacia é sujeita a enchentes. Valores baixos deste índice indicam que a bacia é mais propensa a inundações (HORTON, 1945; STRAHLER, 1952).

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde: Kf é o fator de forma; A é a área da bacia em km² e L é o comprimento axial da bacia.

O Coeficiente de Manutenção foi proposto por Schum (1956) e indica a área necessária para manter perene cada metro de drenagem no interior de uma bacia hidrográfica.

$$C_m = \frac{1}{D_d} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde: C_m é o coeficiente de manutenção e D_d é a densidade de drenagem.

A Extensão do Percurso Superficial indica a extensão média percorrida pelo escoamento superficial até o canal de drenagem mais próximo (CHRISTOFOLETTI, 1969).

$$EPS = \frac{1}{2 \cdot D_d} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde: EPS é a extensão do percurso superficial e D_d é a densidade de drenagem.

O Índice de Circularidade indica que bacias que possuem valores próximos de 1 são mais propensas a alagamentos devido a sua forma circular (STRAHLER, 1952).

$$I_c = \frac{12,57 \times A}{p^2} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde: I_c é o índice de circularidade; 12,57 é o número constante; A é a área da bacia e p² é o perímetro da bacia ao quadrado.

Os índices expressam informações sobre o comportamento do relevo e da rede de drenagem. Logo, são eficientes para ofertar informações para o planejamento adequado do uso e ocupação da terra com o intuito de reduzir os impactos das enchentes.

Christofoletti (1981) discute a importância da análise morfométrica para avaliar parâmetros físicos de bacias hidrográficas. Segundo este autor, os parâmetros morfométricos podem revelar indicadores específicos para um determinado local. Dessa forma, é possível quantificar e qualificar a vulnerabilidade ambiental em bacias hidrográficas. Atualmente, esta análise é realizada por meio de SIG e tem se mostrado bastante eficiente segundo a literatura nacional e internacional (CHRISTOFOLETTI, 1974).

A análise morfométrica pode ser realizada por meio de índices geométricos definidos a partir dos modelos digitais de elevação (MDE). Os MDE's são estruturados

em grades retangulares, onde, cada pixel tem um valor numérico associado à elevação correspondente. Os MDE's também podem ser criados a partir de grades triangulares vetoriais, nas quais os valores são associados aos vértices dos triângulos. O MDE utilizado nesta pesquisa foi gerado a partir de radares interferométricos do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Os dados altimétricos da SRTM são disponibilizados originalmente pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) com resolução espacial de 30 m para os Estados Unidos da América e Japão e de 90 metros para o resto do planeta (KUNTAMALLA *et al.*, 2018).

Em seu trabalho, Medhi *et al.* (2017) demonstram que é possível a partir desses parâmetros identificar a possibilidade de uma bacia hidrológica sofrer processos hidrometeorológicos extremos, como enchentes e inundações e, também, apontam que os parâmetros assumidos na análise podem ainda serem indicativos do potencial de exploração de águas subterrâneas. Portanto, a realização da análise morfométrica é uma alternativa fundamental, viável e de baixo custo para contribuir com o planejamento público e privado de empreendimentos agrícolas, industriais e, mesmo, imobiliários.

A utilização de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto são eficazes para determinação dos parâmetros morfométricos e permitem calcular atributos como a densidade de drenagem, o índice de bifurcação e a relação de relevo de bacias hidrográficas de forma automatizada e com custos reduzidos, colaborando para apontar áreas prioritárias e imediatas para conservação dos recursos naturais e execução de planos de manejo para áreas de risco de enchentes e inundações e deslizamentos de massa (TAOFIK *et al.*, 2017). Quando combinados, os elementos do geoprocessamento e sistemas de informações geográficas possibilitam avaliar e monitorar, tanto quantitativa, como qualitativamente, fenômenos e eventos ambientais e, assim, contribuir com dados para sustentar a tomada de decisão por órgãos públicos e privados (TAOFIK *et al.*, 2017).

2.3 MODELAGEM ESTATÍSTICA

Um dos mais importantes instrumentos analíticos em estudos ambientais é a modelagem estatística. No modelo estatístico, as estruturas de causalidade, que são concebidas através do raciocínio geográfico e motivadas pelas evidências empíricas disponíveis no momento, são representadas pelos efeitos principais e pelos

parâmetros de interação, associados a cada covariável escolhida para compor o modelo (FERREIRA, 2009; KHATTREE; NAIK, 2000).

Uma vantagem da utilização do modelo estatístico para descrição e representação do conhecimento científico está na possibilidade de afirmações probabilísticas. Os mecanismos empregados na modelagem estatística permitem fazer generalizações. Dessa forma, a população infinita que serve de fonte para a amostra em estudo pode ser formada de misturas de populações com diferentes distribuições de forma a representar um fenômeno geográfico, no caso as áreas vulneráveis de ocorrência de enchentes em bacias hidrográficas (FERREIRA, 2009).

Para separar áreas sujeitas a inundação de áreas seguras foi utilizado técnicas de estatística multivariada, cujo objetivo é classificar e discriminar objetos. Uma boa classificação deve resultar em pequenos erros, ou seja, deve haver pouca probabilidade de má classificação (KHATTREE; NAIK, 2000). Para tanto, a técnica de análise de cluster (TYRON, 1939) é um método que permite agrupar variáveis com uma ou mais características em comum. Existem três métodos de classificação, sendo eles: método de partição, método de origem arbitrária e método por similaridade mútua (FERREIRA, 2009; KHATTREE; NAIK, 2000).

O método de partição classifica regiões no espaço definido em função das variáveis que sejam mais densamente ocupadas, em termos de observações. O método com origem arbitrária procura classificar as observações segundo “n” conjuntos previamente definidos; assim, “n” pontos arbitrários servirão como centroides iniciais e as observações irão se agrupando. E o método por similaridade mútua procura agrupar observações que tenham similaridade comum com outras observações. A técnica de análise de agrupamentos tem sido amplamente utilizada em diversas áreas do conhecimento para diferentes fins e objetivos (FERREIRA, 2009; KHATTREE; NAIK, 2000).

Dentre as diferentes técnicas de agrupamentos a unificação em árvore tem o objetivo de construção taxonômica de níveis, sendo considerado um método de agrupamento aglomerativo hierárquico. O objetivo deste algoritmo é o de unificar objetos em classes ou grupos maiores através da utilização de alguma medida de similaridade ou de distância. O resultado obtido é uma árvore hierárquica, ou dendrograma (FERREIRA, 2009).

Definido cluster e os grupos obtidos por meio da árvore hierárquica é possível traçar um modelo matemático que descreve o conjunto e características de

agrupamento executado na análise de cluster. Para tanto, é utilizado a função discriminante linear de Fisher. Esta se caracteriza por produzir separação máxima entre duas populações, ou dois agrupamentos. Dessa forma, essa técnica de análise de estatística multivariada foi amplamente utilizada em diversos estudos das geociências cujo objetivo era descrever e classificar diferentes grupos de uma determinada população ou conjunto de variáveis (FISHER, 1936; KHATTREE; NAIK, 2000).

Todavia a modelagem estatística não está isenta de erros e distorções, porém, é preciso mensurar esses erros de classificação. Uma forma interessante de medir erros de classificação oriundos de produtos cartográficos construídos com base em análises estatísticas é a utilização do Índice Kappa. Tal índice tem sido amplamente utilizado na literatura científica e na cartografia temática para avaliar níveis de concordância entre duas classificações. A sua execução promove 6 classes de concordâncias possíveis variando de 0,00 a 1,00. Logo, valores próximos de 1,00 possuem melhor concordância do que valores inferiores variáveis (FERREIRA, 2009).

2.4 ATRIBUTOS MORFOMÉTRICOS E HIDROLÓGICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO SAPUCAÍ, MINAS GERAIS

Publicado no Volume 41 da Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo em: 18/08/2020. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.169817.

Autores: Lucas Emanuel Servidoni, Joaquim Ernesto Bernardes Ayer, Paulo Vitor Moraes Estella, Gabriel Henrique de Oliveira e Ronaldo Luiz Mincato.

Resumo: A caracterização morfométrica de bacias hidrográficas é fundamental para análises hidrológicas e ambientais. Pois, pode contribuir com políticas de planejamento e gerenciamento de recursos naturais e de prevenção à enchentes e inundações. Neste cenário, o trabalho analisou as características morfométricas e hidrológicas da Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, sul do Estado de Minas Gerais, para fornecer subsídios técnicos para o adequado gerenciamento dos seus recursos hídricos. Para tanto, foram calculados os parâmetros: densidade de rios, densidade de drenagem, relação de relevo, índice de rugosidade, coeficiente de compacidade, fator de forma e coeficiente de manutenção. Os dados referentes à vazão foram obtidos de uma estação de monitoramento fluvial da Agência Nacional de Águas e organizados pelo Sistema Computacional para Análise Hidrológica e pelo aplicativo Excel para obtenção, no período de 1994 a 2013, da vazão média anual, vazão média de longo prazo, vazão máxima de longo prazo, vazão mínima de longo prazo e os desvios em relação à média. Os dados de precipitação foram obtidos pelo *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations* e reunidos em precipitação média mensal e precipitação média anual para o período. Os dados

permitiram caracterizar a Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí como propensa a enchentes, devido aos valores de densidade de drenagem maiores que 15,01, de densidade de rios maiores do que 3,01 e coeficiente de compactidade de 0,89. Tais valores indicam a necessidade de estratégias de prevenção à enchentes e inundações, como o reestabelecimento de áreas verdes e evitar a ocupação antrópica nessas áreas.

Palavras-chave: Hidrologia orbital; Fluviometria; Pluviometria; Recursos Hídricos.

Abstract: The morphometric characterization of hydrographic basins is essential for hydrological and environmental analysis. It allows can contribute to policies for planning and managing natural resources and preventing floods. This work analyzed the morphometric and hydrological characteristics of the High Sapucaí River basin, south of Minas Gerais State, to provide technical support for the proper management of its water resources. For this purpose, the parameters river density, drainage density, relief ratio, roughness index, compactness coefficient, form factor and maintenance coefficient were calculated. The flow data were obtained by the fluvial monitoring station of the National Water Agency and organized by the Computational System for Hydrological Analysis and the Excel application to obtain, from 1994 to 2013, the average annual flow, long-term average flow, maximum long-term flow, flow long-term minimum and deviations the average. Precipitation data were obtained by the Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations and gathered in average monthly precipitation and average annual precipitation for the period. The dataset allowed to characterize the Alto Sapucaí Hydrographic Basin as prone to flooding, due to the values of drainage density greater than 15.01, river density greater than 3.01 and compactness coefficient of 0.89. These values indicate the need for flood prevention strategies, such as the reestablishment of green areas and avoiding anthropic occupation in these areas.

Keywords: Orbital Hydrology; Fluvimetry; Rainfall; Water Resources.

1. Introdução

A análise e a caracterização morfométrica e hidrológica de bacias hidrográficas permitem abordar questões relacionadas ao ambiente fluvial e podem contribuir com a gestão eficaz para prevenção de riscos às enchentes e inundações. Para tanto, esse tipo de trabalho é indispensável para produção de informações sobre o comportamento fluvial e pluviométrico de bacias hidrográficas (WU *et al.* 2019). E, depois, contribuir com conhecimentos para o desenvolvimento e execução de planos de manejo compatíveis com a realidade local e com a Política Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

A disponibilidade e a demanda por recursos hídricos são responsáveis por disputas em regiões de escassez de água. Assim, compreender os aspectos do comportamento hidrológico permite identificar a melhor solução para os problemas associados aos diferentes usos da água (WU *et al.* 2019). Para tanto, é necessário compreender as interações que afetam o ciclo das águas pluviais e alteram as dinâmicas de escoamento superficial, de infiltração e da evapotranspiração na superfície terrestre, em escala de bacias hidrográficas e de vertentes. O comportamento destas variáveis decorre da estrutura geológica, geomorfológica, pedológica e climática das bacias hidrográficas (NAGARAJU *et al.* 2017).

Bacias hidrográficas são áreas banhadas por um rio principal e seus afluentes que fluem para o exutório. Além disso, é composta por solos, rochas e formas de relevo que atuam em conjunto e definem a sua dinâmica hidrológica. As atividades humanas, tais como, sistemas agrícolas, indústrias e áreas urbanas podem ocorrer no interior das bacias e influenciar a entrada e saída de materiais e energia.

Portanto, a bacia hidrográfica é a unidade básica de estudos geocientíficos, pois todos os fenômenos naturais ou antrópicos têm causa e efeito no seu interior (ULIBARRI; GARCIA, 2020).

A análise morfométrica de bacias hidrográficas consiste em avaliar e descrever as características da rede de drenagem, do relevo e suas relações (NAGARAJU *et al.* 2017). Tais aspectos junto com as características climáticas regionais influenciam a quantidade e o comportamento das águas produzidas no deflúvio, na ocorrência e distribuição das precipitações, no escoamento superficial e subsuperficial, na evapotranspiração e na qualidade e propriedades físicas e químicas das águas (ALMEIDA *et al.* 2017).

Os atributos fisiográficos de bacias hidrográficas afetam diretamente os processos hidrológicos, climáticos e as atividades humanas, como o agronegócio, o abastecimento público, a indústria e a produção de energia hidrelétrica. Portanto, o seu conhecimento é essencial para diagnosticar as alterações, com e sem interferências antrópicas, e traçar planos de controle, adaptação e monitoramento para os novos cenários desencadeados pelas mudanças climáticas locais e globais (TAOFIK *et al.* 2017).

Os parâmetros morfométricos do relevo, da rede hidrográfica e pluviométricos são fundamentais para determinar as características hidrológicas de uma bacia hidrográfica. Medhi *et al.* (2017) demonstraram que é possível a partir desses atributos identificar a possibilidade de uma bacia hidrográfica sofrer processos hidrometeorológicos extremos, como enchentes e inundações. Tais autores apontaram também que os parâmetros utilizados na análise podem ainda serem indicativos do potencial de exploração de águas subterrâneas. Portanto, a análise morfométrica é uma alternativa viável e de baixo custo para contribuir com o planejamento público e privado de empreendimentos agrícolas, industriais, imobiliários e para prevenção e mitigação de enchentes e inundações.

As técnicas de geoprocessamento e de sensoriamento remoto são eficazes para determinação dos parâmetros morfométricos e permitem calcular atributos como a densidade de drenagem, o índice de bifurcação e a relação de relevo de bacias hidrográficas de forma automatizada e com custos reduzidos, colaborando para apontar áreas prioritárias e urgentes para investimentos na conservação dos recursos naturais e para elaboração de planos de manejo para as áreas com riscos à enchentes e inundações (TAOFIK *et al.* 2017). Quando combinados, os elementos de geoprocessamento e de sistema de informação geográfica (SIG) possibilitam avaliar e monitorar, tanto quantitativa, como qualitativamente, fenômenos e eventos ambientais e, assim, contribuir com informações para sustentar e amparar as tomadas de decisões por órgãos públicos e privados (TAOFIK *et al.* 2017).

A Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí possui histórico de enchentes e inundações recorrentes nas cidades de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí Delfin Moreira, Piranguinho e Piranguçu (DEFESA CIVIL, 2020). Assim, foram descritas, calculadas e avaliadas as características morfométricas do relevo e da rede de drenagem para auxiliar a gestão de áreas de risco. Visou ainda analisar o comportamento hidrometeorológico a partir das vazões e precipitações de 1994 a 2013, da rede de monitoramento da Agência Nacional de Águas (ANA) e de sensores orbitais. O período de tempo foi selecionado com base nos dados disponíveis nas agências reguladoras. Vale salientar que neste período a área foi recorrentemente vítima de enchentes e inundações com sérios prejuízos socioeconômicos e ambientais.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí é afluente da Bacia do Rio Grande, localizada na Região Sudeste do Brasil, nos Estados de Minas Gerais e São Paulo (**Figura 1**). A área de drenagem do Alto

Sapucaí é de 2.813 km² e a vazão média é de 146 m³ s⁻¹. O Alto Sapucaí é estratégico para a região do sul de Minas Gerais, pois as águas são usadas no abastecimento público e industrial, irrigação e abastecimento do reservatório da Usina Hidrelétrica de Furnas (VIANNA; AVELAR, 2010).

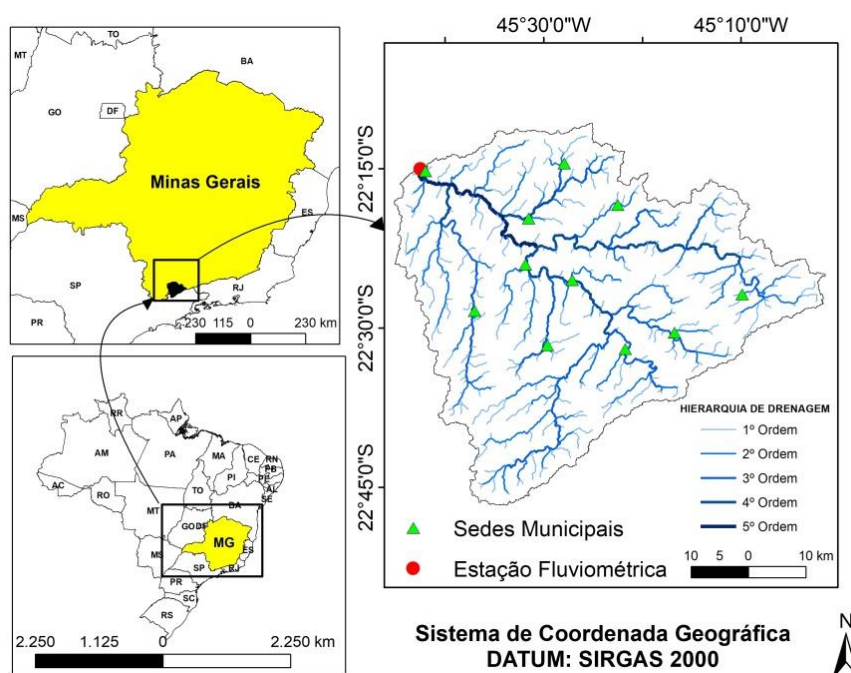


Figura 1: Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, MG

O arcabouço geológico da área é formado principalmente por complexos granito-gnáissicos do Sistema Orogênico do Tocantins (CPRM, 1998). Tais complexos são, em geral, impermeáveis e aliados ao relevo íngreme potencializam a ação das águas fluviais e pluviais em eventos chuvosos. A geomorfologia é caracterizada pelo Domínio das Unidades Denudacionais em Rochas Cristalinas ou Sedimentares, com altimetria entre 816 e 1.482 m (RIBEIRO *et al.* 2016). A bacia hidrográfica do Alto Sapucaí está associada à Serra da Mantiqueira. Devido à isso, há vales profundos com divisores marcados pela presença de escarpas abruptas, além de vales altimontanos com planícies aluviais soerguidas. A jusante é composta por declives e vertentes suaves (SGARBI; DARDENNE, 2002). Na hidrografia, o padrão de drenagem dominante é o dendrítico, com canais de 1^a a 5^a com direção preferencial NE-SO (RIBEIRO *et al.* 2016).

O clima, de acordo com a classificação de Köppen é tropical de altitude (Cwa e Cwe), com verão quente e úmido e inverno frio e seco e precipitação média anual de 1.600 a 1.865 mm (MELLO *et al.* 2007; SPAROVEK *et al.* 2007; AQUINO *et al.* 2012). O Domínio Morfoclimático é a Mata Atlântica, com loresta Estacional Semidecídua, substituída em sua maior parte por pastagens, cultivos agrícolas e silvicultura (SCOLFORO *et al.* 2008).

2.2. Análise Morfométrica

Os parâmetros morfométricos da Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí foram calculados a partir do modelo digital de elevação (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission 2* (SRTM 2) com resolução vertical de 30 m, que atende aos critérios de escala do estudo, conforme Gupta *et al.* (2017). O MDE foi processado em SIG pelo módulo *Hydrology* do conjunto *Spatial Analyst Tools e ArcHydro* para obtenção da base cartográfica, que consiste nos mapas de Declividade, de Altimetria e de Hidrografia.

Para remoção dos pixels com valores de altimetria nulos foi utilizada a extensão *Fill* do ArcGIS 10.5 (ESRI, 2015), para redução das falhas e erros nos cálculos dos parâmetros morfométricos. Para extração automática da rede de drenagem foi usada a extensão *Hidrology* do ArcGIS 10.5, a partir dos processos *fill*, *flow direction*, *flow accumulation*, *con*, *stream to featur* e *watershed* (ESRI, 2015). Os parâmetros utilizados, junto às equações e variáveis, com os seus significados e as referências consideradas estão listados na **Tabela 1**.

Tabela 1: Parâmetros Morfométricos da Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, MG.

Parâmetro	Equação	Definição	Significado	Referência
Densidade de Rios (Dh)	$Dh = \frac{n}{A}$	n = número de canais A = área	Expressa o número de canais existentes por unidade de área, indicando o potencial hídrico da região	Gupta <i>et al.</i> , 2017
Densidade de drenagem (Dd)	$Dd = \frac{C}{A}$	C = comprimento total dos canais A = área	Expressa a influência do fornecimento e transporte de material dendrítico ou indicam o grau de antropização dos canais	Taofik <i>et al.</i> , 2017
Relação de relevo (Rr)	$Rr = \frac{\Delta a}{L}$	Δa = amplitude altimétrica L = comprimento do canal	Relação entre a amplitude altimétrica com o comprimento do canal principal	Kuntama lla <i>et al.</i> , 2018
Índice de rugosidade (Ir)	$Ir = Hm \times Dd$	Hm = amplitude altimétrica Dd = Densidade de drenagem	Representa a relação declividade com os comprimentos de canais. Indica o grau de dissecação da bacia hidrográfica	Kuntama lla <i>et al.</i> , 2018
Coefficiente de Compacidade (Kc)	$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	P = Perímetro da bacia em km A = Área da Bacia em km ²	Indica a maior ou menor ocorrência de cheias	Taofik <i>et al.</i> , 2017
Fator de Forma (Kf)	$Kf = \frac{A}{L^2}$	A = Área da bacia em km ² L = comprimento axial da bacia	Valores baixos a bacia é menos sujeita a enchentes	Taofik <i>et al.</i> , 2017
Coefficiente e Manutenção (Cm)	$Cm = \frac{1}{Dd}$	Dd = Densidade de Drenagem	Indica a área para manter perene cada metro de drenagem	Gupta <i>et al.</i> , 2017
Extensão do percurso superficial (Eps)	$EPS = \frac{1}{2.Dd}$	Dd = Densidade de Drenagem	Indica a extensão média percorrida pelo escoamento até o canal de drenagem	Kuntama lla <i>et al.</i> , 2018

O *flow direction* avalia a capacidade natural da água de escoar pelo caminho mais fácil. Dessa forma, o algoritmo avalia o MDE, *pixel a pixel*, identificando os fundos de vales e de talwegues. Pelo *flow direction*, as áreas mais prováveis para o escoamento da água são mapeadas e examinadas na ferramenta *flow accumulation* que identifica os locais prováveis de acúmulo de água. Em seguida, com a extensão *stream to features* foram unidas as áreas de acumulação e de escoamento d'água, delimitando os canais de drenagem (ESRI, 2015).

O módulo de análise *ArcHydro* possibilitou delimitar 170 sub-bacias hidrográficas na área e definir a hierarquia de drenagens, conforme Strahler (1957). A delimitação das sub-bacias hidrográficas atendeu os critérios de altimetria, de declividade do relevo e de áreas de fluxo e acumulação, que identificam com precisão os divisores de águas da bacia (GUPTA *et al.* 2017). A escala de representação da bacia seguiu a determinação da hierarquia de drenagens, sendo um rio de quinta ordem. De acordo com a ordem, foram mapeadas, 102 bacias de primeira, 55 de segunda, 9 de terceira, 3 de quarta e 1 de quinta. Os parâmetros morfométricos foram calculados para as 170 sub-bacias delimitadas de forma individual pelo *ArcHydro*, conforme Gupta *et al.* (2017). O cálculo dos parâmetros morfométricos foram feitos com a ferramenta *Field Calculator* do ArcGIS 10.5 (ESRI, 2015).

Para avaliação de pontos de ruptura ou *knickpoints*, no perfil longitudinal do canal principal, foi confeccionado o perfil topográfico do Alto Sapucaí utilizando a ferramenta *3D Analyst* do ArcGIS 10.5 conforme Gailleton *et al.* (2019). Em seguida, os pontos de ruptura foram associados aos índices morfométricos e hidrológicos.

2.3. Dados hidrológicos

A análise das vazões foi baseada nos dados da estação de monitoramento fluvial 61410000 da ANA, disponível na plataforma HidroWeb (www.snirh.gov.br/hidroweb). Foi selecionada a estação fluvial que atendeu ao critério de poucas lacunas da série de dados temporais. Assim, foi optado pela estação com lacunas menores do que 5% e alcance temporal de 20 anos (1994 - 2013). A série considerou 20 anos, devido às limitações históricas de dados disponíveis a partir da estação de monitoramento fluvial representativa da área. Após, os dados foram organizados e tratados nos *softwares* Sistema Computacional para Análise Hidrológica (SisCAH) e Excel para a obtenção da vazão média de longo prazo, da vazão máxima de longo prazo, da vazão mínima de longo prazo e do desvio da vazão em relação à média.

A análise das precipitações foi baseada nos dados do *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS)*, disponíveis na Universidade da Califórnia (www.chc.ucsb.edu/data/chirps). Os dados de 20 anos (1994 – 2013) foram organizados no *software* Excel, para ilustrar a precipitação média anual, a precipitação mínima e máxima anual e o climograma da área. No ArcGIS 10.5 foi elaborado o mapa da distribuição espaço-temporal da precipitação média mensal entre 1994 e 2013, de acordo com Costa *et al.* (2019).

Os dados disponibilizados pelo CHIRPS (COSTA *et al.* 2019) são organizados em arquivo matricial em que cada célula da matriz possui 5 km². Os *pixels* da imagem foram reamostrados para representar os dados de precipitação em células de 1 km². Na sequência, foi aplicada técnica de suavização bilinear (COSTA *et al.* 2019) para melhorar a visualização das informações. A utilização de dados regionalizados de precipitação permite identificar as áreas com maior descarga de água e inferir locais onde a contribuição de águas pluviais é mais representativa na transferência precipitação-vazão.

No final, os resultados foram submetidos à avaliação e discussões comparativas com dados da literatura especializada e foram apresentadas e sugeridas medidas para contribuir com o planejamento e a gestão dos recursos hídricos e das áreas de risco a enchentes e inundações.

3. Resultados e discussão

A hierarquia de drenagem do Alto Sapucaí e as unidades amostrais são ilustradas na **Figura 2A**. A Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, das nascentes na Serra da Mantiqueira, ao exutório na cidade de

Santa Rita do Sapucaí, onde está a estação de monitoramento fluvial 61410000, foi classificada como de 5º Ordem, conforme Ribeiro *et al.* (2016).

A regionalização da densidade de drenagem (Dd) é apresentada na **Figura 2B**. A legenda do mapa foi organizada em quatro classes de acordo com a densidade de drenagem: áreas com Dd entre 0,00 e 3,00, entre 3,01 e 5,00, entre 5,01 e 15,00 e acima de 15,00 km km^{-2} .

Os maiores valores de Dd acompanham o curso principal do rio, visto ser o principal canal receptor de drenagens de ordens inferiores e, portanto, com tendência de apresentar valores de Dd maiores.

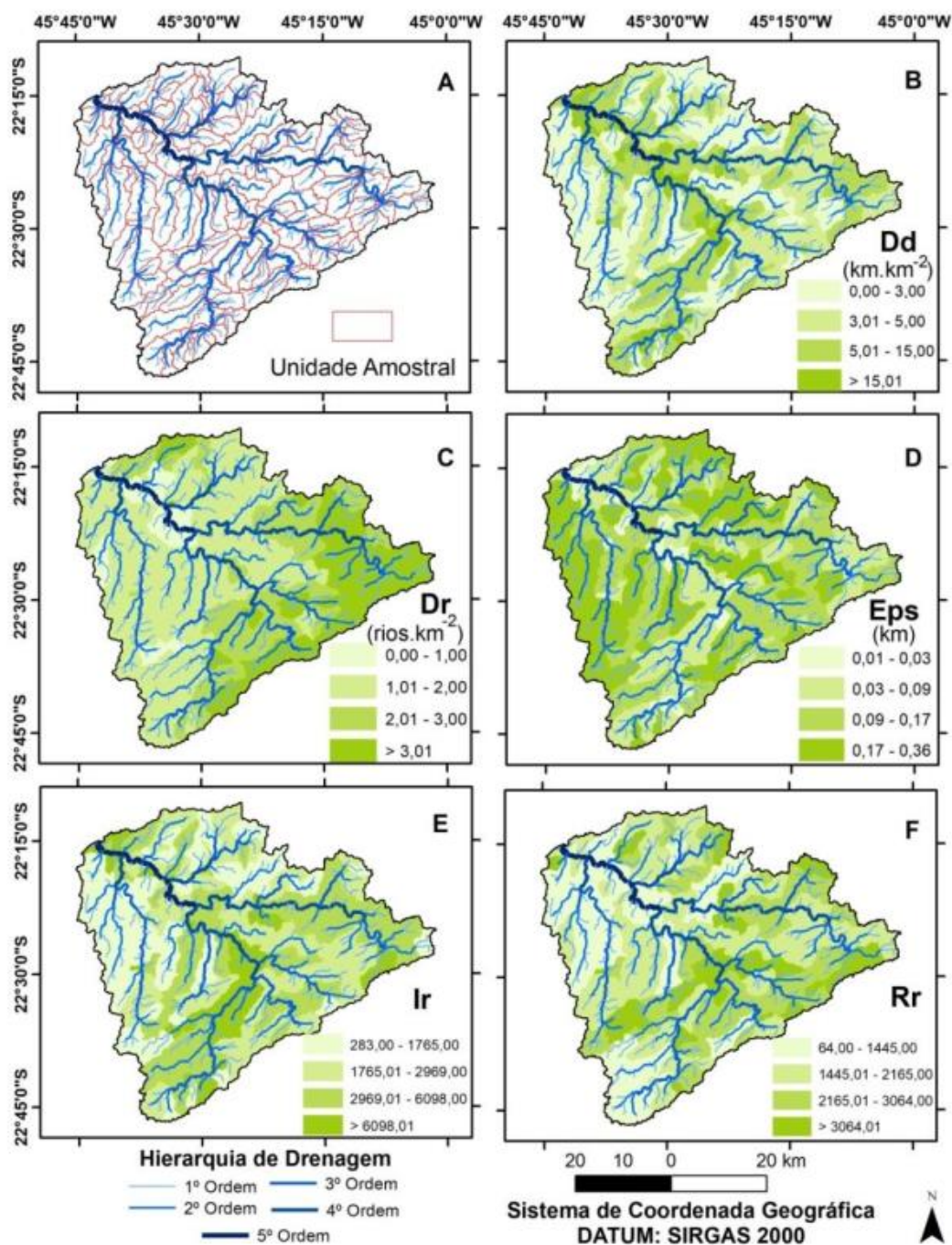


Figura 2: A) Mapa das Unidades Amostrais (sub-bacias); B) Mapa da Densidade de Drenagem; C) Densidade de Rios; D) Extensão do Percurso Superficial; E) Índice de Rugosidade; F) Relação de relevo; da Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, MG.

Como indicativo da suscetibilidade à enchentes e inundações em bacias hidrográficas, a Dd média do Alto Sapucaí de 29 km.km⁻² ilustra tal comportamento, visto as recorrentes enchentes que ocorrem em Santa Rita do Sapucaí, Itajubá, Delfin Moreira, Piranguinho e Piranguçu, todas banhadas pelo rio principal. Os danos causados pelas enchentes e inundações ocorrem de dezembro a março. Os resultados ilustram que na região de Santa Rita do Sapucaí, os elevados valores de Dd associados aos eventos hidrometeorológicos extremos desencadeiam enchentes e inundações, conforme Servidoni *et al.* (2019). Dessa forma, é necessário a elaboração de um plano de contingência para a área, que aborde o comportamento hidrológico, climático, geomorfológico e do uso ocupação da bacia hidrográfica.

A Densidade de Rios (Dr) regionalizada é ilustrada na **Figura 2C**. A legenda está organizada em quatro classes: valores de Dr entre 0,00 e 1,00; 1,01 e 2,00; 2,01 e 3,00 e maior que 3,01 rios km⁻². Com raras exceções a maior parte da área obteve valores entre 0,56 e 2,36 e 2,36 e 3,01 rios km⁻² e cerca de 20% da área possuem valores acima de 3,01 rios.km⁻². As áreas com valores entre 0,56 e 3,01 são áreas de solos permeáveis, onde predomina a infiltração, ou seja, o escoamento superficial é menor, que acarreta menor probabilidade de enchentes e inundações. Todavia, os 20% da área correspondente a valores acima de 3,01 são constituídas por rochas impermeáveis e bem drenadas, onde predomina o escoamento superficial associado a altas declividades aumentando a vazão e o poder destrutivo das águas em eventos de chuvas prolongadas ou curtas de alta intensidade (TAOFIK *et al.* 2017).

As áreas com valores entre 2,36 e 3,01 e acima de 3,01 rios km⁻² se sobrepõem em parte a Serra da Mantiqueira, o que explica os maiores valores de densidade de rios. Pois, regiões com elevadas declividades concentram maior quantidade de canais de primeira e segunda ordem (**Figura 2C**) (GUPTA *et al.* 2017).

A Extensão do Percurso Superficial (Eps) em km está na **Figura 2D**. Este parâmetro corresponde à distância média que um tributário percorre até o canal principal. Os maiores valores de Eps se concentram nos divisores de águas, que são áreas mais elevadas e com as maiores declividades. Dessa forma, a análise visual da Eps é coerente com o comportamento fisiográfico da bacia. O setor leste concentra os maiores valores de Eps. Essas áreas contribuem para descargas hídricas de maior energia, devido ao efeito gravitacional (ALMEIDA *et al.* 2013; KUNTAMALLA *et al.* 2018).

O índice de rugosidade (Ir), ilustrado na **Figura 2E**, aponta a relação entre a declividade e o comprimento dos canais. Assim, quanto maior o Ir mais declivoso e dissecado é o relevo, ou seja, mais entalhado é o formato dos canais de escoamento. Na área, os maiores valores de Ir se sobrepõem em parte ao canal principal na região à montante associada aos *knickpoints*. Os valores do Ir são coerentes e concordam com os resultados de Servidoni *et al.* (2019) para a Bacia Hidrográfica do Rio Machado, no sul de Minas Gerais, que também pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Grande.

Na avaliação de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas, a partir de técnicas estatísticas, Purohit e Parmar (2017) constataram significativa relação direta entre os efeitos da inclinação do relevo e os aspectos morfométricos. Nos seus resultados foram notados que bacias hidrográficas localizadas sobre as encostas íngremes são altamente dissecadas e formadas por materiais mais granulosos, o que foi confirmado em expedições de campo, sustentando os resultados obtidos pela análise computacional na Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí.

A Relação de Relevância (Rr) regionalizada apresentada na **Figura 2F** é indicativa da declividade média da bacia. Os valores elevados da Rr indicam elevada declividade, o que é típico do relevo da Serra da Mantiqueira (RIBEIRO *et al.* 2016).

Todos os parâmetros morfométricos e variáveis necessárias para seu cálculo estão listados na **Tabela 2**. O Kc calculado foi de 0,89 e aponta elevados valores de vazão o que contribui para aumentar o poder destrutivo das águas pluviais e causar enchentes e inundações nas cidades de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí, Delfin Moreira, Piranguçu e Piranguinho durante a estação chuvosa. O valor de Kc 0,89 foi obtido também por Taofik *et al.* (2017) numa bacia hidrográfica Tropical. A similaridade dos resultados obtidos para duas as áreas demonstra que ambas sofrem com enchentes e inundações. Tais valores comparados com outras referências demonstram que o Kc entre 0,75 e 1,00 caracterizam áreas propensas a alagamentos (STRAHLER, 1957; CHRISTOFOLETTI, 1969; SANGMAN & BALAMURUGAN, 2017; SERVIDONI *et al.* 2019). O Kf obtido foi de 0,56 e indica que a bacia está sujeita a picos de enchentes e inundações, devido à forma circular de suas sub-bacias hidrográficas à jusante e aos dados de Kc. Tais áreas estão concentradas próximas a canais de elevada ordem, como o canal principal de quinta ordem e seus tributários de quarta ordem. Essa observação pode ser evidenciada pelo trabalho de Purohit e Parmar (2017), cujos resultados e observações coincidem com os dados obtidos na bacia hidrográfica do Alto Sapucaí. Assim, é necessário o planejamento e adoção de medidas para prevenir e mitigar a vulnerabilidade dessas áreas a processos hidrometeorológicos extremos (TAOFIK *et al.* 2017).

Tabela 2: Valores de Parâmetros Morfométricos da Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, MG.

Parâmetro	Valor (unidade)
Área da bacia	2.813 (km ²)
Perímetro da bacia	387 (km)
Altitude máxima	2.329 (m)
Altitude mínima	829 (m)
Altitude média	1.586 (m)
Densidade de Drenagem (Dd)	29 (km km ⁻²)
Densidade de Rios (Dr)	2,49 (canais km ⁻²)
Número de Rios	175 (n°)
Soma de rios	4.158 (km)
Coefficiente de Compacidade (Kc)	0,89 (adimensional)
Fator de Forma (Kf)	0,56 (adimensional)
Coefficiente de Manutenção (Cm)	217,00 (m ²)
Relação de Relevância (Rr)	2.332,00 (adimensional)
Índice de Rugosidade (Ir)	5.384,00 (adimensional)
Extensão do percurso superficial (Eps)	0,10 (km)

O Coeficiente de Manutenção (Cm) (**Tabela 2**) permite representar qual seria a área necessária para que um canal de drenagem seja classificado como perene. No caso, o valor obtido para Cm foi de 217. Ou seja, é necessário 217,00 m² de um canal de drenagem para que este se mantenha perene ao longo do ano. A análise de *knickpoints* permitiu identificar uma expressiva ruptura de relevo a montante da bacia hidrográfica do Alto Sapucaí conforme a **Figura 3**.

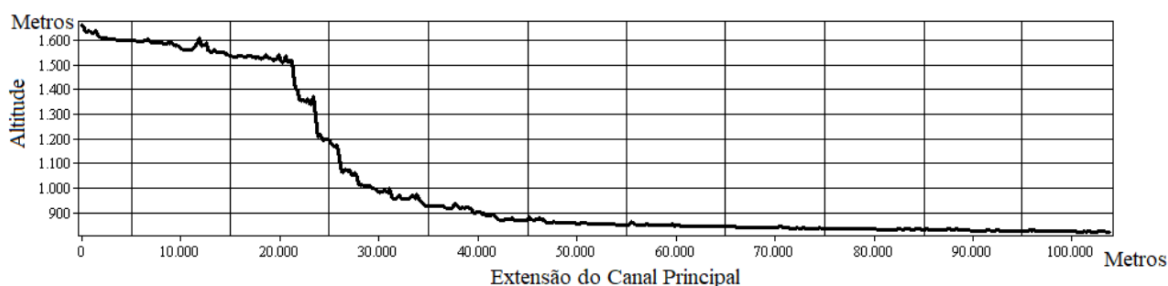


Figura 3: Perfil Longitudinal do canal principal da bacia hidrográfica do Alto Sapucaí.

A ruptura ilustrada na **Figura 3** está inserida na área com Dd maior do que 15,01 e Dr maior do que 3,01, que classifica a área como bem drenada. Esta ruptura do relevo implica em um aumento potencial da vazão do curso principal podendo causar riscos às populações próximas a esta região ou a jusante do *knickpoint* mapeado (GAILLETON *et al.* 2019). Estas características das áreas à jusante são ilustradas por Ribeiro *et al.* (2016) no Município de Pouso Alegre.

Os dados das vazões médias anuais, da vazão média de longo prazo, das vazões máxima e mínima de longo prazo, de 1994 a 2013, estão representados na **Figura 4A**.

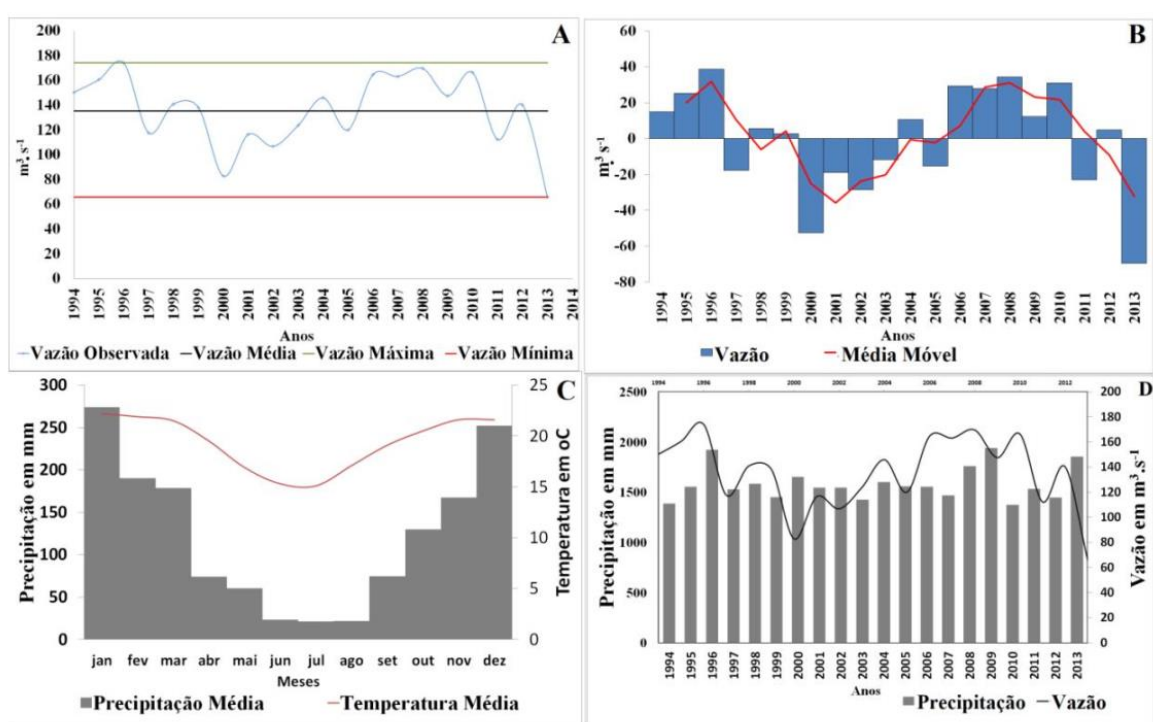


Figura 4: A) Vazão média anual, B) Desvios em relação à média anual das vazões, C) Climograma médio mensal da precipitação e da temperatura e D) Vazão Média Anual e Precipitação Média anual de 1994 a 2013 da Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, MG.

A vazão média calculada no período foi de $135,39 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A vazão máxima de longo prazo atingiu $174,06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ entre 1995 e 1996. Em seguida, entre 1996 e 2000 ocorreu uma queda na vazão. Entre 2000 e 2007 houve um aumento progressivo da vazão e, novamente, entre 2007 e 2013 uma queda, quando foi apontada a menor vazão para o período estudado, de $65,98 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. No período a vazão apresentou uma variação de $108,08 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (**Figura 4A**).

A variação da vazão ocorre em função da sazonalidade do clima. Tal alternância influencia a conversão chuva-vazão o que pode elevar ou diminuir o nível dos cursos de água em períodos recorrentes nas respectivas estações chuvosas e secas. A resposta da conversão chuva-vazão na área é rápida, devido à ruptura do relevo ilustrada **Figura 3**. Tal informação possibilita aos gestores públicos direcionar investimentos em locais estratégicos, de forma a antecipar ações de prevenção de desastres naturais previamente aos eventos chuvosos.

A sazonalidade no regime climático típico de regiões tropicais é ilustrada pela **Figura 4C**, com duas estações bem definidas: o verão quente e úmido, que concentra a pluviosidade e o inverno frio e seco, com estiagem. Esta sazonalidade é, em geral, negligenciada pelos gestores públicos e promove a intranquilidade na população das áreas densamente povoadas, devido favorecer eventos de enchentes e inundações (YAN *et al.* 2019), como observado nas regiões metropolitanas de São Paulo e Belo Horizonte, no verão de 2020. As variações do clima aliadas à ausência de planejamento urbano são responsáveis pelas tragédias recorrentes que poderiam ser evitadas com planejamento urbano, investimentos em infraestrutura e capacitação técnica da Defesa Civil para fornecer respostas imediatas para situações emergenciais (CELARINO & LADEIRA, 2014).

Os desvios em relação à média anual de vazões do Alto Sapucaí de 1994 a 2013 estão representadas na **Figura 4B**, e permitem identificar quatro cenários distintos: o primeiro entre 1994 e 1996 marcado por vazões acima da média de 135,39 m³.s⁻¹ (**Figura 4B**); o segundo de 1997 a 2006 com vazões abaixo da média, exceto em 1998, 1999 e 2004 com valores levemente acima da média (**Figura 4B**); o terceiro cenário, de 2007 a 2010, com desvios anuais da vazão positivos em relação à média; e, por fim, o quarto entre 2011 e 2013 com vazões anuais abaixo da média (**Figura 4B**). A média móvel ilustra o comportamento dos desvios anuais da vazão em relação à média e estão representados pela linha vermelha na **Figura 4B**, ilustrando a variabilidade do comportamento hidrometeorológico da área.

O Climograma (**Figura 4C**) ilustra os dois climas distintos do Clima Tropical, marcado pelas duas estações bem definidas, que confirma a sazonalidade do clima na área. As maiores precipitações ocorreram em janeiro e dezembro com 273,80 e 251,90 mm, respectivamente, e as menores em junho, julho e agosto com 23,40, 21,00 e 21,60 mm, respectivamente (**Figura 4C**), conforme Aquino *et al.* (2012), para o sul de Minas Gerais. A **Figura 4D** apresenta os dados de vazão e precipitação média anual para o período de estudo, que permite avaliar o comportamento da conversão chuva-vazão entre 1994 e 2013.

As precipitações médias mensais de 1994 a 2013 estão ilustradas na **Figura 5**, que identifica os maiores valores de precipitação associados à Serra da Mantiqueira, na porção sul da bacia. Esse acúmulo de precipitação na região serrana é devido à orografia (MENDELSON *et al.* 2007).

Para fins didáticos, a legenda da **Figura 5** deve ser interpretada em função de cada mês separadamente, apontando assim, os locais com maiores precipitações. O uso de uma escala única para todo ano, impediria que fosse possível visualizar diferenças de intensidade de chuva na área de estudo em cada mês.

A análise comparativa das similaridades das informações no conjunto de dados CHIRPS e das 183 estações meteorológicas brasileiras feita por Costa *et al.* (2019) ratificou coeficiente de determinação de 98% para a região sudeste do país. Tais autores concluem que entre 1998 e 2010 os dados validados do CHIRPS são confiáveis. Portanto, os dados do CHIRPS podem ser utilizados com confiança para pesquisas climáticas com economia de tempo e recursos, o que valida fortemente o uso de dados de sensoriamento remoto nestes estudos. O período abordado nesta pesquisa praticamente se sobrepõe ao estudado pelos autores e dessa forma pode ser entendido como representativo da área estudada (REBOITA *et al.* 2010). Além disso, a **Figura 5** permite a identificar os locais com as maiores precipitações médias mensais e apontar aquelas sujeitas a regimes pluviométricos mais intensos.

A avaliação dos atributos morfométricos e hidrológicos da bacia indica a necessidade de estabelecer normas de uso e ocupação do solo, a fim de minimizar os prejuízos decorrentes das enchentes e inundações. Dentre elas, é possível propor a necessidade de elaboração de zoneamento para o uso e

ocupação da terra em função das características fisiográficas e da vulnerabilidade à eventos catastróficos. É necessário considerar as características morfométricas e hidrológicas, o uso e ocupação das terras e as atividades urbanas e rurais para manter a população das áreas vulneráveis em segurança. É necessário impedir a ocupação das planícies de inundação dos rios, córregos afluentes do Alto Sapucaí para evitar os danos catastróficos das enchentes de dezembro a março (SILVA *et al.* 2014; SANGMAN & BALAMURUGAN, 2017).

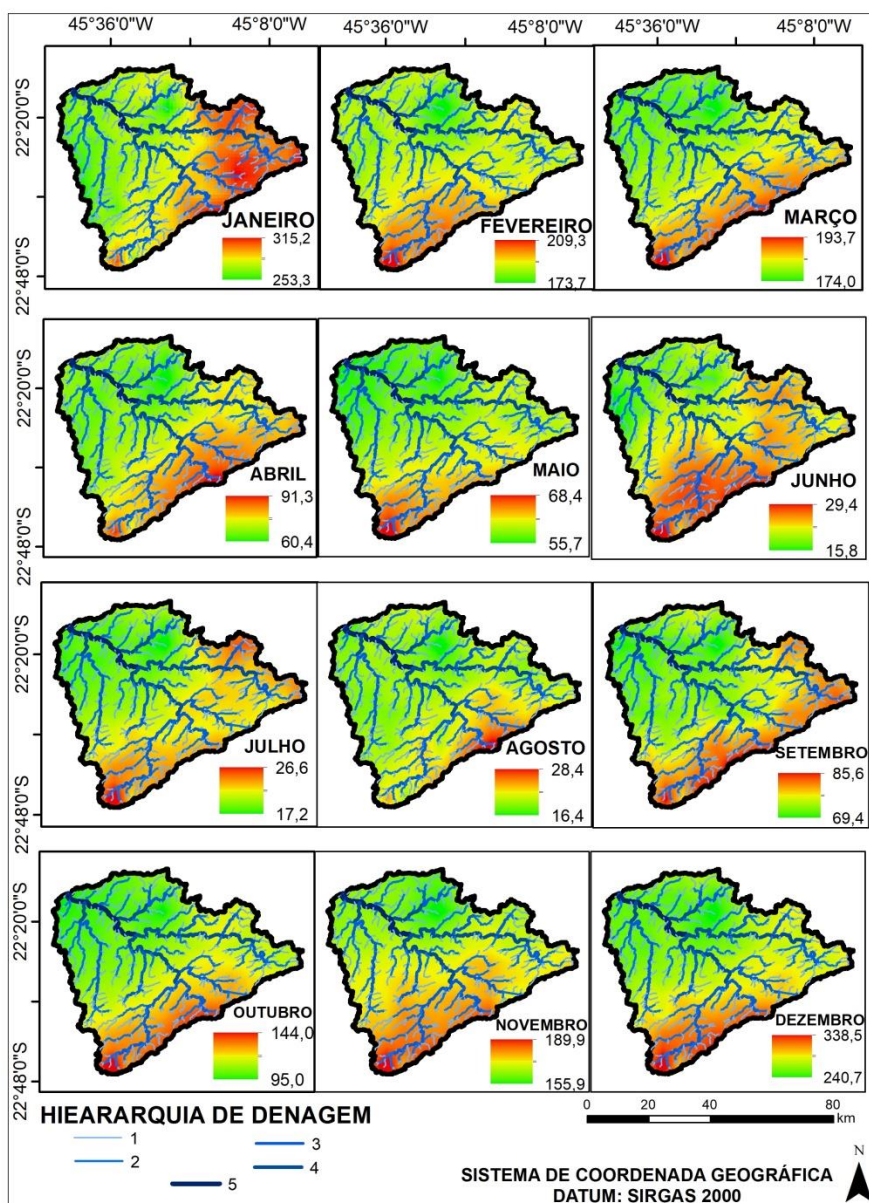


Figura 5: Precipitação média mensal em milímetros da Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, MG, de 1994 a 2013. Fonte: CHIRPS (2020).

A elaboração de um plano emergencial e de um protocolo para ações anteriores e posteriores aos desastres é fundamental para assegurar o bem-estar da população que ocupa as planícies de inundação da bacia hidrográfica. Entretanto, este protocolo de atuação frente aos desastres requer investimentos. Esse fato, porém, foge da realidade dos municípios brasileiros que muitas vezes negligenciam os investimentos em infraestruturas de combate a enchentes e inundações. Tais protocolos devem ser elaborados por pessoal capacitado com parceria entre o poder público e as entidades privadas. Além disso, devem ter como objetivo principal assegurar o bem-estar da população e das infraestruturas

instaladas no interior de áreas de risco a enchentes e inundações (YUNUS *et al.* 2014; ANGILLIERI & FERNÁNDEZ, 2017).

O gerenciamento de desastres naturais é um dos instrumentos de planejamento urbano, que, em conjunto com outras políticas públicas podem contribuir para mitigar, prevenir e controlar, de forma permanente, os riscos de desastres naturais. As medidas de prevenção à enchentes e inundações ocorrem antes, durante e após os eventos catastróficos. As medidas que ocorrem antes dos eventos extremos visam de prevenir, mitigar alertar e preparar a sociedade para uma resposta emergencial e imediata ao fenômeno. Sendo assim, passa pela elaboração do mapeamento de riscos, elaboração de sistemas de alerta eficientes e seguros, treinamento e capacitação de recursos humanos e da população vulnerável e obras de engenharia para atender às demandas de escoamento superficial e de infiltração das águas pluviais (KOBİYAMA *et al.* 2006).

As ações que devem ocorrer durante o evento têm o intuito de garantir uma resposta rápida ao desastre. Assim, estão associadas ao corpo de bombeiros e à defesa civil, que estão capacitados para agir de forma rápida e eficaz protegendo a vida dos atingidos pelas catástrofes (DEFESA CIVIL, 2020).

Por fim, as ações que ocorrem posteriores aos desastres remetem a reabilitação e reconstrução das áreas atingidas, buscando minimizar os prejuízos, investimentos em pesquisas e o desenvolvimento e expansão dos sistemas de monitoramento e alerta de desastres.

Entretanto, estas medidas não resolvem completamente o problema (DUZI *et al.* 2017). Uma solução efetiva passa pelo processo de zoneamento e reformas urbanas que dependem de planejamento, pessoal técnico capacitado e decisão política. Vale salientar que o interesse da coletividade deve prevalecer sobre os interesses políticos e econômicos (DUZI *et al.* 2017; VAN BERCHUM, 2019).

A estratégia apresentada é eficaz, pois além de garantir a qualidade e disponibilidade de água para abastecimento público, também controla a vazão e a captação de águas da chuva favorecendo a infiltração e assegurando a prestação de serviços ambientais e ecossistêmicos. Incentiva também a prática de atividades ao ar livre com consolidação de áreas verdes de uso comunitário (KOBİYAMA *et al.* 2006; SERVIDONI *et al.* 2019; YAN *et al.* 2019).

A relação entre espaço e Estado deve ser percebida e abordada no gerenciamento de risco, pois os fenômenos ocorrem devido à configuração dos elementos urbanos que são produtos do avanço da acumulação capitalista. Esse acúmulo se sobrepõe aos interesses da coletividade e promovem a formação de aglomerados com menor infraestrutura, geralmente em áreas periféricas. Tais áreas comumente são as mais atingidas por catástrofes naturais, pois estão sobrepostas a áreas vulneráveis dotadas de menor infraestrutura onde o interesse estatal é menor, pois não representam o berço das relações capitalistas nas cidades (ARAÚJO, 2020).

Este estudo permitiu identificar fragilidades e potencialidades da rede hidrográfica e do relevo visando auxiliar o planejamento do uso e ocupação do solo e a proteção da vida, especialmente a humana. Além da redução dos prejuízos financeiros relacionados à infraestrutura urbana causados pelas enchentes e inundações na Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí. Visa também contribuir com o debate científico sobre os impactos das mudanças climáticas e o aumento de eventos extremos, como os observados de forma recorrente durante a estação chuvosa (FONSECA & AUGUSTIN, 2014; GAJBHIYE, 2015).

4. Conclusões

A análise permite avaliar a distribuição espaço-temporal do comportamento hidrometeorológico em bacias hidrográficas e permite colaborar com o planejamento da gestão de áreas de risco.

As características geomorfológicas dos rios, devido ao relevo e à geologia contribuem para ampliar a vazão nos eventos de precipitação.

Os valores obtidos para densidade de drenagem, densidade de rios e coeficiente de compacidade indicam que a área é propensa a enchentes e inundações.

A sazonalidade do clima deve ser considerada no planejamento das políticas de uso e ocupação das terras, pois promove, em regiões tropicais, a alternância de estações chuvosas e secas, o que interfere diretamente no planejamento do uso do solo e ações de prevenção às enchentes e inundações.

5. Referências

ALMEIDA, R. A.; ROSA, D. R. Q.; FERREIRA, R. G.; DELAZARI, F. T.; ALMEIDA, I. A. Análise morfométrica de uma sub-bacia do rio Piracicaba (MG) utilizando sistemas de informação geográfica. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, p. 372-380, 2017. <https://doi.org/10.13083/reveng.v25i4.815>.

ALMEIDA, W. S.; SOUZA, N. M.; JUNIOR, D. S. R.; CARVALHO, J. C. Análise morfométrica em bacias hidrográficas fluviais como indicadores de processos erosivos e aportes de sedimentos no entorno do reservatório da usina hidrelétrica (UHE) corumbá IV. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 14, p. 135-140, 2013. <https://doi.org/10.20502/rbg.v14i2>.

ANGILLIERI, M. Y. E.; FERNÁNDEZ, O. M. Morphometric analysis of river basins using GIS and remote sensing of an Andean section of Route 150, Argentina. A comparison between manual and automated delineation basins. **Revista Mexicana de Ciências Geológicas**, Cidade do México, v. 34, p. 150-156, 2017. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.2.482>.

AQUINO, R. F.; SILVA, M. L. N.; DE FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; MELLO, C. R.; AVANZI, J. C. Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais State, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, p. 533-542, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542012000500006>.

ARAÚJO, J. A. Aplicação de elementos da teoria das catástrofes ao estudo da (re) produção do espaço urbano: parte 1 – como Henri Lefebvre trouxe René Thom para o debate. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 39, p. 14-24, 2020. <https://doi.org/10.11606/rdg.v39i0.157576>.

BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. **Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm.

COSTA, J.; PEREIRA, G.; SIQUEIRA, M. E.; CARDOZO, F.; SILVA, V. V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 24, p.228-243, 2019. <https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.60237>.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Carta Geológica Guaratinguetá, Escala 1:250.000, 1998. Disponível em: <http://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>.

CELARINO, A. L. S.; LADEIRA, F. S. B. Análise morfométrica da bacia do Rio Pardo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 15, p. 471-491, 2014. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i3>.

CHIRPS – CLIMATE HAZARD CENTER. Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations. 2020. Disponível em: www.chc.ucs.edu/data/chirps.

CHRISTOFOLETTI, A. A análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícias Geomorfológicas**, Rio Claro, v. 18, p. 35-64, 1969.

DEFESA CÍVIL. **Boletim Estadual de Proteção e Defesa Civil**. 2020. Disponível em: <http://www.defesacivil.mg.gov.br>.

DUZI, B.; VIKHROV, D.; KELMAN, I.; STOJANOV, R.; JURICKA. Household measures for river flood risk reduction in the Czech Republic. **Journal of Flood Risk Management**, Londres, v. 12, p. 253-266, 2017. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12132>.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ARCGIS professional GIS for the desktop version 10.3**. 2015 Manual do usuário. Disponível em: <https://esripress.esri.com/bookResources/index.cfm?event=catalog.index>.

FONSECA, B. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Análise Morfométrica de bacias de drenagem e sua relação com a estrutura geológica na serra do espinhaço meridional – MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 15, p. 153-172, 2014. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i2.296>.

GAILLETON, B.; MUDD, S.M.; CLUB, F. J.; PEIFER, D.; HURST, M. D. A segmentation approach for the reproducible extraction and quantification of knickpoints from river long profiles. **Earth Surface Dynamics**, Strasbourg, v. 7, p. 211-230, 2019. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-211-2019>.

GAJBHIYE, S. Morphometric Analysis of a Shakkar River Catchment Using RS and GIS. **International Journal of u-and e- Service, Science and Technology**, Stanford, v. 8, p. 11-24, 2015. <https://doi.org/10.14257/ijunesst.2015.8.2.02>.

GUPTA, D. S.; GOSH, P.; TRIPATHI, S. K. A Quantitative Morphometric Analysis of Barhar River Watershed of Mahoba district, U.P., India using Remote Sensing and GIS. **Indian Journal of Science and Technology**, Bagarole, v. 10, p. 1-5, 2017. <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i11/109695>.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 56, p. 275-370, 1945. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2).

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZELETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006, 109p.

KUNTAMALLA, S.; NALLA, M.; SAXENA, P.R. Drainage Basin Analysis through GIS: A Case study of Lakhnapur Reservoir Watershed in Rangareddy District, Telangana State, India. **International Journal of Engineering, Science and Mathematics**, Jahadhri, v. 7, p. 9-17, 2018. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22464.84484>.

MEDHI, B.; CHAKRAVARTTY, M.; PATGIRI, A. D. Inferring Hydrological Characteristics of Gabharu River Basin, North-East India, Based on the Application of Some Important Morphometric Parameters. **Global Journal for Research Analysis**, Gujarat, v. 6, p. 10-12, 2017. <https://doi.org/10.36106/gira>.

MELLO, C. R.; SÁ, M. A. C.; CURI, N.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R.; SILVA, A. M Erosividade mensal e anual no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 537-545, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000400012>.

MENDELSON, R.; KURUKULASURIYA, P.; BASIST, A.; KOGAN, F.; WILLIAMS, C. Climate analysis with satellite versus weather station data. **Climatic Change**, Basingstoke, v. 81, p. 71-83, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9139-x>.

NAGARAJU, S. K.; BHANUPRAKASH, D.; SHIVASWAMY, H. M.; BALASUBRAMANIAN, A. Morphometric Evaluation and Sub Basin Analysis in Hanur Watershed, Kollegal Taluk, Chamarajanagar District, Karnataka, India, using Remote Sensing and GIS Techniques. **International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS**, Gujarat, v. 6, p. 2178-2191, 2017. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.265>.

PUROHIT, K.; PARMAR, M. K. Morphometric Analysis and Correlation between Morphometric Parameters with Mean Basin Altitude and Slope: A case study of Alaknanda Basin, Uttarakhand, India. **Global Journal for Research Analysis**, Ahmedabad, v. 6, p. 27-30, 2017. <https://doi.org/10.36106/gira>.

- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 25, p. 185-204, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>.
- RIBEIRO, A. S.; MINCATO, R. L.; CURI, N.; KAWAKUBO, F. S. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 9, p. 16-31, 2016. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p016-031>.
- SANGMAN, F.; BALAMURUGAN, G. Morphometric Analysis of Kakoi River Watershed for Study of Neotectonic Activity Using Geospatial Technology. **International Journal of Geoscience**, Paris, v. 8, p. 1384-1403, 2017. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.811081>.
- SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; SILVA, C.P.C. **Inventário Florestal de Minas Gerais: Floresta Estacional Semidecidual e Ombrófila – Florística, Estrutura, Diversidade, Similaridade, Distribuição diamétrica e de altura, Volumetria e Tendências de crescimento e Áreas aptas para manejo florestal**. Lavras: UFLA, 2008, 1029p.
- SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, Tysons, v. 67, p. 597-646, 1956. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2).
- SERVIDONI, L. E.; TEODORO, A. E. M.; MINCATO, R. L.; SANTOS, C. A. Avaliação de risco a enchentes e inundações por krigagem ordinária em sistemas de informação geográfica. **Revista Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 29, p. 126-143, 2019. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp126>.
- SGARBI, G. N. C.; DARDENNE, M. A. Evolução climática do Gondwana nas regiões centro-sul do Brasil e seus registros geológicos continentais durante o Mesozóico, enfatizando o ardo do Alto Paranaíba, a borda NNE da Bacia do Paraná e a Porção meridional da bacia sanfranciscana no oeste do estado de Minas Gerais. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 4, p. 21-49, 2002. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v4i1.193>.
- SILVA, M.T.; SILVA, V. P. R.; SOUZA, E. P.; OLIVEIRA, V. G. Morphometric Analysis of the Basin Low Middle São Francisco River. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, Recife, v. 4, p. 168-174, 2014. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v4.8.p168-174>.
- STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, Washington v. 63, p. 1117-1142, 1952. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2).
- STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions, American Geophysical Union**, Washington, v. 38, p. 913-920, 1957. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>.
- SPAROVEK, G.; VAN LIER, Q. J.; NETO, D. Computer assisted Köppen climate classification: case study for Brazil. **International Journal Climatology**, Amsterdam, v. 27, p. 257-266, 2007. <https://doi.org/10.1002/joc.1384>.
- TAOFIK, O. K.; INNOCENT, B.; CHRISTOPHER, N.; JIDAUNA, G. G.; JAMES, A. S. A Comparative Analysis of Drainage Morphometry on Hydrologic Characteristics of Kereke and Ukoghor Basins on Flood Vulnerability in Makurdi Town, Nigeria. **Hydrology**, Amsterdam, v. 5, p. 32-40, 2017. <https://doi.org/10.11648/j.hyd.20170503.11>.
- ULIBARRI, N.; GARCIA, N. E. Comparing Complexity in Watershed Governance: The Case of California. **Water**, Basel, v.12, p. 766-785, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030766>.
- VIANNA, M. P.; AVELAR, W. E. O. Ocorrência da espécie invasora *Corbicula fluminea* (Bivalvia, Corbiculidae) no Rio Sapucaí (São Paulo, Brasil). **Biotemas**, Florianópolis, v. 23, p. 56-66, 2010. <https://doi.org/10.5007/2175-7925.2010v23n3p59>.

VAN BERCHUM, E. C.; MOBLEY, W.; JONKMAN, S. N.; TIMMERMANS, J. S.; KWAKKEL, J. H.; BRODY S.D. Evaluation of flood risk reduction strategies through combinations of interventions. **Journal of Flood Risk Management**, Londres, v. 12, p. 1-17, 2019. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12506>.

YUNUS, A. P.; OGUCHI, T.; HAYAKAWA, Y. S. Morphometric Analysis of Drainage Basins in the Western Arabian Peninsula Using Multivariate Statistics. **International Journal of Geosciences**, Paris, v. 5, p. 527-539, 2014. <https://doi.org/10.4236/ijg.2014.55049>.

YAN, L.; XIONG, L.; RUAN, G.; XU C.; YAN, P.; LIU, P. Reducing uncertainty of design floods of two-component mixture distributions by utilizing flood timescale to classify flood types in seasonally snow covered region. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 574, p. 588-608, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.056>.

WU, H.; KIMBALL, J. S.; ZHOU, N.; ALFIERI, L.; LUO, L.; DU, J.; HUANG, Z. Evaluation of real-time global flood modeling with satellite surface inundation observations from SMAP. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 233, p. 1-15, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111360>.

2.5 OF VULNERABLE AREAS TO THE OCCURRENCE OF FLOODS IN TROPICAL REGIONS, FROM MORPHOMETRIC ATTRIBUTES

Publicado na Revista Brasileira de Geomorfologia em: 30/10/2023.

Autores: Lucas Emanuel Servidoni; Derielsen Brandão Santana, Guilherme Henrique Expedito Lense, Taya Cristo Parreiras, Joaquim Ernesto Bernardes Ayer, Felipe Gomes Rubira e Ronaldo Luiz Mincato.

Abstract: Floods are the principal natural disasters responsible for social, economic, and environmental damages in tropical and subtropical regions of Brazil. The objective of this research was to establish a procedure to remotely determine areas vulnerable to the occurrence of floods in a watershed using a geographic information system. Therefore, a morphometric analysis of the drainage network and the relief was performed in 170 hydrographic subbasins from the Alto Sapucaí watershed, Minas Gerais Southern and São Paulo Northeast states, Brazil. This study considered the following parameters: compactness coefficient, drainage density, stream frequency, roughness index, stream surface length and form factor or Gravelius's shape index. Therefore, a cluster analysis was executed to identify similar characteristics in the 170 subbasins to discriminate those most susceptible to flooding due to the morphometric characteristics of the drainage, relief, and basins. It was possible to separate the subbasins into two groups. The first includes 85% of the area and did not present significant risks for floods. The second, which represents 15%, is classified as a risk zone. In the second group are the municipalities of Itajubá, Piranguinho, Santa Rita do Sapucaí, Piranguçu, and Delfim Moreira, which, according to the civil defense bulletins, suffer from recurrent floods. The diagnosis was followed by a list of suggestions for planning and managing areas subject to natural disasters. The procedure adopted was efficient and can be applied in other regions for the effective planning of public policies for the use and occupation of urban and rural areas, with lower financial costs and saving lives.

Keywords: Natural Disaster Management; Geoprocessing; Risk Analysis.

Resumo: As inundações são os principais desastres naturais responsáveis por danos sociais, econômicos e ambientais nas regiões tropicais e subtropicais do Brasil. O objetivo desta pesquisa foi estabelecer um procedimento para determinar remotamente áreas vulneráveis à ocorrência de inundações em uma bacia hidrográfica utilizando sistema de informações geográficas. Para tanto, foi realizada uma análise morfométrica da rede de drenagem e do relevo em 170 sub-bacias hidrográficas da bacia do Alto Sapucaí, Sul de Minas Gerais e Nordeste de São Paulo, Brasil. Este estudo considerou os seguintes parâmetros: coeficiente de compacidade, densidade de drenagem,

frequência dos canais, índice de rugosidade, comprimento de superfície dos canais e fator forma ou índice de forma de Gravelius. Portanto, foi realizada uma análise de agrupamento para identificar características semelhantes nas 170 sub-bacias, objetivando discriminar aquelas mais suscetíveis a inundações devido às características morfométricas da drenagem, relevo e bacias. Foi possível separar as sub-bacias em dois grupos. O primeiro abrange 85% da área e não apresentou riscos significativos de inundações. O segundo, que representa 15%, é classificada como zona de risco. No segundo grupo estão os municípios de Itajubá, Piranguinho, Santa Rita do Sapucaí, Piranguçu e Delfim Moreira, que, segundo os boletins da Defesa Civil, sofrem com inundações recorrentes. O diagnóstico foi acompanhado de uma lista de sugestões para planejamento e gestão de áreas sujeitas a desastres naturais. O procedimento adotado foi eficiente e pode ser aplicado em outras regiões para o planejamento efetivo de políticas públicas de uso e ocupação de áreas urbanas e rurais, com menores custos financeiros e salvando vidas.

Palavras-chave: Gestão de Desastres Naturais; Geoprocessamento; Análise de risco.

1. Introduction

Floods are phenomena that occur naturally due to surface dynamics, mainly in tropical and subtropical areas. However, the disordered use and occupation of the soil contribute to incremental loss of lives and material damage. As the most common natural disaster in Brazil, floods have resulting in losses worth billions of US dollars each year for both public and private capital (FERGUSON; FENNER, 2020). However, even though it is recurrent, there is practically no integrated plan for combating and preventing floods in Brazil (FERGUSON; FENNER, 2020).

Due to climatic and hydrological characteristics, Brazilian territory is highly prone to the occurrence of floods. The number of natural disasters has grown since 1960, which follows the current global trend. Atmospheric phenomena, such as prolonged or high-intensity rains over short periods, are some of the causes of floods and are also influenced by landscape morphometric and hydrological characteristics. However, underdeveloped countries, such as Brazil, are susceptible to this dangerous combination of factors, leading to catastrophic disasters (MEDHI; CHAKRAVARTTY; PATGIRI, 2017).

In 2018, at least 2,500 people died, and more than 500 families were left homeless in Brazil due to the absence of efficient natural disaster prevention protocols. In addition to the lack of action protocols for catastrophic events, the unpreparedness of institutions and public policies related to the management of natural disaster risks is notable. The dispersal of information regarding such events in several databases makes risk analysis and management difficult (ALVALÁ *et al.*, 2019).

The damage caused by floods is related to the advance of urbanization in fluvial areas. The waterproofing of urban soils after removing the vegetation cover has a direct impact on the water balance in a watershed, modifying the natural drainage system and therefore intensifying the floods. The increase in the speed and volume of surface water enhances the peak of floods; that is, the surface runoff increases, promoting the rapid accumulation of water in wetland places in urban areas (ALMEIDA *et al.*, 2017). This also occurs in occupied rural areas.

The occupation of areas vulnerable to flooding, such as floodplains of rivers or lower points of urban and rural areas where rainwater and fluvial waters tend to concentrate, is responsible for major losses of lives and economic resources. The mapping of these areas is part of the zoning process of municipal plans, but the oversight of these areas is inefficient, allowing the occurrence of precarious housing in inadequate locations (MEDHI; CHAKRAVARTTY; PATGIRI, 2017).

The advance of the removal of native vegetation cover in Brazil historically and, more specifically, in the Amazon rainforest has grown at an accelerated pace since the beginning of 2018, according to data from the Monitoring of Deforestation of the Brazilian Amazon Forest by Satellite (PRODES), carried out by the National Institute for Space Research (INPE). The PRODES data from 2018 to 2019 show a 34% increase in deforestation in this biome (GRIFFITHS; JAKIMOW; HOSTERT, 2018).

In the Atlantic Forest biome, the situation is less worrisome, as pointed out by Ferreira *et al.* (2019). There was a reduction of the number of isolated forest fragments as a result of the extensive programs for the conservation of biodiversity. Additionally, according to Ferreira *et al.* (2019), this picture

suggests the hypothesis that this biome is in a stage of stabilization and restoration. However, it is necessary to continue conservation programs so that they can reduce the impacts of climate change.

This significant increase in deforestation leads to a hydrological and climatic imbalance throughout Brazil, resulting in both intense short-term rain as well as prolonged intense rains, which can trigger flooding processes. This fact illustrates the relevance of exploring the relationship between climate change and the increase in natural disasters from external forces (MAURANO; ESCADA; RENNO, 2019).

In this context, the identification and mapping of areas vulnerable to floods is a tool that can be used for public policies that address the risk management of natural disasters. Therefore, this work aims to demonstrate the possibility of remote detection of such areas from the morphometric properties in tropical watersheds.

2. Materials and methods

The study area is the Alto Sapucaí Watershed, a tributary of the River Grande Watershed, in the Tropical Region of the Minas Gerais and São Paulo states, Brazil, with 2,813 km² and an average flow rate of 146 m³ s⁻¹ (Figure 1). The waters are used for industrial, agriculture and energy production at the Furnas Hydroelectric Power Plant, as well as for human supply. Therefore, the study is strategic for regional socioeconomic development.

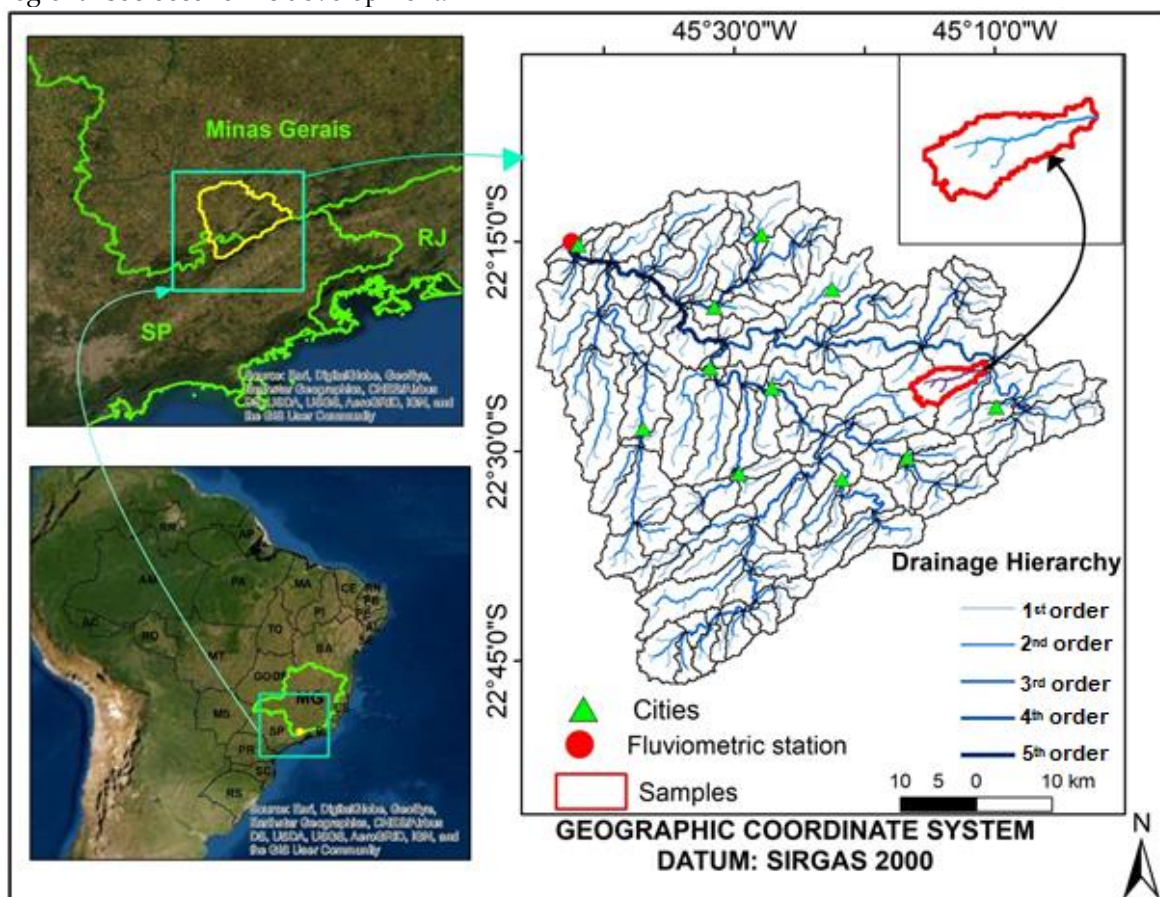


Figure 1. Map of the location of the Alto Sapucaí watershed, highlighting the areas of the sampling units.

According to the Köppen classification, the climate is tropical (Cwa and Cwb) and is characterized by hot and humid summers and cold and dry winters, with an average annual rainfall of 1,600 to 1,865 mm (SPAROVEK; DE JONG VAN LIER; DOURADO NETO, 2007; AQUINO *et al.*, 2012). The Atlantic Forest is the prevailing morphoclimatic domain, although the seasonal semideciduous forest is mostly replaced by pastures and agriculture (SCOLFORO; MELLO; SILVA, 2008). The geological framework is

predominantly composed of granite-gneissic complexes from the Tocantins Orogenic System (CPRM, 1998). The geomorphology is dominated by denudational units of crystalline or metasedimentary rocks, with an altitude between 816 and 1,482 m. Regarding hydrography, the drainage pattern is dendritic, with 1st- and 2nd- order channels with a NNE–SSW orientation and 3rd-, 4th- and 5th- order channels with a NE–SW orientation (RIBEIRO *et al.*, 2016).

Gupta, Gosh and Tripathi (2017) calculated the morphometric parameters using the digital elevation model (DEM) Shuttle Radar Topography Mission 2 (SRTM 2) with a vertical resolution of 30 m, which agrees with the study's scale criteria. The DEM was processed in a geographic information system (GIS) using the hydrology module of the Spatial Analyst Tools and the ArcHydro toolset. This stage was required to obtain a cartographic base containing declivity, altimetry, and hydrographic data. To remove pixels with null altimetry values and to reduce flaws and errors, the fill extension of ArcGIS 10.5 (ESRI, 2016) was used.

The automatic extraction of the drainage network was completed using the Hydrology extension of ArcGIS 10.5, from the processes of generating the following files: fill, flow direction, flow accumulation, con, stream to feature, and watershed definition (ESRI, 2016). Flow direction assesses the natural property of water to flow through the easiest path. Thus, the algorithm scans the DEM pixel by pixel, identifying valleys. Through flow direction, the most likely flow is mapped and used in the Flow Accumulation tool, which locates the possible sites of water accumulation. Then, the stream-to-features extension joined the water accumulation points with drainage areas, delimiting the river (ESRI, 2016).

From ArcHydro, it was possible to delimitate 170 subbasins in the Alto Sapucaí watershed, which followed the definition of the drainage hierarchy from Strahler (1957). Criteria of altimetry and slope and the areas of water flow and accumulation were used to identify the subbasins with precision. The morphometric parameters were calculated according to the authors mentioned in Table 1 for the 170 subbasins.

Table 1. Alto Sapucaí Watershed calculated morphometric parameters.

Parameter	Estimator	Variables	Meaning	References
Stream frequency (Dh)	$Dh = \frac{n}{A}$	n = Number of channels A = Area	Expresses the number of existing channels per unit area, indicating the water potential of the region	Gupta, Gosh and Tripathi (2017)
Drainage density (Dd)	$Dd = \frac{C}{A}$	C = Channels total length A = Area	Expresses the influence of the supply and transport of dendritic material. Indicates the degree of the anthropization of the channels	Taofik <i>et al.</i> (2017)
Relief ratio (Rr)	$Rr = \frac{\Delta a}{L}$	Δa = Altimetric amplitude L = Chanel length	Relationship between altimetric amplitude and the length of the main channel	Kuntamalla <i>et al.</i> (2018)
Roughness index (Ir)	$Ir = Hm \times Dd$	Hm = altimetric amplitude Dd = Drainage density	Represents the slope relationship with the channel lengths. Indicates the degree of dissection of the watershed	Kuntamalla <i>et al.</i> (2018)
Compactness coefficient (Kc)	$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	P = Basin perimeter in km A = Basin area in km ²	Indicates the highest or lowest occurrence of floods	Taofik <i>et al.</i> (2017)
Form fator or Gravelius's shape index (Kf)	$Kf = \frac{A}{G^2}$	A = Basin area in km ² G = Basin axial length	Lower values indicate that the basin is less prone to flooding	Horton (1945); Taofik <i>et al.</i> (2017)

Stream surface length (Eps)	$EPS = \frac{1}{2.Dd}$	Dd = Drainage density	Indicates the average length traveled by the flow to the drainage channel	Kuntamalla <i>et al.</i> (2018)
-----------------------------	------------------------	-----------------------	---	---------------------------------

To identify groups of subbasins according to similar morphometric characteristics, multivariate cluster analysis was used (FERREIRA, 2009).

Student's t test was applied when the assumptions were not violated. When a violation did occur, the Mann–Whitney nonparametric test was used (FERREIRA, 2009). The maximum error of 5% for rejection of the null hypothesis was considered, which shows a nondifference between the groups ($p < 0.005$). The data were processed and analyzed with the support of the statistical package R (R CORE TEAM, 2020).

The results of the cluster analysis were synthesized in ArcGIS 10.5, generating maps with groupings of subbasins with similar morphometric characteristics. The data were systematized to represent the areas vulnerable to floods from the interpretation of these data. Afterward, historical information about floods in the Alto watershed was obtained from the Civil Defense and the Integrated Disaster Information System Natural (S2iD) database (DEFESA CIVIL, 2020; S2iD, 2020), which was used to validate the model. The validation of the cluster analysis was conducted through a visual comparison of the map of risk areas to floods with empirical data obtained by Defesa Civil (2020), and the overlap in both mappings was considered as an indicator of quality.

The Civil Defense is responsible for actions to prevent floods in Brazil. Such information contributed to the discussion regarding the mapping of vulnerable areas and predictive planning for natural disasters.

Finally, measures to prevent losses caused by floods and a model for natural disaster management for the municipalities in the watershed, as established by the Civil Defense (DEFESA CIVIL, 2020), were suggested.

3. Results

The morphometric parameters calculated for the 170 subbasins are illustrated in Figure 2A, showing the Dd, with the darkest areas having high values and accompanying the river stretches with higher stream channels.

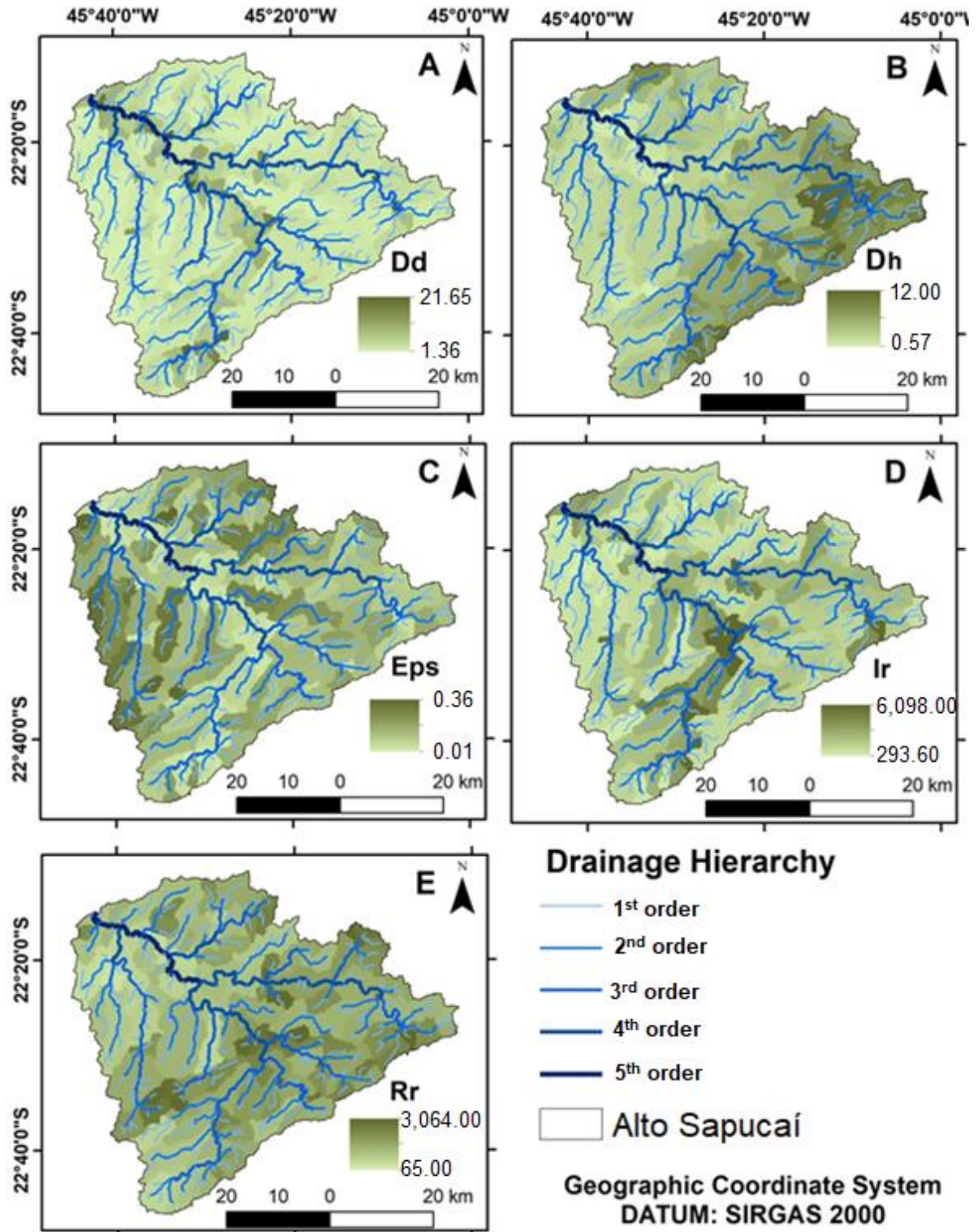


Figure 2. Maps of the spatial distribution of the morphometric indices calculated for the Alto Sapucaí watershed. (A) Dd: Drainage density; (B) Dh: Stream frequency; (C) Eps: Stream surface length; (D) Ir: Roughness index; (E) Rr: Relief ratio.

The Dh (Figure 2B) has the highest concentration of values in the northeast and east sectors of the watershed, which can be explained by the rugged relief of the Mantiqueira Mountains. Native vegetation must be maintained in areas with high Dh to sustain the quantity and quality of water and the hydrological balance, reduce the amount of rainwater, and mitigate the impacts downstream (PUROHIT; PARMAR, 2017).

The rock directly influences the hydrographic density. Massive rocks, without many fractures, make it difficult for water to infiltrate, resulting in greater surface runoff and river development and providing a high Dh. However, sedimentary rocks, or rocks with very fracture planes, provide greater water infiltration, resulting in a less dense drainage network, with fewer rivers providing a low Dh. more runoff than infiltration (FEITOSA *et al.*, 2008).

Basin sectors with higher Dh indicate the occurrence of thinner surface flow, while very low Dh indicates the occurrence of deep aquifers. Generally, the water accumulation areas are in higher-order channels in the middle and lower reaches, with exceptions in the upper reaches (FEITOSA *et al.*, 2008).

Higher stream surface length (Eps) values can be found in areas of lower river hierarchy, mainly 1st- and 2nd-order channels (Figure 2C). The distribution of the Ir values (Figure 2D) is along the main channel, which indicates that the Alto Sapucaí watershed has the potential for modeling the relief and influences the entire geomorphological dynamics of the area. This dynamic generates characteristics that directly impact flooding downstream areas (SIDDARAJU *et al.*, 2017). The Rr expressed in Figure 2E is concentrated upstream and is consistent with the rugged relief of the Mantiqueira Mountain Range.

The analysis of the regionalized parameters (Figure 2) allowed the grouping of similar characteristics and the discrimination of two distinct areas, a "safe area" (Cluster 1), which was less susceptible to the occurrence of floods, and a "risk area" (Cluster 2), which was more susceptible (Table 2).

In Table 2, the high Dd values for the risk area indicate that it has the potential for the accumulation of surface water from rapid, intense, or prolonged rains. The obtained Kf suggests a rounded shape for the studied watershed. This parameter, along with the high Dd values, indicates that the area is susceptible to the occurrence of periodic floods, which is in agreement with Taofik *et al.* (2017).

Table 2. Watershed, according to morphometric characteristics and parameter values. Alto Sapucaí Watershed - Minas Gerais Southern, 05/10/2020.

Area	Obs	Morphometric Characteristics						
		Kc ¹	Dd ²	Dr ²	Ir ²	Rr ¹	Eps ²	Kf ¹
Safe	109	1.93	3.53	2.00	2,117.76	2,265.16	0.14	0.36
Risk	66	1.13	21.65	2.12	6,928.39	2,444.41	0.02	0.78
P value	-	0.0040	0.001	0.1617	0.0001	0.3286	0.0001	0.0001
		*	**	**	**	*	**	*

Note: number of observations; Kc: compactness coefficient; Dd: drainage density; Dr: stream frequency; Ir: roughness index; Rr: relief ratio; Eps: stream surface length; Kf¹: form factor; ¹Average; ²Median; * Student's t test; ** Mann-Whitney test.

The results obtained in this research demonstrate that areas with Kf values of 0.36 are areas close to the basin's outlet, a region of water accumulation, so they are more prone to flooding, and such information allows the monitoring of inappropriate land occupation. Therefore, it can support land use and occupation public policies and help to reduce flood damage since it allows the automation of the delimitation of areas at risk (TAOFIK *et al.*, 2017; SERVIDONI *et al.*, 2019).

The cluster analysis allowed the mapping of areas naturally vulnerable to the occurrence of flooding in the Alto Sapucaí watershed, considering the relief and drainage network's morphometric characteristics, as shown in Figure 3.

The municipalities of Santa Rita do Sapucaí and Itajubá, located close to the outlet of the Alto Sapucaí Watershed, are in a flat relief region bathed by 5th order channels. Therefore, as shown in Figure 3, it is an area naturally prone to flooding. On the Official Civil Defense Bulletin No. 118 of April

27, 2020, Santa Rita do Sapucaí, Delfim Moreira, Itajubá, Piranguinho, and Piranguçu Municipalities decreed a state of emergency because of the extreme rains and floods that affected the region of the Alto Sapucaí Watershed (DEFESA CIVIL, 2020).

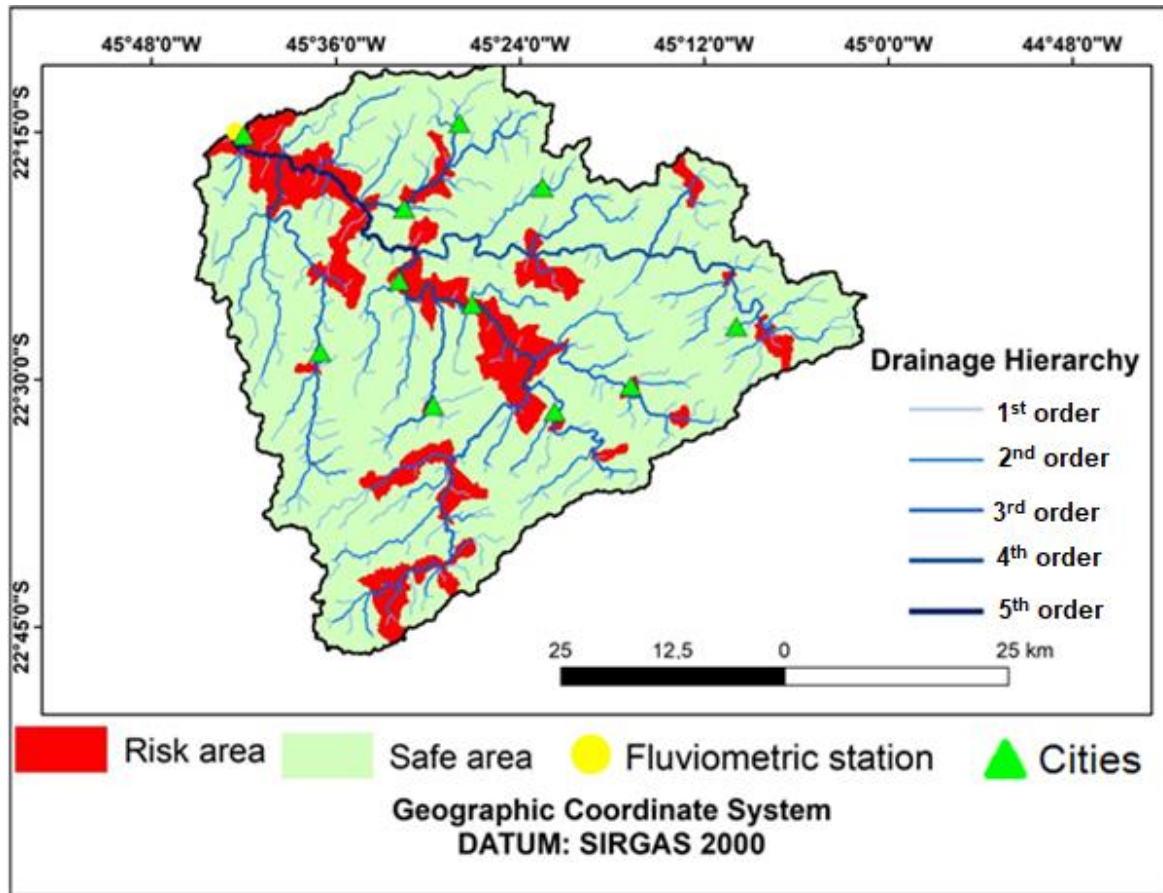


Figure 3. Map of areas at risk of floods in the Alto Sapucaí Watershed. Cluster 1: low risk of flooding; Cluster 2: high risk of flooding.

The overlap in both mappings for the municipalities of Itajubá, Piranguinho, Santa Rita do Sapucaí, Piranguçu, and Delfim Moreira confirms that the cluster analysis proved to be efficient in identifying regions prone to flooding, suggesting that this procedure can be applied in other areas.

4. Discussion

As pointed out by Kuntamalla *et al.* (2018), the values obtained for K_c in the risk areas suggest that these areas are prone to the occurrence of intense floods. The morphometric parameters obtained were similar to previous analyses in the Rio Machado watershed, which belongs to the Rio Grande watershed (SERVIDONI *et al.*, 2019). Thus, both have similar morphometric characteristics and hydrological behavior.

The data regarding the morphometric parameters of the drainage network and the relief of the Alto Sapucaí watershed are consistent (SANGMA; BALAMURUGAN, 2017). The authors found similar outcomes for the Kakoi River Basin in India, which has relief and hydrological behavior comparable to the study area.

The inference that areas classified as "at-risk" are more susceptible to floods is due to their morphometric characteristics. In addition to the high D_d values, the K_c and K_f values indicate destructive hydrological behavior and rapid flooding caused by the rounded shape of the subbasins. This behavior suggests that the river has great potential to cause loss of life and material.

Taofik *et al.* (2017) compared the morphometric parameters of the drainage network and the relief of two watersheds in a tropical region of Nigeria, both with climatic, geological, and geomorphological attributes similar to the Alto Sapucaí Watershed. The results of this work corroborate Taofik *et al.* (2017) because the authors achieved a Kf of 0.85 for a low flood tendency basin and 0.36 for one with high vulnerability.

The survey of municipalities in an emergency in the Minas Gerais state carried out by S2iD for the years 2003 and 2016 pointed out that there is a seasonality factor, which can be explained by the variability of the region's climate. Moreover, there was a notable increasing trend of municipalities in an emergency, which reinforces the impacts resulting from local and global climate changes causing intense rain more frequently (S2iD, 2020).

Data from the Minas Gerais State Secretariat for the Environment and Sustainable Development (SEMAD) classify the Alto Sapucaí region as a critical zone due to material damage and loss of lives caused by flooding (MINAS GERAIS, 2013).

Both the impact and the frequency of these events are considered high by SEMAD, which increases the vulnerability of the area, as highlighted in the Bulletin (DEFESA CIVIL, 2020) by the state of the calamity of the Municipalities of Itajubá, Piranguinho, Santa Rita do Sapucaí, Delfim Moreira and Piranguçu.

The mapping of the characteristics of the population at risk of disasters in Brazil carried out by Alvalá *et al.* (2019) made it possible to define a profile of those who suffer from floods in an intense way. Alvalá *et al.* (2019) found that in 2010, 16% of the small-town populations were at risk, but only 8% were in large cities. In Brazil, people from small and medium-sized towns are more vulnerable to flooding than those from regional and metropolitan centers due to both the lower degree of technical and operational infrastructure and the lack of consolidated proposals for land use and occupation planning in municipal zoning.

The National Policy to Civil Protection and Social Defense established by law 12.608 (BRASIL, 2012) provides that civil defense must carry out actions aimed at disaster management and that these actions must pursue the following parameters: prevention, mitigation, preparation, and response to recovery. Each parameter addressed requires specific responsibilities and skills to compose a continuous, integrated, permanent, and interdependent management system amid various sectors of civil service and the population vulnerable to risk.

Data from the Civil Defense Bulletin of Minas Gerais reinforce the demand for a contingency plan for small and medium-sized towns in the state. The report made available by the Civil Defense pointed out that 271 municipalities declared an emergency in the rainy season of 2020. The political incapacity of Brazilian cities to manage actions to prevent natural disasters reinforces the need for investments in strategies to fight against impacts caused by short-, medium-, and long-term natural disasters (DEFESA CIVIL, 2020). Therefore, procedures and analyses, such as those presented here, allow the identification of areas naturally vulnerable to the occurrence of floods, contributing to information for zoning and risk management.

The Civil Defense has a history of identifying and mapping areas subject to flooding. Thus, this is empirical knowledge based on the occurrence of floods in previous years. However, they do not use a method that allows the identification of such areas before the occurrence of floods. However, the method proposed by this research allows the previous identification of areas subject to floods, avoiding loss of life and material. Therefore, our proposal presents a method of prognostication of areas subject to flooding and not just a diagnosis of areas already flooded in previous events.

A contingency plan, which is the product of this management system, must be prepared with the definition of procedures, actions, and decisions to be made concerning disasters. This plan contains eight stages in Table 3. (BRASIL, 2017). However, we suggest that a new stage must be provided, which consists of a center for organizing, training, and disseminating knowledge accessible to communities located in areas at risk of flooding. This new stage makes it possible for people affected by disasters to respond quickly and efficiently (STOLERIU; URZICA; MIHU-PINTILIE, 2020; SCHÖBER; HAUER; HABERSACK, 2020).

This methodological proposal aims to act as the first stage of the contingency plan, providing areas that, due to their morphometric and hydrological characteristics, are subject to flooding. Thus, it would encourage the preventative actions by public agencies and victims, optimizing the use of resources to fight floods, and promoting an instrument that directly helps in the occupation of the urban and rural land to reduce or eliminate risks of losses of life and materials.

Currently, government agencies have taken measures to contain floods as a direct consequence of inappropriate land use and occupation. If the occupations of the areas were based on their physical and hydrological attributes, then contingency plans would be improved. Therefore, our proposal, if implemented, would avoid new tragedies by adopting simple and low-cost procedures.

Table 3. Synthesis of procedures for preparing the contingency plan. Source: Brasil (2017).

Contingency Plan Design	Description
1st Stage: Risk perception	Reflects the perception of the local risk. It varies depending on the physiographic and demographic characteristics of a given area. Stage of identification of the zones with the highest potential for natural disasters.
2nd Stage: Team building	Working group establishment according to the risks identified in the 1st Stage. The involvement and responsibility for preparation and response actions are criteria for the selection of the team members.
3rd Stage: Analysis of the risk scenario	This stage is for identifying and mapping the risk scenarios. Locations where disasters use to occur, as well as their communities, should be detailed.
4th Stage: Definition of actions and procedures	Establishment of viable strategies for the execution of procedures to mitigate the risks and impacts of disasters.
5th Stage: Approval	The approval must be with a Public Hearing, which should happen for each new assent in the Plan. Then, the institutions responsible for the execution must validate it.
6th Stage: Disclosure of the Contingency Plan	The final document of the Contingency Plan must have language accessible and widely disseminated to the community.
7th Stage: Operationalization	Operationalization occurs at each simulation of alerts, alarms or even in a real disaster situation. In this case, the actions suggested in the previous stages must be applied.
8th Stage: Review	The Contingency Plan must be constantly reviewed and updated due to the unpredictability of natural disasters.

The risk of flooding increases due to the seasonal characteristics of the region's tropical climate and the influence of La Niña and El Niño. Well, it concentrates the rains from October to March. Seasonality is, in general, ignored by public managers. This lack of action creates insecurity in the population of areas subject to the risk of flooding, as seen in several Brazilian cities between 2020 and 2021. In addition, climate change coupled with the lack of planning is responsible for the recurring tragedies that could be avoided through the adaptation of customary planning practices for the use and occupation of land, investments in infrastructure, and technical training of society to promote the security of citizens against natural events that could be catastrophic.

he protocol of morphometric analysis of the Alto Sapucaí watershed, together with the cluster analysis, allowed us to discriminate areas at risk of floods. Thus, this protocol is efficient for assessing areas susceptible to flooding in the Brazilian territory and supporting public management and the

minimization of natural disasters. Based on the morphometric characteristics of the watershed, the cluster analysis allowed the identification of two groups in the studied location: safe and risk areas.

The watershed has an area of 85% without a significant risk of flooding; thus, it is a safe area for occupation, which corresponds to 6 municipalities. Therefore, the risk area corresponds to 15% and 5 municipalities. The maps produced by the cluster analysis can be used to assess inappropriate uses and occupations in risk areas of the watershed. Thus, these maps can be an instrument for monitoring and protecting risk areas.

Municipalities in risk areas must jointly prepare contingency plans that follow defined risk maps and civil defense procedures. Thus, public managers must incorporate science and techniques into decision-making to reduce or minimize the loss of life and material. Similarly, it is possible to identify areas susceptible to flooding in advance.

Finally, it is important to emphasize that the use of scientific knowledge about morphometric attributes is essential to avoid tragedies with human and material losses associated with floods.

References

- ALMEIDA, R. A.; ROSA, D. R. Q.; FERREIRA, R. G.; DELAZARI, F. T.; ALMEIDA, I, A. Análise morfométrica de uma sub-bacia do rio Piracicaba (MG) utilizando sistemas de informação geográfica. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 25, n. 4, p. 372-380, 2017. DOI: 10.13083/reveng.v25i4.815.
- ALVALÁ, R. C. S.; DIAS, M. C. A.; SAITO, S. M.; STENNER, C.; FRANCO, C.; AMADEU, P.; RIBEIRO, J.; SANTANA, R. A. S. M.; NOBRE, C. A. Mapping characteristics of at-risk population to disasters in the context of Brazilian early warning system. **International Journal of Disasters Risk Reduction**, v. 41, 101326, 2019. DOI: 10.1016/j.ijdr.2019.101326.
- AQUINO, R. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; MELLO, C. R.; AVANZI, J. C. Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais state, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, n. 5, p. 533-542, 2012. DOI: 10.1590/S1413-70542012000500006.
- BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de Abril de 2012**. Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. Brasília: Palácio do Planalto, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm>.
- BRASIL. Elaboração de Plano de Contingência. Ministério da Integração Nacional. **Diário Oficial da União**: seção 4, Brasília, DF, Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, 2017.
- CPRM. **Carta Geológica Guaratinguetá**. São Paulo: CPRM, 1998. Escala 1:250.000.
- DEFESA CIVIL. **Boletim Estadual de Proteção e Defesa Civil**. Belo Horizonte: Defesa Civil de Minas Gerais, 2020. 5p. Disponível em: <http://www.sistema.defesacivil.mg.gov.br/anexo/boletim/151-0715_Boletim_11_de_11_de_Janeiro_de_2020.pdf>.
- ESRI. **ArcGIS Professional GIS for the desktop version 10.5**. Redlands, Environmental Systems Research Institute, 2016.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3ª Ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812 p.
- FERGUSON, C. R.; FENNER, R. A. The potential for natural flood management to maintain free discharge at urban drainage outfalls. **Journal of Flood Risk Management**, v. 13, n. 3, e12617, 2020. DOI: 10.1111/jfr3.12617
- FERREIRA, D. F. **Estatística básica**. 2ª Ed. Lavras: UFLA, 2009. 663 p.
- FERREIRA, I. J. M.; BRAGION, G. R.; FERREIRA, J. H. D.; BENEDITO, E.; COUTO, E. V. Landscape pattern changes over 25 years across a hotspot zone in southern Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 81, n. 2, p. 175-184, 2019. DOI: 10.2989/20702620.2018.1542563

GRIFFITHS, P.; JAKIMOW, B.; HOSTERT, P. Reconstructing long term annual deforestation dynamics in Pará and Mato Grosso using the Landsat archive. **Remote Sensing of Environment**, v. 216, p. 497-513, 2018. DOI: 10.1016/j.rse.2018.07.010.

GUPTA, D. S.; GOSH, P.; TRIPATHI, S. K. A Quantitative Morphometric Analysis of Barhar River Watershed of Mahoba district, U.P., India using Remote Sensing and GIS. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 10, n. 11, p. 1-5, 2017. DOI: 10.17485/ijst/2017/v10i11/109695.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of American Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2

KUNTAMALLA, S.; GUGULOTHU, S.; NALLA, M.; SAXENA, P. R. Drainage Basin Analysis through GIS: A Case study of Lakshnapur Reservoir Watershed in Rangareddy District, Telangana State, India. **International Journal of Engineering, Science and Mathematics**, v. 7, n. 3, p. 9-17, 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.22464.84484

MAURANO, L. E. P.; ESCADA, M. I. S.; RENNO, C. D. Padrões espaciais de desmatamento e a estimativa da exatidão dos mapas do PRODES para Amazônia Legal Brasileira. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, p. 1763-1775, 2019 DOI: 10.5902/1980509834380

MEDHI, B.; CHAKRAVARTTY, M.; PATGIRI, A. D. Inferring Hydrological Characteristics of Gabharu River Basin, North-East India, Based on the Application of Some Important Morphometric Parameters. **Global Journal for Research Analysis**, v. 6, n. 3, p. 10-12, 2017. DOI: 10.36106/gjra

MINAS GERAIS. **Atlas da vulnerabilidade às inundações Minas Gerais 2013**. 1ª Ed. Belo Horizonte: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2013. 32p. Disponível em: <<http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/Fotos/fotos/atlas-vulnerabilidade.pdf>>.

PUROHIT, K.; PARMAR, M. K. Morphometric Analysis and Correlation between Morphometric Parameters with Mean Basin Altitude and Slope: A case study of Alaknanda Basin, Uttarakhand, India. **Global Journal for Research Analysis**, v. 6, n. 7, p. 27-30, 2017. DOI: 10.36106/gjra

R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Áustria, 2020. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>.

RIBEIRO, A. S.; MINCATO, R. L.; CURI, N.; KAWAKUBO, F. S. Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 16-31, 2016. DOI: [10.26848/rbgf.v9.1.p016-031](https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p016-031)

S2iD, Sistema Integrado de Informações sobre Desastres. **Série Histórica 2003-2016**. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/series/>.

SANGMA, F.; BALAMURUGAN, G. Morphometric Analysis of Kakoi River Watershed for Study of Neotectonic Activity Using Geospatial Technology. **International Journal of Geoscience**, v. 8, n. 11, p. 1384-1403, 2017. DOI: 10.4236/ijg.2017.811081

SCHOBBER, B.; HAUER, C.; HABERSACK, H. Floodplain losses and increasing flood risk in the context of recent historic land use changes and settlement developments: Austrian case studies. **Journal of the Flood Risk Management**, v. 13, e12610, 2020. DOI: 10.1111/jfr3.12610

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; SILVA, C. P. C. **Inventário Florestal de Minas Gerais: Floresta Estacional Semidecidual e Ombrófila – Florística, Estrutura, Diversidade, Similaridade, Distribuição diamétrica e de altura, Volumetria e Tendências de crescimento e Áreas aptas para manejo florestal**. 1ª Ed. Lavras: UFLA, 2008. 1029 p. SERVIDONI, L. E.; TEODORO, A. E. M.; MINCATO, R. L.; SANTOS, C. A. Avaliação de risco a enchentes e inundações por krigagem ordinária em sistemas de informação geográfica. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 1, p. 126-143, 2019. DOI: [/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp126](https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp126)

SIDDARAJU, K.; NAGARAJU, D.; BHANUPRAKASH, H. M.; SHIVASWAMY, H. M.; BALASUBRAMANIAN, A. Morphometric Evaluation and Sub Basin Analysis in Hanur Watershed, Kollegal Taluk, ChamaraJanagar District, Karnataka, India, using Remote Sensing and GIS Techniques. **International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS**, v. 6, n. 1, p. 2178-2191, 2017. DOI: 10.23953/cloud.ijarsg.265

SPAROVEK, G.; DE JONG VAN LIER, Q.; DOURADO NETO, D. Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil. **International Journal Climatology**, v. 27, p. 257-266, 2007. DOI: 0.1002/joc.1384

STOLERIU, C. C.; URZICA, A.; MIHU-PINTILIE, A. Improving flood risk map accuracy using high-density LiDAR data and the HEC-RAS river analysis system: A case study from north-eastern Romania. **Journal of Flood Risk Management**, v. 13, n. 1, e12572, 2020. DOI: 10.1111/jfr3.12572

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **EOS, Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957. DOI: 10.1029/TR038i006p00913

TAOFIK, O. K.; INNOCENT, B.; CHRISTOPHER, N.; JIDAUNA, G. G.; JAMES, A. S. A Comparative Analysis of Drainage Morphometry on Hydrologic Characteristics of Kereke and Ukoghor Basins on Flood Vulnerability in Makurdi Town, **Nigeria**. **Hydrology**, v. 5, n. 3, p. 32-40, 2017. DOI: 10.11648/j.hyd.20170503.11

2.6 METHODOLOGICAL PROPOSAL TO REMOTE DETECTION AND MANAGEMENT OF AREAS THAT ARE NATURALLY VULNERABLE TO FLOODS

Aceito para Publicação na Earth Science Research Journal em 01/02/2023.

Autores: Lucas Emanuel Servidoni, Joaquim Ernesto Bernardes Ayer, Guilherme Henrique Expedito Lense, Felipe Gomes Rubira, Velibor Spalevic, Brainslav Dudic e Ronaldo Luiz Mincato.

ABSTRACT

Floods are the main natural disasters in Brazil, causing loss of life and socioeconomic damage. This work proposes a model for the remote detection of areas that are naturally flood-prone due to the morphometric characteristics of their relief and drainage networks in the Alto Sapucaí River in Minas Gerais, Brazil. The morphometric parameters used were the drainage density, river density, relief ratio, roughness index, maintenance coefficient, form factor and stream surface length. The risk areas had a compactness coefficient of 0.75 and a form factor of 0.56, and both were considered a high risk for floods. The obtained results allowed the identification of a significant predictive equation that suggested a cutoff value of 3.82 for the discriminant function; areas with values under this cutoff were considered naturally more

vulnerable to floods occurrences. These areas were corroborated with the emergency maps of the municipalities. The map obtained by the proposed model was compared with the Civil Defense map, and its accuracy, according to the Kappa coefficient, was 0.83, indicating strong similarity between the two maps.

Keywords: Geoprocessing, Natural Disasters, Remote Sensing, Environmental Risk.

1. INTRODUCTION

One of the steps of natural disaster management is to assess environmental behaviors, such as the influence of landforms on surface and subsurface water runoff processes. Obtaining information about the dynamics of these landscape elements enables decision-makers to mitigate and control risk (Arantes *et al.*, 2021; Mardhel *et al.*, 2021; Tesema, 2021). In this context, prior knowledge of morphometric landform characteristics and drainage networks allows for the prevention and mitigation of events that are triggered by natural disasters and for the precise and efficient allocation of resources for flood event warning and preparation systems (Waghwala and Agnihotri, 2019; Bogo, 2020).

Floods are natural processes associated with mountain snowmelts, rapid and intense rains, long-term rains, and extreme hydrometeorological events such as hurricanes and tropical cyclones (Ward *et al.*, 2020). Thus, despite being natural events, the uncontrolled development in river plains increases the risks and socioeconomic damages caused by floods, which, in general, result in loss of life (Martin-Díaz *et al.*, 2018; Cobbinah *et al.*, 2022). Due to Brazil's climate and historically uncontrolled development of flood-prone areas (Fleischmann *et al.*, 2021), several millions reais are spent annually to combat the adverse effects of flooding catastrophes (Bitencourt and Rocha, 2014).

The urbanization process imposed by capitalism in peripheral countries such as Brazil occurred in an accelerated and disorderly way, following the intense process of industrialization in the 1970s. This process promoted an intense rural exodus causing a population explosion in

urban centers. This migratory wave could not be adequately absorbed in urban centers, forming clusters of precarious housing and subjecting the low-income population to settle in areas at risk of flooding (Fleischmann *et al.*, 2021; Cobbinah *et al.*, 2022).

However, flood risks have worsened due to uncontrolled land changes associated with climate changes (Arantes *et al.*, 2021); the deleterious effects of this natural phenomenon are exacerbated by anthropogenic changes in hydrosedimentological systems (Silva *et al.*, 2018), which have intensified both in volume and area, leading to an increase in the number of people affected and displaced by flood events, mainly in urban areas (Molina and González, 2020; Defesa Civil, 2020).

To assess and map floods, computational analysis of morphometric and hydrological variables, remote sensing and geographic information systems (GIS) are indispensable and widely used, due to the low cost of acquiring images and even free of charge in specialized public agencies. These resources can make land use management and agricultural and urban development possible at low cost. They significantly contribute to the generation of strategic information for coping with floods (Tamiru and Dinka, 2021). Such costs are even lower than those necessary to carry out field surveys in large areas subject to flooding in a country with continental dimensions such as Brazil.

In this scenario, geoprocessing and remote sensing techniques enable preliminary and pilot studies for recognizing flood-prone areas and support land use planning, development and management (Udin and Matin, 2021). These techniques reduce the costs and efforts of mapping and disaster management (Ardaya *et al.*, 2017). In addition, identifying areas naturally vulnerable to flooding favors the establishment of inspection, policing and control actions appropriate to their socioeconomic and environmental realities (Ekmekcioglu *et al.*, 2022). Thus, the development of proposals to analyze and map flood-prone areas based on the morphometric characteristics of their drainage networks and landforms is a necessary response

to climate change, which increasingly causes extreme climatic events to occur (Kuntamalla *et al.*, 2018; Lin and Billa, 2021).

This research aims to develop a methodological proposal for remote detection and management of areas naturally vulnerable to flooding, based on morphometric and hydrological parameters of hydrographic basins.

2. MATERIALS AND METHODS

The study area comprises 170 hydrographic subbasins of the Alto Sapucaí (Figure 1), a tributary of the Rio Grande Hydrographic Basin, which has a volume of 2,813 km² and an average flow of 146 m³s⁻¹. A main source of water for the Furnas Hydroelectric Power Plant Reservoir, the Alto Sapucaí river in southern Minas Gerais is also important for locomotion, fishing, irrigation, and hydroelectric energy production (Galvão and Bermann, 2015). However, surrounding municipalities, such as Itajubá, Piranguinho, Santa Rita do Sapucaí, Piranguçu, and Delfin Moreira, recurrently suffer from floods due to their history of uncontrolled development (Martins *et al.*, 2019).

The local geomorphology is dominated by denudational units of crystalline or sedimentary rocks, with an altitude between 816 and 1,482 m. The geological framework of the area is composed of granite-gneissic complexes from the Orogenic System of Tocantins (CPRM, 1998; Hasui, 2010). In the area, red and red yellow Argisols predominate and, secondarily, red Latosols, Haplic Cambisols and Neosols (Santos *et al.*, 2018). Regarding the hydrography, the drainage pattern is dendritic, with 1st- and 2nd-order channels with NNE-SSW orientations and 3rd-, 4th- and 5th-order channels with NE-SW directions (Ribeiro *et al.*, 2016).

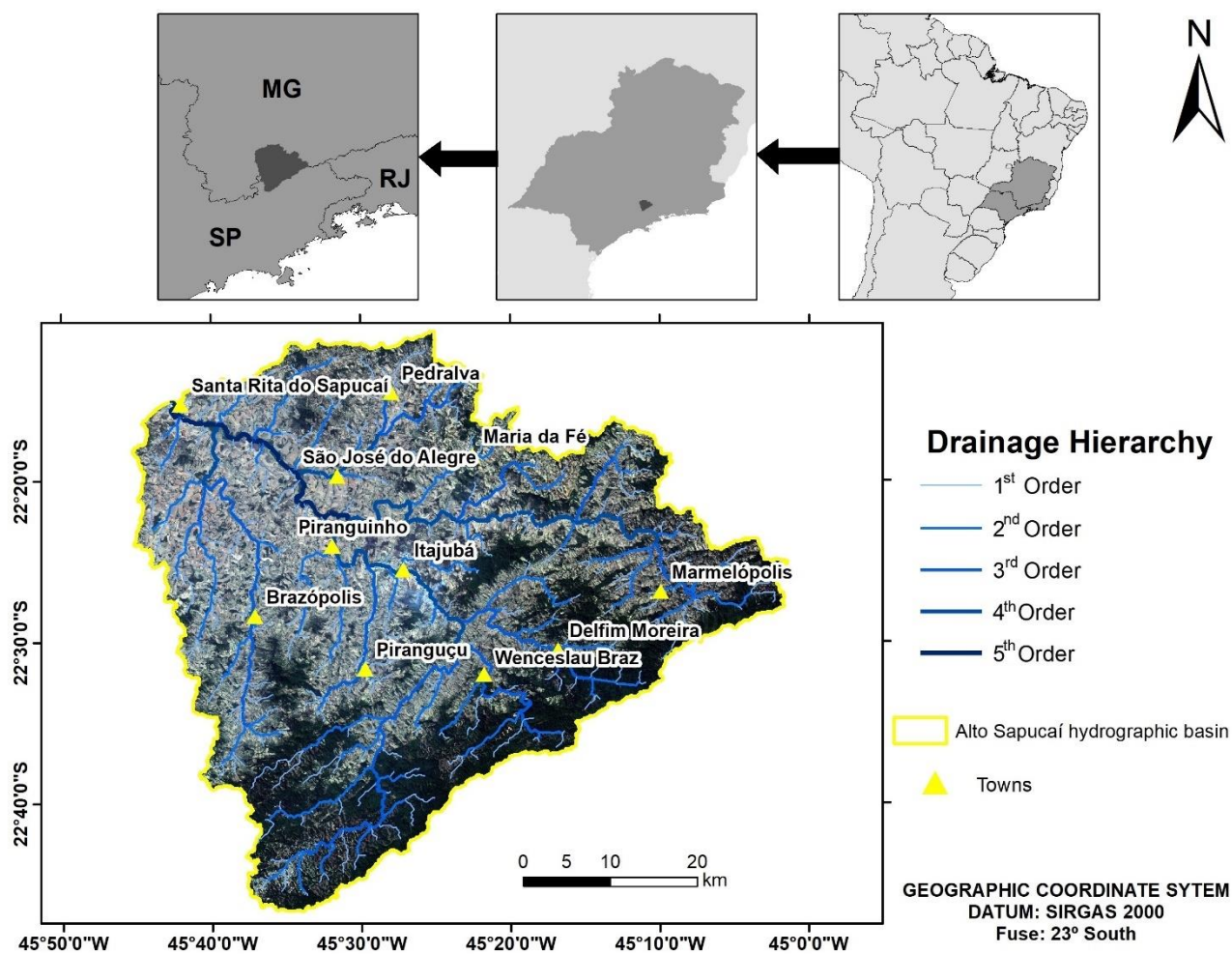


Figure 1. Location map of the Alto Sapucaí hydrographic basin, southern of Minas Gerais, Brazil.

The climate, according to Köppen's classification, is tropical in altitude (Cwa and Cwe), with hot and humid summers and cold and dry winters and average annual precipitation of 1.600 to 1.865 mm (Aquino *et al.*, 2012). In southern Minas Gerais, December and January have the highest precipitation values of 253 and 245 mm, respectively (Martins *et al.*, 2019), with preferential maximums leeward of Serra da Mantiqueira, which illustrates the orographic performance in the distribution of precipitation (Campos *et al.*, 2016; Ávila *et al.*, 2009). The dominant morphoclimatic domain is the Atlantic Forest, with the seasonal semideciduous forest replaced mainly by pastures and agriculture (Scolforo *et al.*, 2008).

From the ArcHydro analysis module, 170 hydrographic subbasins were delimited as representative sampling units of the study area. Subsequently, the drainage hierarchy was

defined according to Strahler (1957). Finally, the morphometric parameters of the Alto Sapucaí watershed were calculated using the Shuttle Radar Topography Mission 2 (SRTM 2) digital elevation model (DEM) with a vertical resolution of 30 m (USGS, 2014), which agrees with the scale criteria adopted by Gupta *et al.* (2017).

The DEM was processed in GIS by the Hydrology module of the Spatial Analyst Tools and ArcHydro toolset to obtain the cartographic base comprising the slope, altimetry, and hydrography maps. ArcGIS 10.5 Fill extension (ESRI, 2015) was used to reduce failures and errors in the results obtained from the morphometric and hydrological parameters to remove pixels with anomalous altimetry values.

The automatic extraction of the drainage network was performed by the hydrology extension of ArcGIS 10.5 from the processes of generating fill, flow direction, flow accumulation, con, stream to feature, and watershed files (ESRI, 2015).

The delimitation of the hydrographic subbasins followed the criteria of altimetry and relief slope and the areas of flow and accumulation of water, allowing the precise identification of the watersheds in the basins. The calculations of morphometric parameters were performed for the 170 sampling units according to Gupta *et al.* (2017) and are described in Table 1.

Table 1. Morphometric parameters of the Alto Sapucaí hydrographic basin, southern Minas Gerais, Brazil.

Parameter	Estimator	Variable	Meaning	References
Stream frequency (Dh)	$Dh = \frac{n}{A}$	n = Number of channels A = Area	Expresses the number of existing channels per unit area, indicating the water potential of the region	Strahler (1952)
Drainage density (Dd)	$Dd = \frac{C}{A}$	C = Channels total length A = Area	Expresses the influence of the supply and transport of dendritic material. Indicates the degree of the anthropization of the channels	Horton (1945)

Relief ratio (Rr)	$Rr = \frac{\Delta a}{L}$	Δa = Altimetric amplitude L = Chanel length	Relationship between altimetric amplitude and the length of the main channel	Strahler (1952)
Roughness index (Ir)	$Ir = Hm \times Dd$	Hm = Altimetric amplitude Dd = Drainage density	Represents the slope relationship with the channel lengths. Indicates the degree of dissection of the watershed	Horton (1945)
Compactness coefficient (Kc)	$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	P = Basin perimeter in km A = Basin area in km ²	Indicates the highest or lowest occurrence of floods	Horton (1945)
Form factor or Gravelius's shape index (Kf)	$Kf = \frac{A}{G^2}$	A = Basin area in km ² G = Basin axial length	Lower values indicate that the basin is less prone to flooding	Strahler (1952)
Maintenance coefficient (Cm)	$Cm = \frac{1}{Dd \times 1000}$	Dd = Drainage density	Indicates the minimum area needed to maintain a meter of drainage perennial	Schum (1956)
Stream surface length (Eps)	$EPS = \frac{1}{2.Dd}$	Dd = Drainage density	Indicates the average length traveled by the flow to the drainage channel	Chistofolletti (1969)
Circularity index (Ic)	$Ic = \frac{12.57 \times A}{p^2}$	A = Basin area P = Basin perimeter	The unit tends as the basin approaches the circular shape making it more prone to flooding	Strahler (1952)

For the composition and selection of the variables that most affect the natural propensity to flooding in regions of rugged reliefs, the following protocol was used. The variables were grouping to identified regions naturally vulnerable to the occurrence of floods due to the values of morphometric and hydrological parameters that assess risks to floods, in accordance with relevant literature (Gupta *et al.*, 2017; Taofik *et al.*, 2017; Kuntamalla *et al.*, 2018). Empirical data generated by the Civil Defense of Minas Gerais were also collected (Defesa Civil, 2022), which mapped the areas with occurrences of flooding in urban areas in the study region.

The cluster analysis results were synthesized in ArcGIS 10.5, generating maps with clusters of areas with similar morphometric characteristics. This grouping uses Ward's

minimum variance method and this technical use the measure of the absolute distances from Manhattan (Mingoti, 2005). In the ArcGIS software, the areas mapped by civil defense were superimposed on the areas grouped for each of the morphometric parameters calculated for the study area, which are: Compactness coefficient (Kc); Drainage density (Dd); Stream frequency (Sf); Maintenance coefficient (Mc); Roughness index (Ri); Form factor (Kf) (Cristofolleti, 1974; 1981). The variables were then selected considering the greatest overlaps between the areas mapped by the civil defense with the morphometric groupings. To evaluation of the assumptions, the nonparametric Mann–Whitney test was used (Ferreira, 2009). A maximum error of 5% was considered to reject the null hypothesis, which was declared as the nondifference between the groups ($p < 0.05$).

The variables representing the morphometric and hydrological parameters were initially assessed in a complete model and adjusted to a more economical model using the backward method (Mingote, 2005). Fisher's discriminant function was proposed as a predictive equation for scoring, and the classification constant was used as a cutoff point for classifying subbasins that are naturally vulnerable to flooding (Mingoti, 2005). As a result of Fisher's discriminant function, equation 1 was found, which synthesizes the variables and their weights for the evaluation of areas with a natural propensity for flooding. Data processing and analysis were performed with the support of the R statistical package (R Core Team, 2020).

$$EFRE = -3.28 \times 10^{-1} Kc + 2.64 \times 10^{-4} Dd - 3.62 \times 10^{-1} Dr - 5.76 \times 10^{-3} Cm + 8.58 \times 10^{-5} Ir - 3.44 Kf \text{ (Equation 1)}$$

Where: EFRE = Equation for flood risk evaluation; Kc: Compactness coefficient; Dd: Drainage density; Dr: Stream frequency; Cm: Maintenance coefficient; Ir: Roughness index; Kf: Form factor.

To evaluate the proposed model, the data obtained by the discriminant function were crossed with empirical maps of Civil Defense (Defesa Civil, 2022). Then, 500 points were

randomly distributed on the map of areas that were vulnerable to flooding estimated by the proposed model and on the map of the observed risk areas, and the Kappa agreement index was calculated to assess the level of accuracy of the proposed map (Aburas *et al.*, 2021).

3. RESULTS

In this research we use the concepts of vulnerability and susceptibility to indicate predisposed/prone terrains for the development of processes in the physical environment (floods). Already, the concept of risk was used to indicate areas likely to be affected by natural processes that can cause adverse effects of losses of life and material by floods.

The cluster analysis identified two groups of hydrographic sub-basins with similar functions of morphometric and hydrological characteristics: a group considered safe and a group characterized as naturally vulnerable to the occurrence of floods; both are described in Table 2. As an indication of susceptibility to flooding in watersheds, Dd indicates well-drained areas. Such areas convert rain into flow very quickly, causing flooding in a short period. The average Dd (Table 2) of the subbasins included in the Alto Sapucaí risk grouping was 21.65 km², confirming its vulnerability to floods given the recurrent cases of flooding in Santa Rita do Sapucaí, Itajubá, Delfin Moreira, Piranguinho, and Piranguçu by the main river, as pointed out by the Official Civil Defense Bulletin (Defesa Civil, 2022).

Table 2. Hydrographic basins, according to morphometric characteristics and parameter values. Alto Sapucaí hydrographic basin, southern Minas Gerais, Brazil.

Morphometric Characteristics										
Area	Obs	Kc ¹	Dd ²	Dr ²	Ir ²	Rr ¹	Eps ²	Cm ²	Kf ¹	Ic ¹
Safe	109	1.93	3.53	2.00	2,117.76	2,265.16	0.14	283.06	0.36	0.32
Risk	66	1.13	21.65	2.12	6,928.39	2,444.41	0.02	46.22	0.78	0.86

P-	-	0.0040	0.001	0.1617	0.0001	0.3286	0.0001	0.0001	0.0001	0.4030
valor	-		**	**	**	-	**	**	-	-

Obs: number of observations; Kc: compactness coefficient; Dd: drainage density; Dr: stream frequency; Ir: roughness index; Rr: relief ratio; Eps: stream surface length; Cm: maintenance coefficient; Kf: form factor; Ic: circularity index; ¹Average; ²median; ** Mann–Whitney test.

Damage caused by floods mainly occurs between December and March. The results demonstrate that in the Santa Rita do Sapucaí region, the high values of Dd associated with extreme hydrometeorological events trigger floods (Servidoni *et al.*, 2021). Thus, it is necessary to prepare a contingency plan for the area that includes the hydrological, climatic, geomorphological, pedological and land use aspects of the hydrographic basin, which also considers the morphometric behavior of the relief and drainage network, as shown in Table 2.

The calculated roughness index (Ir) indicates the relationship between the slope and the length of the channels. The greater the Ir is, the more sloped and dissected is the relief, more notched the shape of the flow channels is and the greater the gravitational force on the rivers. In the area, the highest Ir values partially overlap the mainstream in the upstream region associated with the knickpoints, a significant relief rupture upstream of the Alto Sapucaí hydrographic basin, resulting from lithological transitions with different resistance to erosion and regional shear zones linked to the evolution of Mantiqueira Range, developed during the Brazilian-Pan African Neoproterozoic Orogeny (Hasui, 2010; Rezende and Castro, 2016; Rezende, 2018; CPRM, 2020; Rezende and Salgado, 2020; Calegari, 2021) (Figure 2). The Ir values are consistent and agree with the results of the Machado River hydrographic basin, which also belongs to the Rio Grande hydrographic basin (Servidoni *et al.*, 2021; 2019).

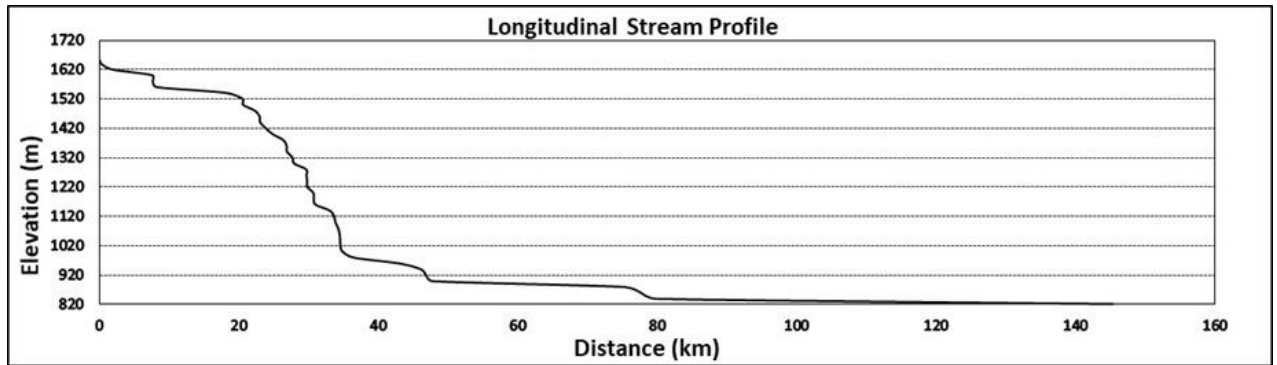


Figure 2. Longitudinal profile of the main channel of the Alto Sapucaí hydrographic basin, southern Minas Gerais, Brazil

The rupture illustrated in Figure 2 is inserted into areas with a D_d greater than 15.01 and a D_r greater than 3.01, classifying the area as well drained. This relief rupture implies a potential increase in the flow of the main course, which may cause risks to riverside populations close to urban watercourses or downstream of the mapped knickpoints (Gailleton *et al.*, 2019). These characteristics of the downstream risk areas are illustrated by Ribeiro *et al.* (2016) in the municipality of the Pouso Alegre, south of Minas Gerais.

The areas in red in Figure 3 indicate subbasins that are vulnerable to floods due to the morphometric characteristics of the relief and the drainage network. There is an overlap of risk areas with Itajubá, Piranguinho, Santa Rita do Sapucaí, Piranguçu, and Delfin Moreira. In 2020, from January to March, these municipalities declared a state of emergency due to heavy rains (Defesa Civil, 2020).

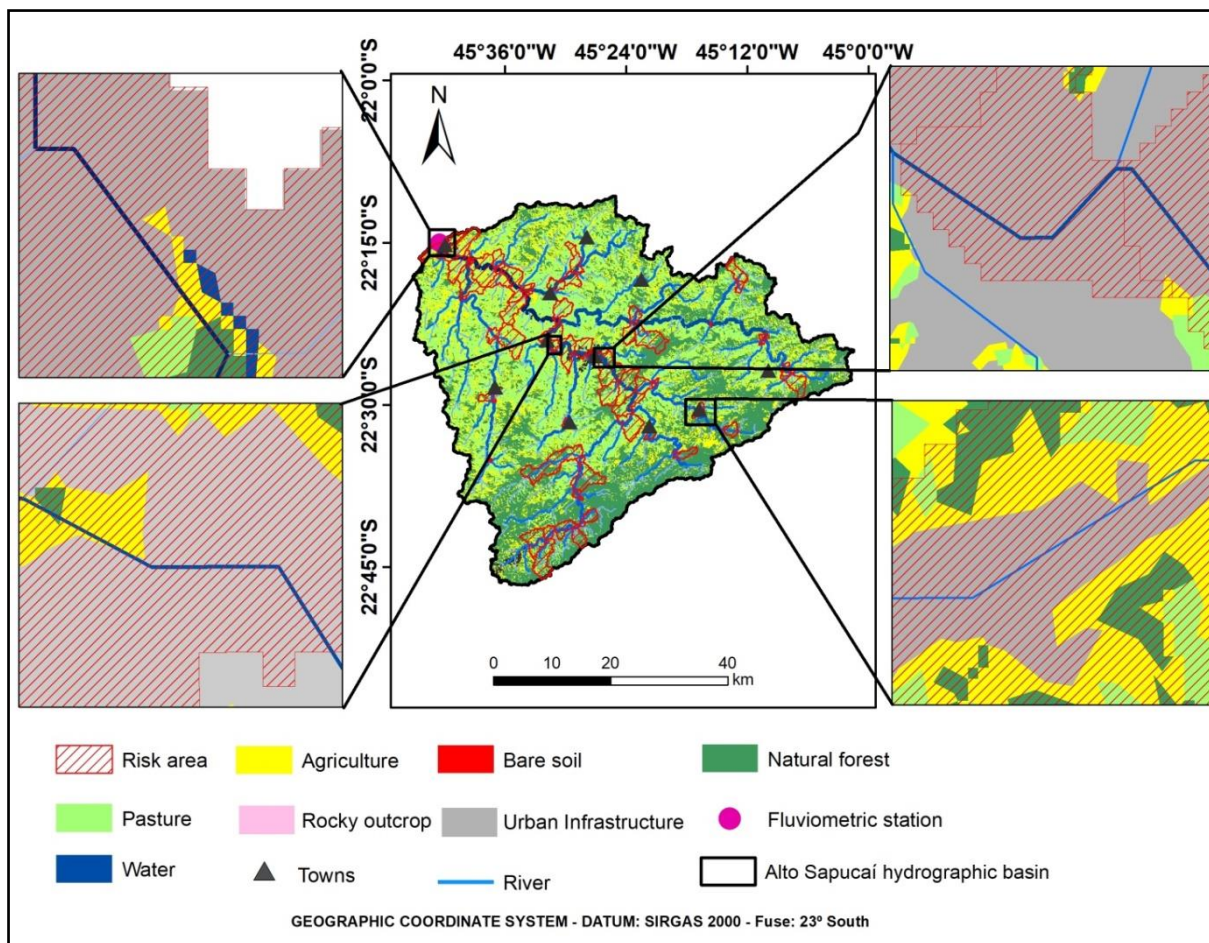


Figure 3. Map of areas at risk to floods in the Alto Sapucaí hydrographic basin, southern Minas Gerais, Brazil.

Figure 3 identifies areas prone to flooding. Thus, it can be a territorial planning instrument for the preparation of contingency plans for cities. In addition, determining risk areas can target priority locations for investments and projects to contain floods. This allows for directing investments for proper disaster management in places prone to flooding in the modeled area represented in Figure 3. The identification of priority areas would enable urban space to be restructured using sustainable strategies for land use and occupation, inspecting and monitoring risk areas and planning the consolidation of new urban and rural areas into safe areas. Maps of flood-prone areas (Figure 3), when linked to land use and occupation data, can generate strategic information to prepare and execute contingency plans for floods in the Alto Sapucaí hydrographic basin (Table 3).

Table 3. Land use in risk areas of the Alto Sapucaí hydrographic basin, southern Minas Gerais, Brazil.

Land use	Area (km ²)	Area (%)	Risk Area (km ²)	Risk Area (%)	Land Use Risk Area (%)
Natural Forest	1,029.05	36.57	135.63	32.80	13.18
Agricultural	677.16	24.09	99.32	24.06	14.66
Pasture	1,060.94	37.70	161.40	39.04	15.21
Rocky Outcrop	12.93	0.45	3.74	0.91	28.92
Bare Soil	0.66	0.03	0.12	0.04	18.18
Urban Infrastructure	31.43	1.11	12.19	2.95	38.78
Water	1.46	0.05	0.85	0.21	58.22
Total	2,813.67	100.00	413.28	100.00	14.69

Adapted from MapBiomias Project (2018).

Table 3 presents the calculation of land use areas in the hydrographic basin. Classes are grouped to synthesize regional land use behavior. The most representative uses in the basin are Native Vegetation, Pasture, and Agricultural Areas. They occupy 36.57, 24.09, and 37.70% of the total area, respectively. However, when observing the relationship of each use with the risk area, their values are 13.18, 14.66 and 15.21%, respectively. Thus, 14.69% of the basin is vulnerable to flooding, which, despite the low numerical value, is quite significant, as this portion of the basin includes areas inhabited by people and destined for agriculture and livestock; these areas have high risk levels for damage to economic activities and life.

Urban patches occupy 31.34 km² of risk area; however, when observing the percentage of these areas in vulnerable places, the value is 38.80% (Table 3). In other words, a significant amount of urban infrastructure historically occupies areas that are naturally prone to flooding due to the morphometric characteristics of the relief and the hydrographic network. This is due

to the historical disordered occupation of the riverbanks and soil impermeabilization of the urban areas of the basin (Hora and Gomes, 2009).

The subbasins classified as vulnerable to flooding have a Kf value of 0.78, like that obtained by Taofik *et al.* (2017). This value expresses the flooding risk in a tropical hydrographic basin with similar morphometric and climatic characteristics. The Dd value (Figure 4) for the vulnerable cluster is 21.65, demonstrating a significant accumulation of drainage channels in this area. As it is a well-drained environment, rainfall-runoff conversion occurs abruptly in high-intensity or prolonged rainfall events (Taofik *et al.*, 2017).

The value of Kc 0.89 was obtained by Taofik *et al.* (2017) in a tropical hydrographic basin. The parity of the results obtained for the two areas demonstrates that both suffer from floods and have similar morphometric characteristics. Such values compared to other references show that Kc values between 0.75 and 1.00 characterize areas prone to flooding (Strahler, 1957; Christofolletti, 1969; Sangman and Balamurugan, 2017).

The value obtained for Kf was 0.56, indicating that the basin is subject to floods and flood peaks due to the circular shape of the downstream subbasins and the Kc values. Furthermore, such areas are concentrated near higher-order channels, such as the main channel. This can be evidenced by a comparison with the results of Purohit and Parmar (2017) in the Alaknanda Basin, India. Thus, it is essential that public administration agencies plan and adopt the necessary measures to address and mitigate the vulnerability of these areas to extreme hydrometeorological processes, with consideration given to the environmental characteristics of each area (Taofik *et al.*, 2017).

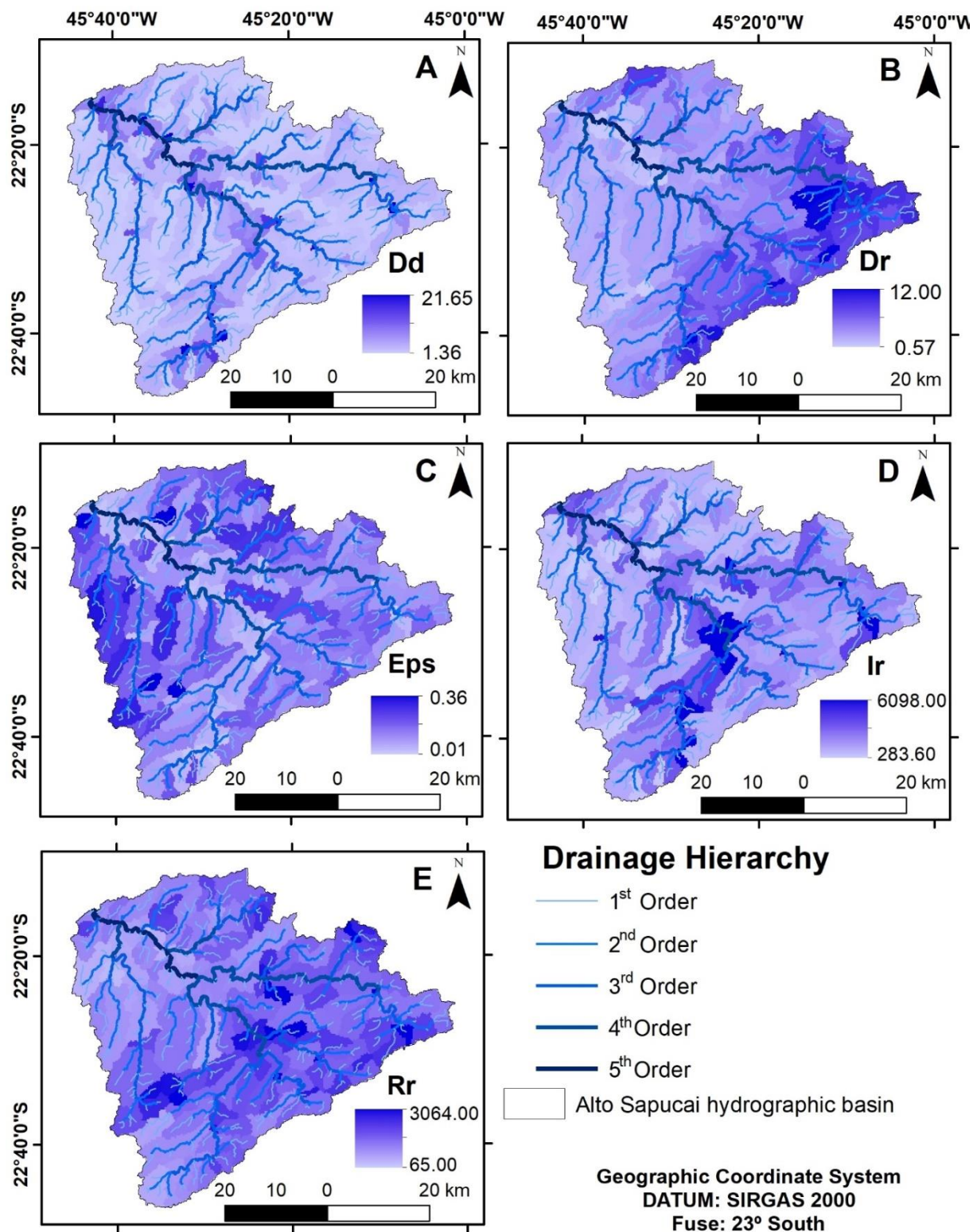


Figure 4. Map of the spatial distribution of the morphometric indices calculated for the Alto Sapucaí hydrographic basin, southern Minas Gerais, Brazil. A: Dd: Drainage density; B: Dr: Stream frequency; C: Eps: Stream surface length; D: Ir: Roughness index; E: Rr: Relief ratio.

The application of cluster analysis allows classification of the morphometric parameters into two groups. Therefore, it is possible to develop a discriminant function capable of distinguishing subbasins subject to flood risks from those that are safe (Equation 1).

$$EFRE = -3.28 \times 10^{-1} Kc + 2.64 \times 10^{-4} Dd - 3.62 \cdot 10^{-1} Dr - 5.76 \times 10^{-3} Cm + 8.58 \times 10^{-5} Ir - 3.44 Kf$$

(Equation 1)

Where: EFRE = Equation for flood risk evaluation; Kc: Compactness coefficient; Dd: Drainage density; Dr: Stream frequency; Cm: Maintenance coefficient; Ir: Roughness index; Kf: Form factor.

In Alto Sapucaí, the discriminant function defines an EFRE threshold value of 3.82 for the basin, below which areas are classified as naturally prone to flooding. Thus, this cutoff value classifies the watershed as a risk or safe area due to the geomorphological and fluvial characteristics (Figure 3).

The methodological proposal can be applied in spatial clippings of hydrographic basins and in different federative units, with a view to identifying areas with natural vulnerability to flooding (Brito *et al.*, 2020). Thus, it is possible to plan actions and strategies to minimize and overcome the catastrophic effects of floods.

Cluster and discriminant function analyses are quantitative tools capable of identifying urban and regional planning priorities in areas at risk of flooding. Consequently, with such resources, governmental and nongovernmental management and actions can be more efficient. Its correct use could allow that human occupation of risk areas and loss of life, material goods, and public infrastructure are avoided.

Another advantage of the method is that it automates the detection of areas naturally vulnerable to flooding from the discriminant function applied in GIS. Automation reduces operating costs, and based on prior mapping, field activities can be concentrated in vulnerable areas.

Currently, remote object detection has been widely developed in geotechnologies, which reduces technical and operational costs, accelerates the collection of strategic information, and supports decision-making. In Brazil, a country of continental dimensions and, historically, a lack of planning and management for land use and occupation, low-cost and high-efficiency techniques to identify areas vulnerable to flooding are essential to save lives and resources (Tsatsaris *et al.*, 2021).

The Kappa (K) test measures the degree of agreement between proportions derived from dependent samples. More than one method can map a risk area and not necessarily obtain the same result. Different methods should identify a risk area, if indeed it is a risk area. However, ideally, the different methods should achieve the same result (Landis and Koch, 1977).

Absolute agreement between two objects observed by different methods does not always occur in real life. However, it is possible to measure the reliability of two observations of the same object by K. This coefficient is based on the number of concordant responses between two products. Values close to 1.0 represent total agreement, and those close to 0.0 indicate nonagreement (Aburas *et al.*, 2021).

Figure 5 illustrates the overlap of the risk map obtained by EFRE with those mapped by Civil Defense (Defense Civil, 2022). It should be noted that not all the municipalities surveyed have flood maps. Thus, to obtain the Kappa Agreement Index, all products available for the study area were considered. The agreement value was 0.83, which is considered solid or substantial agreement (Landis and Koch, 1977). However, such a Kappa concordance value may be higher due to the absence of maps of flooded areas in some municipalities studied.

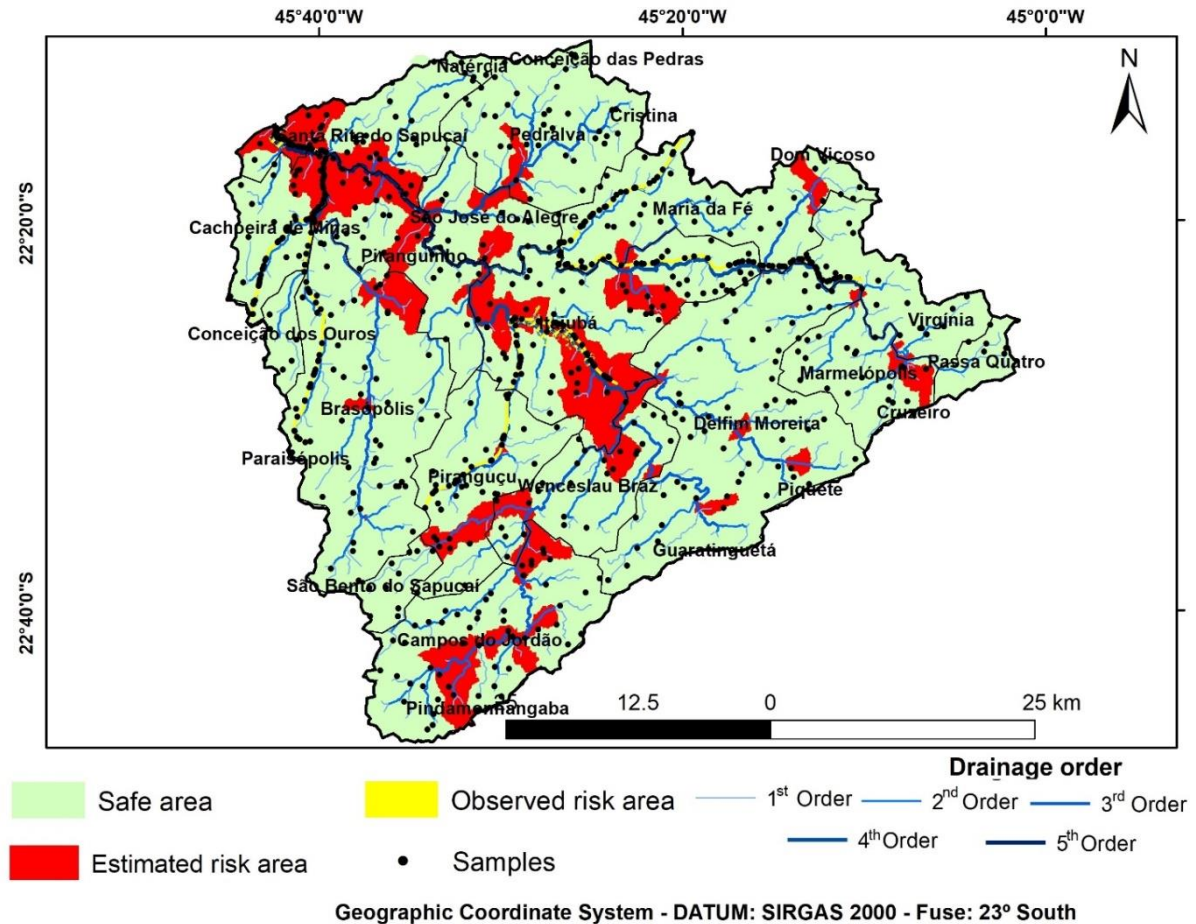


Figure 5. Map of the distribution of points to calculate the accuracy of the Kappa coefficient for the Alto Sapucaí hydrographic basin, southern Minas Gerais, Brazil.

The precision obtained by EFRE is quite satisfactory for the area. From now on, new works should seek different applications for EFRE, such as the establishment of quality control measures and model validation (Figure 5).

4. DISCUSSION

According to Brito *et al.* (2020), it is vital to emphasize the importance of not waiting for the authorities to assume their responsibilities in risk management. The needs of communities affected by floods must take precedence over individual interests and real estate speculation. Due to their vulnerability, these communities must participate in the disaster

management process so that, in partnership with experts, they can efficiently allocate investments to fight against and mitigate the socio-economic and environmental impacts of floods (Bogo, 2020).

However, the management of natural disasters is, above all, the responsibility of the State, which is the only entity with the legal capacity to act and regulate the occupation of risk areas. Therefore, authorities must coordinate efforts; only with the participation of all sectors of society will it be possible to achieve sustainable management and mitigation of impacts and damage caused by floods. Unfortunately, government organizations should and need to standardize procedures, which would imply changes in risk management protocols. Bureaucracy creates challenges for establishing a unified disaster management model in Brazil (Brito *et al.*, 2020).

According to data from the João Pinheiro Foundation, 5.87 million people are part of the population affected by the Brazilian housing deficit in 2019 (FJP, 2019). These families live in marginalized urban spaces, forming clusters of poverty, and many are in areas that are inappropriate for occupation, such as slopes and riverbeds.

Brazil experienced one of its most critical summers due to the influence of the La Niña weather phenomenon. Thus, climate change promotes catastrophic events of extreme intense rains in southern Bahia and northern Minas Gerais, in addition to disasters in the cities of Rio de Janeiro and São Paulo, according to the management report of the Integrated Information System of Disasters (Civil Defense, 2022).

These increasingly commonplace events demonstrate the relevance of this type of research. This study sought to identify the area's most vulnerable to floods in a simple, objective, cheap, fast and efficient way. For a country of continental dimensions, such as Brazil, with complex hydrography and different socioenvironmental contexts, the product derived from this model is essential for the development of public policies and risk management systems in

Brazilian areas, such as in the metropolitan area of Curitiba, Paraná State (Nascimento Neto, 2020), in the Itajaí-Açu River area in Blumenau, Santa Catarina State (Alberton *et al.*, 2021); and in Amazonian cities like Belém, Pará State (Szlafsztein and Araújo, 2021).

Climate change causes storm events to become more frequent and intense, so it is essential to predict the identifying patterns, trends, and distribution of natural phenomena to reduce natural risks. Only in this way will it be possible to implement land use and occupation planning that values the quality of life and the sustainability of the environment. Therefore, the EFRE enables the identification of geomorphological conditions that potentiate flood events in tropical watersheds and may be an option to manage this problem that has devastated and claimed many lives in Brazil.

5. CONCLUSION

The discriminant function showed potential to identify areas susceptible to flooding. It is proposed that a value of 3.82 for the equation for flood risk evaluation indicates areas vulnerable to flooding and that higher values suggest a low natural risk of flooding.

The value of the Kappa Index was 0.83, indicating good agreement between the products obtained by the Equation Flood Risk Evaluation and the Civil Defense risk maps, demonstrating good accuracy in forecasting areas at risk of flooding.

The geomorphological characteristics and frequency of storms are the main natural factors that increase the potential for flooding in the region. Due to climate change, storm events tend to become more intense and frequent.

Of the eleven municipal seats, five are in areas at risk of flooding; these areas, Itajubá, Piranguinho, Santa Rita do Sapucaí, Piranguçu and Delfin Moreira, and have suffered flooding events in the last ten years.

Public policies to combat floods should be addressed in conjunction with the housing issue in Brazil, with the participation of vulnerable populations, providing technical support for land use planning and increasing the security of marginalized populations in urban areas.

6. ACKNOWLEDGMENTS

To the “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil” (CAPES) for the doctoral scholarship for the first author.

To the “Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais” (FAPEMIG) for the doctoral scholarship for the third author.

This study was funded in part by the “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil” (CAPES) - Finance Code 001.

7. REFERENCES

Aburas, M. M., Ho, Y. M., Pradhan, B., Salleh, A. H. & Alaiza, M. Y. D. (2021). Spatio-temporal simulation of future urban growth trends using an integrated CA-Markov Model. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(131), 01-12. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06487-8>

Alberton, G. B., Severo, D. L., Melo, M. N. V., Potelicki, H. & Sartori, A. (2021). Aplicação de redes neurais artificiais para previsão de enchentes no Rio Itajaí-Açu em Blumenau, SC, Brasil. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, 12(4), 686-696. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0053>

Aquino, R. F., Silva, M. L. N., Freitas, D. A. F., Curi, N., Mello, C. R. & Avanzi, J. C. 2012. Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais State, Brazil.

Ciência e Agrotecnologia, 36(5), 533-542. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542012000500006>

Arantes, L. T., Carvalho, A. C. P., Lorandi, R., Moschini, L. E. & Di lollo, J. A. (2021). Surface runoff associated with climate change and land use and land cover in southeast region of Brazil. *Environmental Challenges*, 3(100054). <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100054>

Ardaya, A. B., Evers, M. & Ribbe, L. (2019). Participatory approaches for disaster risk governance? Exploring participatory mechanisms and mapping to close the communication gap between population living in flood risk areas and authorities in Nova Friburgo Municipality, RJ, Brazil. *Land Use Policy*, 88(104103). <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104103>

Ávila, L. F., Mello, C. R. & Viola, M. R. (2009). Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13, 906–915. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700013>

Bitencourt, N. L. R. & Rocha I. O. (2014). Percepção das populações costeiras sobre os efeitos dos eventos adversos no extreme sul de Santa Catarina - Brasil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 14(1), 15-25. <https://doi.org/10.5894/rgci408>

Brito, R. P., Miguel, P. L. S. & Pereira, S. C. A. F. (2020). Climate risk Perception and media framing. *RAUSP Management Journal*, 55(2), 247-262. <https://doi.org/10.1108/RAUSP-09-2018-0082>

Bogo, R. S. (2020). Participatory master plan, territory and floods in Rio do Sul, State of Santa Catarina. *Cadernos Metr pole*, 22(48), 555-577. <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2020-4810>

Calegari, S. S. (2021). Estruturas R pteis e Expressão Topográfica na Termina o Norte da Serra da Mantiqueira, Sudeste do Brasil. Ph.D. Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.

Campos, B., Pereira, R. A. A., Freitas, C. H. & Barbosa, A. A. (2016). Eventos extremos de precipita o no Sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(7), 2325-2340. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160166>

Christofoletti, A. (1969). Análise morfométrica de bacias hidrográficas. *Nota Geomorfológica*, 9(18), 35-64.

Christofoletti, A. (1974). *Geomorfologia*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 149pp.

Christofoletti, A. (1981). *Geomorfologia fluvial*. Edgard Blucher, São Paulo, Brazil, 152pp.

Cobbinah, P. B., Korah, P. I., Bardoe, J. B., Darkwah, R. M. & Nunbogu, A. M. (2022). Contested urban spaces in unplanned urbanization: Wetlands under siege. *Cities*, 121(103489). <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103489>

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). (1998). *Carta Geológica Guaratinguetá, Escala 1:250.000*. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, São Paulo, Brazil, 210 pp.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). (2020). Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. Escala 1:1.000.000. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Belo Horizonte, Brazil.

Defesa Civil (2020). Boletim Estadual de Proteção e Defesa Civil 2020, <http://www.sistema.defesacivil.mg.gov.br/index.php?modulo=cce&controller=cce&action=boletimsite> (last accessed January 2022).

Defesa Civil (2022). Sistema Integrado de Informações sobre Desastres Naturais 2022, <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/sistema-integrado-de-informacoes-sobre-desastres> (last accessed January 2022).

Ekmekcioğlu, O., Koc, K. & Özger, M. (2022). Towards flood risk mapping based on multi-tiered decision making in a densely urbanized metropolitan city of Istanbul. *Sustainable Cities and Society*, 80(103759). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103759>

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2015). ARCGIS Professional GIS for the desktop version 10.3, 1st ed., Environmental Systems Research Institute, Redlands, California, United States, 30 pp.

Ferreira, D. F. (2009). Estatística básica, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brazil, 664 pp.

Ferreira, G. G., Calmon, P., Fernandes, A. S. A. & Araújo, S. M. V. G. (2019). Política habitacional no Brasil: uma análise das coalizões de defesa do Sistema Nacional de Habitação de Interesse Social versus o Programa Minha Casa, Minha Vida. *Urbe Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 11(e20180012), 1-15. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.001.A004>

Fleischmann, A. S., Brêda, J. P. F., Rudorff, C., Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Papa, F. & Ravello, M. M. (2021). River Flood Modeling and Remote Sensing Across Scales: Lessons from Brazil. *Earth Observation for Flood Applications*, Elsevier, p. 61-103.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819412-6.00004-3>

Fundação João Pinheiro (FJP) (2019). Deficit habitacional no Brasil – 2016-2019. Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, Brazil, 169 pp.

Gailleton, B., Mudd, S. M., Club, F. J., Peifer, D. & Hurst, M. D. (2019). A segmentation approach for the reproducible extraction and quantification of knickpoints from river long profiles. *Earth Surface Dynamics*, 7, 211-230. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-211-2019>

Galvão, L. & Bernann, C. (2015). Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. *Estudos Avançados*, 29(84), 43-68. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142015000200004>

Gupta, D. S., Gosh, P. & Tripathi, S. K. (2017). A Quantitative Morphometric Analysis of Barhar River Watershed of Mahoba district, U.P., India using Remote Sensing and GIS. *Indian Journal of Science and Technology*, 10(11), 1-5. <https://doi.org/10.17485/ijst/2017/v10i11/109695>

Hasui, Y. (2010). A grande colisão Pré-Cambriana do Sudeste Brasileiro e a estruturação regional. *Geociências*, 29(2), 141-169.

Hora, S. B. & Gomes, R. L. (2009). Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do Município de Itabuna/BA. *Sociedade & Natureza*, 21(2), 57-75.

<https://doi.org/10.1590/S1982-45132009000200005>

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *GSA Bulletin*, 56(3), 275–370.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)

Kuntamalla, S., Nalla, M. G. S. & Saxena, P. R. (2018). Drainage Basin Analysis through GIS: A Case study of Lakhnapur Reservoir Watershed in Rangareddy District, Telangana State, India. *International Journal of Engineering, Science and Mathematics*, 7(3), 9-17.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22464.84484>

Landis, J. R. & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. <https://doi.org/10.2307/2529310>

Lin, J. M. & Billa, L. (2021). Spatial prediction of flood-prone areas using geographically weighted regression. *Environmental Advances*, 6(100118).
<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100118>

Mapbiomas Project. (2018). *Coleção 4 Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil*, <https://mapbiomas.org/en> (last accessed January 2022).

Mardhel, V, Pinson, S. & Allier, D. (2021). Description of an indirect method (IDPR) to determine spatial distribution of infiltration and runoff and its hydrogeological applications to the French territory. *Journal of Hydrology*, 592(125609).
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125609>

Martín-Díaz, J., Palma, P., Golijanin, J., Nofre, J., Oliva, M. & Čengić, N. (2018). The urbanisation on the slopes of SARAJEVO and the rise of geomorphological hazards during the post-war period. *Cities*, 72(A), 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.07.004>

Martins, C. M. S., Silva, B. C. & Pons, N. A. D. (2019). Estimativa de cheias em bacias hidrográficas com base em previsões de precipitação por conjunto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(5), 1713-1729. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.5.p1713-1729>

Minas Gerais. Secretária de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável.

(2015). Atlas da vulnerabilidade às inundações de Minas Gerais 2015, 1st ed., Secretária de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Belo Horizonte, Brazil, 231 pp.

Mingoti, S. A. (2007). Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 293 pp.

Molina, E. C. & González, A. L. M. (2020). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante inundaciones. Un ejercicio emergent ante el cambio climático. *Economía, sociedad y territorio*, 19(61), 543-574. <https://doi.org/10.22136/est20191342>

Nascimento, M. C. (2019). Problemas socioambientais causados pelas chuvas em cidades da região metropolitana de Maceió, Brasil. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 24(1276), 1-31. <https://doi.org/10.1344/b3w.0.2019.27489>

Nascimento, D. M. & Braga, R. C. Q. (2009). Déficit habitacional: um problema a ser resolvido ou uma lição a ser aprendida? *Risco Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo*, 2(9), 98-109. <https://doi.org/10.11606/issn.1984-4506.v0i9p98-109>

Nascimento Neto, P. (2020). A dimensão esquecida da política habitacional: reflexões a partir do caso da Área Metropolitana de Curitiba (PR). *Cadernos Metr pole*, 22(47), 215-246.

<https://doi.org/10.1590/2236-9996.2020-4710>

Purohit, K. & Parmar, M. K. (2017). Morphometric Analysis and Correlation between Morphometric Parameters with Mean Basin Altitude and Slope: A case study of Alaknanda Basin, Uttarakhand, India. *GJRA - Global Journal for Research Analysis*, 6(7), 27-30.

<https://doi.org/10.36106/gjra>

R CORE TEAM. (2020). R: A language and environment for statistical computing,

<http://www.r-project.org/> (last accessed January 2022).

Rezende, E. A. (2018). O papel da dinâmica espaço-temporal da rede hidrográfica na evolu o geomorfológica da alta/média bacia do Rio Grande, sudeste brasileiro. Ph.D. Thesis, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brazil.

Rezende, E. R. & Castro P. T. A. (2016). Varia o espacial e condicionantes do entalhamento fluvial na bacia do Rio Grande, Sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17(4), 645-659.

<https://doi.org/10.20502/rbg.v17i4.1045>

Rezende, E. A., Salgado, A. A. R. & Castro P. T. A. (2018). Evolu o da rede de drenagem e evidências de antigas conexões entre as bacias dos Rios Grande e São Francisco no sudeste brasileiro.

Revista Brasileira de Geomorfologia, 19(3), 483-501. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i3.1304>

Rezende, E. A. & Salgado, A. A. R. (2020). Considerações sobre a gênese do vale suspenso do alto Rio Preto na borda da Bacia de Resende. *Revista do Departamento de Geografia da USP*, 40(1), 49-60. <https://doi.org/10.11606/rdg.v40i0.165775>

Ribeiro, A. S., Mincato, R. L., Curi, N. & Kawakubo, F. S. (2016). Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica pelo processo analítico hierárquico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(1), 16-31. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p016-031>

Sangman, F. & Balamurugan, G. (2017). Morphometric Analysis of Kakoi River Watershed for Study of Neotectonic Activity Using Geospatial Technology. *International Journal of Geosciences*, 8(11), 1384-1403. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.811081>

Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araujo Filho, J. C., Oliveira, J. B. & Cunha, T. J. F. (2018). *Brazilian Soil Classification System*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília, Brazil, 356 pp.

Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *GSA Bulletin*, 67(5), 597-646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)

Scolforo, J. R. S., Mello, J. M. & Silva, C. P. C. (2008). *Inventário Florestal de Minas Gerais: Floresta Estacional Semidecidual e Ombrófila – Florística, Estrutura, Diversidade, Similaridade, Distribuição diamétrica e de altura, Volumetria e Tendências de crescimento e Áreas aptas para manejo florestal*, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brazil, 1029 pp.

Servidoni, L. E., Teodoro, A. E. M., Mincato, R. L. & Santos, C. A. (2019). Avaliação de risco a enchentes e inundações por krigagem ordinária em sistemas de informação geográfica. *Caderno de Geografia*, 29(1), 126-143. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29nespp126>

Servidoni, L. E., Ayer, J. E. B., Estella, P. V. M., Oliveira, G. H. & Mincato, R. L. (2021). Atributos morfométricos e hidrológicos da Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí, Minas Gerais. *Revista do Departamento de Geografia*, 41(1), e169817. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.169817>

Silva, V. P. R., Silva, M. T., Singh, V. P., Souza, E. P., Braga, C. C., Holanda, R. M., Almeida, R. S. R., Sousa, F. A. S. & Braga, A. C. R. (2018). Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. *Catena*, 162, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

Szlafsztein C. F. & Araújo, A. N. B. (2021). Autonomous flood adaptation measures in Amazonian cities (Belem, Brazil). *Natural Hazards*, 108, 1069-1087. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04720-x>

Tamiru, H. & Dinka M. O. (2021). Application of ANN and HEC-RAS model for flood inundation mapping in lower Baro Akobo River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100855. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100855>

Taofik, O. K., Innocent, B., Christopher, N., Jidauna, G. G. & James, A. S. A. (2017). Comparative Analysis of Drainage Morphometry on Hydrologic Characteristics of Kereke

and Ukoghor Basins on Flood Vulnerability in Makurdi Town, Nigeria. *Hydrology*, 5(3), 32-40. <https://doi.org/10.11648/j.hyd.20170503.11>

Tesema, T. A. (2021). Impact of identical digital elevation model resolution and sources on morphometric parameters of Tena watershed, Ethiopia. *Heliyon*, 7(11), e08345. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08345>

Tsatsaris, A., Kalogeropoulos, K., Stathopoulos, N., Louka, P., Tsanakas, K., Tsesmelis, D. E., Krassanakis, V., Petropoulos, G. P., Pappas, V. & Chalkias, C. (2021). Geoinformation Technologies in Support of Environmental Hazards Monitoring under Climate Change: An Extensive Review. *International Journal of Geo-Information*, 10(2), 94-127. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020094>

Uddin, K. & Matin, M. A. (2021). Potential flood hazard zonation and flood shelter suitability mapping for disaster risk mitigation in Bangladesh using geospatial technology. *Progress in Disaster Science*, 11, 100185. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2021.100185>

United States Geological Survey (USGS) (2014). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Version 2, <https://earthexplorer.usgs.gov/> (last accessed January 2022).

Waghwal, R. & Agnihotri, P. G. (2019). Flood risk assessment and resilience strategies for flood risk management: A case study of Surat City. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 40, 101155. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101155>

Ward, P. J., Blauhut, V., Bloemendaal, N., Daniell, J. E., Ruiter, M. C., Duncan, M. J., Emberson, R., Jenkins, S. F., Kirschbaum, D., Kunz, M., Mohr, S., Muis, S., Riddell, G. A., Schäfer, A., Stanley, T., Veldkamp, T. I. E. & Winsemius, H. C. (2020). Review article: Natural hazard risk assessments at the global scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 1069-1096. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1069-2020>

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aspecto mais relevante desde trabalho foi identificar que as políticas públicas de combate às enchentes devem ser abordadas e elaboradas por equipe multidisciplinar. Com um espectro de áreas que envolva além de profissionais da área técnica ambiental, profissionais de engenharia civil, urbanistas e também profissionais das áreas de ciências humanas como antropólogos, sociólogos e psicólogos.

Outra observação importante é que o impacto ocasionado pelas enchentes no Brasil está intimamente ligado a questão habitacional no Brasil. O mapeamento das características da população em risco de desastres no Brasil realizado por Alvalá *et al.* (2019) possibilitou traçar um perfil daqueles que sofrem com as enchentes de forma intensa. Alvalá *et al.* (2019) constataram que em 2010, 16% das populações de cidades pequenas estavam em risco, mas apenas 8% estavam em grandes cidades. No Brasil, os habitantes de cidades de pequeno e médio porte são mais vulneráveis às inundações do que os de centros regionais e metropolitanos, tanto pelo menor grau de infraestrutura técnica e operacional quanto pela falta de propostas consolidadas de planejamento de uso e ocupação do solo no zoneamento municipal.

Os municípios em áreas de risco devem elaborar, em conjunto, planos de contingência que sigam mapas de risco definidos e procedimentos de defesa civil. Assim, os gestores públicos devem incorporar a ciência e as técnicas nas tomadas de decisão para reduzir ou minimizar as perdas de vidas e materiais. Da mesma forma, é possível identificar antecipadamente áreas suscetíveis a inundações. Atualmente, os órgãos governamentais têm tomado medidas para conter as enchentes como consequência direta do uso e ocupação inadequada do solo. Se as ocupações das áreas fossem baseadas em seus atributos físicos e hidrológicos, os planos de contingência seriam aprimorados. Portanto, nossa proposta, se implementada, evitaria novas tragédias ao adotar procedimentos simples e de baixo custo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. A. *et al.* A. Análise morfométrica de uma sub-bacia do rio Piracicaba (MG) utilizando sistemas de informação geográfica. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, p. 372-380, 2017. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v25i4.815>
- ALVALÁ, R. C. S. *et al.* Mapping characteristics of at-risk population to disasters in the context of Brazilian early warning system. **International Journal of Disasters Risk Reduction**, v. 41, p. 101326, 2019. DOI: 10.1016/j.ijdr.2019.101326.
- ARANTES, L. T. *et al.* Surface runoff associated with climate change and land use and land cover in southeast region of Brazil. **Environmental Challenges**, Amsterdam, v. 3, n.1, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100054>
- ARDAYA, A. B.; EVERS, M.; RIBBE, L. Participatory approaches for disaster risk governance? Exploring participatory mechanisms and mapping to close the communication gap between population living in flood risk areas and authorities in Nova Friburgo Municipality, RJ, Brazil. **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 88, n.1, p. 1-13, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104103>
- BRASIL. Secretaria de Defesa Civil. **Sistema integrado de informações sobre desastres naturais**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/sistema-integrado-de-informacoes-sobre-desastres>. Acesso em: 1 abr. 2023.
- CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 9, n.18, p. 35-64, 1969.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 1. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1974.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.
- EKMEKCIOĞLU, O.; KOC, K.; ÖZGER, M. Towards flood risk mapping based on multi-tiered decision making in a densely urbanized metropolitan city of Istanbul. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v. 80, n. 1, p. 1 – 18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103759>
- FERGUSON, C. R.; FENNER, R. A. The potential for natural flood management to maintain free discharge at urban drainage outfalls. **Journal of Flood Risk Management**, Nova Jersey, v. 13, n. 3, p.1-15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12617>
- FERREIRA, D. F. **Estatística básica**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2009.
- FISHER, R. A. The use of multiple measurements in taxonomic problems. **Annals of Eugenics**, Washington, v. 7, n. 1, p. 179-188, 1936. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1936.tb02137.x>.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of American Bulletin**, Washington, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2.

KHATTREE, R.; NAIK, D. N. **Multivariate data reduction and discrimination with SAS software**. 1. ed. Cary: SAS Institute, 2000.

KUNTAMALLA, S.; NALLA, M.; SAXENA, P. R. Drainage basin analysis through GIS: a case study of Lakhnapur reservoir watershed in Rangareddy district, Telangana State, India. **International Journal of Engineering, Science and Mathematics**, Jahadhri, v. 7, p. 9-17, 2018. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22464.84484>

LIN, J. M.; BILLA, L. Spatial prediction of flood-prone areas using geographically weighted regression. **Environmental Advances**, Amsterdam, v. 6, n. 1, p. 100- 118, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100118>

MEDHI, B.; CHAKRAVARTTY, M.; PATGIRI, A. D. Inferring hydrological characteristics of Gabharu river basin, North-East India, based on the application of some important morphometric parameters. **Global Journal for Research Analysis**, Gujarat, v. 6, p. 10-12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.36106/gira>

MOLINA, E. C.; GONZÁLEZ, A. L. M. Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante inundaciones. Un ejercicio emergent ante el cambio climático. **Economía, Sociedad y Territorio**, Zinacantepec, v. 19, n. 61, p. 543-574, 2020. DOI: <https://doi.org/10.22136/est20191342>

PUROHIT, K.; PARMAR, M. K. Morphometric analysis and correlation between morphometric parameters with mean basin altitude and slope: a case study of Alaknanda basin, Uttarakhand, India. **GJRA - Global Journal for Research Analysis**, Gujarat, v. 6, n.7, p. 27-30, 2017. DOI: <https://doi.org/10.36106/gjra>

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **GSA Bulletin**, McLean, v. 67 n. 5, p. 597-646, 1956. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)

SILVA, V. P. R. *et al.* Simulation of stream flow and hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. **Catena**, Amsterdam, v. 162, n. p. 166-176, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.024>

ANEXOS

ANEXO A – Cópia da carta de aceite enviada pelo corpo editorial da Revista Brasileira de Geomorfologia.

Autores: Lucas Emanuel Servidoni; Derielsen Brandão Santana, Guilherme Henrique Expedito Lense, Taya Cristo Parreiras, Joaquim Ernesto Bernardes Ayer, Felipe Gomes Rubira e Ronaldo Luiz Mincato.

Prezados autores Lucas Emanuel Servidoni, Derielsen Brandão Santana, Guilherme Henrique Expedito Lense, Taya Cristo Parreiras, Joaquim Ernesto Bernardes Ayer, Felipe Gomes Rubira e Ronaldo Luiz Mincato,

É um prazer comunicar o aceite do seu artigo #2287, intitulado "Detection of vulnerable areas to the occurrence of floods in tropical regions, from morphometric attributes" para publicação na Revista Brasileira de Geomorfologia (RBG).

Seu trabalho será enviado para a editoração da RBG para o cumprimento do estilo e formato da revista.

Obrigado pela sua contribuição para a Revista Brasileira de Geomorfologia.

Os meus sinceros agradecimentos.

Atenciosamente,

Édipo Cremon
Editor da RBG

Revista Brasileira de Geomorfologia
<https://rbgeomorfologia.org.br>

ANEXO B – Cópia da carta de aceite enviada pelo corpo editorial da Earth Science Research Journal.

Autores: Lucas Emanuel Servidoni, Joaquim Ernesto Bernardes Ayer, Guilherme Henrique Expedito Lense, Felipe Gomes Rubira, Velibor Spalevic, Branslav Dudic e Ronaldo Luiz Mincato.

Lucas Emanuel Servidoni, Joaquim Ernesto Bernardes Ayer, Guilherme Henrique Expedito Lense, Felipe Gomes Rubira, Velibor Spalevic, Branslav Dudic, Ronaldo Luiz Mincato:

We have reached a decision regarding your submission to Earth Sciences Research Journal, "METHODOLOGICAL PROPOSAL TO REMOTE DETECTION AND MANAGEMENT OF AREAS THAT ARE NATURALLY VULNERABLE TO FLOODS."

We decided to accept your submission for publication in our first Volume of 2023.

You would check our format for references at the following link.

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/esrj/about/submissions#authorGuidelines>

Include the DOI in those references having one.

Please, confirm the reception of this message. During this process step, refrain from sending the manuscript to other journals.

ALEXANDER CANEVA

Editor-in-Chief

ESRJ - Earth Sciences Research Journal

<http://www.esrj.unal.edu.co>

Facultad de Ciencias

Departamento de Geociencias

Universidad Nacional de Colombia

ANDRÉS TORRES

Assistant Editorial

Bogotá D.C.