

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



RAMON OCTAVIANO DE CASTRO MATOSO

**PERSPECTIVA HIDROLÓGICA E MORFOLÓGICA NO CONTEXTO DAS
INUNDAÇÕES URBANAS EM ESPERA FELIZ - MG**

JUIZ DE FORA
2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Octaviano de Castro Matoso, Ramon.

Perspectiva Hidrológica e Morfológica no Contexto das Inundações Urbanas em Espera Feliz - MG / Ramon Octaviano de Castro Matoso. -- 2023.

143 f.

Orientador: César Henrique Barra Rocha

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2023.

1. Inundação. 2. Modelos Algébricos. 3. Hidrologia. 4. Morfologia. 5. Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto.. I. Henrique Barra Rocha , César, orient. II. Título.

RAMON OCTAVIANO DE CASTRO MATOSO

**PERSPECTIVA HIDROLÓGICA E MORFOLÓGICA NO CONTEXTO DAS
INUNDAÇÕES URBANAS EM ESPERA FELIZ - MG**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós graduação em Geografia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito para obtenção do título de mestre em Geografia na área de concentração: Dinâmicas Sócio Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. César Henrique Barra Rocha

Aprovada em 28 de setembro de 2023

Prof. D.Sc. César Henrique Barra Rocha - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. D.Sc. Pedro José de Oliveira Machado
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.^a D.Sc. Ana Clara Mourão Moura
Universidade Federal de Minas Gerais

Dedico este trabalho à memória de minha
querida tia, Maria da Conceição de Castro,
descanse em paz.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha gratidão a Deus pela dádiva da vida, e celebro esta conquista entregando o melhor de mim. Aproveitei cada momento dessa jornada maravilhosa em busca da excelência. Durante a trajetória proporcionada pela oportunidade do mestrado, descobri que ser inteligente transcende o mero domínio das palavras difíceis, de leituras robustas ou a realização de cálculos abstratos e complexos. A verdadeira inteligência é manifestada ao reconhecermos nossas limitações, ao buscarmos constantemente o aprimoramento e, acima de tudo, cultivarmos a humildade.

Agradeço profundamente meu orientador, Professor César Henrique Barra Rocha, por me guiar na direção da humildade. Suas lições sobre a importância do trabalho em equipe, e o valor de se doar aos outros foram fundamentais. Tenho a certeza de que estou colocando meu coração em tudo o que faço, e isso é graças aos ensinamentos do Professor. Muito obrigado.

Agradeço à minha família, que sempre acreditou em mim e me proporcionou apoio constante. Nos momentos mais desafiadores dessa jornada, estiveram ao meu lado, consolando-me nas lágrimas de uma perda enorme e incentivando-me a perseverar, reafirmando que vale a pena continuar a luta, pois a vida merece nossa melhor versão.

Quero agradecer por este momento especial aos meus pais, os maiores amores que tenho nesta vida. Agradeço imensamente por insistirem no meu sucesso. Amo vocês sinceramente. E, por último, mas não menos importante, expresso minha gratidão à minha noiva. Além de me dar forças para enfrentar os desafios, esteve ao meu lado durante as batalhas que a vida nos apresentou. Soube proporcionar-me o espaço e o amor necessário para que eu pudesse entregar o meu melhor neste trabalho. Muito obrigado.

Por fim, reitero minha gratidão a Deus por Ele me dar serenidade para aceitar as coisas que eu não posso modificar, coragem para modificar aquelas que posso, e sabedoria para reconhecer a diferença entre as que eu posso modificar e as que eu não posso. Sem Deus, nada sou.

RESUMO

Nesta pesquisa, o uso das geotecnologias foi preponderante na compreensão dos fenômenos causadores dos impactos socioambientais relacionados às inundações urbanas. A crescente gravidade desses impactos na sociedade em geral evidencia uma realidade cada vez mais complexa, exigindo a busca por soluções efetivas. Outro fator crucial considerado no presente trabalho foi a busca por uma abordagem interdisciplinar, inclusive o uso de modelos algébricos com o propósito de identificar áreas com maior susceptibilidade à ocorrência de inundações urbanas. Além disso, o modelo hidrológico do Soil Conservation Service foi empregado neste estudo para investigar as mudanças nas dinâmicas hidrográficas do escoamento superficial em diferentes datas. Esse modelo abrange os anos de 1991 e 2021, permitindo uma análise comparativa do uso e cobertura do solo ao longo desse período. Por fim, os estudos morfológicos com cálculos e parâmetros, buscaram compatibilizar as escalas para detalhar e interpretar as tendências naturais das bacias hidrográficas em análise. Tais estudos propiciaram uma compreensão mais aprofundada das características e configurações das bacias hidrográficas em questão.

As investigações multidisciplinares realizadas em Espera Feliz, Minas Gerais, revelaram uma realidade em que a ocorrência dos eventos de inundações urbanas, é fortemente influenciada pelas características morfológicas das bacias hidrográficas estudadas. Verificou-se que a tendência natural desses eventos está intrinsecamente relacionada às características físicas da região. Embora tenham sido analisados dados referentes ao uso e cobertura do solo ao longo dos anos, não foram identificadas interferências significativas capazes de justificar o aumento da recorrência desses eventos extremos com base neste parâmetro. Isso enfatiza a importância das análises morfológicas, comparando-as com modelos hidrológicos para a compreensão completa dos fatores que influenciam a dinâmica hidrográfica local.

Ao integrar conhecimentos e abordagens de diferentes ciências, este estudo buscou identificar soluções com embasamento científico, considerando as melhores práticas descritas na literatura.

Palavras-chave: Inundações, Modelos Algébricos, Hidrologia, Morfologia, Geoprocessamento, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

In this research, the use of geotechnology was key to understanding phenomena originator from socio-environmental impacts related to urban inundation. The growing severity of such impacts to society in general uncovers an increasingly complex reality, thus requiring the pursuit of effective solutions. Another crucial factor considered in this paper was the search for an interdisciplinary approach, including the use of algebraic models to identify areas more prone to the occurrence urban inundation. The Soil Conservation Service hydrologic model was used in this study to provide insight into the shifts in hydrographic dynamics of surface runoff in different points in time. Said model was applied to the years 1991 and 2021, allowing for a comparative analysis of land use and cover in the resulting timeframe. Lastly, the aim of the morphologic studies—with calculations and parameters—was to produce compatible scales, so as to break down and interpret the natural trends of the analyzed drainage basins. These studies provided a deeper understanding of the aforementioned drainage basins' features and arrangements. The multidisciplinary investigations conducted in Espera Feliz, Minas Gerais show a reality in which the occurrence of urban inundation events is strongly influenced by the morphologic features of the studied drainage basins. It was found that the natural trend of such events is intrinsically related to the morphologic aspects of the region. Despite the analysis of land use and cover data over the years, there was no significant interference detected that could explain the increasing recurrence of said events based on this parameter. This emphasizes the importance of morphologic analysis, which is then compared to hydrologic models so as to provide a comprehensive understanding of the factors that influence local hydrographic dynamics.

By integrating knowledge and approaches from different fields of science, this study sought to identify scientifically backed solutions, considering best practices described in academic literature.

Keywords: Inundation, Algebraic Models, Hydrology, Morphology, Geoprocessing, Remote Sensing.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	7
2.1	OBJETIVO GERAL.....	7
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1	BACIA HIDROGRÁFICA.....	8
3.2	ALAGAMENTOS, ENCHENTES E INUNDAÇÕES (INUNDAÇÕES URBANAS).....	9
3.3	RELAÇÃO ÁGUA X SOLO X VEGETAÇÃO.....	12
3.4	TERRITÓRIO.....	14
4	METODOLOGIA.....	16
4.1	EXPLICAÇÃO GERAL DA METODOLOGIA.....	16
4.1.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	18
4.1.2	DEFINIÇÃO DO RECORTE TERRITORIAL.....	18
4.1.3	AQUISIÇÃO DAS BASES DE DADOS DE ACESSO LIVRE.....	19
4.1.4	ROTINAS DE CÁLCULOS PRELIMINARES.....	23
4.1.5	ROTINA DE CÁLCULOS FINAIS.....	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1	RESULTADOS DA HIERARQUIZAÇÃO E GERAÇÃO DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE.....	45
5.2	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO SOIL CONSERVATION SERVICE E GERAÇÃO DO MAPA DA PLUMA ALAGÁVEL.....	66
5.3	RESULTADOS DAS APLICAÇÕES DOS INDICADORES MORFOLÓGICOS.....	91
6	CONCLUSÃO.....	105
7	RECOMENDAÇÕES.....	108
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
9	APÊNDICE PÓS-TEXTUAL.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coordenadas planas de localização geográfica.....	3
Figura 2 - Abastecimento de água na área urbana de Espera Feliz	5
Figura 3 - Rede de coleta e destinação final de esgoto.....	6
Figura 4 - Resíduos sólidos	6
Figura 5 - Ilustração inundações e enchentes	9
Figura 6 - Ilustração de alagamento urbano	10
Figura 7 - Fluxograma dos processos realizados na pesquisa	17
Figura 8 - Recorte territorial adotado.	18
Figura 9 - Ilustração dos parâmetros do hidrograma unitário triangular.....	28
Figura 10 - Modelo Tridimensional de Espera Feliz (MG) (HIPSOMETRIA)	40
Figura 11 - Declividade	41
Figura 12 - Acumulação de fluxo	41
Figura 13 - Hidrografia.....	42
Figura 14 - Modelo pluviométrico.....	43
Figura 15 - Uso e cobertura do solo 1991	44
Figura 16 - Uso e cobertura do solo 2021	45
Figura 17 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 1991	50
Figura 18 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 2021	51
Figura 19 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 1991	52
Figura 20 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 2021	53
Figura 21 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 1º Quadrante - 2021	54
Figura 22 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 2º Quadrante - 2021	55
Figura 23 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 3º Quadrante - 2021	56
Figura 24 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 4º Quadrante - 2021	57
Figura 25 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 5º Quadrante - 2021	58
Figura 26 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 6º Quadrante - 2021	59
Figura 27 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 1º Quadrante - 2021	60
Figura 28 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 2º Quadrante - 2021	61
Figura 29 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 3º Quadrante - 2021	62
Figura 30 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 4º Quadrante - 2021	63
Figura 31 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 5º Quadrante - 2021	64

Figura 32 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 6º Quadrante - 2021	65
Figura 33 - Mapa de separação das seções pesquisadas	66
Figura 34 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 1 (1991).....	67
Figura 35 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 1 (2021).....	68
Figura 36 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 2 (1991).....	68
Figura 37 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 2 (2021).....	69
Figura 38 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 3 (1991).....	69
Figura 39 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 3 (2021).....	70
Figura 40 - Hidrograma triangular – seção 1	73
Figura 41 - Hidrograma triangular – seção 2.....	73
Figura 42 - Hidrograma triangular – seção 3.....	73
Figura 43 - Hidrograma da convolução 1991 – Seção 1	77
Figura 44 - Hidrograma da convolução 2021 – Seção 1	77
Figura 45 - Hidrograma da convolução 1991 – Seção 2	78
Figura 46 - Hidrograma da convolução 2021 – Seção 2	78
Figura 47 - Hidrograma da convolução 1991 – Seção 3	79
Figura 48 - Hidrograma da convolução 2021 – Seção 3	79
Figura 49 - Relatório canal – seção 1	81
Figura 50 - Relatório canal – seção 2	81
Figura 51 - Relatório canal – seção 3	82
Figura 52 - Pluma alagável geral – Bacia do Rio São João.....	83
Figura 53 - Pluma alagável com imagem de satélite.....	84
Figura 54 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 1	85
Figura 55 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 2	86
Figura 56 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 3	87
Figura 57 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 4	88
Figura 58 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 5	89
Figura 59 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 6	90
Figura 60 - Parâmetros morfológicos – áreas e perímetros	91
Figura 61 - Parâmetros morfológicos – hierarquização fluvial seção 1	92
Figura 62 - Parâmetros morfológicos – hierarquização fluvial seção 2	93
Figura 63 - Parâmetros morfológicos – hierarquização fluvial seção 3	93
Figura 64 - Distâncias e comprimentos	101
Figura 65 - Perfil longitudinal seção 1	102

Figura 66 - Perfil longitudinal seção 2	103
Figura 67 - Perfil longitudinal seção 3	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Escala fundamental de Saaty	25
Quadro 2 - Períodos de retorno (TR) para diferentes ocupações da área	30
Quadro 3 - Taxas de infiltração sugeridas por diferentes pesquisadores	33
Quadro 4 - Resultados das médias anuais das estações pluviométricas	43
Quadro 5 - Matriz de hierarquização 1	46
Quadro 6 - Matriz de hierarquização 2	46
Quadro 7 - Notas de reclassificação da hipsometria	47
Quadro 8 - Notas de reclassificação da declividade	47
Quadro 9 - Notas de reclassificação do uso e cobertura do solo	48
Quadro 10 - Notas de reclassificação pluviométrica	48
Quadro 11 - Notas de reclassificação da acumulação de fluxo	48
Quadro 12 - Valores de uso e cobertura do solo	71
Quadro 13 - Resultado do SCS – seção 1	71
Quadro 14 - Resultado do SCS – seção 2	72
Quadro 15 - Resultado do SCS – seção 3	72
Quadro 16 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 1 – 1991	74
Quadro 17 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 1 – 2021	74
Quadro 18 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 2 – 1991	75
Quadro 19 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 2 – 2021	75
Quadro 20 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 3 – 1991	76
Quadro 21 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 3 – 2021	76
Quadro 22 - Parâmetros morfológicos – áreas e perímetros	92
Quadro 23 - Hierarquização fluvial - seção 1	94
Quadro 24 - Hierarquização fluvial - seção 2	94
Quadro 25 - Hierarquização fluvial - seção 3	94
Quadro 26 - Relação de bifurcação seção 1	96
Quadro 27 - Relação de bifurcação, seção 1 + seção 2	96

Quadro 28 - Relação de bifurcação seção 3	96
Quadro 29 - Comprimento dos rios principais	96
Quadro 30 - Valores de referência de densidade de drenagem	97
Quadro 31 - Resultados do Dd e Cm.....	97
Quadro 32 - Resultados do índice de circularidade	98
Quadro 33 - Resultados da declividade média	99
Quadro 34 - Classificação das declividades médias.....	100
Quadro 35 - Resultados do coeficiente de rugosidade	100
Quadro 36 - Resultados do índice de sinuosidade.....	101
Quadro 37 - Resultados dos gradientes altimétricos	104
Quadro 38 - Convolução da vazão de drenagem do Rio São João seção 1 – 1991.....	126
Quadro 39 - Convolução da vazão de drenagem do Rio São João seção 1 – 2021.....	127
Quadro 40 - Convolução da vazão de drenagem do Rio São João seção 2 – 1991.....	128
Quadro 41 - Convolução da vazão de drenagem do Rio São João seção 2 – 2021.....	129
Quadro 42 - Convolução da vazão de drenagem do Rio Caparaó seção 3 – 1991.....	130
Quadro 43 - Convolução da vazão de drenagem do Rio Caparaó seção 3 – 2021.....	131

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a civilização humana criou raízes no entorno dos rios e, com o passar dos séculos, segundo Paixão et al. (2018), o que antes era crucial para o seu desenvolvimento se tornou um problema de saneamento e saúde, gerando grandes empecilhos para o desenvolvimento econômico da sociedade, seja por questões referentes ao mau cheiro dos esgotos, falta de água limpa, enchentes, alagamentos, inundações, proliferações de doenças, ou questões de desmoronamentos devido a modificações morfológicas do relevo associadas às reações do meio natural em busca do seu equilíbrio. Nesse contexto, o presente estudo utiliza como prerrogativa o uso de bases de dados gratuitas em termos hidrológicos e morfológicos, buscando apontar os motivos e possíveis agravamentos decorrentes de inundações, alagamentos e enchentes no domínio territorial do município de Espera Feliz – MG, indo além da escala urbana, com uma ampliação para áreas rurais, distritos e municípios a montante da área urbana central de Espera Feliz.

Os estudos da morfologia, associados a um panorama histórico, configuram um poderoso recurso metodológico no estudo dos padrões de ocupação urbana, ganhando perspectiva no uso dos recursos hídricos. Os estudos dos padrões morfológicos potencializam a compreensão do espaço físico, não somente como um palco dos eventos, mas como o pivô das suas origens. Nesse contexto, em que existe disponibilidade hídrica dos recursos fluviais, também existem problemáticas das questões de inundações, alagamentos e enchentes. Um fator relevante a ser destacado refere-se à utilização da interdisciplinaridade das aplicações de modelos hidrológicos, associados com fatores morfológicos e de cunho algébrico.

Existem diversos fatores que impactam as relações socioambientais em ambientes urbanos. A expansão urbana traz consigo alguns desafios, sejam eles sociais, ambientais ou econômicos. Por outro lado, o planejamento urbano visa prevenir e mitigar esses impactos em decorrência de sua expansão. Pode-se dizer que a expansão urbana deve caminhar junto com o planejamento, fomentando o desenvolvimento sustentável através de políticas públicas e infraestrutura.

Segundo Matoso, Souza & Rocha (2021), uma maneira interessante de manter o monitoramento de áreas urbanas é a utilização da base de dados do MapBiomas, que apresenta resultados testados e validados, promovendo uma visão macroscópica do

desenvolvimento do recorte territorial e temporal objeto de análise, sendo, portanto, uma ferramenta essencial para o presente trabalho.

A metodologia para buscar desenvolver todos esses fatores necessita de uma hierarquização para produzir o mapeamento de susceptibilidade a alagamento, que neste trabalho foi desenvolvido utilizando diversos subprodutos, culminando no mapeamento através de um recorte territorial e temporal em um horizonte de 30 anos.

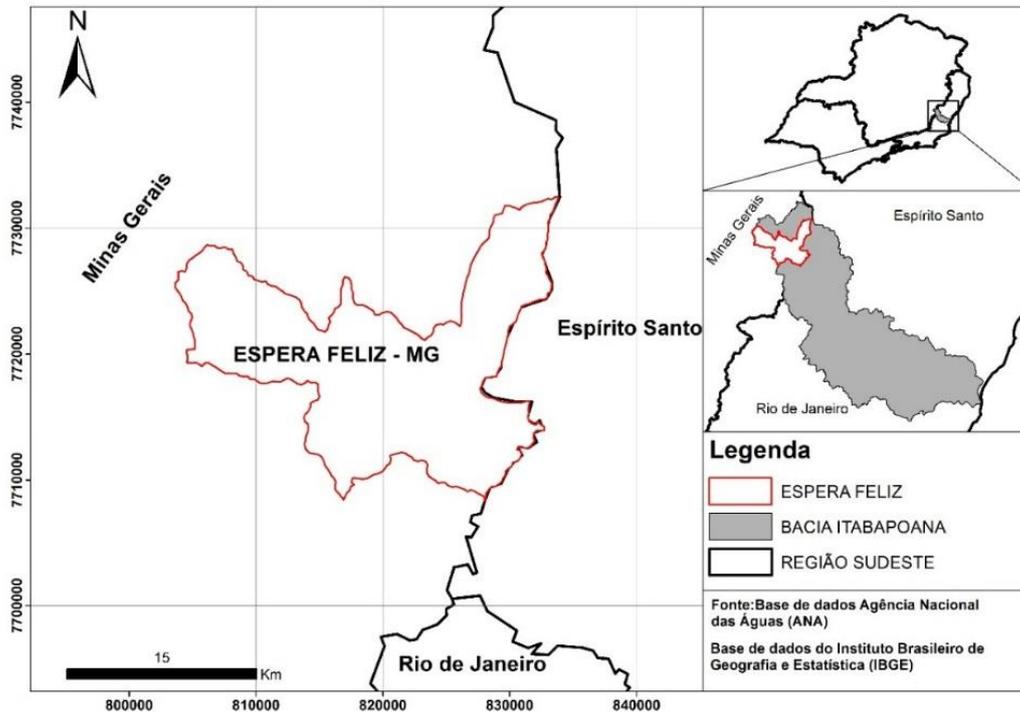
Após o desenvolvimento dos mapeamentos de susceptibilidade, fez-se necessário o desenvolvimento de modelos hidrológicos, em que foi possível verificar a ordem de grandeza das vazões do escoamento superficial nas bacias hidrográficas estudadas, e dessa forma gerou-se o mapeamento da pluma de alagamento, por intermédio de seus resultados.

Por fim, a associação da geotecnologia na criação de indicadores morfológicos auxilia na gestão e controle dos impactos socioambientais em ambientes urbanos e rurais. O uso de bases de dados gratuitas permite compreender a dinâmica hidrológica da região, através do confronto de base de dados de uso e cobertura do solo com suas dinâmicas temporais. Esse processo de verificação e simulação possibilita a identificação dos melhores caminhos a serem trilhados pela sociedade.

Em suma, a integração da geotecnologia, morfologia e modelos hidrológicos é fundamental para o gerenciamento dos recursos hidrológicos em ambientes urbanos e rurais. O conhecimento e a aplicação adequada dessas ferramentas contribuem para o desenvolvimento sustentável e para a mitigação dos impactos socioambientais causados por fenômenos hidrológicos em tais ambientes.

O presente trabalho está centrado no município de Espera Feliz, situado no estado de Minas Gerais, na divisa com o Espírito Santo. Essa localidade está inserida na Zona da Mata mineira, antiga denominação de regiões geográficas do Brasil. É importante destacar que a nomenclatura “Zona da Mata” foi extinta pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em 2017. Entretanto, foi estabelecida uma nova denominação para a região, que segundo IBGE (2017), Espera Feliz encontra-se na Região Geográfica Imediata de Carangola, tendo como aspecto geral formações montanhosas. O município está compreendido entre as coordenadas planas Universal Transversa de Mercator (UTM) Sirgas 2000 zona 23 sul, apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Coordenadas planas de localização geográfica



Fonte: desenvolvido pelo autor.

O clima da região é tropical de altitude. Segundo Horn & Soares (2007), trata-se do clima subtropical a tropical, com duas estações bem definidas, com chuvas intensas e duradouras de novembro a abril e seca nos períodos restantes. A temperatura varia de 25°C a 12°C no centro urbano; já nas altitudes maiores no topo da Serra do Caparaó, as temperaturas podem chegar a 0°C no inverno. Com esse clima, o cultivo de café ganha destaque. Segundo De Oliveira Ferreira et al. (2020), a produção de café associada à inauguração da estrada de ferro, entre 1911 e 1915, colaborou diretamente para o desenvolvimento econômico e administrativo da cidade.

Na região territorial do que hoje é conhecido como Espera Feliz, a mão de obra escrava era usada como força de trabalho, assim como em grande parte dos municípios mineiros no século XIX. Logo, o motor da formação social e da propriedade privada teve grande influência do período escravista, ou seja, os trabalhadores — com ou sem recursos — contribuíram para o desenvolvimento e ocupação do território. Segundo De Oliveira Ferreira et al. (2020), outro fator muito relevante foi a criação das estações ferroviárias

que foram instaladas na localidade, no século XX, mais especificamente no ano de 1913, ligando a cidade ao litoral do Espírito Santo e ao Rio de Janeiro.

A formação administrativa do município de Espera Feliz, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), se deu pelo Decreto-Lei n.º 148 de 17/12/1938, figurando em seu território os distritos Sede, Caiana e Caparaó. Dessa forma, a instalação do município de Espera Feliz ocorreu em 01/01/1939. Com a instalação do município veio seu primeiro prefeito, o Bacharel José Augusto Ferreira Filho. Assim começou a formação administrativa de Espera Feliz, que se subordinava ao termo e comarca de Carangola.

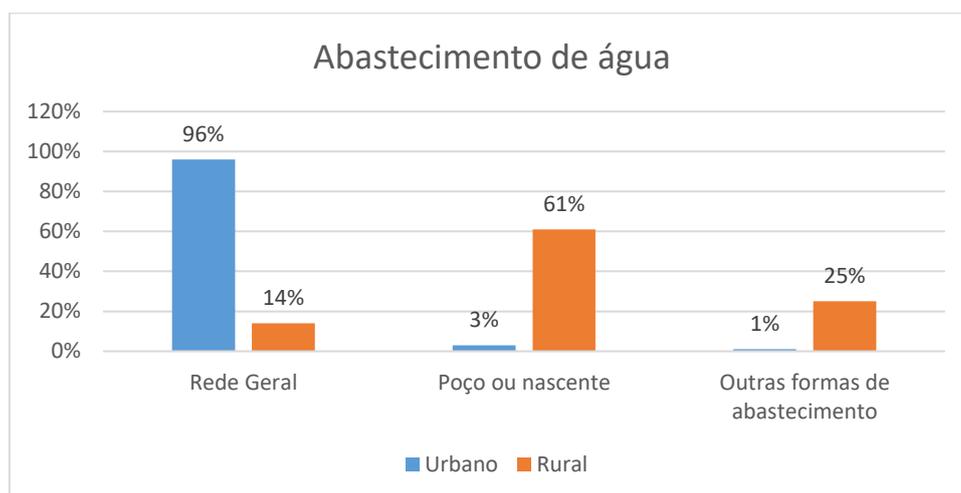
Desde sua origem, o município teve uma relação direta com a agricultura, principalmente no que se refere ao café. Segundo Ferreira (1959), em 1950 o café já se destacava nas colheitas, representando 67,91% sobre o total do valor da produção agrícola no município. Com o passar dos anos, conforme demonstrado no trabalho De Oliveira Ferreira et al. (2020), o café continuou sendo um ponto forte da economia local e atualmente vem agregando valor pela qualidade nos processos.

De acordo com o último censo do IBGE (2010), os trabalhadores do agronegócio nas zonas rurais do município de Espera Feliz totalizam 8.422 pessoas (aproximadamente 34% da população local), que são impactadas diretamente por este nicho de mercado, no cultivo de milho, feijão, café, silvicultura, entre outros produtos. Porém, o destaque se dá pelo café do tipo exportação. Esse dado aponta que o trabalho no campo ainda tem um peso grande na economia local, considerando que a última estimativa de população realizada pelo IBGE (2010) projetou 24.773 habitantes.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), o produto interno bruto do município de Espera Feliz é de R\$16.890,30 por habitante. A economia local está balizada entre agronegócio, pecuária e turismo. O principal destino dos turistas na região é o Parque Nacional do Caparaó, que abriga o terceiro ponto mais alto do País, o Pico da Bandeira, com 2.892 metros. Segundo Garcia Leite Júnior (2018), o perfil dos turistas que procuram a localidade é de jovens na faixa etária entre 18 a 24 anos, em sua maioria homens (54,7% do sexo masculino), sendo que 34% dos visitantes têm renda mensal entre 2 e 6 salários mínimos. A principal demanda é constituída pela motivação dos turistas em adquirir serviços, como: hospedagem, lazer, cultura, entretenimento, recreação, dentre outras tantas possibilidades.

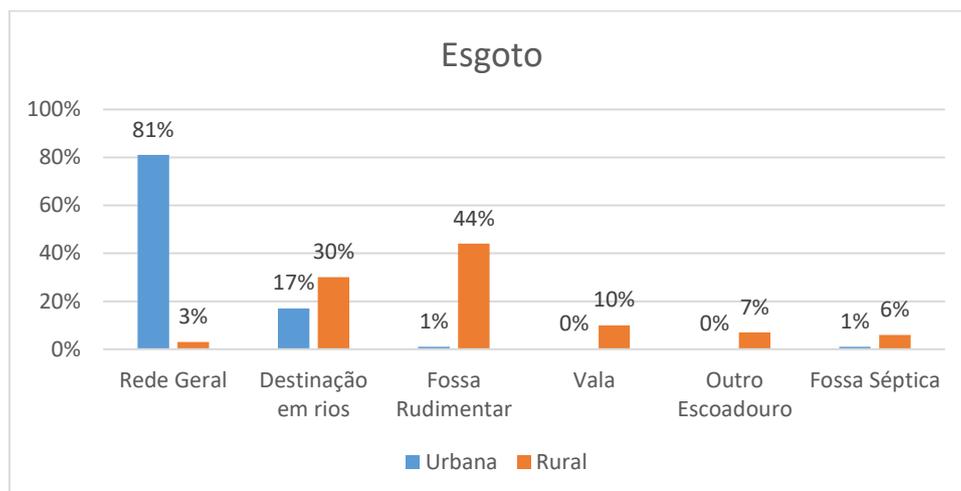
A concessionária de abastecimento de água da cidade de Espera Feliz é a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), que é responsável por tratar e disponibilizar água para a população. Segundo o Sistema Nacional de Informação Sobre o Saneamento – SNIS (2021), a cidade tem um índice de atendimento urbano de água de 97,97%. Das totalidades referentes ao abastecimento de água, 96% da população urbana é abastecida por rede de distribuição de água, 3% por poço ou nascente na propriedade e 1% por outras formas de abastecimento. Já nas áreas rurais o panorama está mais voltado para as soluções individuais, onde 61% do abastecimento é feito através de poços ou nascentes, 25% de outras formas — como uso de cisternas, uso de águas de córregos e rios — e apenas 14% dispõe de rede de distribuição com hidrômetro. A Figura 2 demonstra esse dado em forma de gráfico.

Figura 2 - Abastecimento de água na área urbana de Espera Feliz



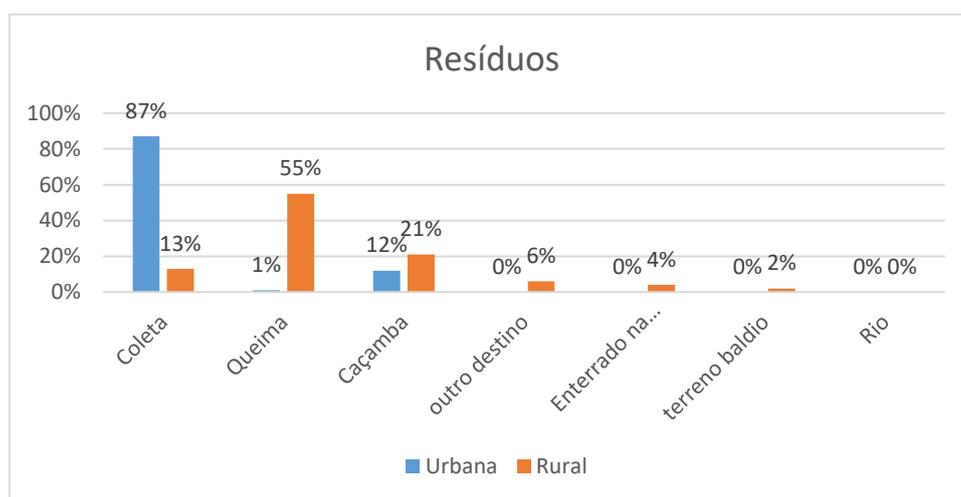
Fonte: modificado de SNIS e InfoSabas (2021).

Em relação ao atendimento da coleta de esgoto (rede de esgotamento sanitário), o município abrange 81% dos domicílios urbanos, porém não há tratamento dos esgotos na cidade. Segundo informações retiradas da imprensa local (G1, 2017), a prefeitura foi intimada pelo Ministério Público a implantar um sistema que contemple o tratamento de esgoto, juntamente com a infraestrutura de coleta existente. Porém, até o momento não foram encontrados registros de qualquer tipo de tratamento de esgoto na cidade. Nas áreas rurais o panorama é ainda pior, pois não há coleta de esgoto e o tratamento desses efluentes é feito de forma rudimentar, por soluções inapropriadas, com o uso de valas e outras formas de disposição final. A Figura 3 apresenta esse panorama em forma de gráfico.

Figura 3 - Rede de coleta e destinação final de esgoto

Fonte: modificado de SNIS e InfoSabas (2021).

Sobre os indicadores de resíduos sólidos na cidade, o panorama na área urbana é bom. 87% da municipalidade é atendida por serviços de limpeza e coleta de lixo; já os outros 13% são divididos em coleta por caçamba e queima dos resíduos na propriedade. Na área rural, chama atenção a queima dos resíduos na propriedade, com 55% de adesão. A Figura 4 apresenta esses dados em forma de gráfico.

Figura 4 - Resíduos sólidos

Fonte: modificado de SNIS e InfoSabas (2021).

2. OBJETIVOS

Nos últimos anos, o município de Espera Feliz tem enfrentado episódios cada vez mais frequentes e intensos de inundações. Esta dissertação tem como foco a investigação das causas desses eventos.

2.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo geral realizar uma abordagem hidrológica e morfológica para compreender o fenômeno das inundações urbanas em Espera Feliz (MG) por meio da quantificação numérica dos indicadores e compara-los.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Montar uma base de dados georreferenciada da localidade através de dados de acesso livre;
- Realizar mapeamento local, com o intuito de quantificar e verificar as condições de uso e cobertura do solo;
- Mapear áreas com susceptibilidade a inundações urbanas;
- Compreender as dinâmicas do ciclo hidrológico local;
- Estimar o escoamento superficial;
- Calcular os indicadores morfológicos das bacias estudadas;
- Avaliar a viabilidade da metodologia deste trabalho como ponto de partida para estudos em outras localidades;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, explorou-se os conceitos fundamentais de bacia hidrográfica; alagamentos, enchentes e inundações; a relação entre água, solo e vegetação; destacando como essa tríade é fundamental para a manutenção de ecossistemas saudáveis. Adicionalmente, foi examinado o conceito de território, explorando como o homem o utiliza para buscar o domínio e a gestão do meio, revelando as complexidades da interação humana com o ambiente.

3.1 BACIA HIDROGRÁFICA

Diversos autores, como Christofolletti (1988), Tucci & Silveira (2001), Tundisi et al. (2008) e Siqueira & Henry-Silva (2011), afirmam que as bacias hidrográficas são modelos de análise abrangentes, capazes de oferecer respostas hidrológicas adequadas. Para conceituar e compreender os ecossistemas que envolvem os aspectos de geologia, vegetação, clima, uso e cobertura do solo e morfologia fluvial, as bacias são formadas por subsistemas que se interligam por processos bióticos e abióticos. Esses mosaicos, quando confrontados com uma estimativa de escoamento superficial, ligados a modelos matemáticos e aplicados adequadamente, podem subsidiar a identificação de localidades com susceptibilidade a inundações urbanas. Deve-se, ainda, confrontar informações de topografia, declividade, tempo de concentração e tempo de retorno dos eventos para compreender a dinâmica do escoamento e suas variáveis.

Há inúmeras variáveis que impactam na dinâmica do escoamento em uma bacia hidrográfica. Christofolletti (1988) apresenta alguns conceitos fundamentais para a percepção correta desses fenômenos. São eles: (i) os tipos de fluxo, (ii) a distribuição da energia cinética das águas nos canais, (iii) o gasto de energia nos canais naturais e (iv) a influência da força das águas na dissipação da energia. O tipo de fluxo traz consigo a forma como o curso d'água percorre o caminho, e tem a denominação de: fluxo laminar ou turbulento, uniforme ou não uniforme, estável ou instável. A distribuição de energia cinética das águas nos canais se dá por duas forças, a força do peso da água e a força de fricção, que atuam mutuamente e se distribuem de forma a gerar uma força resultante que promove o movimento, gerando os regimes de distribuição da velocidade. O gasto energético está diretamente ligado com a turbulência e a velocidade das águas em busca do equilíbrio, e isso naturalmente gera erosões, transporte de sedimentos, deposição de detritos, inundações e enchentes. Por fim, a influência da força das águas em busca de equilíbrio encontra barreiras nas modificações morfológicas e todos os agravamentos sociais e ambientais que essa dinâmica pode trazer.

3.2 ALAGAMENTOS, ENCHENTES E INUNDAÇÕES (INUNDAÇÕES URBANAS)

Para conceituar alagamento, enchente e inundação, Valente (2009) traz uma abordagem didática e bem ilustrada, que fornece subsídio para a compreensão conceitual desses fenômenos. Existe uma grande confusão no uso desses termos, inclusive no meio científico. Dessa forma, na busca por esclarecimento, os conceitos foram balizados através das informações a seguir. As inundações e as enchentes são resultado do comportamento natural dos cursos d'água (córregos, ribeirões e rios), em que o extravasamento da calha natural e a ocupação parcial ou total do leito maior e da várzea levam à enchente. Existem autores que caracterizam as enchentes como eventos devastadores que resultam em destruição de propriedades, deslocamento de comunidades inteiras e até perdas de vidas, pois normalmente acarretam uma velocidade maior nas águas. Já as inundações tratam-se do extravasamento do leito maior do curso d'água e cobrem parcial ou completamente as construções ribeirinhas. A Figura 5 ilustra tal compreensão.

Figura 5 - Ilustração inundações e enchentes



Fonte: Licco & Mac Dowell (2015).

Já o alagamento é compreendido como o acúmulo de água momentâneo em determinados lugares, devido a deficiências no sistema de drenagem. Dessa forma, o escoamento superficial é concentrado em áreas impermeabilizadas e, logo, a sua causa

pode não estar associada a questões de forma (morfologia) dos domínios fluviais. A Figura 6 mostra um exemplo de alagamento urbano na cidade de Foz do Iguaçu.

Figura 6 - Ilustração de alagamento urbano



Fonte: Portal Saneamento Básico (2021).

As águas pluviais têm o potencial de produzir inundações e impactar áreas urbanas inteiras devido aos processos destacados neste tópico. Segundo Tucci & Bertoni (2003), é possível verificar que os rios com potencial de ocorrência de extravasamento do leito maior e a ocupação de suas várzeas, geralmente têm uma recorrência de 1,5 a 2 anos de tempo de retorno, e o impacto decorrente da inundação ocorre quando a população ribeirinha ocupa essas áreas.

Ainda segundo Tucci & Bertoni (2003), esses episódios decorrem de processos naturais do ciclo hidrológico. É necessário criar dispositivos que impeçam a população de ocupar áreas susceptíveis a essa problemática, aplicando restrições no código de obras do município e no plano diretor urbano, os quais decorrem da invasão de áreas ribeirinhas, pela população de baixa renda, e da ocupação de áreas com alta probabilidade de ocorrência desses eventos.

Existem diversos impactos sobre a população caracterizados na literatura para a problemática destacada aqui neste tópico, que podem ter desde prejuízos materiais até perdas humanas. São eles: (i) contaminação por doenças, (ii) interrupção da atividade econômica e (iii) contaminação das águas potáveis, dentre outros.

Em termos gerais, as inundações, enchentes e alagamentos têm aumentado sua recorrência. Muitos casos o próprio curso de água tem suas características de origem já voltadas para a ocorrência destes fenômenos (devido a morfologia local). Por outro lado, a impermeabilização do solo e a ocupação de áreas de infiltração das chuvas aumentam o escoamento das águas e, somando todos os fatores supracitados, causam o acúmulo de problemas que dificultam esse escoamento. Na medida em que a cidade amplia suas construções, ocorrem diversas respostas hidrológicas a essas modificações, como: (i) aumento das vazões de pico, (ii) aumento da produção de sedimentos, causando obstrução e assoreamento e (iii) deterioração da qualidade das águas.

Pode-se dizer que as inundações urbanas são tão antigas quanto as próprias cidades, pois as inundações já ocorriam, muito provavelmente, antes de a cidade se instalar naqueles locais. Esses eventos são um comportamento natural dos cursos d'água, mas seus efeitos são potencializados pela urbanização e pela impermeabilização das superfícies, arruamentos, canaletas, telhas dentre outras.

Quando se tem um episódio de chuva intensa e o solo não tem as características naturais para o seu amortecimento e infiltração, a capacidade de escoar ultrapassa a capacidade de infiltrar, e com isso o volume que escoar para o sistema de drenagem supera sua capacidade projetada. Logo, é preciso criar mecanismos novos de retenção das águas para que não seja lançado nas bocas de lobo de drenagem pluvial um volume superior à capacidade.

Para a geração de uma estimativa do volume de escoamento superficial em episódio de chuva intensa, Tomaz (2002) esclarece que os modelos hidrológicos devem ser mensurados a partir da hipótese de que a intensidade, duração e frequência de um evento climático de chuva intensa, serão convertidas em hidrogramas, produzindo a vazão de escoamento superficial que norteará a distribuição do evento em relação ao tempo. Além disso, a chuva efetiva deverá ser considerada em toda a área de drenagem e, através desses dados, é possível estimar o escoamento superficial. Existem diversos modelos que desenvolvem essas estimativas, cada modelo com suas vantagens e limitações. De forma análoga, é possível realizar estudos que demonstrem graficamente a geração desses eventos, a partir de *softwares* de geoprocessamento. Os pesquisadores envolvidos no trabalho de Marciano, Barbosa & Silva (2018) realizaram simulações utilizando *softwares* de sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas, associando vazão, escoamento superficial, topografia e declividade. Os autores simularam dois cenários distintos, com base no uso e cobertura do solo, e geraram manchas de inundações para

cada um dos cenários, com base no programa computacional Global Mapper. Os autores concluíram que os resultados foram satisfatórios e representaram de forma eficiente o evento proposto.

3.3 RELAÇÃO ÁGUA X SOLO X VEGETAÇÃO

Os estudos hidrológicos, tal como mencionado no tópico relacionado diretamente ao tema, têm a bacia hidrográfica como o meio mais eficaz de se estudar e entender sua dinâmica. A prerrogativa principal visa o entendimento do ciclo da água, promovendo um enfoque nas origens, preservação do meio e conseqüentemente a sua proteção em termos de quantidade e qualidade. É importante frisar que a qualidade da água é diretamente relacionada ao uso do solo, relevo, tipo de solo e a vegetação por onde ela flui. As coberturas vegetais têm uma finalidade crucial no amortecimento das águas pluviais, evitando a quebra dos agregados do solo e o conseqüente arraste deste para os pontos de várzeas, gerando o fenômeno de assoreamento.

O poder público, na expressão dos dispositivos constitucionais, visando a proteção dos recursos hídricos, criou a Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), que regulamenta a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), considerando a água um recurso ou bem econômico, porque é finita, vulnerável e essencial para a conservação da vida e do meio ambiente. Quanto às principais premissas do dispositivo de cunho legislativo, sob força de lei, é considerado que: (i) todos têm direito a pleitear acesso aos recursos hídricos, (ii) a água é um bem econômico, (iii) a bacia hidrográfica é um modelo de gestão, (iv) a água deve ser distribuída conforme critérios sociais, econômicos e ambientais, (v) a população deve participar da administração da água e (vi) a população tem o dever constante na educação ambiental da sociedade.

Mediante as considerações supracitadas, é possível dizer que existe uma relação direta entre água, solo e vegetação. Portanto, para respeitar a PNRH, é preciso que o meio físico e o biótico estejam preservados, pois estão diretamente interligados. A capacidade de infiltração das águas pluviais no solo, dentro de uma determinada bacia hidrográfica, promove o abastecimento dos lenções freáticos, que permeiam até o fornecimento de água nos canais de drenagens fluviais, em regime intermitente ou permanente. Dessa forma, para manter o meio ambiente saudável é preciso garantir a sua preservação, e principalmente as suas características naturais. Entretanto, com o crescimento do meio

antrópico e os impactos causados pelas suas modificações no espaço físico, ocorre o prejuízo à preservação ambiental, com o qual as características naturais são suprimidas.

Existem autores que consideram a coexistência das atividades antrópicas com a preservação do meio ambiente como uma realidade técnica totalmente possível, sejam elas no âmbito urbano ou rural. Segundo Coutinho Filho (2015), é extremamente generalista a definição de um modelo numérico fixo (em área por habitante) para definir a demanda de preservação de um zoneamento urbano, pois cada local tem sua peculiaridade e sua própria demanda. Entretanto, é possível implementar o uso das geotecnologias para definir os limiares da saúde ambiental de um determinado zoneamento urbano e compará-los com outras localidades, criando modelos — através da hierarquização e de ponderações algébricas — que atendam a demanda local. É possível mitigar os impactos ambientais nas áreas urbanas com investimento em preservação ambiental e infraestrutura. Ainda segundo o autor, a implantação de áreas verdes de domínio público tem papel preponderante na preservação ambiental, na melhoria da qualidade de vida da população e na promoção da purificação do ar, das águas e do solo.

Nos estudos relacionados às áreas rurais, Brandão, Pruski & Silva (2004) salientam para a importância do manejo, pois as águas que fluem nas cabeceiras de uma determinada zona rural podem impactar as cidades ribeirinhas a jusante. Ainda segundo os autores, a capacidade da água de infiltrar no solo diminui os impactos do escoamento superficial e tem relação direta com o manejo, tipo de solo, uso e cobertura do solo, propriedades químicas e físicas, tamanho dos agregados, umidade, espaço entre os poros e composições minerais. Outro dado relevante a ser contextualizado neste tópico é que, ainda segundo os autores, o manejo é a variável mais prática de ser controlada. Para atestar esse fato, os autores descreveram um estudo de caso que correlacionou a precipitação em diferentes municípios com os valores de taxa de infiltração em cenários distintos de manejo. Como resultado, foi verificado o amortecimento do escoamento superficial em decorrência da diferença de manejo, ou seja, a taxa de infiltração superficial aumentou de 45 mm/h, registrados em um manejo denominado preparo convencional, para 58 mm/h, registrados no plantio direto. Dessa forma, observou-se que as vazões máximas de escoamento superficial obtidas pelo plantio direto foram 29,9% a 43,6% inferiores às obtidas pelo preparo convencional, isto é, as técnicas de manejo são de suma importância para a diminuição do escoamento superficial em áreas rurais. Para compreender a dinâmica de infiltração de água no solo, Sales et al. (1999) atestam que o

processo de infiltração não é uma constante ao longo do tempo, pois enquanto o solo está seco a taxa de infiltração é maior. Posteriormente com a sua saturação, a taxa vai gradativamente diminuindo até atingir a sua saturação e cessar a infiltração. Dessa forma, a capacidade de armazenamento de água pluvial no solo é limitada, e as principais variáveis que norteiam essa capacidade são: (i) manejo adequado, (ii) profundidade da camada de solo, (iii) susceptibilidade à erosão do solo e (iv) declividade.

3.4 TERRITÓRIO

Existe uma longa discussão na geografia sobre o conceito de território. Os conceitos geográficos têm importantes fundamentos para caracterizar e embasar a compreensão da realidade humana e as suas relações com o território. Não existe uma unanimidade em torno dessa definição no ambiente acadêmico-científico para o termo, mas existem linhas de pensamento que são amplamente discutidas e defendidas há séculos.

As diferentes concepções dos diversos autores no decorrer do amadurecimento das ciências sociais e geográficas geraram diferentes aspectos na junção de dados para a elaboração de um conceito mais palpável, sob a ótica geográfica, e com tal desenvolvimento surgiu um rico acervo, com o qual é possível contextualizar e usufruir da elaboração dos conhecimentos preponderantes sobre a temática.

Se dividirmos o conceito por perspectiva e buscarmos a origem etimológica da palavra território, tem-se esta definição: do latim, *territorium*; “área delimitada, terra sob jurisdição”. Com a definição supracitada, pode-se concluir que o território se refere a um espaço onde foi demarcada uma área, com uma jurisdição, que aparentemente tem sua origem em uma esfera de poder. Entrando no conceito de espaço, analisado pela perspectiva filosófica e física, Lefebvre (2006) demonstra que as concepções de espaço são bastante confusas e carecem de convergência entre os cientistas, pois se misturaram nos debates entre os espaços geográficos, como: (i) espaço sideral, (ii) espaço de vida, (iii) espaço filosófico e, mais recentemente, (iv) espaço virtual.

É importante destacar que os conceitos de território e espaço são próximos, mas têm suas diferenças, pois a territorialidade pode ser percebida como algo que denota a posse e, portanto, o poder sobre o domínio daquele território, enquanto o espaço é uma

medida universal e pode ser tratado fisicamente, e até como um termo mais vago e abrangente.

Partindo dessas contextualizações, é possível traçar um paralelo histórico das discussões sobre a temática, pois território é um conceito que foi elaborado nas verificações empíricas da geografia, com a geografia política ocupando posição de destaque, já que diversos autores o compreendem como o espaço pelo qual se exerce a soberania do Estado. No decorrer do tempo, a geografia avançou na atualização do conceito de território, incorporando aspectos sociais, culturais e econômicos, ampliando a abrangência do termo e sua complexidade explicativa. Na atualidade, já existe um consenso em torno do termo território, que é indissociável da noção de poder e domínio, mas que seria simplório demais se fosse compreendido apenas como os limites políticos e administrativos dos países, pois o poder não é uma categoria espacial, nem mesmo temporal, mas está diretamente ligado à produção econômica no espaço e no tempo.

Segundo Santos (2002), em sua obra “O retorno do território”, é possível compreender que a visão do autor se refere a uma crítica à noção de território, herdada da modernidade e incompleta, demonstrando que o uso do território faz dele objeto de análise social e não o contrário. Por isso o autor demonstra que território são formas que conotam objetos e ações no espaço humano — o espaço habitado. O território é formado de lugares, que podem ser ligados entre si, adjacentes, ou com interações em rede, aumentando a complexidade do sistema e da compreensão das relações de poder.

Durante a revisão bibliográfica, foi identificada a necessidade de aprofundar o conceito de território sob a perspectiva do espaço físico e sua relação com as inundações urbanas. Tucci & Bertoni (2003), em seu livro “Inundações urbanas na América do Sul”, traçam um paralelo interessante sobre as inundações, destacando sua antiguidade anterior à presença do homem na terra. Os autores ressaltam que, ao longo da história, o homem sempre buscou se desenvolver próximo aos cursos de água, devido às múltiplas finalidades de uso da água. Essa ocupação — muitas vezes em áreas planas — teve como resultado a proximidade com potenciais zonas de inundação.

No entanto, observou-se uma mudança de comportamento da população ribeirinha, que passou a construir habitações em áreas mais elevadas com o objetivo de evitar inundações. Esse movimento gerou a impermeabilização das áreas de absorção em

topos de morro, aumentando o escoamento das águas e prejudicando ainda mais as populações mais suscetíveis a alagamentos, inundações e enchentes.

Nesse contexto, as áreas ocupadas pelas populações nas margens de córregos, ribeirões e rios não se enquadram especificamente no conceito de “espaço” e “território”. Todavia, esses lugares ocupados têm o potencial de se tornarem espaços de convivência pelo desenvolvimento de relações socioambientais.

Para caracterizar e conceituar essas áreas como territórios, é imprescindível realizar mais estudos e aprofundar o tema, buscando uma perspectiva mais inclusiva e menos perversa, desvinculada de conotações de domínio e poder do homem sobre o meio. Nesse sentido, compreender a relação das populações com o ambiente em que vivem é fundamental para promover soluções integradas que favoreçam a convivência sustentável com as inundações urbanas. Ao invés de tentar controlar o ambiente, é essencial valorizar os eventos naturais e respeitar os limites do meio físico e biótico. A busca por harmonia entre as comunidades e o ambiente natural é essencial para uma abordagem mais equilibrada e resiliente em relação aos desafios das inundações urbanas.

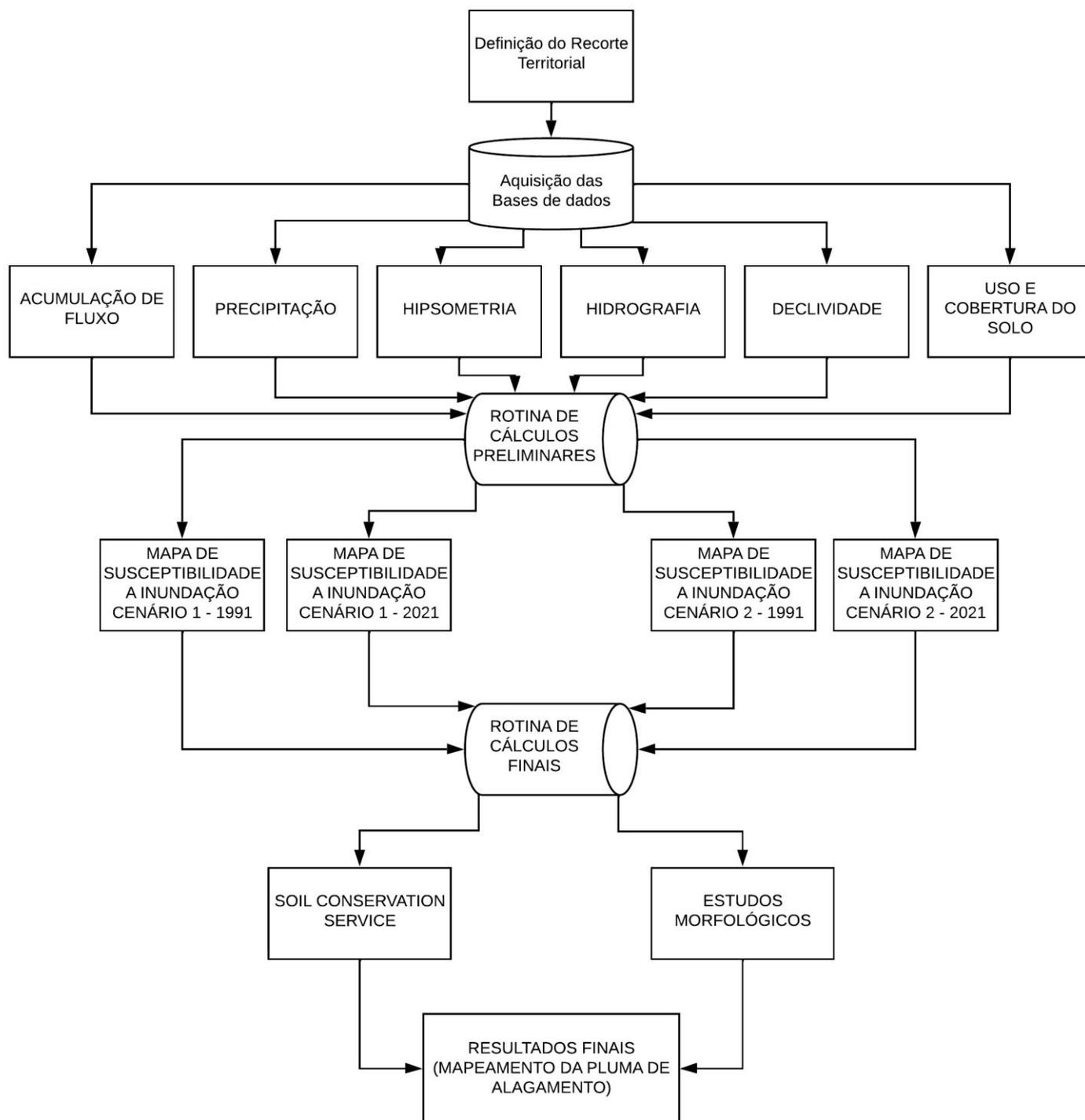
4 METODOLOGIA

Neste capítulo da pesquisa foi abordado toda a sistematização metodológica utilizada para a aquisição, análise e geração das bases de dados, fruto da utilização de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, inclusive os sistemas de informações geográficos (SIG) como base para o desenvolvimento desta dissertação.

4.1 EXPLICAÇÃO GERAL DA METODOLOGIA

Para o bom entendimento das etapas desenvolvidas nesta pesquisa, e com o intuito de proporcionar uma maior transparência na estrutura organizacional das ideias referente ao tema escolhido, foi elaborado o fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma dos processos realizados na pesquisa



Fonte: desenvolvido pelo autor.

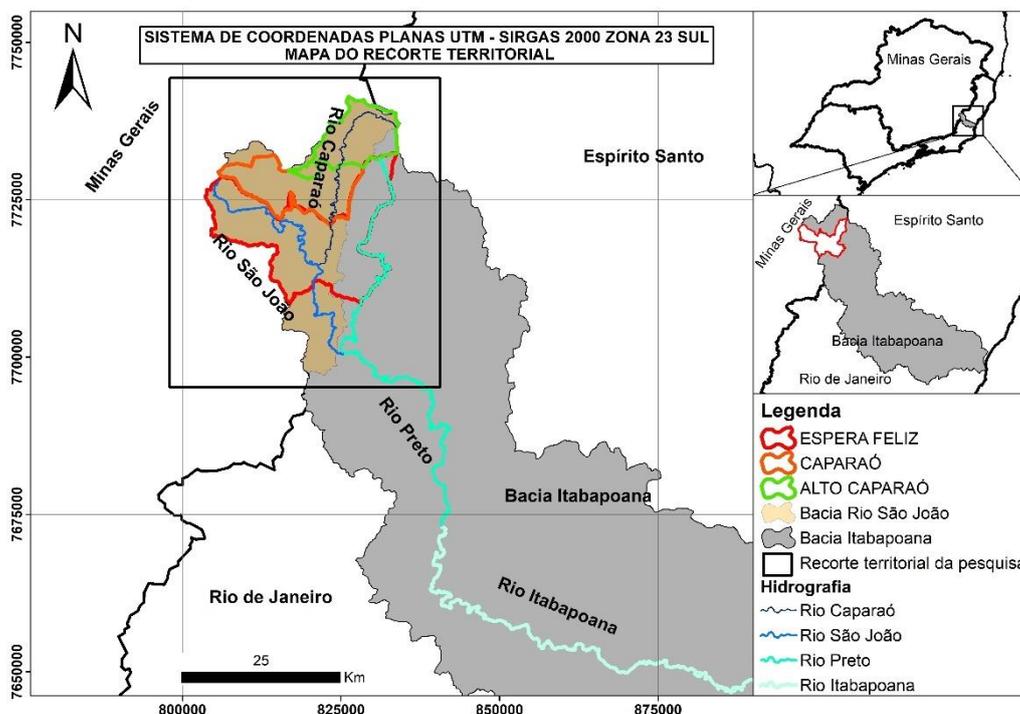
4.1.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O levantamento bibliográfico se deu por leituras e organizações de estudos científicos, sendo eles: artigos, dissertações e teses. Outras fontes de informações usadas foram: notícias de jornais locais, reuniões com representantes do poder executivo do município e bases de dados georreferenciadas de sensoriamento remoto e fotogrametria, além da utilização de mapeamentos temáticos de representação do uso e cobertura do solo local, no intuito de organizar todos os dados de acesso livre para a lapidação e geração do recorte territorial pesquisado.

4.1.2 DEFINIÇÃO DO RECORTE TERRITORIAL

O recorte territorial da pesquisa foi definido mediante o desenvolvimento do levantamento bibliográfico, durante o qual foi percebida a necessidade de expandir o olhar desta pesquisa para a fonte das problemáticas aqui descritas. Dessa forma, ficou evidente como etapa indispensável a compreensão da dinâmica hidrológica com um olhar direcionado ao município de Espera Feliz e às bacias hidrográficas envolvidas na problemática aqui descritas, que abrangem também áreas rurais, distritos e as cidades de Caparaó e Alto Caparaó. A Figura 8 demonstra o recorte territorial desta pesquisa.

Figura 8 - Recorte territorial adotado.



Fonte: desenvolvido pelo autor.

A cidade de Espera Feliz está situada na divisa com o estado do Espírito Santo, sendo encaixada entre os vales da parte baixa da Serra do Caparaó e tendo como aspecto preponderante grandes formações montanhosas. A bacia hidrográfica de gestão federal em que a cidade está inserida abrange o Rio Itabapoana. Com um olhar mais direcionado a problemática local, o foco pode ser deslocado para o Rio São João, afluente da margem direita do Rio Preto, que por sua vez é afluente da margem esquerda do Rio Itabapoana, conforme pode ser observado na figura supracitada. Outro tributário importante e digno de foco é o Rio Caparaó, que nasce no Parque Nacional da Serra do Caparaó e encontra com o Rio São João em Espera Feliz.

4.1.3 AQUISIÇÃO DAS BASES DE DADOS DE ACESSO LIVRE

A aquisição de dados para o desenvolvimento desta pesquisa decorreu da necessidade de buscar produtos disponibilizados gratuitamente, que fornecessem os seguintes subprodutos: (i) hipsometria, (ii) declividade, (iii) acumulação de fluxo, (iv) hidrografia, (v) uso e cobertura do solo e (vi) precipitação. Para tal, foram iniciados os trabalhos de busca para baixar e tratar todos os dados, realizando o desenvolvimento e compatibilização da escala, referencial geodésico e tipo de arquivo.

Como o objetivo da aquisição dos dados é o desenvolvimento de mapas com susceptibilidade a inundações, inicialmente se faz necessário conceituar susceptibilidade para buscar entender a metodologia conceitual deste trabalho.

Os estudos da susceptibilidade à ocorrência de um determinado evento emergem de uma maior exposição à provável problemática, que no caso desta pesquisa diz respeito às inundações. Não se pode misturar os conceitos de susceptibilidade e risco, uma vez que o risco depende de dados históricos e validação de campo, estando em um grau mais avançado. Essa questão pode ser objeto de pesquisa futura, de modo a validar os resultados da presente pesquisa. Para Tricart (1977), a compreensão de susceptibilidade em maior ou menor grau de estabilidade ou instabilidade tem origem nos fatores abióticos e nas modificações feitas na morfologia local. Nesse contexto, também vale destacar a diferença conceitual de susceptibilidade em relação a vulnerabilidade e fragilidade. Nesse caso, ambos os conceitos são associáveis e interativos, porém distintos. A vulnerabilidade, ainda segundo Tricart (1977), tem sua origem quando ocorre um conjunto de fatores naturais e sociais que condiciona à uma determinada sociedade o

reflexo das características do ambiente, como renda, habitação, educação, saneamento básico, saúde etc. Já no caso da fragilidade, autores como Ratcliffe (1971), Ratcliffe (1977) e Theberge (1986) defendem que o conceito se refere à sensibilidade de um ecossistema às pressões, combinando a exposição à ameaça que poderia perturbar seu equilíbrio.

Feitos todos os esclarecimentos conceituais, foi escolhido o modelo digital de elevação das imagens geradas pelo satélite Advanced Land Observing Satellite (ALOS) da agência espacial japonesa, a Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). A utilização desse satélite refere-se aos produtos gerados pelo sensor PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar). Segundo o manual do usuário, ALOS Data Users Handbook, JAXA (2006), o sensor Palsar é um radar ativo, com capacidade de obtenção de dados de imagens diurnas ou noturnas em quaisquer condições atmosféricas, sem interferência de nebulosidade, com comprimento de onda na faixa das micro-ondas. O sensor tem versão gratuita com resolução espacial de 12,50 metros disponibilizada no site da Alaska Satellite Facility. No entanto, de acordo com Rocha & Dias (2023), atualmente há novas opções de modelos digitais de elevação, que conseguem representar de forma mais precisa a realidade dos relevos, como é o caso do Copernicus DEM e do FABDEM. Este último, em específico, corresponde ao Modelo Digital do Terreno (MDT), destacando-se por realizar filtragem das áreas florestais e das estruturas construídas, o que resulta em valores ainda mais precisos e detalhados. Apesar das vantagens oferecidas pelo FABDEM, optou-se por utilizar o modelo digital de elevação do Alos, devido a sua ampla divulgação no meio científico. Para abranger toda a bacia hidrográfica estudada, foram baixadas diversas imagens que se complementam. As imagens foram unidas através de mosaicos, e o resultado foi projetado no sistema de coordenadas UTM, no referencial geodésico SIRGAS 2000 zona 23S, assim como toda a base de dados desenvolvida. O mosaico produzido foi feito respeitando a resolução radiométrica das imagens de origem. Posteriormente, fez-se necessário o processamento com a correção e eliminação de erros, como *no-data* (ausência de dados cadastrados no pixel), falhas de depressões espúrias e ruídos no mosaico. Todas as correções foram aplicadas pelo intermédio de sistemas de informações geográficas, com o *software* QGIS 3.10, para obter os resultados finais esperados. Os procedimentos metodológicos relatados tiveram estes produtos: hipsometria, declividade e acumulação de fluxo.

A hidrografia do Rio Itabapoana foi baixada no site da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico – ANA (2022), no catálogo de metadados, com multiescalas. Entretanto, realizou-se a compatibilização manual da escala dos cursos principais (Rio São João e Rio Caparaó), obedecendo suas sinuosidades originais e ampliando o espectro escalar. Após os ajustes na hidrografia, gerou-se a bacia hidrográfica extraída pelo modelo digital de elevação, no intuito de definir a abrangência necessária para analisar todos os fatores intercorrentes da bacia, contida em grande parte na cidade de Espera Feliz, assim seguindo a definição escolhida como recorte territorial da pesquisa. Ainda na base de dados hidrográfica, foram empregadas ferramentas de conversão de dados vetoriais para matriciais, a fim de melhorar a classificação do uso e cobertura do solo, entrando com a hidrografia modificada em seu uso, sendo, portanto, classificada como água.

O uso e a cobertura do solo foram extraídos do mapeamento temático realizado pelo MapBiomias (2021), que tem como fonte de dados a série histórica do satélite Landsat. Ainda segundo o MapBiomias (2021), para a geração dos dados finais com uma acurácia testada e validada utiliza-se o ATBD (Algorithm Theoretical Basis Document), que melhora os apontamentos de uso e cobertura do solo na base de dados, criando grande potencial de diversidade na classificação. O processamento é feito com os algoritmos de aprendizagem supracitados, que confrontam seus dados com a plataforma Google Earth Engine, aumentando a acurácia e confiabilidade destes, gerando um poder de processamento em nuvem.

Os mapeamentos anuais da coleção de uso e cobertura do solo do MapBiomias (2021) são produzidos de forma otimizada através da classificação pixel a pixel de imagens. Outro ponto relevante para a pesquisa é o recorte temporal adotado. Foram baixadas imagens classificadas de 1991 e 2021, com o intuito de contrastar as diferenças classificatórias, bem como produzir uma escala temporal que se compare com as informações retiradas das estações pluviométricas no horizonte de tempo, este de 30 anos. O parágrafo posterior trata disso. Dentro desse contexto, foram criados dois cenários discutidos posteriormente. É importante ressaltar que foram adquiridos dados da coleção 6 do MapBiomias (2021). No entanto, é importante mencionar que, no decorrer do desenvolvimento desta pesquisa, as coleções 7 e 8 foram lançadas, prontamente baixadas e comparadas com a versão anterior. Durante essa análise, não foram identificados erros significativos ao uso e cobertura do solo. É relevante observar que os

erros de classificação encontrados nas versões 6 e 7, como um todo, estavam principalmente concentrados em áreas de mineração, confundidas com áreas urbanas, as quais não refletem a realidade verificada no recorte territorial desta pesquisa. Portanto, foi mantido o uso da coleção 6 do MapBiomias (2021), uma vez que não se justificaria a alteração da coleção na base de dados adotada.

O desenvolvimento do modelo digital de precipitação foi realizado inicialmente através da verificação das estações pluviométricas que circundam o recorte territorial objeto desta pesquisa, no site Hidroweb, gerenciado pela Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico – ANA (2022). Após a pesquisa, foram selecionadas as estações que continham uma base de dados histórica de ao menos 30 anos, e que a distribuição das estações pluviométricas, prevalecesse a equivalência e a equidistância em relação ao recorte territorial desta pesquisa. Para gerar uma média das precipitações máximas mensais, foram selecionadas 9 estações pluviométricas. Definidas as estações e feitos os *downloads*, posteriormente tratados em planilhas via Microsoft Excel, seus resultados foram georreferenciados no QGIS 3.10. Na sequência, foi usada ferramenta de interpolação de dados vetoriais (*shapefile*) para o formato matricial (*raster*), tendo como domínio de dados a coluna referente aos valores previamente tratados para a precipitação com as médias dos meses mais chuvosos no intervalo de 30 anos de cada uma das estações selecionadas. O método consiste na utilização da ferramenta disponível no software QGIS 3.10, que converte os arquivos de ponto em formato *shapefile* para o formato *raster*. A ferramenta baseia-se nos lugares georreferenciados das estações pluviométricas com valores reais para estimar valores nos locais sem dados.

O método selecionado se trata da “interpolação IDW”. A sigla vem do inglês *Inverse of Distance Weighted*, que significa: ponderação da distância inversa. A abordagem metodológica, conceitualmente, se assemelha ao modelo físico da gravidade, destacando a importância da proximidade na influência entre dois pontos, ou seja, o funcionamento matemático do modelo se assemelha ao gravitacional, em que a interação entre dois corpos diminui com o aumento da distância. O IDW atribui maior peso aos valores amostrados que estão próximos e os reduz à medida que a distância aumenta. Segundo Murara (2019), o método IDW cria uma combinação linear ponderada, e o peso atribuído ao dado “criado” é influenciado pela distância, isto é, quanto maior a distância, menor a influência do ponto com valor real atribuído, promovendo os objetos mais próximos como semelhantes. Vale destacar que existem outros modelos de interpolação

amplamente utilizados. Murara (2019), por exemplo, demonstra e compara alguns métodos em seu trabalho. Segundo o autor, é de extrema importância a escolha criteriosa do método de interpolação, para que ocorra a representação precisa dos dados espaciais amostrados. Na sequência são apresentados os métodos apontados no trabalho supracitado: (I) IDW; (II) SPLINE; (III) KRIGING; (IV) NATURAL NEIGHBOR; (V) TOPO TO RASTER. No contexto desta pesquisa, conforme já mencionado, optou-se pelo método IDW. Sua escolha se justifica pela sua eficácia em situações nas quais a distribuição dos pontos de coleta é abrangente. No total, foram nove pontos coletados no entorno do município de Espera Feliz, permitindo dizer que os pontos estão próximos da área objeto de estudo, promovendo valores equidistantes do recorte territorial adotado, e assim garantindo uma representação adequada da realidade na área de estudo. Esta escolha destaca a relevância da seleção apropriada do método para assegurar a acurácia na espacialização dos dados.

Feitos todos os apontamentos descritos, foram organizados os dados coletados, por pasta e tipo de arquivo, mantendo uma estrutura de dados adequada para as próximas etapas de verificações e ponderações matemáticas, com o intuito de gerar um modelo digital que acuse os locais mais propensos a episódios de inundações.

4.1.4 ROTINAS DE CÁLCULOS PRELIMINARES

Para a determinação das rotinas de cálculos preliminares, fez-se necessário compreender as rotinas metodológicas disponíveis na literatura. Dessa forma, foram procurados autores que fizeram uso dos escalonamentos de multicritérios, através das diversas metodologias sobre a temática. O pesquisador e arquiteto Ian McHarg foi o pioneiro. McHarg (1969) propôs em sua abordagem um inventário ecológico detalhado, gerando escalonamento de multicritérios que permitiram categorizar áreas para diversas atividades. Já na década seguinte, o pesquisador Thomas Saaty desenvolveu um método que busca determinar o escalonamento ideal, gerando uma razão matemática que resulta em uma matriz de dados, como visto em Saaty (1977). No Brasil, o pesquisador Jorge Xavier da Silva foi o pioneiro, com o desenvolvimento de um software capaz de gerar dados interativos entre os modelos digitais. O software é conhecido como Sistema de Análise Geo-Ambiental (SAGA, 2000), cuja versão beta se encontra disponível gratuitamente, o que contribuiu para as atividades de diversos pesquisadores brasileiros.

A brasileira Moura (2007), em seu trabalho, faz uso da análise multicritérios no geoprocessamento, demonstrando que tal abordagem simplifica a complexidade espacial ao selecionar e integrar diversas variáveis em um Sistema de Informação Geográfico (SIG).

Segundo Silva & Rosa (2017), um dos métodos mais utilizados para a ponderação matemática é a análise de multicritérios, gerando pesos percentuais para cada matriz de dados. Entre outros autores que desenvolveram trabalhos metodológicos utilizando o multicritério, Ferraz et al. (2018) afirmam que a definição de critérios selecionados e representados por pesos estatísticos é uma potente ferramenta para o apontamento de áreas susceptíveis a inundações.

A criação de um ordenamento escalar entre os fatores selecionados para a hierarquização, usando o multicritério, necessita de uma definição metodológica de ordenamento e ponderação. Nesta pesquisa foi utilizado o modelo proposto por Saaty (1977), que desenvolveu o método de Análise Hierárquica de Processos – AHP na Wharton School of Business da Universidade da Pensilvânia. O método consiste em investigar qual é o escalonamento ideal, para gerar uma razão matemática capaz de promover uma matriz de dados, com potencial de apontar uma medida que expresse a ponderação algébrica das possibilidades estudadas.

O uso do AHP lança mão de uma hierarquia criteriosa que busca a compreensão lógica de seus níveis estruturados. Segundo Saaty (1990), a estrutura de um sistema tem interações fundamentais envolvendo todos os seus componentes que geram impactos globais no sistema estudado. As interações são desenvolvidas através de um processo lógico, que organiza e fundamenta as hierarquias selecionadas em cada etapa dos cálculos, e enfim há os pesos a serem considerados no multicritério. O Quadro 1 apresenta as definições da escala fundamental de Saaty (1990) para o julgamento lógico dos critérios.

Quadro 1 - Escala fundamental de Saaty

Nível de importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas contribuem igualmente para o objetivo
3	Pequena uma à outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra
5	Grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra
7	Muito grande	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra
9	Importância absoluta	Quando se procura absoluta condição sob a outra
2,4,6,8	Intermediários	Quando se procura uma condição intermediária
1/3	Menos importante	A experiência e o julgamento desfavorecem levemente uma atividade em relação à outra
1/5	Fortemente menos importante	A experiência e o julgamento desfavorecem fortemente uma atividade em relação à outra
1/7	Muito fortemente menos importante	Uma atividade é muito fortemente desfavorecida em relação à outra
1/9	Extremamente menos importante	Quando se procura um absoluto desfavorecimento sob a outra

Fonte: modificado de Saaty (1990).

A matriz definida através dos valores de referência da escala fundamental de Saaty deve ser montada e comparada. Na matriz representada pela escala supracitada, o número na linha i e coluna j define a importância dos critérios em relação a outra coluna. A Equação 1 retirada do trabalho de Saaty (1990) demonstra como se deve montar a matriz.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3j} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & 1/a_{3j} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Cada item da matriz indica o julgamento de um par de critérios, ou seja, supondo o critério C_i (altitude) com relação a C_j (Declividade) os elementos “ a_{ij} ” indicam o julgamento do par de critérios (C_i, C_j). O valor da intensidade de importância é definido

posteriormente e confrontado com outros. Dessa forma, matematicamente valem as definições lógicas a seguir:

- Se a_{ij} = nível de importância, então $a_{ij} = (1/\text{nível de importância})$, portanto nível de importância $\neq 0$;
- Se o critério C_i é julgado como de igual importância relativa em relação ao outro C_j , então $a_{ij} = 1$ para todo i .

Definida a matriz de hierarquização, na sequência vêm duas rotinas: comparação para todos os critérios e geração da normalização do resultado. A primeira rotina é feita avaliando todas as alternativas em relação ao objetivo global. Na segunda rotina, a cada célula gerada deve-se somar todos os elementos de cada coluna, e por fim, deve-se realizar a divisão de cada célula pelo somatório das respectivas colunas.

Após a geração da normalização, pode-se calcular os pesos de cada critério, o que Saaty (1990) chama de Cálculo da Prioridade Média Local – PML. Dessa forma, pode-se dizer que o PML é a média de cada linha da normalização e, através desse resultado, cada critério recebe o peso final para cada um dos cenários elaborados na pesquisa.

Na elaboração da hierarquização do presente estudo, foram fatores preponderantes os critérios apontados por Santos, Louzada & Eugênio (2010), modificados para a realidade local: altitude (hipsometria), declividade e precipitação. Além desses, percebeu-se a necessidade de incluir outros fatores considerados como secundários no processo decisório: uso e cobertura do solo e acumulação de fluxo. Feitos esses apontamentos, foram definidos dois cenários distintos. O cenário 1 trata das ponderações matemáticas, incluindo na base de cálculo algébrico o *flow accumulation* (acumulação de fluxo) para os anos de 1991 e 2021 (para os dois anos dentro do cenário 1), com a justificativa de que o *flow accumulation* tem o potencial de demonstrar os lugares onde o caminho do fluxo de água tem preferência por escoar, ou seja, demonstra os locais onde o fluxo tende a se acumular em função da morfologia. Já no cenário 2 aplicam-se as mesmas ponderações descritas com todas as bases de dados citadas, porém com a retirada do *flow accumulation* do processo decisório para os anos de 1991 e 2021 (para os dois anos dentro do cenário 2).

4.1.5 ROTINA DE CÁLCULOS FINAIS

Neste capítulo, foi abordado a apresentação do método Soil Conservation Service (SCS) visando elucidar o processo de cálculo do escoamento superficial de águas pluviais por meio desse método. Adicionalmente, foram explorados os indicadores morfológicos utilizados, detalhando o método de cálculo de cada um, a fim de compreender o comportamento do espaço físico em relação ao escoamento superficial no recorte territorial desta pesquisa.

4.1.5.1 MÉTODO SOIL CONSERVATION SERVICE

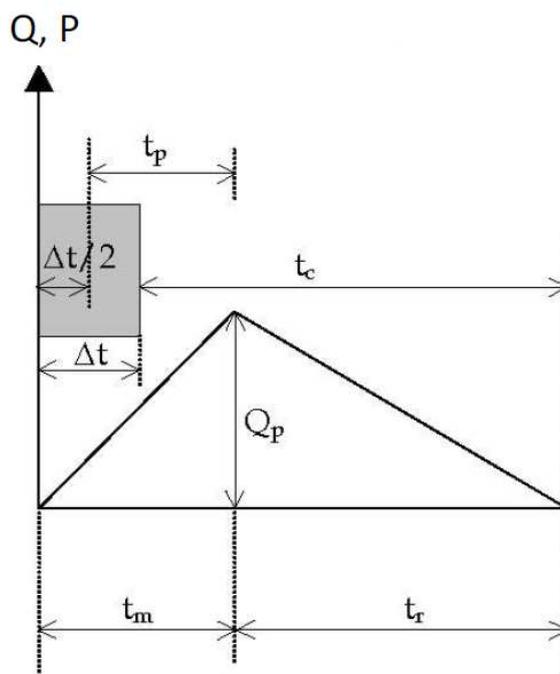
O hidrograma unitário, parte integrante do que hoje é conhecido como modelo Soil Conservation Service, foi desenvolvido pela primeira vez por Sherman (1932). A proposta do método foi uma maneira encontrada pelo autor de representar as respostas hidrológicas das precipitações no exutório das bacias hidrográficas, de modo a retratar essas vazões. Posteriormente, o United States Department of Agriculture adotou o conceito e aprimorou os estudos referentes à hidrologia para pequenas bacias hidrográficas, onde o método Soil Conservation Service foi desenvolvido, testado, validado e publicado em 1975 (SCS, 1975), no trabalho intitulado “Urban hydrology for small watersheds”. Com esse estudo, diversos trabalhos subsequentes foram publicados utilizando este modelo como base na caracterização do escoamento superficial de bacias hidrográficas e, em 1986 (SCS, 1986), foi publicada a segunda edição do estudo de origem do SCS.

Segundo Tomaz (2002), o modelo SCS é aplicável para bacias hidrográficas com áreas que variam de 3km² a 250km². Assim como qualquer modelo matemático, existem limitações que devem ser observadas e compreendidas para a efetiva aplicação da resposta hidrológica do modelo. Deve-se levar em consideração que o modelo compreende a intensidade da chuva como constante em toda a área de drenagem da bacia estudada. Também é observado como limitação do método a uniformidade da distribuição da chuva em toda a bacia. Portanto, há a tendência de majoração dos resultados. Outro ponto a ser levado em consideração é a duração do deflúvio, que serve de base para a geração dos cálculos, por meio da qual são avaliados os efeitos de todas as características da bacia no decorrer do tempo. São estes os efeitos: forma da bacia, declividade média,

detenção hidráulica, taxa de infiltração e a capacidade de escoamento dos canais de drenagem fluvial existente.

O método SCS consiste na transformação da convolução gráfica e na geração do hidrogramas para estimar as vazões acumuladas do escoamento superficial. Segundo Nines et al. (2007), a vazão gerada pelo escoamento superficial é a responsável pelas vazões de cheias, principalmente nas bacias hidrográficas urbanizadas. Ainda segundo os autores, o método, por ter o potencial de majorar seu resultado, é amplamente utilizado para a elaboração de projetos hidráulicos de drenagem e de detenção. Para estimar as vazões, são usados os dados da curva de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) das chuvas intensas que ocorrem na bacia hidrográfica estudada. O método traz como resposta hidrológica as vazões máximas proporcionais à curva IDF, pois o SCS é um método que utiliza a hipótese de que o fenômeno de transformação da chuva em vazão é regido por equações lineares. Outros parâmetros importantes e descritos por autores como Tucci & Silveira (2001) e Tomaz (2002) são: (i) tempo de concentração (T_c), (ii) tempo de ascensão (T_m), (iii) tempo de pico (T_p), (iv) tempo de recessão do hidrograma (T_r), (v) tempo de base do hidrograma (T_b) e (vi) vazão máxima ou vazão de pico (Q_p). A Figura 9 apresenta a ilustração dos parâmetros mencionados neste parágrafo.

Figura 9 - Ilustração dos parâmetros do hidrograma unitário triangular



Fonte: Plano de Drenagem de Juiz de Fora (2011).

Evidenciada a necessidade de geração dos itens supracitados, é importante usufruir da técnica da Curva-Número (CN), parte integrante do processo desenvolvido pelo SCS (1975). O método é empírico e baseado em um conjunto de relações incluídas neste processo, que buscam caracterizar o uso e cobertura do solo e o armazenamento das águas pluviais nesse solo, a partir de cada tipo de cobertura da terra. Em outras palavras, através do uso e cobertura verificados no local é possível estimar a infiltração da água no solo, com o amparo das tabelas desenvolvidas pelo método para cada tipo de cobertura.

O tempo de retorno é caracterizado como sendo a probabilidade de o evento ser superado. Tomaz (2002) conceitua o termo através da aplicação probabilística, ou seja, quanto maior o tempo de retorno, menor é a probabilidade de que ele ocorra ao menos uma vez no ano, e sua probabilidade é calculada de maneira inversamente proporcional ao tempo de retorno escolhido.

O tempo de concentração (T_c), por sua vez, é definido por Tomaz (2002) como um parâmetro importantíssimo, que determina o tempo em que o escoamento superficial percorre toda a bacia até a sua foz. A escolha da equação a ser adotada nesta pesquisa foi subsidiada pelo referencial bibliográfico, que atenta para a utilização dessas equações. Segundo Araújo et al. (2011), as equações que representam a realidade de bacias consideradas de médio a grande porte são: Kirpich (com correção) e Temez. Foi percebido que, das opções abordadas no trabalho citado, a equação de Temez tem uma resposta hidrológica com melhor acurácia para bacias de até 250km², não sendo necessária a aplicação de correções matemáticas.

Definidos todos os parâmetros de entrada do modelo, foi utilizada a equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF), extraída do *software* Pluvio 2.1 (FREITAS et al., 2001), e os valores obtidos para a cidade de Espera Feliz, MG foram incorporados ao cálculo IDF, apresentado na Equação 2.

$$IDF = \frac{1088,213 \times (2^{0,14})}{(2 \times T_c + 13,97)^{0,782}} \quad (2)$$

O período de retorno (TR) escolhido para o trabalho foi de 2 anos. Segundo Tomaz (2002), existem recomendações que relacionam o TR com vários tipos de ocupação da área, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Períodos de retorno (TR) para diferentes ocupações da área

Tipo de obra	Ocupação do solo	TR (anos)
Microdrenagem	Residencial	2
	Comercial	5
	Edifícios públicos	5
	Aeroportos	2 a 5
	Comercial, artéria de tráfego	5 a 10
	Área comerciais e residenciais	50 a 100
	Área de importância específica	500

Fonte: modificado de Tomaz (2002).

Para o bom uso da ferramenta elaborada pelo SCS (1975), diversos manuais de drenagem fazem recomendações quanto aos parâmetros, como: (i) determinar o Δt com base no critério $\Delta t \leq tc/5$, (ii) a partir da curva IDF, identificar as precipitações máximas para o tempo de retorno escolhido e duração correspondente a cada intervalo de tempo acumulado, (iii) obter as precipitações de cada intervalo de tempo e sua distribuição temporal crítica, e (iv) transformar a precipitação em vazão utilizando o método do hidrograma unitário triangular.

Para se utilizar a Curva-Número (CN), a determinação da precipitação efetiva (P_{ef}) no método, se dá através da Equação 3. Entretanto, se $P \leq 0,2S$, então $P_{ef} = 0$.

$$P_{ef} = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (3)$$

Dado que P_{ef} é a precipitação efetiva direta, em mm; P é a precipitação, em mm; S é o armazenamento potencial máximo do solo, em mm; I_a representa as perdas iniciais, incluindo perdas por armazenamento na superfície e outros fatores, em mm, de acordo com a Equação 4.

$$I_a = 0,2S \quad (4)$$

Para se obter o armazenamento superficial S através dos resultados da Curva-Número, utiliza-se a Equação 5.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

Para determinar os parâmetros do hidrograma unitário, primeiro deve-se calcular o tempo de concentração (T_c) da bacia. No presente trabalho, optou-se por utilizar a equação de Temez, conforme já mencionado nesta metodologia. A Equação 6 apresenta sua fórmula, considerando que L é o comprimento do curso de água principal, em quilômetros (km), e i trata-se do declive médio do curso de água principal, em metros/metros (m/m).

$$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{i^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (6)$$

Para a mensuração dos parâmetros de entrada foi empregado o *software* de geoprocessamento em plataforma SIG, QGIS 3.10, bem como o ARCGIS 10.3, de forma complementar, para definir as entradas do modelo.

Posteriormente, foi calculado o tempo de ascensão (T_m), sendo Δt o intervalo de tempo de simulação e T_c o tempo de concentração adotado para a bacia. A Equação 7 apresenta sua fórmula.

$$T_m = \frac{\Delta t}{2} + 0,6T_c \quad (7)$$

O próximo passo é determinar o tempo de pico (T_p) pela Equação 8, o tempo de recessão (t_r) pela Equação 9, o tempo de base (T_b) pela Equação 10 e por fim encontrar a vazão máxima, pela Equação 11, na qual Q_p é a vazão máxima do hidrograma triangular em m^3/s e A é a área da bacia em quilômetros quadrados (km^2). O intervalo de tempo é definido em unidades de T_p , recomendada a utilização de $\Delta t = T_p/5$.

$$T_p = 0,6T_c \quad (8)$$

$$tr = 1,67 \times Tp \quad (9)$$

$$Tb = Tm + tr \quad (10)$$

$$Qp = \frac{0,208 \times A}{Tm} \quad (11)$$

Para a determinação da Curva-Número (CN), que depende da cobertura do solo, o parâmetro CN apresenta valores que variam de 0 a 100. Esses valores podem ser encontrados na maioria dos manuais e livros de drenagem e hidrologia.

Solo A: baixo potencial de escoamento, alta taxa de infiltração quando completamente úmido e perfil profundo, geralmente arenoso, com pouco silte e argila;

Solo B: moderada taxa de infiltração quando completamente úmido e profundidade moderada;

Solo C: baixa taxa de infiltração quando completamente úmido, com camada de impedimento e considerável porcentagem de argila;

Solo D: elevado potencial de escoamento e baixa taxa de infiltração, raso e de camada impermeável.

Diversos pesquisadores utilizam como critério para diferenciação dos grupos de solo o estabelecimento de limites de taxas de infiltração. Brandão, Pruski & Silva (2004) recomendam a adoção de valores para definir em qual tipologia aplicar o método SCS-CN de cobertura do solo. Entretanto, como a taxa de infiltração é um parâmetro que depende muito do manejo, uso e cobertura do solo, textura e presença de microporos, esse dado varia de localidade para localidade, sendo um parâmetro de difícil adoção, pois cada local tem a sua peculiaridade e valores adotados genericamente podem não representar a realidade. A referência foi o trabalho Da Silva, De Oliveira & Souza Filho (2019), cujos autores realizaram a caracterização da geologia local definindo amostragens e modelos que demonstrem as características do solo. Ainda segundo os autores supracitados, a cidade de Espera Feliz está localizada próximo a um substrato rochoso, composto em grande parte por gnaisses e granito pré-cambrianos. Além dessa caracterização, os

estudos apontaram existência majoritária de Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolos. Esses solos, se comparados com as outras regiões da Zona da Mata, como Viçosa, permitem dizer que a variação de taxa de infiltração estaria na ordem de grandeza de 72 mm/h a 200 mm/h, pois o trabalho de Santos et al. (2015) realizou verificações e ensaios de infiltração de água no solo por meio de infiltrômetros, pelo método dos anéis concêntricos, em um latossolo vermelho-amarelo, na cidade de Viçosa. Os resultados apontaram para essa faixa de infiltração. Portanto, como parte da determinação do tipo de solo na metodologia do SCS-CN, utilizou-se o Quadro 3, desenvolvido por Brandão, Pruski & Silva (2004). Foi realizada a comparação de diversas recomendações, em diferentes pesquisas científicas, e foi definido para esta pesquisa que a melhor representatividade para o solo da região de Espera Feliz seria o solo do tipo C.

Quadro 3 - Taxas de infiltração sugeridas por diferentes pesquisadores

Autor	Grupos de solo definidos pelo SCS			
	A (mm/h)	B (mm/h)	C (mm/h)	D (mm/h)
SCS (1972)	< 5,1	5,1 – 20,3	20,3 – 127,0	>127,0
Leven e Steder (1967)	<20,3	20,3 – 63,5	63,5 – 127,0	>127,0
USFS (sem data)	<12,7	12,7 – 31,8	31,8 – 76,2	>76,2
Miller et al. (1973)	<2,0	2,0 – 3,8	3,8 – 7,6	>7,6
Estgate (1977)	<4,6	4,6 – 9,9	9,9 – 30,0	>30,0
Musgrave (1973)	<5,6	5,6 – 11,9	11,9 – 25,4	>25,4
Pruski et al. (1997)	>3,0	3,0 – 40,0	40,0 – 190,0	> 190,0

Fonte: Brandão, Pruski & Silva (2004).

Determinados todos os parâmetros supracitados por esta metodologia, gerou-se o hidrograma unitário. A partir deste, determinou-se o hidrograma gerado pela chuva de pico. O procedimento executado é em seguida denominado convolução gráfica da chuva, a fim de obter o hidrograma de escoamento direto. Isso é apresentado nos resultados desta pesquisa e os cálculos são apresentados no apêndice pós-textual.

4.1.5.2 INDICADORES MORFOLÓGICOS

As variáveis que influenciam o clima e conseqüentemente a pluviometria têm uma característica física interessante nos modelos matemáticos, pois não se trata de um sistema harmônico — a perspectiva de alteração de um dos parâmetros de entrada descaracteriza por completo a sua previsibilidade futura, sendo, portanto, definido como um sistema caótico. Segundo Kokubun (2004), nos sistemas conhecidos na mecânica clássica como caóticos, a previsão de longo prazo não é efetiva, com pequenas variações nos parâmetros de entrada gerando grandes erros nos modelos matemáticos. Nessa linha, pode-se compreender o sistema caótico como sensível às alterações dos parâmetros de entrada, gerando trajetórias complexas, totalmente desconhecidas e imprevisíveis. Uma maneira de diminuir a imprevisibilidade dos sistemas pluviais é conhecer as características físicas dos sistemas fluviais, que certamente absorverão as oscilações e alterações das características do regime pluvial. Assim, os estudos morfológicos são de extrema importância porque agregam confiabilidade e previsibilidade ao sistema.

Os estudos da morfologia objetivam analisar as formas e os processos que geram seus resultados nas configurações dos relevos. No caso desta pesquisa, o interesse pelo estudo da morfologia ganha forma no que tange os conhecimentos relacionados ao escoamento dos rios. A bacia hidrográfica enquanto modelo de entrada para a morfologia é destacada por Christofolletti et al. (1988) como sendo de grande importância para se compreender o objeto central dos processos, que resulta no conhecimento amplo das características físicas da morfologia da paisagem fluvial. Para buscar compreender essas características, Machado & Torres (2012) endossam que o método de análise da morfologia tem potencial para gerar dados quantitativos, que diferenciem os aspectos hidrográficos através de indicadores e parâmetros que respondam matematicamente aos critérios estabelecidos, corroborando para a diminuição da incerteza do sistema derivado dos aspectos pluviais.

No contexto desta pesquisa, são utilizados os recursos metodológicos e matemáticos da morfologia, no intuito de caracterizar as bacias hidrográficas dos Rios Caparaó e São João; ambos convergindo para a região central da cidade de Espera Feliz. Dessa forma, pode-se dizer que a seleção adequada dos indicadores é essencial para se compreender as dinâmicas hidrográficas no local. Os indicadores que seguem foram selecionados porque são amplamente utilizados na literatura para destacar o potencial de inundação em determinada bacia hidrográfica. São eles: (i) área [A] e perímetro [P] da

bacia, (ii) hierarquia fluvial [Hf] (ordenamento de canais), (iii) comprimento do rio principal [L], (iv) densidade de drenagem [Dd], (v) coeficiente de manutenção [Cm], (vi) índice de circularidade [Ic], (vii) relação de bifurcação [Rb], (viii) declividade média [H], (ix) coeficiente de rugosidade [RN], (x) índice de sinuosidade (Is) e (xi) perfil longitudinal e gradiente altimétrico. Os cálculos supracitados foram desenvolvidos por intermédio de geotecnologias, utilizando as ferramentas SIG, através do *software* QGIS 3.10 e complementarmente o ARCGIS 10.3. Ao considerar esses indicadores em conjunto, é possível obter uma compreensão abrangente das características da bacia, permitindo a elucidação dos motivos causadores do fenômeno estudado. Essa abordagem integrada, contribui com os outros recursos apresentados nesta pesquisa e gera embasamento técnico e científico para a tomada de decisão na busca por caminhos de resolução.

Para a geração da área [A] e do perímetro [P], foi utilizada a ferramenta de “calcular geometrias” da plataforma SIG. Na geração da hierarquia fluvial [Hf] foi utilizado o método de Strahler (1982), no qual estava incorporado na tabela de atributos da hidrografia baixada, após a organização dos layers evidenciou os ordenamentos do método. Segundo Strahler (1982) o seu ordenamento segue a seguinte lógica:

- Primeira Ordem – canais pequenos e sem tributários desde a nascente;
- Segunda Ordem – canais com confluência de dois canais de primeira ordem, recebendo tributários de canais de primeira ordem;
- Terceira Ordem – canais com confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber tributários de primeira e segunda ordem;
- Quarta Ordem – canais com confluência de dois canais de terceira ordem, podendo receber tributários de todas as ordens anteriores, e assim sucessivamente para as ordens superiores, seguindo o mesmo critério lógico.

O comprimento do rio principal [L] foi calculado com uma ferramenta de cálculo de geometrias, sendo definido como o trecho de maior comprimento, da nascente até a sua foz.

A densidade de drenagem [Dd], por sua vez, trata-se de um parâmetro que utiliza de variáveis do sistema morfológico. Segundo Machado (2011), o indicador revela-se fundamental para entender as dinâmicas hidrológicas e os potenciais assoreamentos na região. Isso significa que em locais que apresentam elevada densidade de drenagem, observa-se a intensificação de processos erosivos, destacando a necessidade de uma

abordagem cuidadosa nas práticas de manejo e conservação de matas remanescentes. A Equação 12, apresenta como deve-se calcular o parâmetro.

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (12)$$

Sendo Dd a densidade de drenagem (km/km^2), Lt o comprimento total dos canais da bacia (km) e A representando a área da bacia (km^2).

O coeficiente de manutenção, segundo Machado & Torres (2012), indica a área necessária para manter ativo um quilômetro do canal e assim caracterizar o sistema de drenagem local. Já Machado (2011) aponta este indicador como essencial para definir a área mínima necessária à eficiente manutenção do escoamento de água, destacando regiões cruciais para a recarga hídrica. A Equação 13 apresenta a maneira de cálculo do indicador.

$$Cm = \frac{1}{Dd} \quad (13)$$

O índice de circularidade, inicialmente proposto por Muller (1953), é um indicador que, segundo o autor, avalia a correlação de uma bacia de drenagem com uma circunferência, ou seja, quanto mais próximo o resultado deste estiver de um, maior é a semelhança com uma circunferência. Em termos práticos, isso significa que a forma da bacia se assemelha a uma circunferência, e, portanto, tem-se uma resposta hidrológica equidistante, promovendo a chegada das águas em conjunto nos pontos mais baixos, gerando alagamentos. Machado & Torres (2012) explicam que é necessária a aplicação de três equações: a primeira é a definição do raio equivalente, utilizando a Equação 14, com o comprimento sendo o perímetro total da bacia hidrográfica. Posteriormente, utiliza-se o raio equivalente encontrado na Equação 15, que produzirá a área de um círculo equivalente. Por fim, utiliza-se a Equação 16, que trata do índice de circularidade.

$$Re = \frac{c}{2\pi} \quad (14)$$

$$Ac = \pi Re^2 \quad (15)$$

$$Ic = \frac{A}{Ac} \quad (16)$$

Sendo Re o raio equivalente [km], C o comprimento equivalente [km], Ac a área do círculo [km²] e A representando a área total da bacia [km²].

A relação de bifurcação envolve o número total de segmentos de ordenamento (ordenamento de Strahler) e o número total de segmentos de ordem imediatamente superior. Machado & Torres (2012) relatam que este indicador pode representar regiões que apontam características geométricas específicas para cada tipologia de bacia. Por exemplo, valores mais altos indicam que a bacia tem um formato alongado e, com isso, tem um hidrograma característico desse formato. Para o cálculo desse indicador utiliza-se a Equação 17.

$$Rb = \frac{N(u)}{N(u+1)} \quad (17)$$

Sendo Rb a relação de bifurcação, $N(u)$ o número de segmentos de determinada ordem, e $N(u+1)$ o número de segmentos de ordem imediatamente superior.

Para definir a declividade média (H), Machado & Torres (2012) apresentam uma equação interessante, em que é feita a verificação do comprimento de todas as curvas de nível (em quilômetros), a equidistância dessas curvas entre si (também em quilômetros), e enfim a área total da bacia (em quilômetros quadrados). A Equação 18 apresenta essa descrição matematicamente.

$$H = \frac{\sum 1Cn \times \Delta h}{A} \times 100\% \quad (18)$$

Sendo $\sum 1Cn$ a soma dos comprimentos de todas as curvas de nível, Δh a equidistância entre as curvas de nível e A representando a área da bacia hidrográfica. As

duas primeiras variáveis são dadas em quilômetros, ao passo que a terceira é dada em quilômetros quadrados.

O coeficiente de rugosidade é a relação entre dois indicadores previamente calculados: a densidade de drenagem multiplicada pela declividade média. Para Machado & Torres (2012), essa comparação é importante porque indica um potencial de ocorrência de erosões na bacia hidrográfica. Trata-se de um indicador relevante para a pesquisa aqui desenvolvida, uma vez que o regime hídrico está diretamente envolvido na possibilidade de erosão, devido à velocidade da água e sua capacidade de promover riscos para a sociedade. Este indicador, associado à densidade de drenagem, tem importância fundamental nesta pesquisa. A Equação 19 apresenta a fórmula matemática para o seu desenvolvimento.

$$RN = Dd \times H \quad (19)$$

Considerando que Dd é a densidade de drenagem, H é a declividade média e RN é o coeficiente de rugosidade. Ressalta-se que o resultado da equação é adimensional.

O índice de sinuosidade (Is) dos meandros envolve a relação entre o comprimento do rio principal (L) e distância entre a cabeceira e a foz da bacia (exutório). Machado & Torres (2012) explicam que esse parâmetro é um dos indicadores mais utilizados em pesquisas científicas, por fornecer um mecanismo interessante como resposta matemática ao problema das inundações de origens morfológicas. Entretanto, é importante destacar que é necessária a utilização de outros indicadores que corroborem o desenvolvimento dos dados. A Equação 20 apresenta a fórmula matemática em questão.

$$Is = \frac{L}{D} \quad (20)$$

Sendo L o comprimento do curso d'água principal (em quilômetros), D a distância entre a cabeceira e a foz (em quilômetros) e Is o índice de sinuosidade (adimensional).

Para finalizar esta descrição metodológica, foi utilizada a plataforma SIG para gerar o perfil longitudinal do curso d'água principal das bacias estudadas. Após o desenvolvimento do perfil, o próximo elemento elaborado foi o gradiente altimétrico, que

trata da relação entre a maior elevação do perfil longitudinal, subtraída a altitude de menor elevação, dividido pelo comprimento total do curso d'água principal. Esse desenvolvimento é retratado matematicamente pela Equação 21.

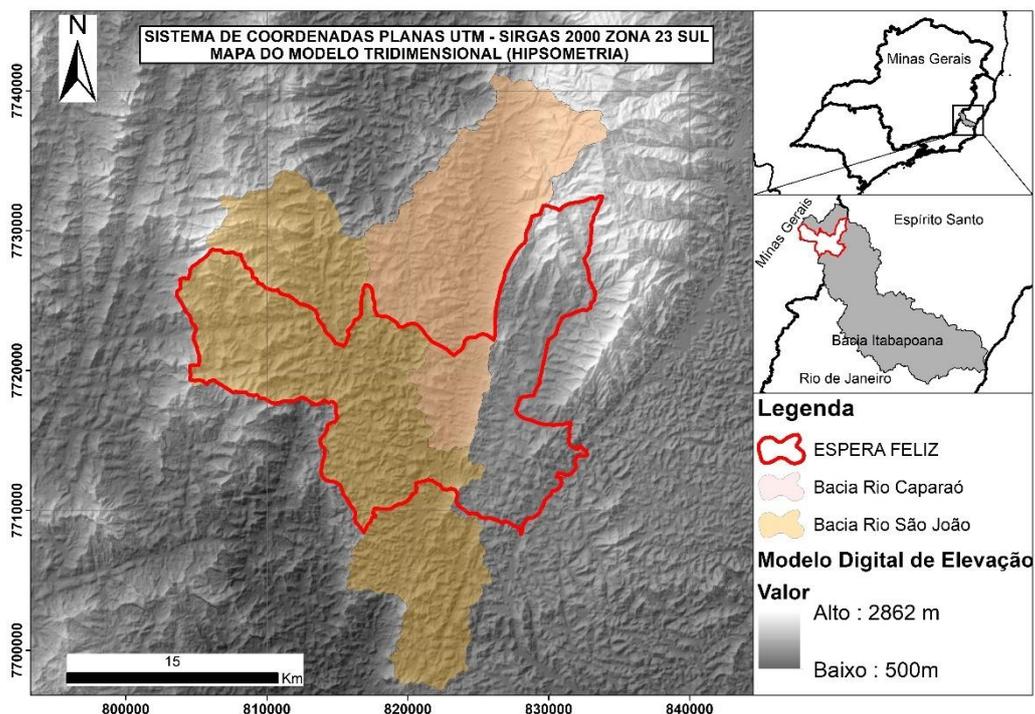
$$G = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \quad (21)$$

Sendo H_{max} a altitude máxima de cabeceira; H_{min} a altitude mínima da foz; e L representando o comprimento total do curso d'água principal (todos na mesma unidade de medida). G refere-se ao gradiente altimétrico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados apresentados neste tópico foram gerados como resultados preliminares da presente pesquisa, pois foram o *input* dos modelos descritos na metodologia, ou seja, decorrentes do tratamento aplicado à base de dados em plataforma SIG. Na sequência, foram gerados os resultados finais a serem apresentados em tópico específico. A Figura 10 apresenta o modelo digital de elevação, que foi instrumento para a geração de diversos outros subprodutos.

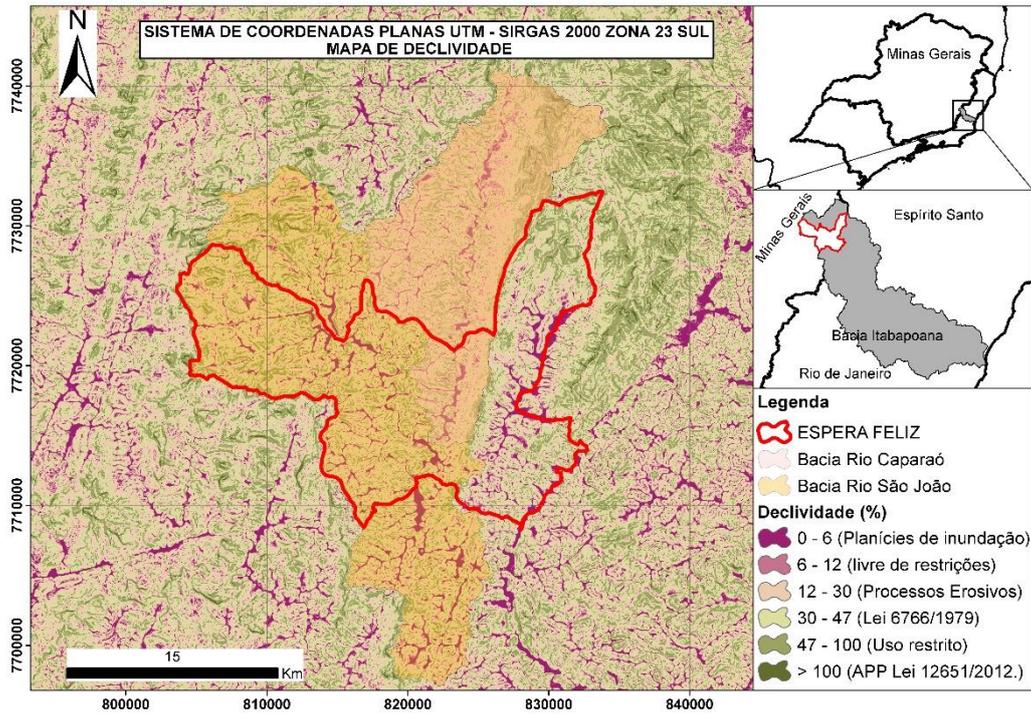
Figura 10 - Modelo Tridimensional de Espera Feliz (MG) (HIPSOMETRIA)



Fonte: desenvolvido pelo autor.

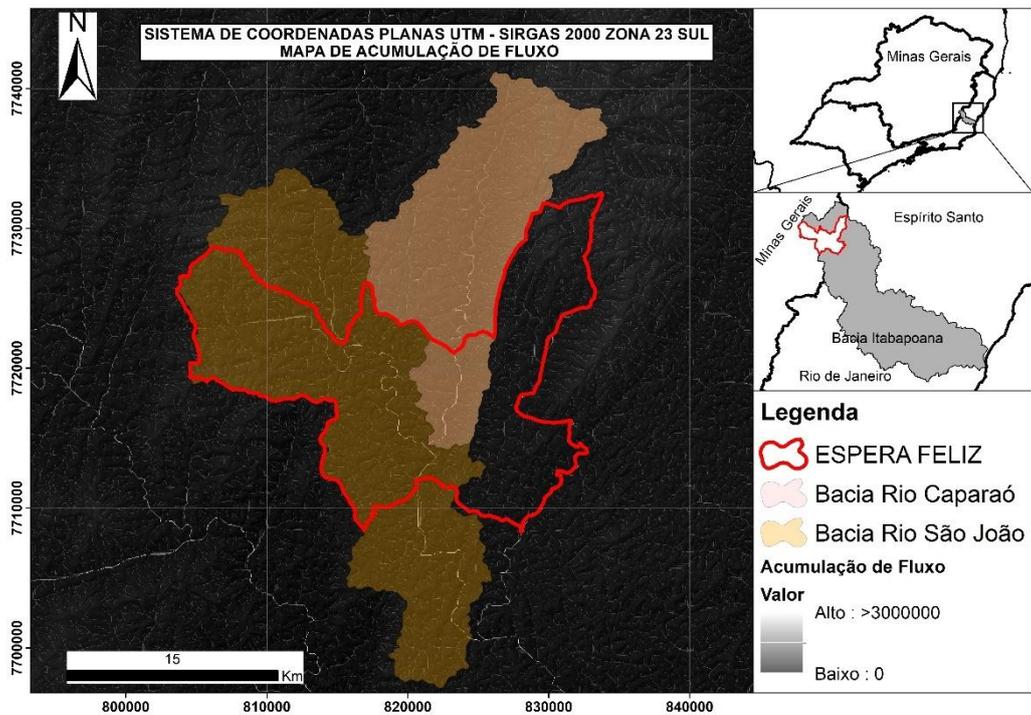
Através do modelo digital de elevação foram geradas a declividade e a acumulação de fluxo, apresentadas respectivamente nas Figuras 11 e 12. O desenvolvimento destes produtos se deu pelo processamento do modelo digital de elevação, utilizando ferramentas específicas para tal finalidade. Da Costa, Fidalgo & Schuler (2011) e Rocha (2019) desenvolveram procedimentos para o mapeamento de declividade. Na presente pesquisa, o mapeamento foi elaborado sob a referência dos materiais desses autores, com modificações orientadas à demanda específica deste trabalho.

Figura 11 - Declividade



Fonte: desenvolvido pelo autor.

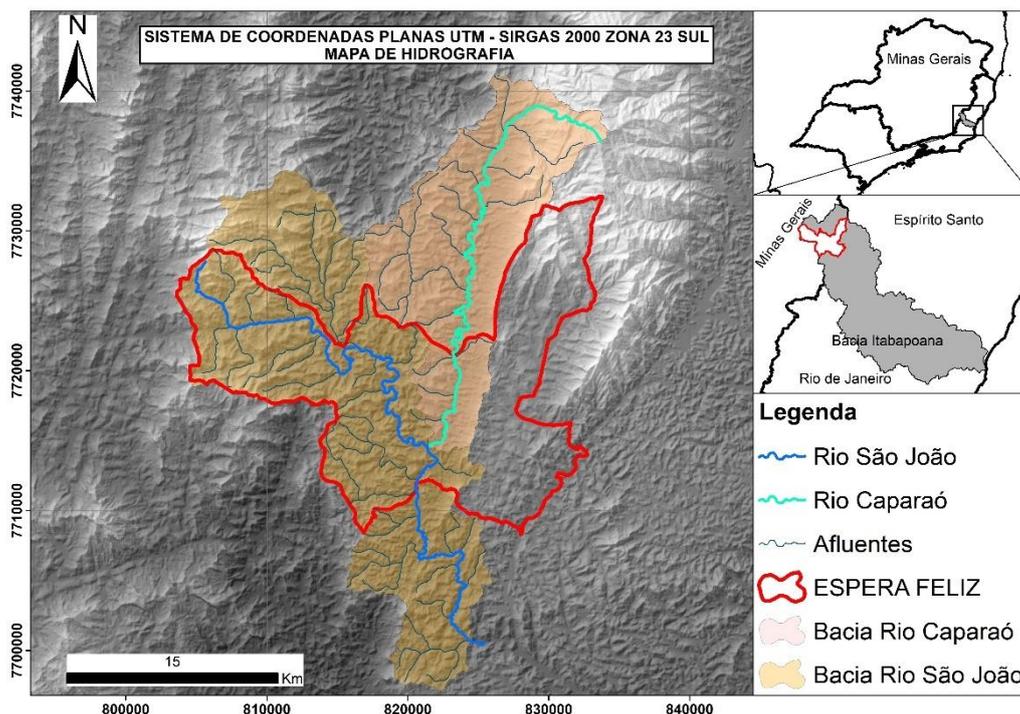
Figura 12 - Acumulação de fluxo



Fonte: desenvolvido pelo autor.

A acumulação de fluxo é um produto interessante, pois revela os caminhos preferenciais de drenagem existentes no modelo digital de elevação, onde o fluxo tende a acumular em função da morfologia. Já os dados hidrográficos foram tratados através da compatibilização manual dos cursos de água principais (Rio Caparaó e Rio São João), para que fosse possível revelar os comprimentos e sinuosidades reais. A Figura 13 apresenta o resultado.

Figura 13 - Hidrografia



Fonte: desenvolvido pelo autor.

A hidrografia foi baixada através do site da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) e editada conforme informado, pois no que se refere à base oficial dos metadados, o arquivo vem em formato *shapefile*, porém em multiescalas, modificando a sua sinuosidade original devido à limitação escalar.

Para o desenvolvimento do modelo pluviométrico, foi necessário realizar o *download* das estações pluviométricas que contornam as bacias hidrográficas estudadas. Foram baixadas as seguintes estações pluviométricas: (i) 2042000, (ii) 2041005, (iii) 2041014, (iv) 2041016, (v) 2042017, (vi) 2041046, (vii) 2142009, (viii) 2141015 e (ix) 2041013. Com os dados planilhados, a etapa seguinte consistiu no levantamento e no

tratamento dos dados com as médias dos meses mais chuvosos no intervalo de 30 anos. O Quadro 4 apresenta os resultados dos tratamentos dos dados em cada estação.

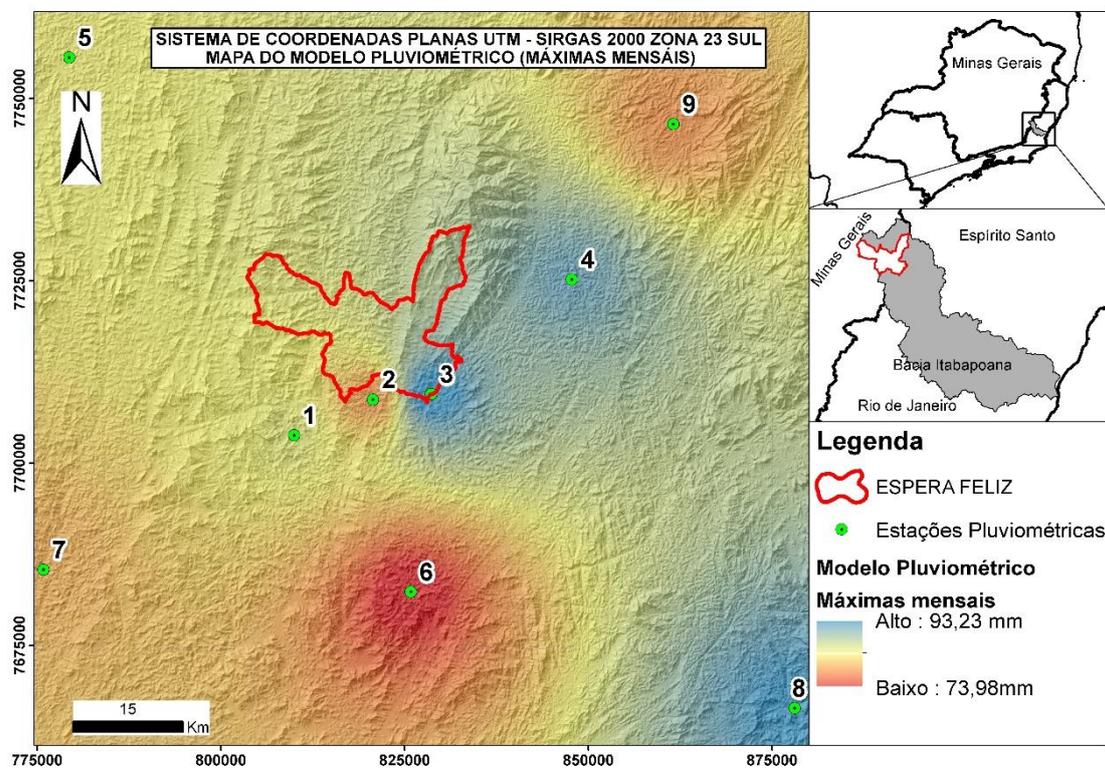
Quadro 4 - Resultados das médias anuais das estações pluviométricas

Estação pluviométrica	Nº da estação	Média dos meses mais chuvosos
1	2042000	84,09
2	2041005	79,25
3	2041014	93,23
4	2041016	90,33
5	2042017	83,32
6	2041046	73,98
7	2142009	80,48
8	2141015	91,78
9	2041013	79,03

Fonte: desenvolvido pelo autor.

A Figura 14 apresenta o resultado do desenvolvimento do modelo digital de pluviometria, gerado através da conversão das isolinhas para o formato *raster*.

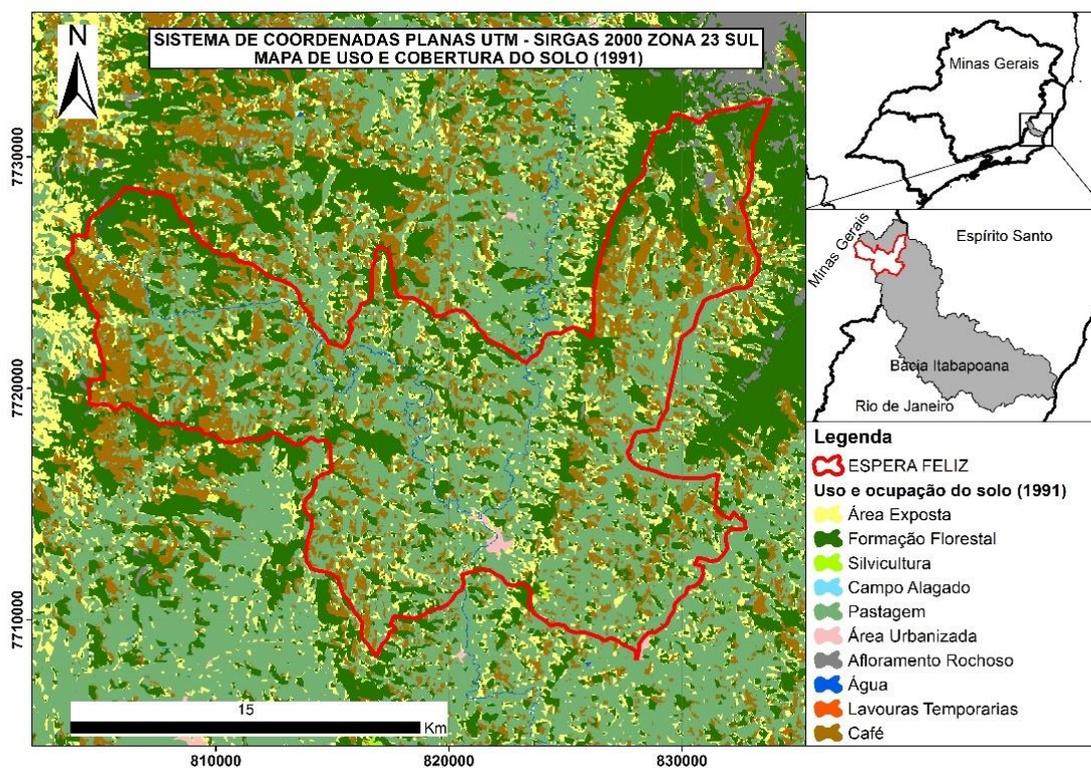
Figura 14 - Modelo pluviométrico



Fonte: desenvolvido pelo autor.

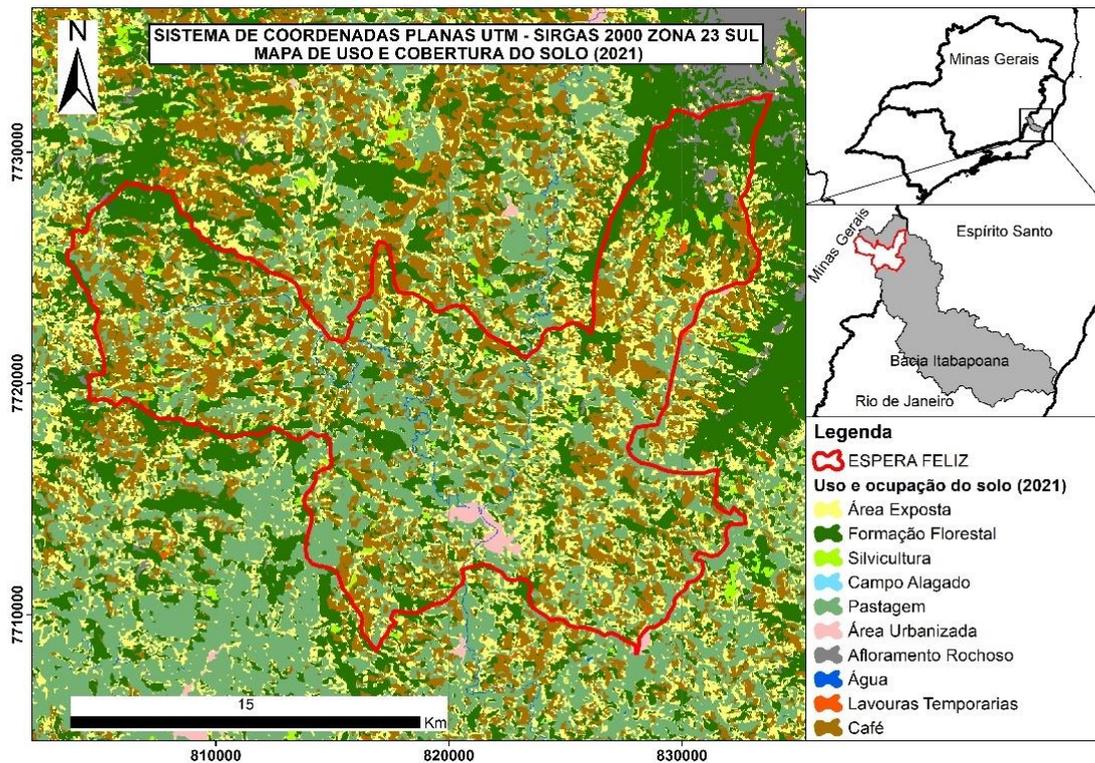
Para finalizar o levantamento e o tratamento, foram baixados e também tratados os dados de uso e cobertura do solo, disponibilizados pelo MapBiomas nas datas de 1991 e 2021, apresentados nas Figuras 15 e 16.

Figura 15 - Uso e cobertura do solo 1991



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 16 - Uso e cobertura do solo 2021



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Pelos mapas de uso e cobertura do solo pode-se perceber o aumento de área exposta, silvicultura, área urbana e café. Essas alterações têm um impacto direto nas simulações das estimativas de escoamento superficial e na ampliação das susceptibilidades a inundação ao longo do tempo. Notavelmente, em termos percentuais, os maiores aumentos foram observados no cultivo de café e na silvicultura. Essa informação é crucial para entender as respostas hidrológicas que o modelo apresenta, ressaltando a importância do manejo do solo.

5.1 RESULTADOS DA HIERARQUIZAÇÃO E GERAÇÃO DE MAPAS DE SUSCEPTIBILIDADE

Magalhães et al. (2011) recorreram ao método proposto por Saaty (1990) na geração da hierarquização dos pesos em cada base de dados. Na presente pesquisa, também foi adotado o método de hierarquização AHP — seus resultados para os cenários simulados foram apresentados nos Quadros 5 e 6.

Quadro 5 - Matriz de hierarquização 1

MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 1						
Fator	Ac. Flu*	Pre*	Hipsometria	Declividade	Uso*	PESOS
Ac. Flu*	1,0000	0,1111	0,2000	0,2000	7,0000	0,1059
Pre*	9,0000	1,0000	3,0000	0,2000	0,1429	0,2071
Hipsometria	5,0000	0,3333	1,0000	0,3333	9,0000	0,2036
Declividade	5,0000	5,0000	3,0000	1,0000	3,0000	0,3327
Uso*	0,1429	7,0000	0,1111	0,3333	1,0000	0,1508

Ac. Flu* - Representa a acumulação de Fluxo; **Uso*** - Representa o uso e cobertura do solo (1991 – 2021); **Pre*** - Representa a precipitação.

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 6 - Matriz de hierarquização 2

MATRIZ DE COMPARAÇÃO CENÁRIO 2					
Fator	Pre*	Hipsometria	Declividade	Uso*	PESOS
Pre*	1,0000	3,0000	0,2000	0,1429	0,1537
Hipsometria	0,3333	1,0000	0,3333	9,0000	0,2572
Declividade	5,0000	3,0000	1,0000	3,0000	0,3902
Uso*	7,0000	0,1111	0,3333	1,0000	0,1988

Uso* - Representa o uso e cobertura do solo (1991 – 2021); **Pre*** - Representa a precipitação.

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Obtidos os pesos gerados pela metodologia AHP, foi atribuído o desenvolvimento de duas equações para a geração dos mapas de susceptibilidade a inundação, sendo que, no primeiro cenário, a ponderação matemática inclui o item referente à acumulação de fluxo, resultando na produção de dois mapas: um com o uso e cobertura do solo de 1991 e outro de 2021. De forma similar, o segundo cenário foi desenvolvido sem a inclusão da acumulação de fluxo nos pesos, gerando também dois mapas: um com o uso e cobertura do solo de 1991 e outro de 2021. Essa abordagem possibilita uma comparação mais precisa entre os diferentes cenários ao longo do tempo e ajuda a identificar as mudanças significativas nas áreas suscetíveis a inundação. As Equações 22 e 23 que se seguem foram desenvolvidas para ponderar os pesos de cada camada a ser desenvolvida em plataforma SIG.

$$Fr1 = 0,1059A + 0,2071P + 0,2036H + 0,3327D + 0,1507U \quad (22)$$

Sendo Fr1 o fator de risco 1, 'A' acumulação de fluxo, 'P' a precipitação, 'H' a hipsometria, 'D' declividade e 'U' uso e cobertura do solo.

$$Fr2 = 0,1537P + 0,2572H + 0,3902D + 0,1989U \quad (23)$$

Sendo: Fr2 o fator de risco 2, 'P' Precipitação, 'H' hipsometria, 'D' declividade e 'U' uso e cobertura do solo.

Os pesos determinados pelo método AHP referem-se aos tipos de produtos previamente baixados e tratados. Entretanto, foi necessário atribuir notas em cada subproduto para viabilizar a confecção dos mapas a serem gerados. Os valores atribuídos a cada pixel das bases matriciais em formato *raster* foram reclassificados e apresentados nos Quadros 7, 8, 9, 10 e 11, e ao final foi feita uma média ponderada das notas através da calculadora *raster*.

Quadro 7 - Notas de reclassificação da hipsometria

Classes de altitudes	Notas
2862 - 2000	0
2000 - 1500	2
1500 - 1000	4
1000 - 775	6
775 - 500	10

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 8 - Notas de reclassificação da declividade

Classes de declividade	Notas
0 - 6 (%)	10
6 - 12 (%)	8
12 - 30 (%)	6
30 - 47 (%)	4
47 - 100 (%)	2
>100 (%)	0

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 9 - Notas de reclassificação do uso e cobertura do solo

Classes de uso e cobertura do solo	Notas
Área Exposta	7
Formação Florestal	1
Silvicultura	2
Campo Alagado	10
Pastagem	4
Área Urbana	9
Afloramento Rochoso	6
Água	10
Lavoura Temporária	5
Café	3

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 10 - Notas de reclassificação pluviométrica

Classes de pluviometria (mm)	Notas
73 - 74	0
74 - 78	4
78 - 82	6
82 - 86	8
86 - 90	9
90 - 94	10

Fonte: desenvolvido pelo autor.

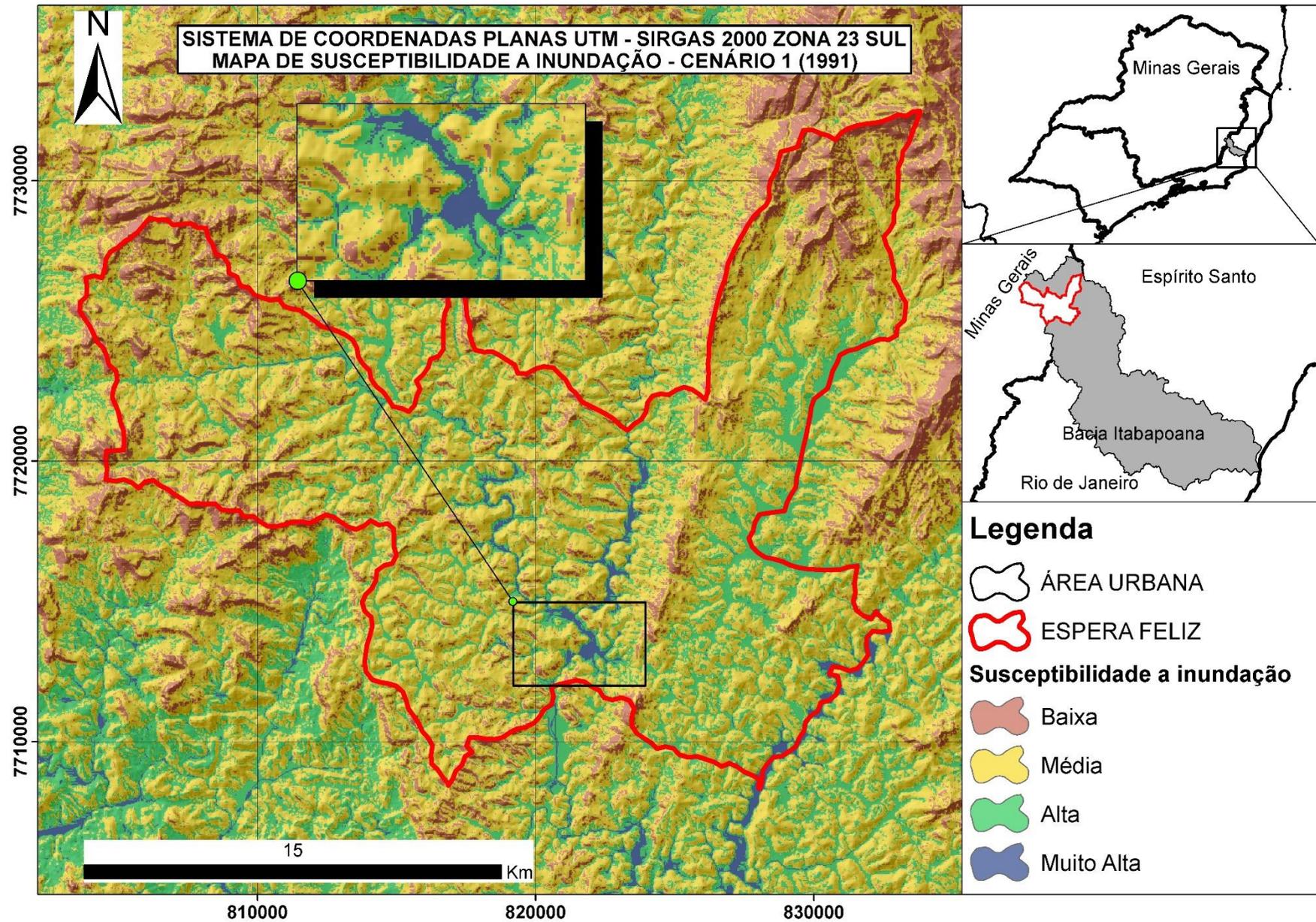
Quadro 11 - Notas de reclassificação da acumulação de fluxo

Classes de acumulação (value)	Notas
≤ 1	0
1 - 3	1
3 - 5	2
5 - 8	3
8 - 10	4
10 - 50	5
50 - 1.000	6
1.000 - 10.000	7
10.000 - 100.000	8
100.000 - 1.000.000	9
$\geq 1.000.000$	10

Fonte: desenvolvido pelo autor.

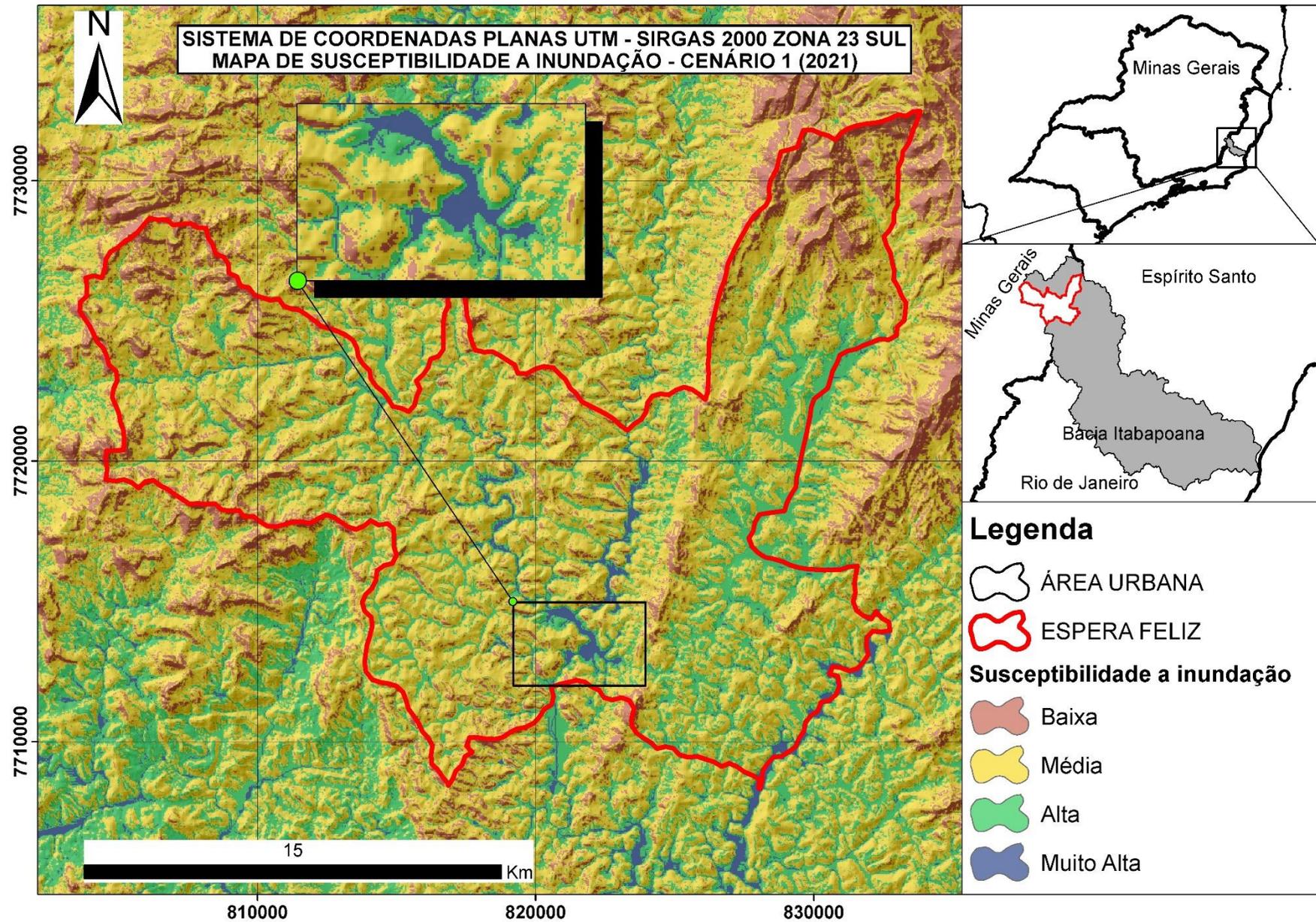
Concluídas a reclassificação e a atribuição das notas em cada imagem matricial no formato *raster*, utilizou-se a ferramenta conhecida como calculadora raster do *software* QGIS 3.10, com o qual foram feitos os cálculos algébricos pixel a pixel e geradas Figuras 17, 18, 19 e 20. Além disso, foram desenvolvidos mapas específicos ampliando o espectro escalar para identificar os pontos mais suscetíveis a inundações na cidade de Espera Feliz, utilizando imagens de satélite como base para conhecer efetivamente os locais dentro da cidade que precisam de atenção. É importante destacar que somente as susceptibilidades relacionadas ao ano de 2021 foram utilizadas na verificação com as imagens de satélite, visto que avaliar o mapeamento de 1991 não seria relevante para esse propósito. O mapeamento de 1991 teve como objetivo demonstrar a evolução das susceptibilidades ao longo do tempo. Nas Figuras 21 a 32 é possível observar a ampliação do espectro escalar.

Figura 17 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 1991



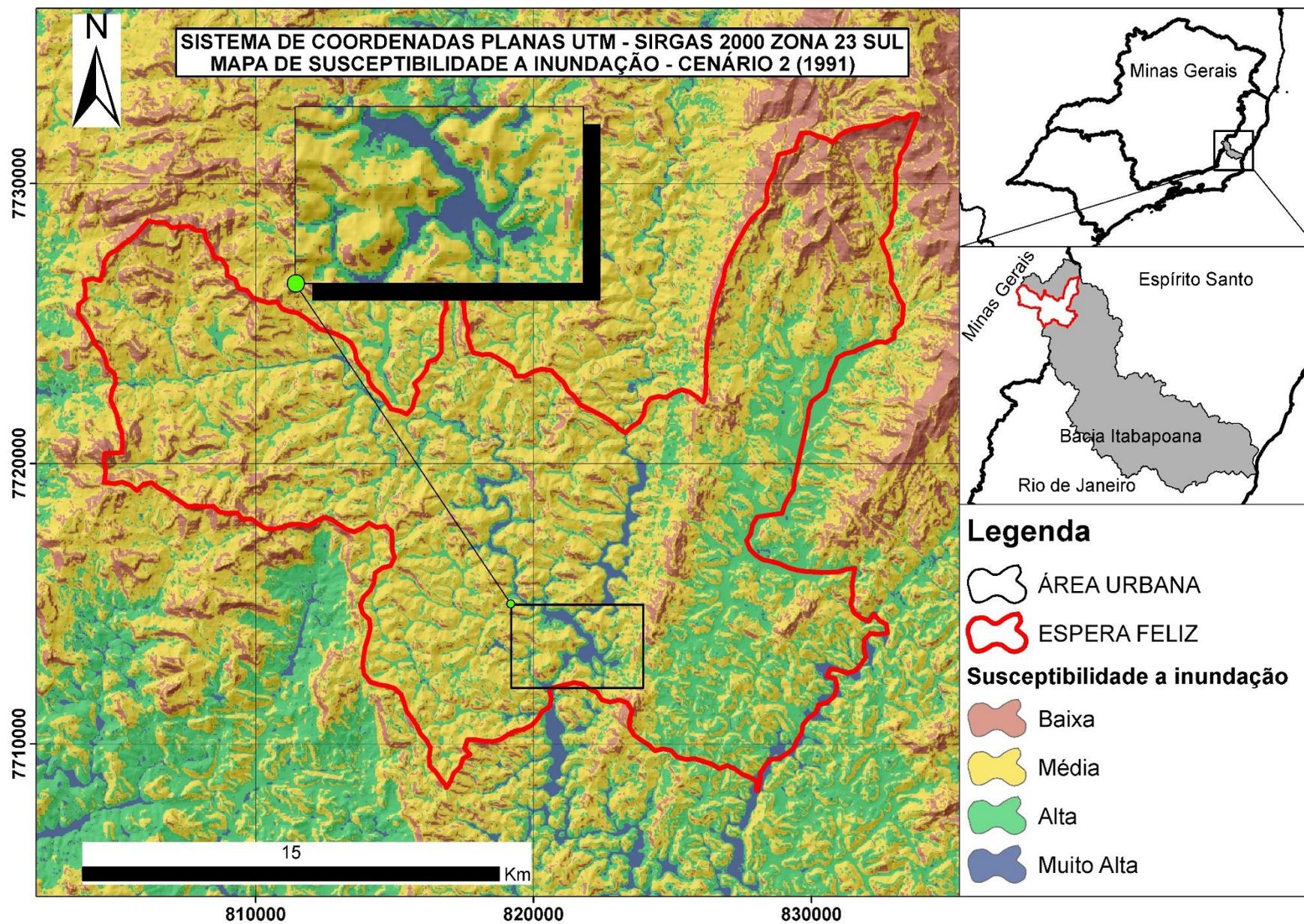
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 18 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 2021



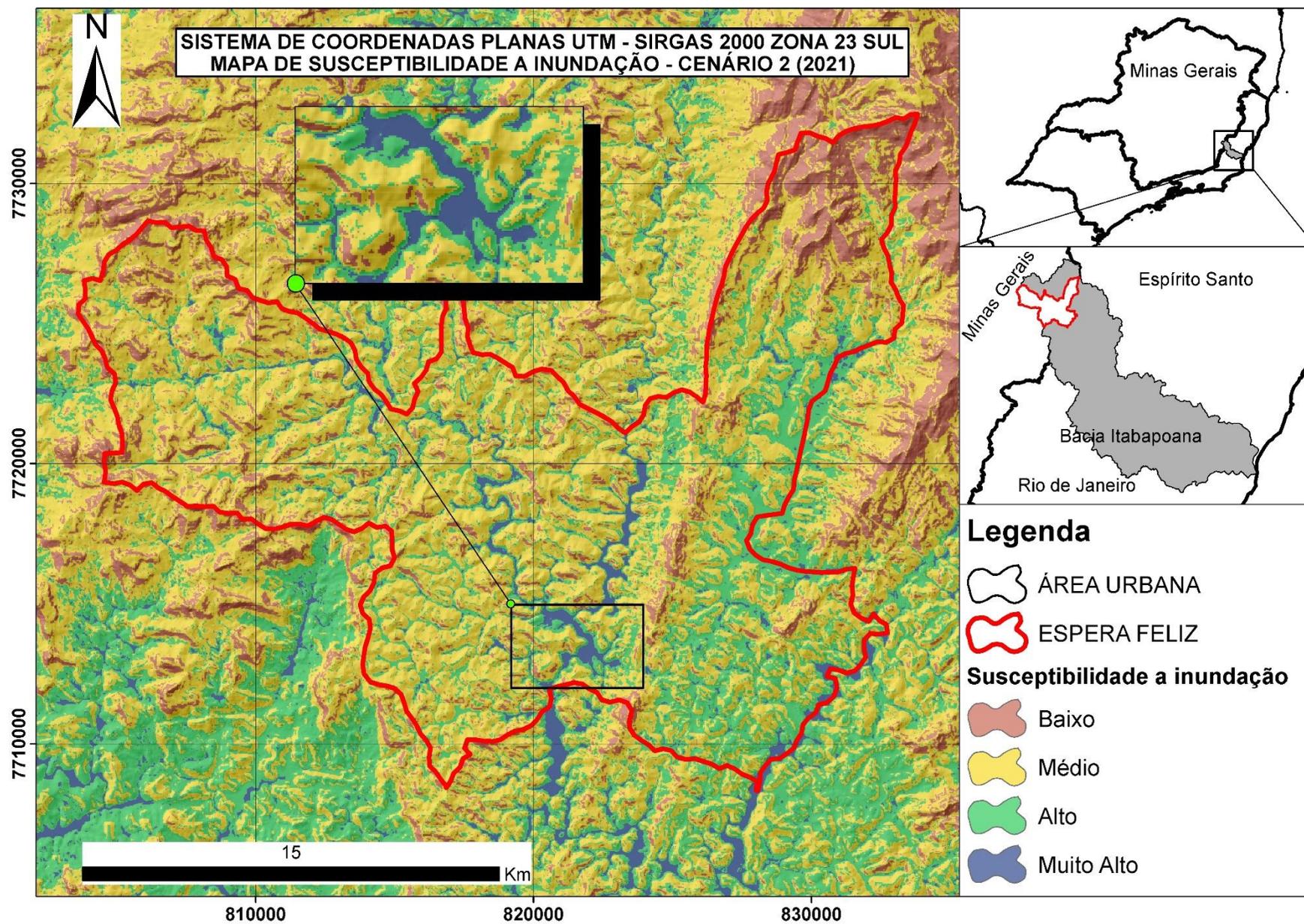
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 19 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 1991



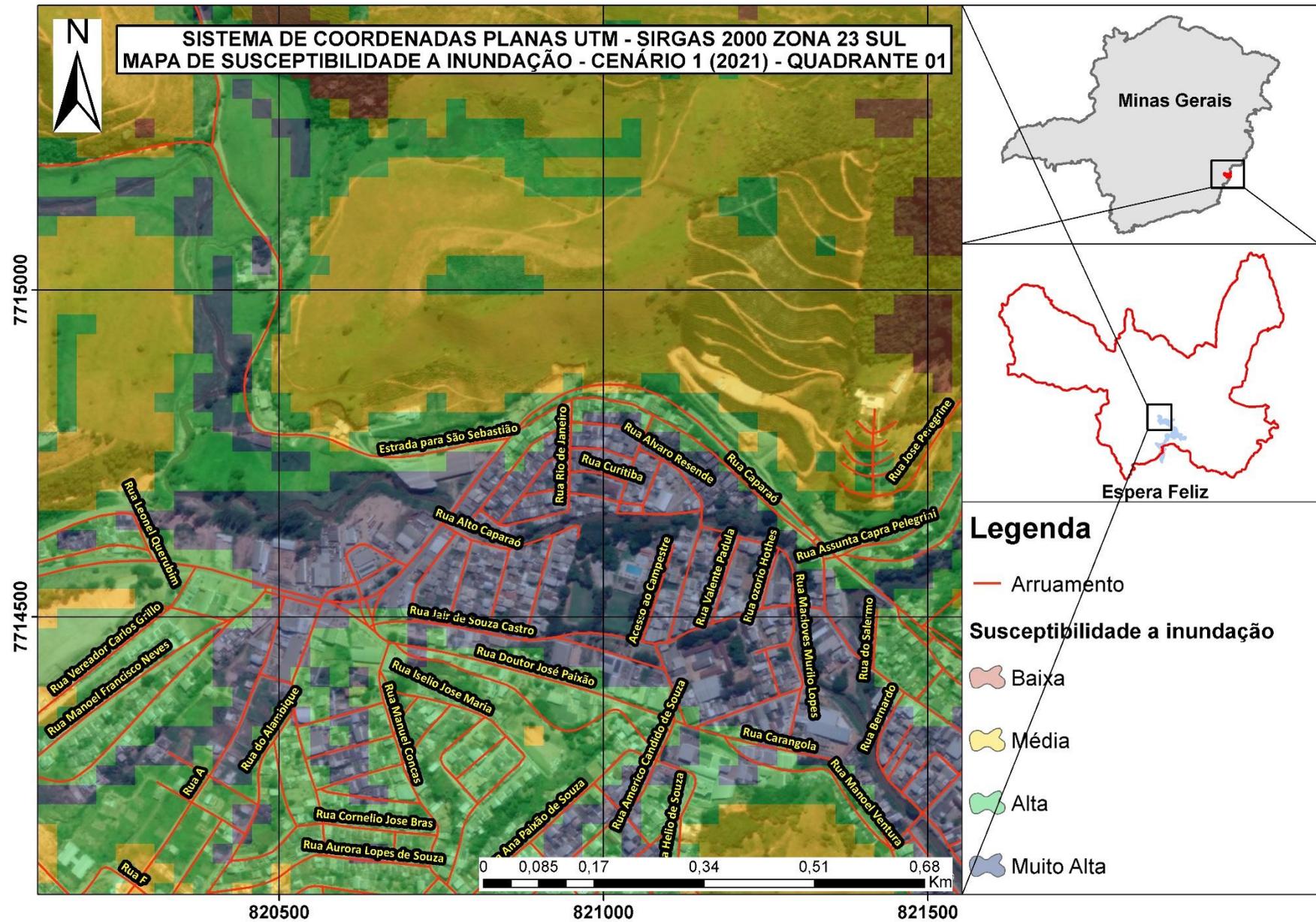
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 20 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 2021



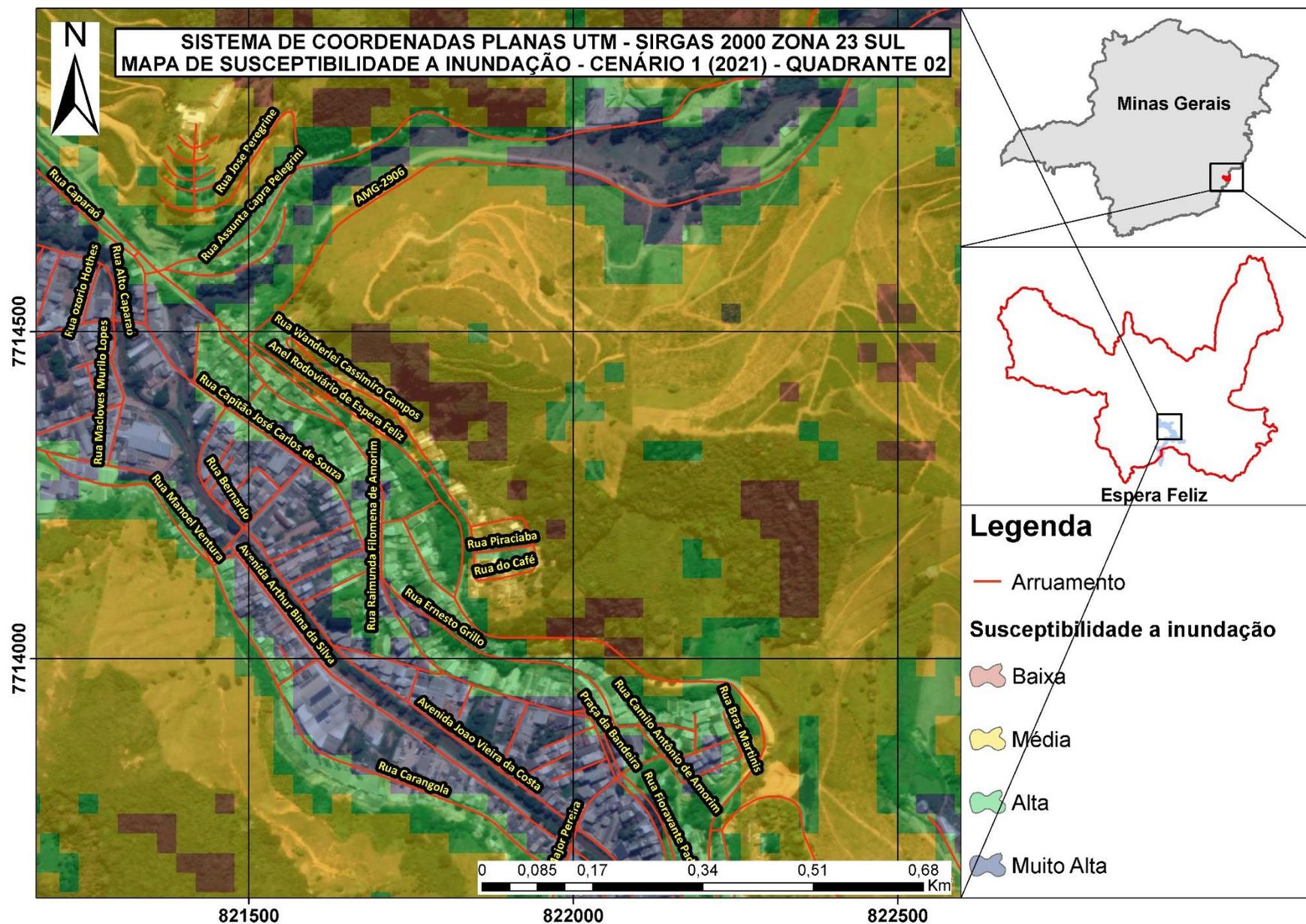
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 21 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 1º Quadrante - 2021



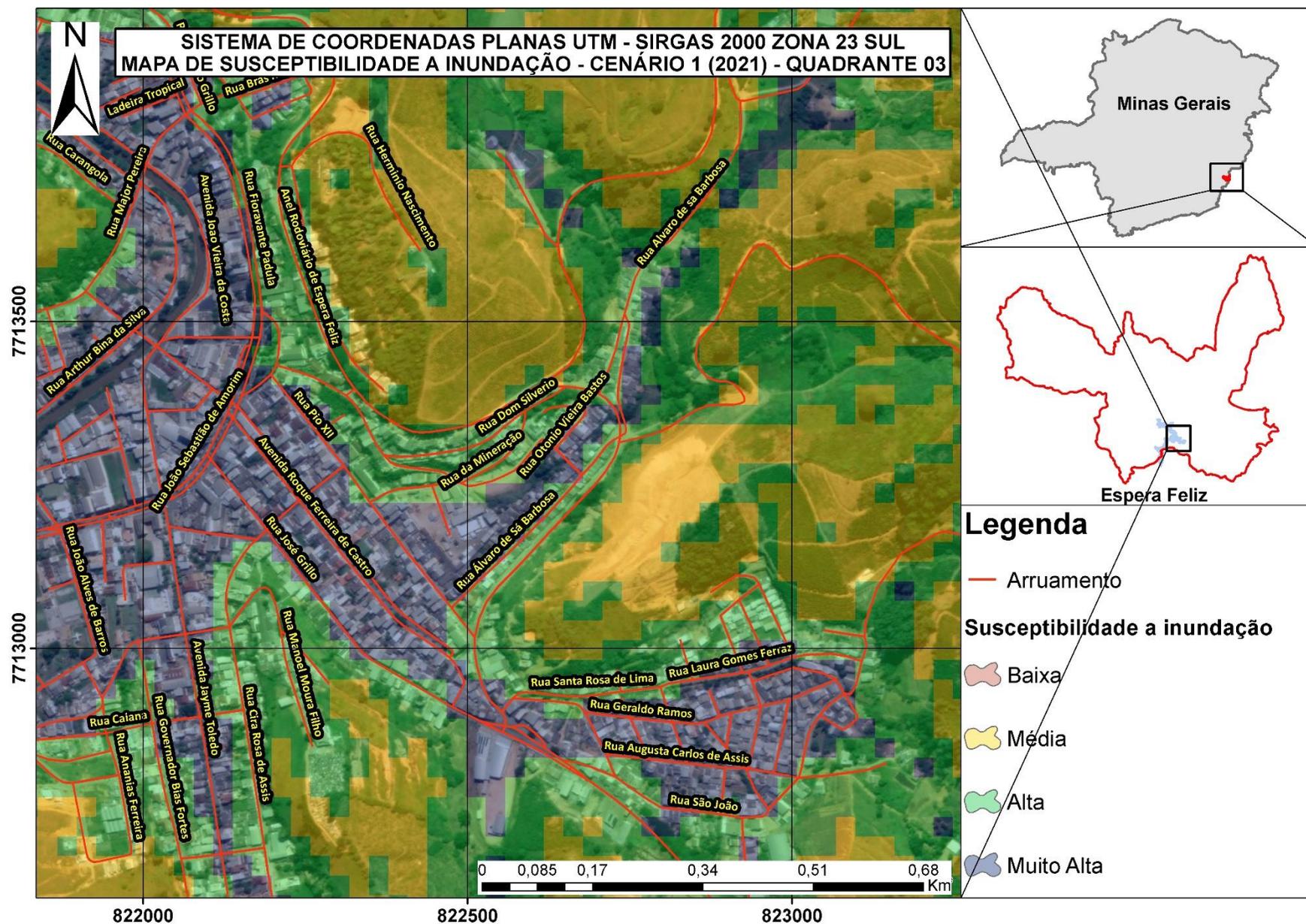
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 22 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 2º Quadrante - 2021



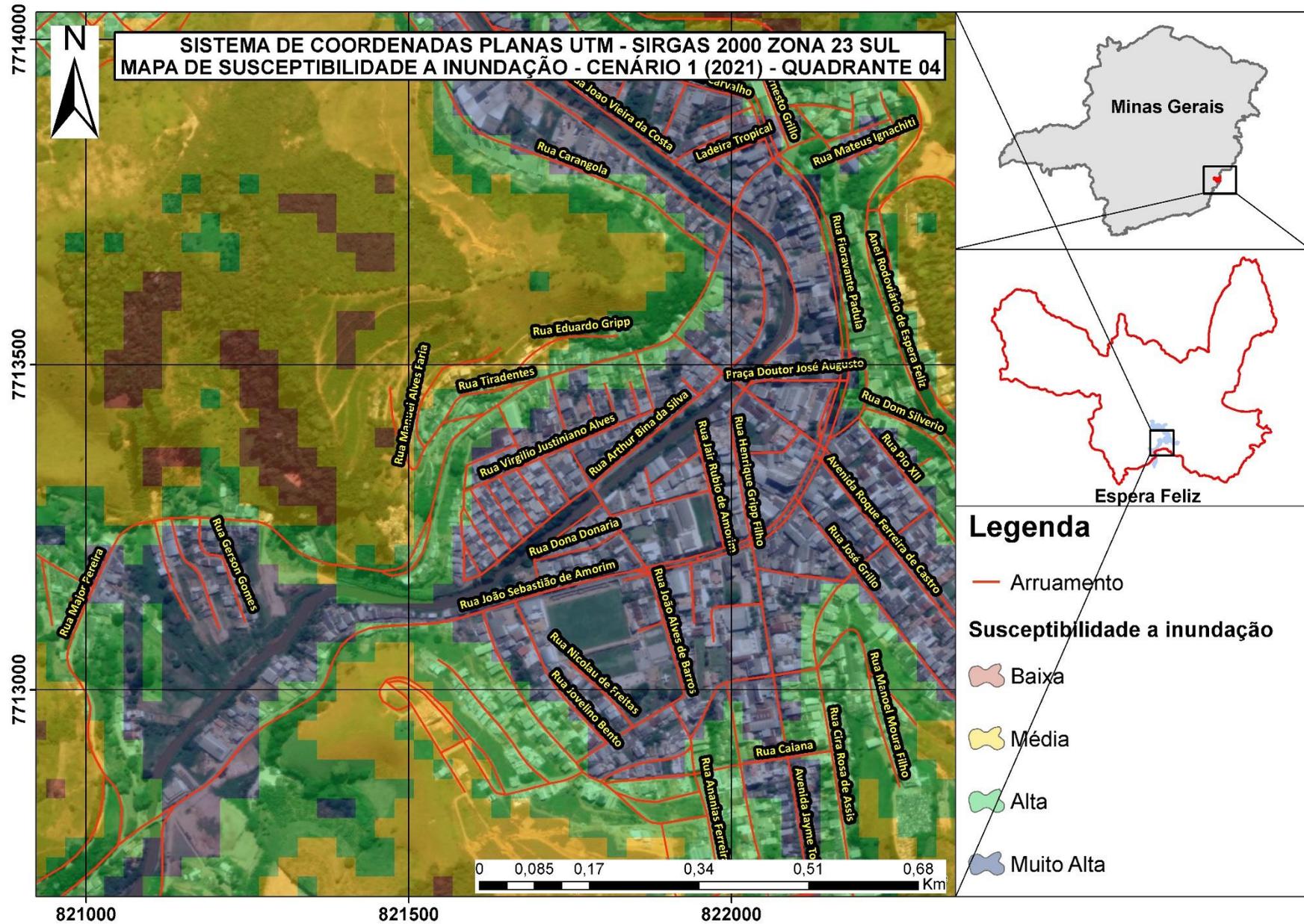
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 23 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 3º Quadrante - 2021



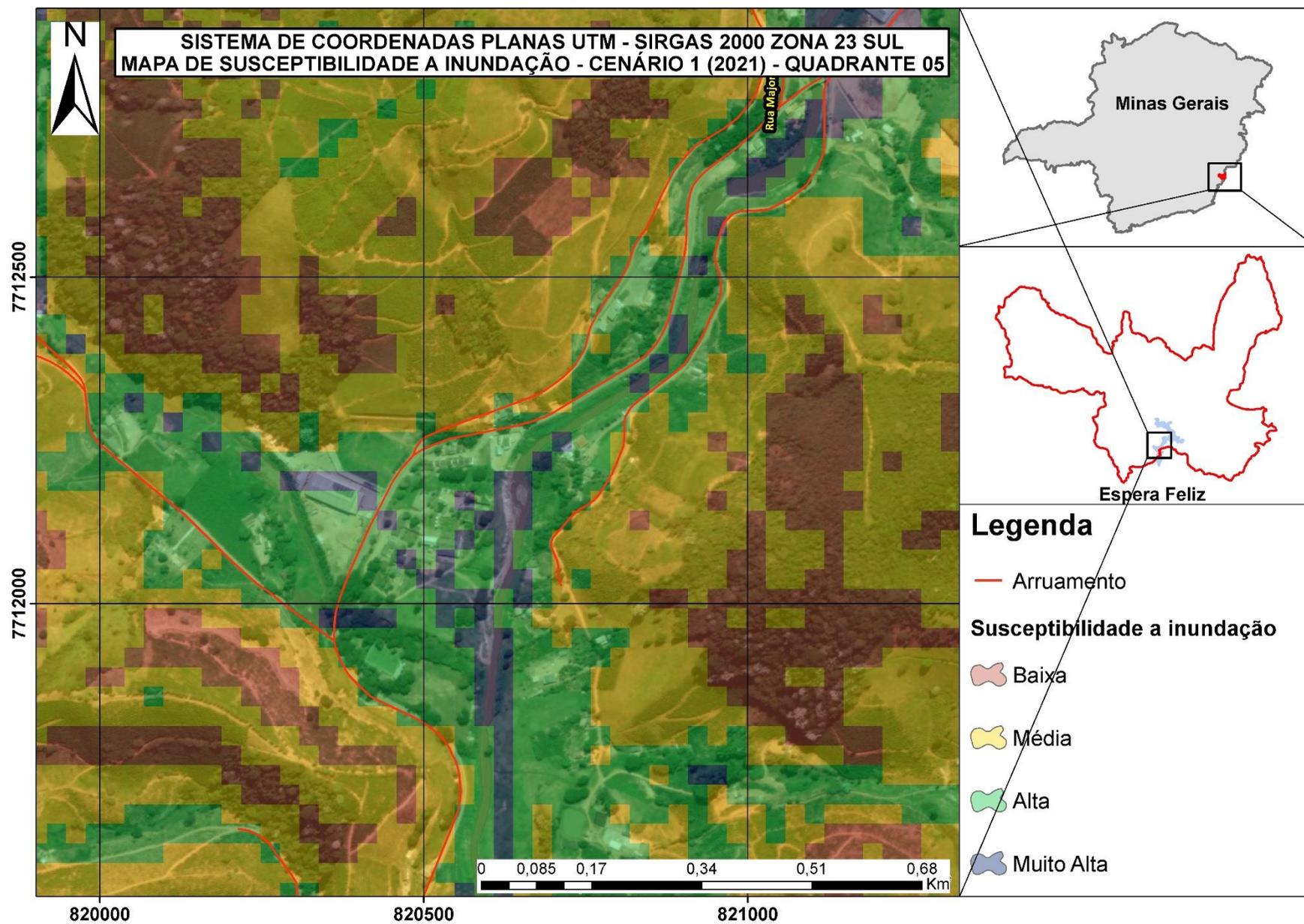
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 24 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 4º Quadrante - 2021



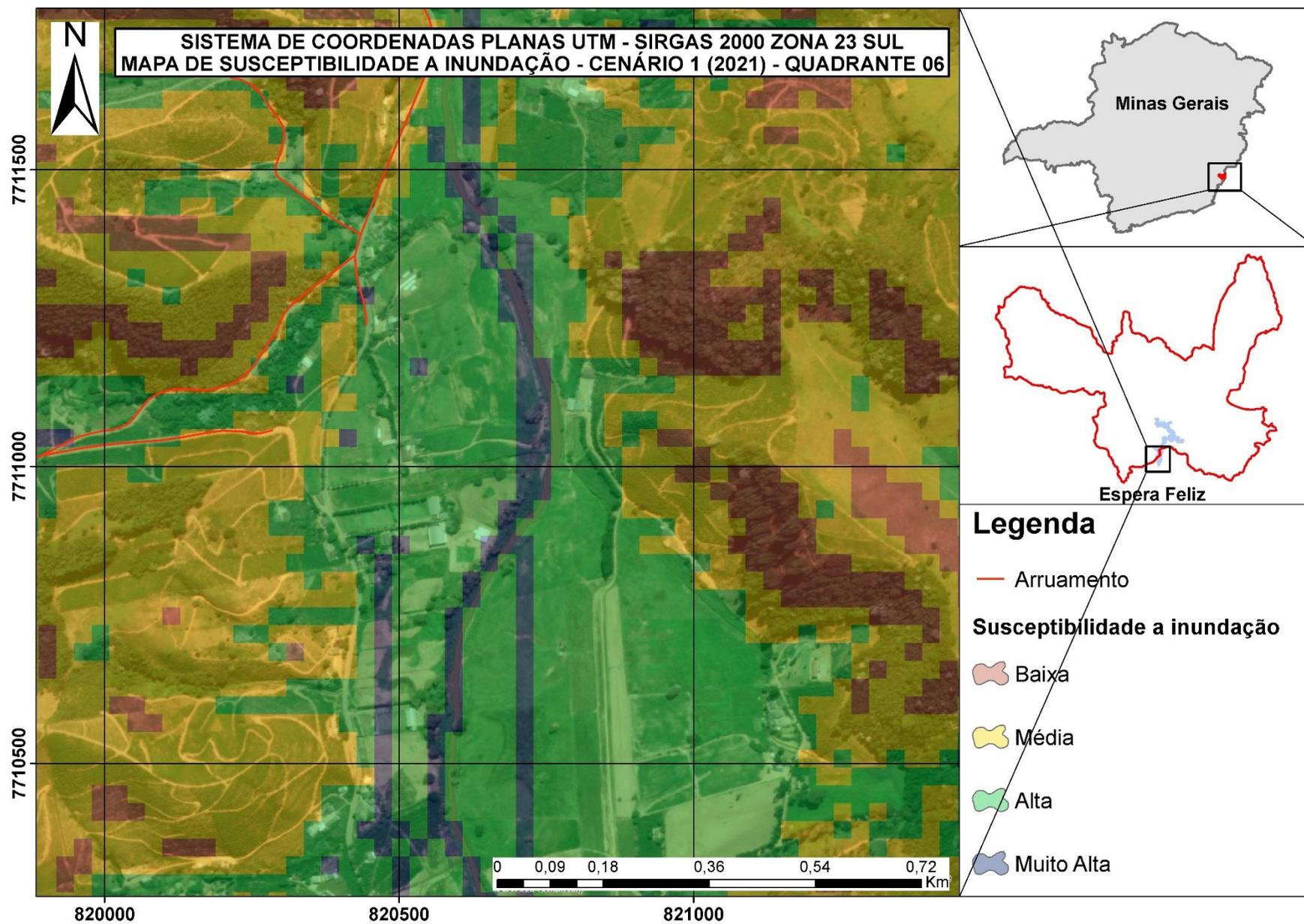
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 25 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 5º Quadrante - 2021



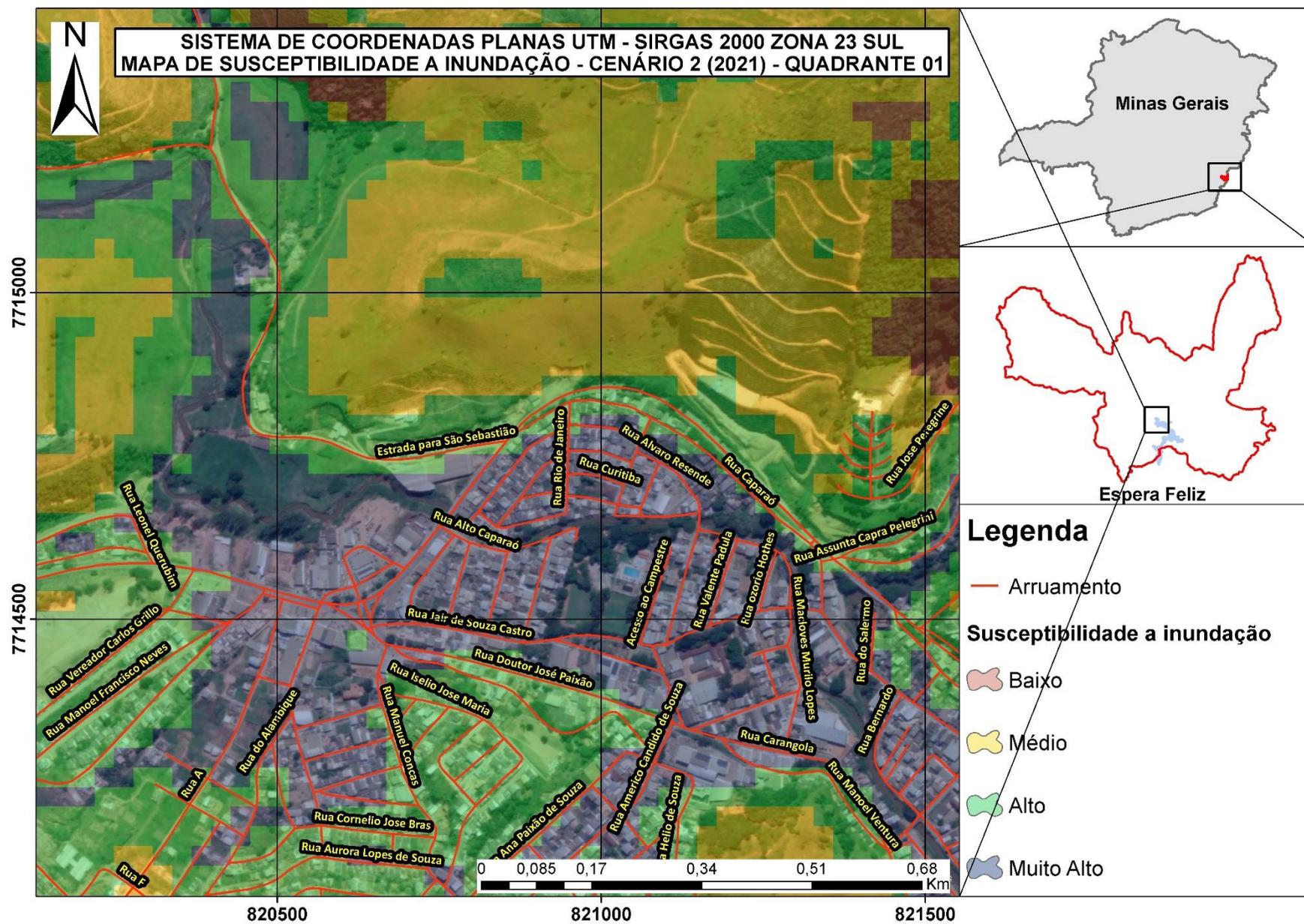
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 26 - Mapa de susceptibilidade cenário 1 – 6º Quadrante - 2021



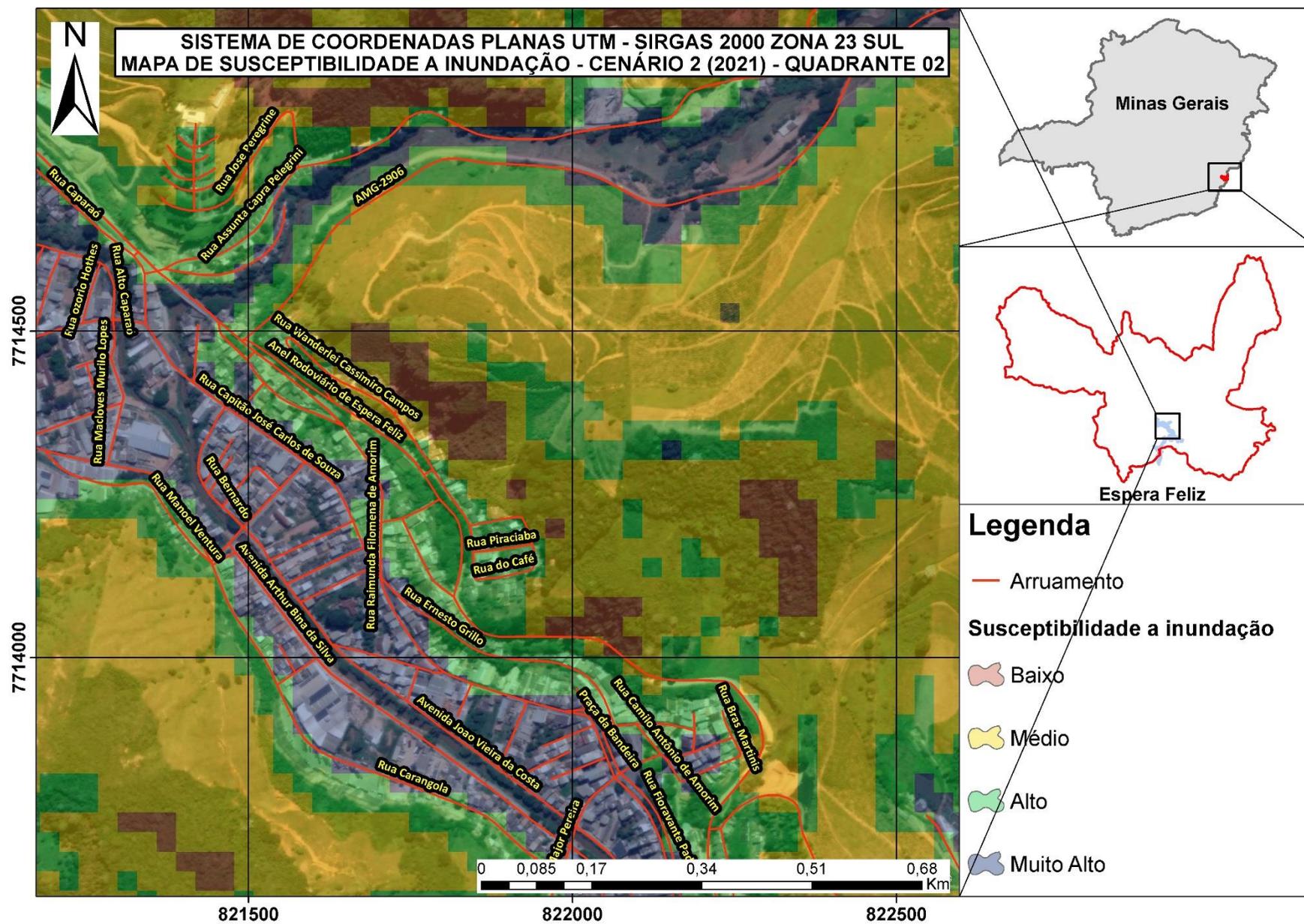
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 27 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 1º Quadrante - 2021



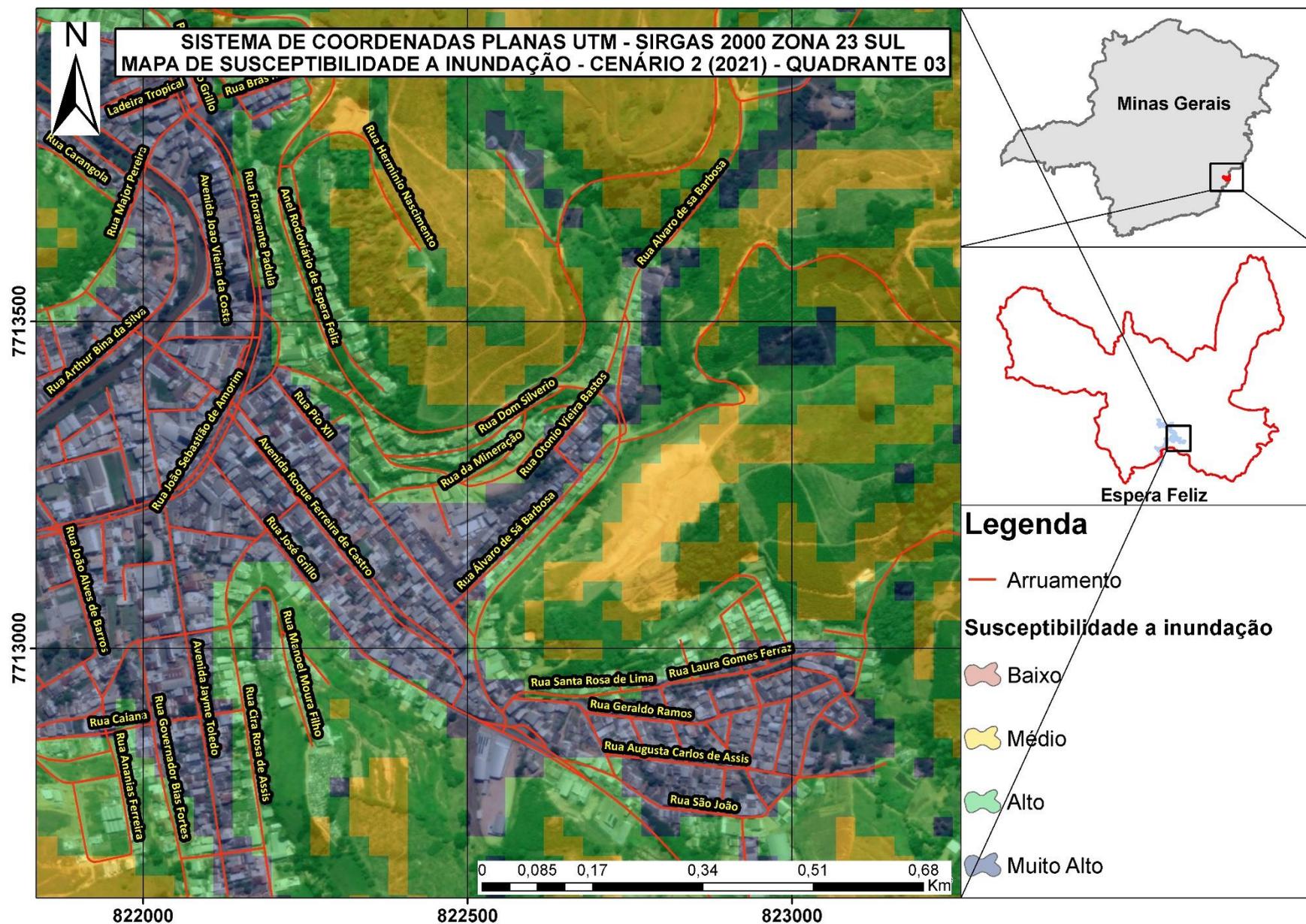
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 28 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 2º Quadrante - 2021



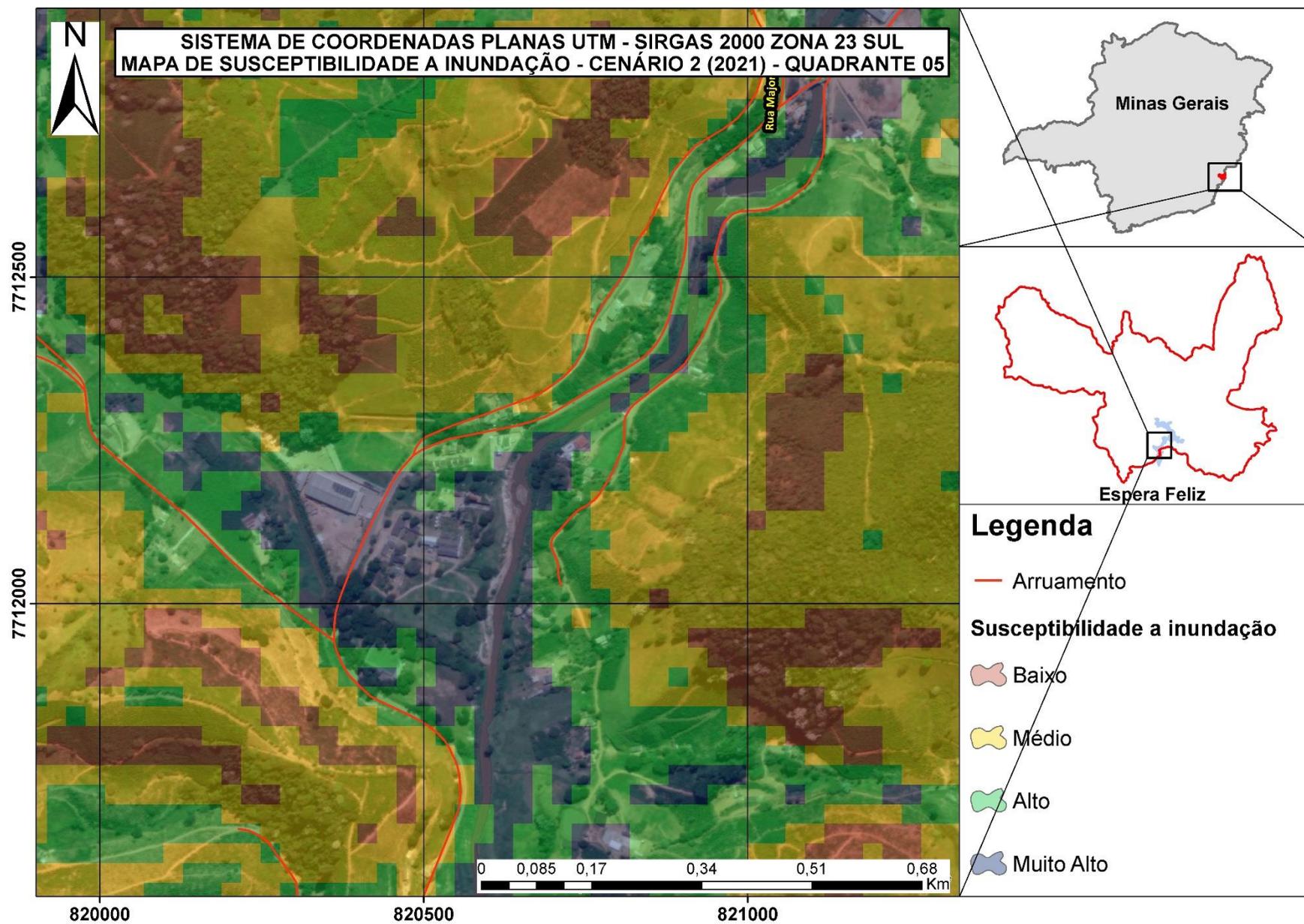
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 29 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 3º Quadrante - 2021



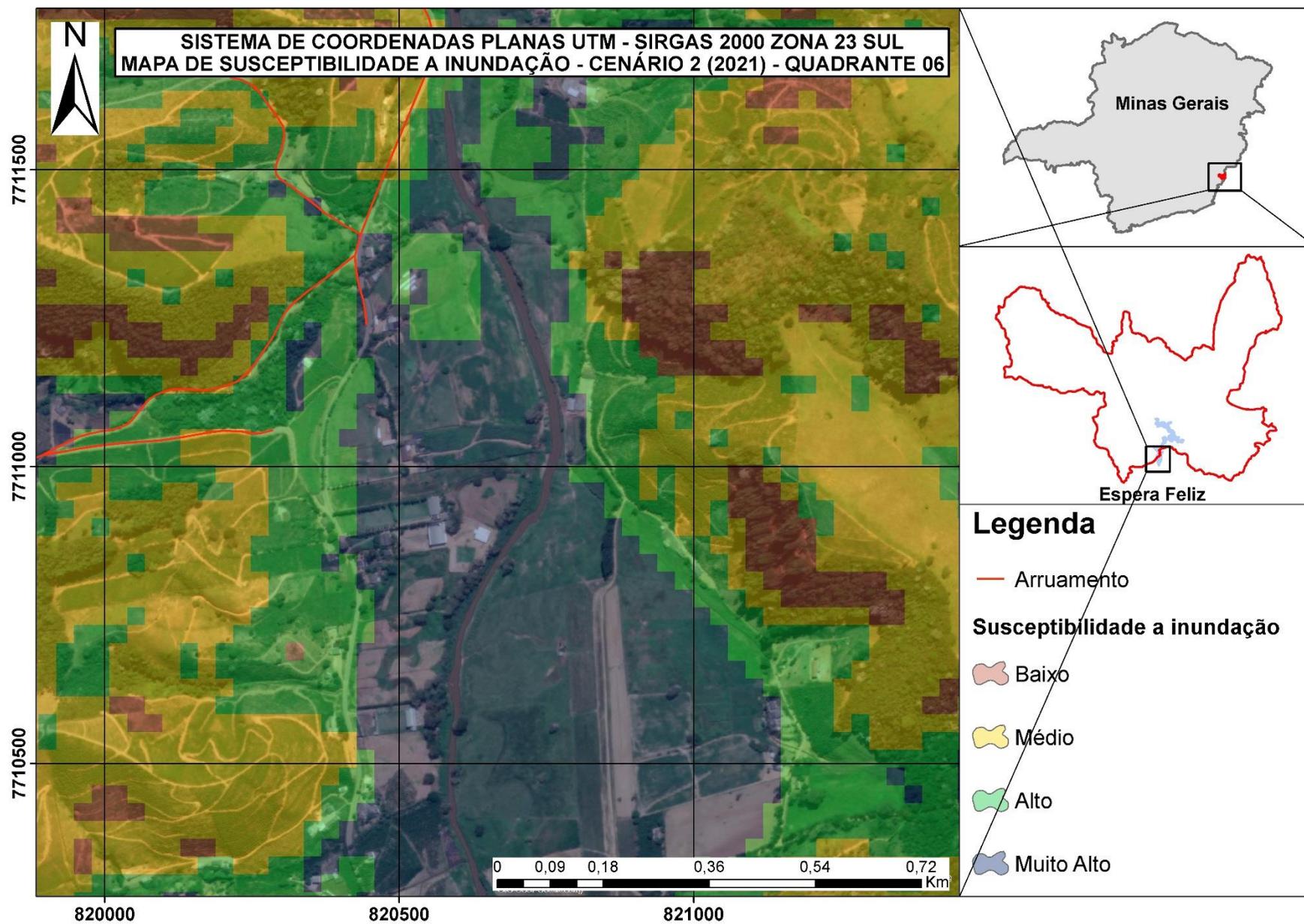
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 31 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 5° Quadrante - 2021



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 32 - Mapa de susceptibilidade cenário 2 – 6º Quadrante - 2021



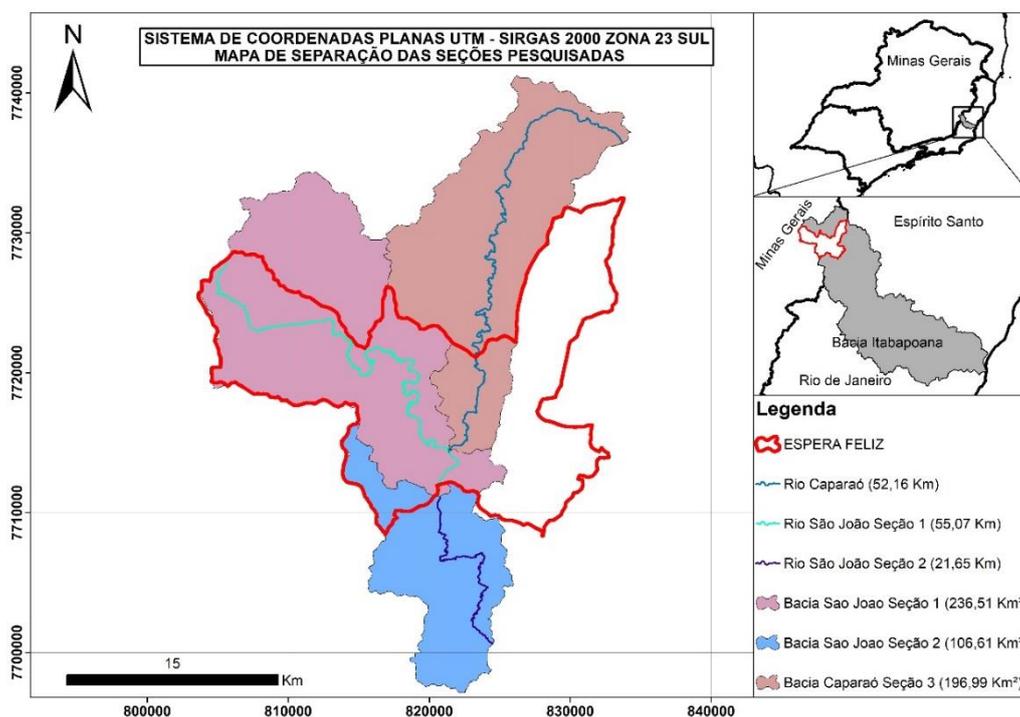
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Percebe-se que houve diferenciação entre os tipos de cenário. O cenário 2 apresentou valores mais elevados no zoneamento urbano. Além disso, outro dado interessante foi a constatação de que os pontos de susceptibilidade “muito alta” mostraram uma notável diferença na expansão da malha urbana em ambos os cenários ao longo do tempo. Essa expansão ocorreu principalmente na área de várzea, próxima à confluência dos Rios Caparaó e São João, o que contribuiu para o aumento da susceptibilidade, conforme demonstrado pelas ponderações algébricas apresentadas.

5.2 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO SOIL CONSERVATION SERVICE E GERAÇÃO DO MAPA DA PLUMA ALAGÁVEL

A Figura 33 demonstra quais foram as áreas selecionadas para manter as seções abaixo do valor recomendado pelo modelo (até 250 km²).

Figura 33 - Mapa de separação das seções pesquisadas

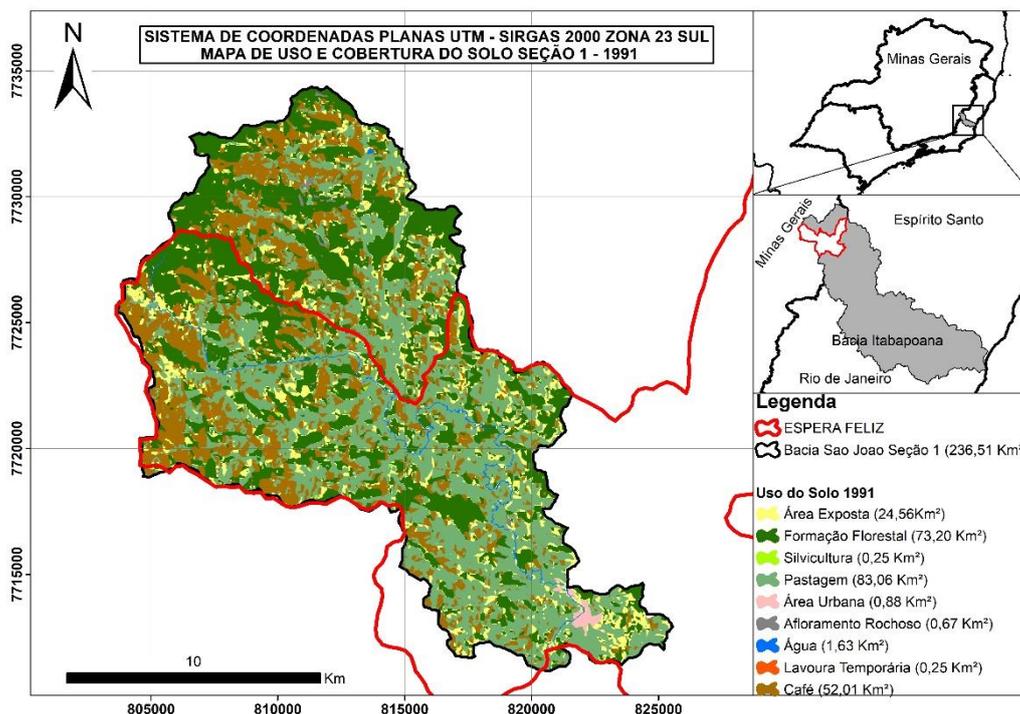


Fonte: desenvolvido pelo autor.

Para prosseguir com a análise, foi necessário definir seções nas bacias hidrográficas estudadas. Essa divisão teve como objetivo respeitar o limite estipulado pelo modelo do Soil Conservation Service, que estabelece um máximo de 250 km² por seção.

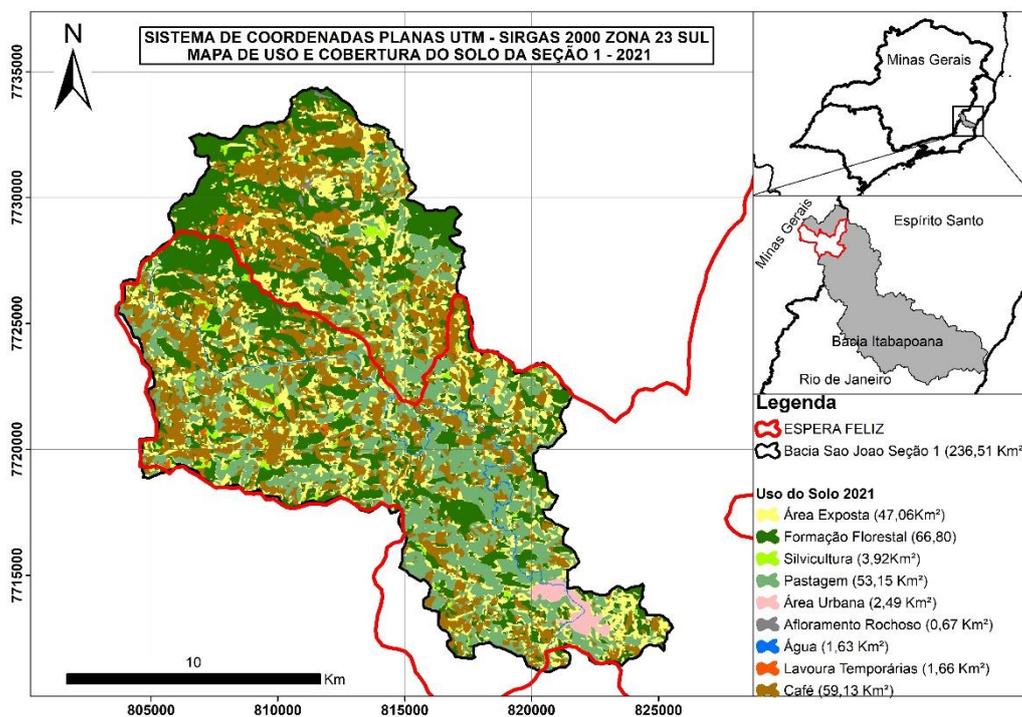
Antes de prosseguir com o desenvolvimento dos resultados nas seções, foi essencial obter informações sobre as características de uso e ocupação em cada uma delas. Para isso, foram criadas seis imagens — com informações quantitativas — que representam duas datas de cada seção. Essas imagens, numeradas nas Figuras 34 a 39, trazem dados relevantes sobre as grandezas relacionadas ao uso e cobertura do solo. A partir dessas informações são calculados os parâmetros pertinentes, apresentados posteriormente. Esses parâmetros são cruciais para uma análise abrangente e fundamentada das mudanças ocorridas nas diferentes seções ao longo do tempo.

Figura 34 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 1 (1991)



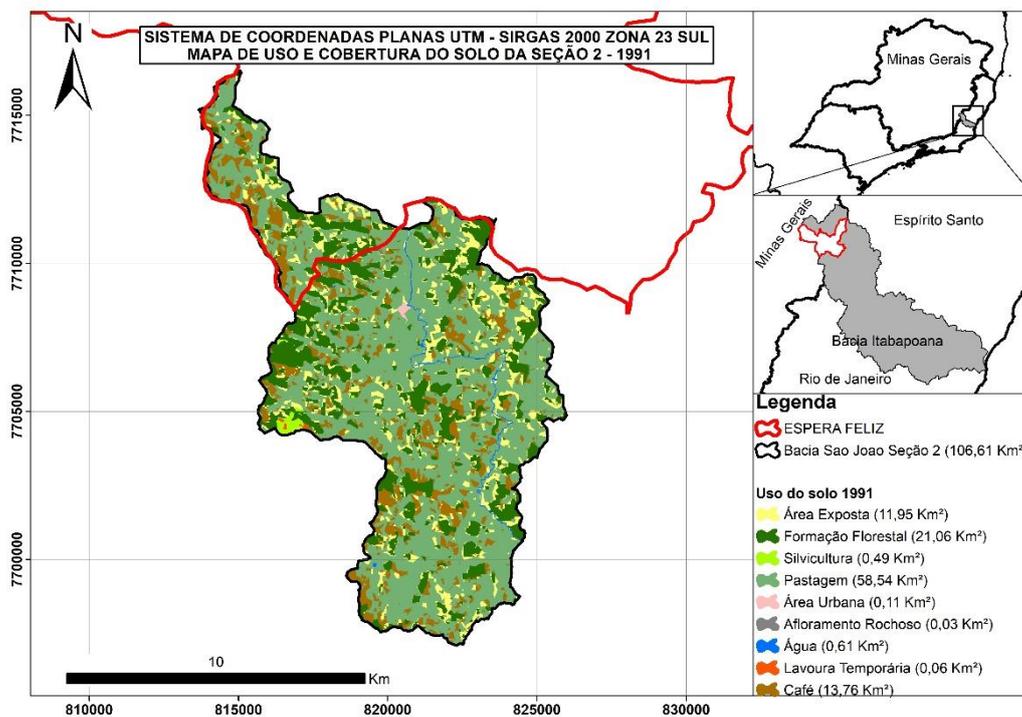
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 35 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 1 (2021)



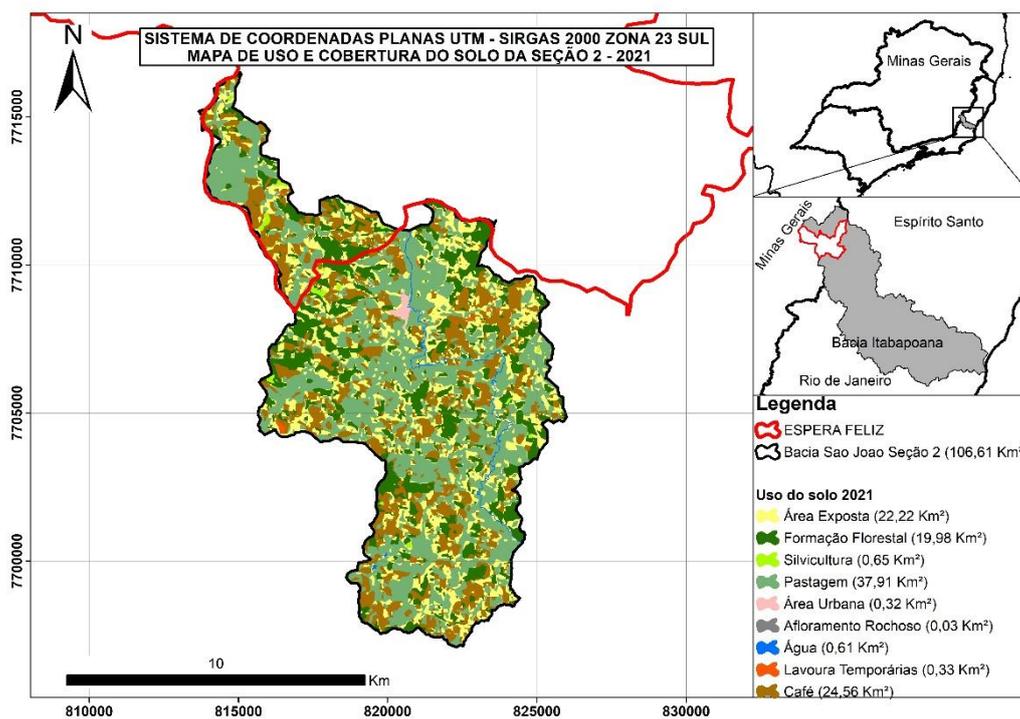
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 36 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 2 (1991)



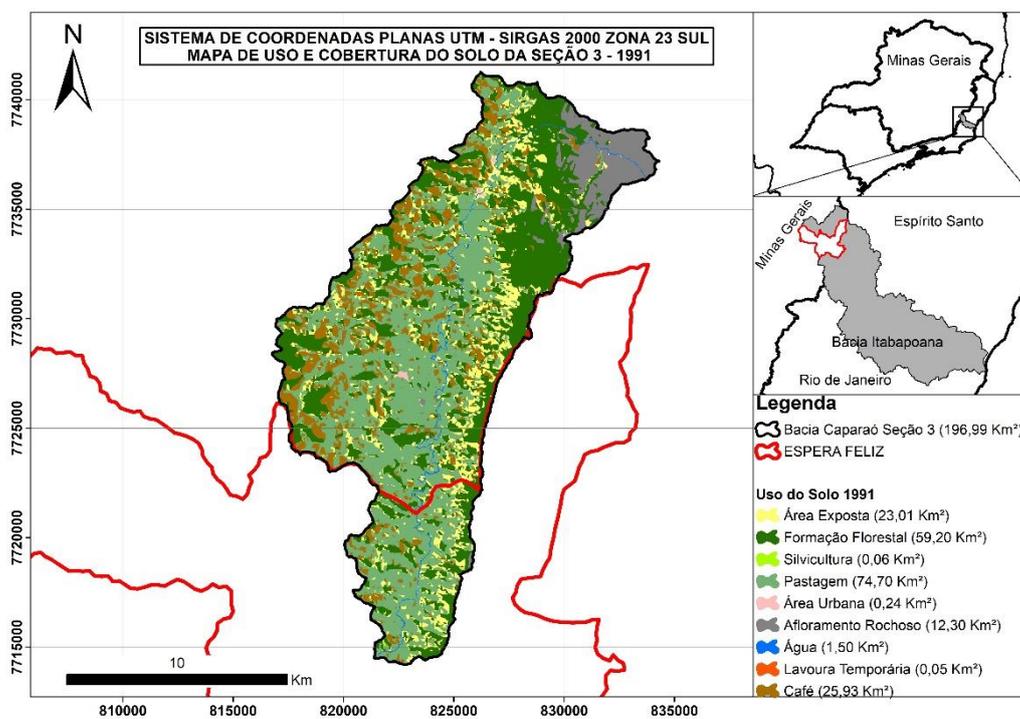
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 37 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 2 (2021)



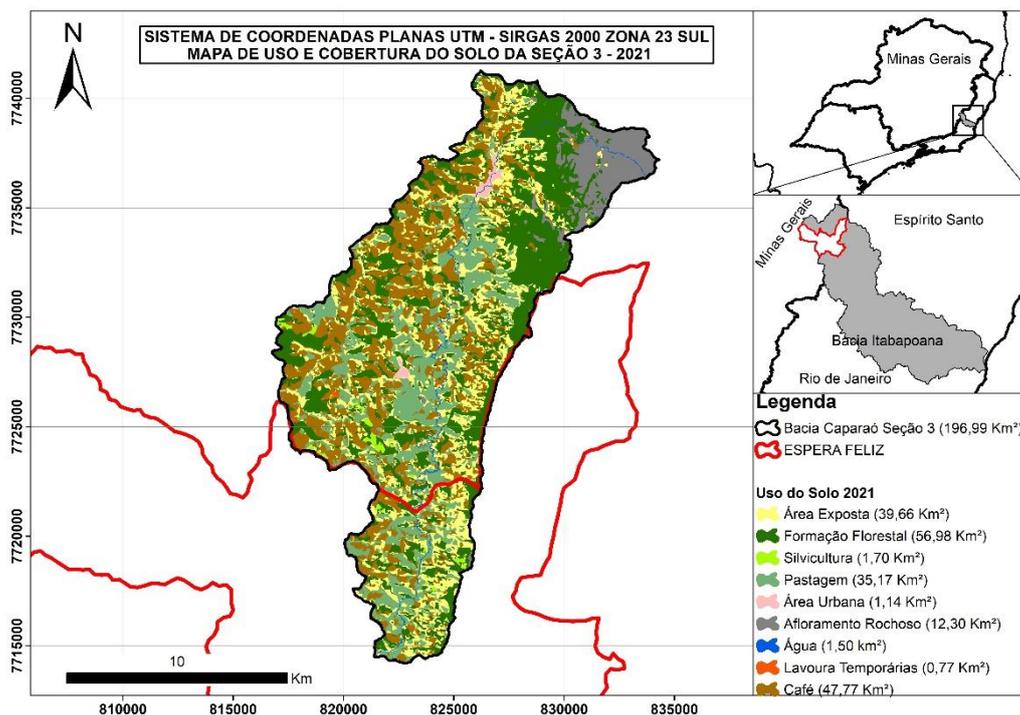
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 38 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 3 (1991)



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 39 - Mapa de uso e cobertura do solo seção 3 (2021)



Fonte: desenvolvido pelo autor.

É possível verificar na Figura 39 a existência de dois zoneamentos urbanos fora do domínio territorial de Espera Feliz. Pode-se dizer que esses municípios a montante fazem parte do problema, contribuindo para o cenário de inundação dentro da cidade de Espera Feliz. Os municípios a montante são estes: Caparaó (logo acima de Espera Feliz) e Alto Caparaó (dentro da serra onde fica o Pico da Bandeira).

Como produto das figuras supracitadas, elaborou-se o Quadro 12, que apresenta os valores comparativos de cada seção, contendo os respectivos usos e o percentual de cada categoria.

Quadro 12 - Valores de uso e cobertura do solo

	S1 - 1991	S1 - 2021	S2 - 1991	S2 - 2021	S3 - 1991	S3 - 2021
Área	10,38%	19,90%	11,21%	20,84%	11,68%	20,13%
Exposta	24,56Km ²	47,06Km ²	11,95Km ²	22,22Km ²	23,01Km ²	39,66Km ²
Formação Florestal	30,95%	28,24%	19,75%	18,74%	30,05%	28,93%
	73,20Km ²	66,80Km ²	21,06Km ²	19,98Km ²	59,20Km ²	56,98Km ²
Silvicultura	0,11%	1,66%	0,46%	0,61%	0,03%	0,86%
	0,25Km ²	3,92Km ²	0,49Km ²	0,65Km ²	0,06Km ²	1,70Km ²
Pastagem	35,12%	22,47%	54,91%	35,56%	37,92%	17,85%
	83,06Km ²	53,15Km ²	58,54Km ²	37,91Km ²	74,70Km ²	35,17Km ²
Área Urbana	0,37%	1,05%	0,10%	0,30%	0,12%	0,58%
	0,88Km ²	2,49Km ²	0,11Km ²	0,32Km ²	0,24Km ²	1,14Km ²
Afloramento Rochoso	0,28%	0,28%	0,03%	0,03%	6,24%	6,24%
	0,67Km ²	0,67Km ²	0,03Km ²	0,03Km ²	12,30Km ²	12,30Km ²
Água	0,69%	0,69%	0,57%	0,57%	0,76%	0,76%
	1,63Km ²	1,63Km ²	0,61Km ²	0,61Km ²	1,50Km ²	1,50Km ²
Lavoura Temporária	0,11%	0,70%	0,06%	0,31%	0,03%	0,39%
	0,25Km ²	1,66Km ²	0,06Km ²	0,33Km ²	0,05Km ²	0,77Km ²
Café	21,99%	25,00%	12,91%	23,04%	13,16%	24,25%
	52,01Km ²	59,13Km ²	13,76Km ²	24,56Km ²	25,93Km ²	47,77Km ²
Total	100%		100%		100%	
	236,51Km ²		106,61Km ²		196,99Km ²	

S1, S2, S3 - Representam respectivamente a Seção 1, Seção 2 e Seção 3.

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Os resultados gerados pelo modelo Soil Conservation Service de cada seção podem ser verificados nos Quadros 13, 14 e 15, respectivamente em referência às seções 1, 2 e 3, conforme as grandezas principais da metodologia desenvolvida neste trabalho.

Quadro 13 - Resultado do SCS – seção 1

Parâmetro	Valores 1991	Valores 2021	Unidade
Curva-Número (CN)	78,85	79,04	-
Armazenamento (S)	68,14	67,34	mm
Perda inicial (Ia)	13,63	13,47	mm
Tempo de concentração (Tc)	19,2	19,2	min
Tempo de pico (Tp)	0,192	0,192	horas
Intervalo de tempo (Δt)	0,038	0,038	horas
Tempo de ascensão (Tm)	0,211	0,211	horas
Tempo de recessão (tr)	0,321	0,321	horas
Tempo de base (Tb)	0,532	0,532	horas
Período de retorno (T)	2	2	anos
Vazão máxima (Qp)	54,29	54,29	m ³ /s

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 14 - Resultado do SCS – seção 2

Parâmetro	Valores 1991	Valores 2021	Unidade
Curva-Número (CN)	81,41	80,86	-
Armazenamento (S)	57,99	60,12	mm
Perda inicial (Ia)	11,60	12,02	mm
Tempo de concentração (Tc)	11,70	11,70	min
Tempo de pico (Tp)	0,117	0,117	horas
Intervalo de tempo (Δt)	0,023	0,023	horas
Tempo de ascensão (Tm)	0,129	0,129	horas
Tempo de recessão (tr)	0,195	0,195	horas
Tempo de base (Tb)	0,324	0,324	horas
Período de retorno (T)	2	2	anos
Vazão máxima (Qp)	34,91	34,91	m ³ /s

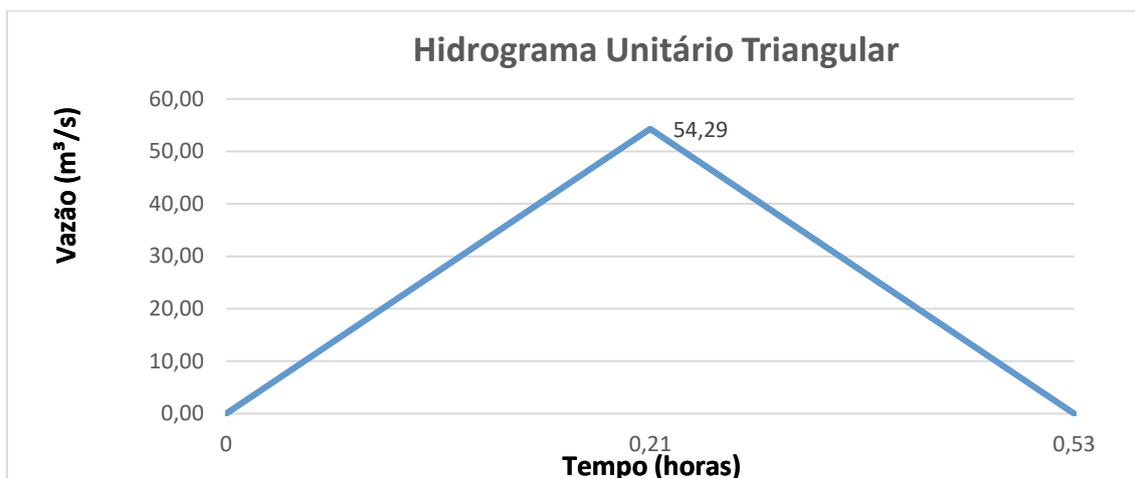
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 15 - Resultado do SCS – seção 3

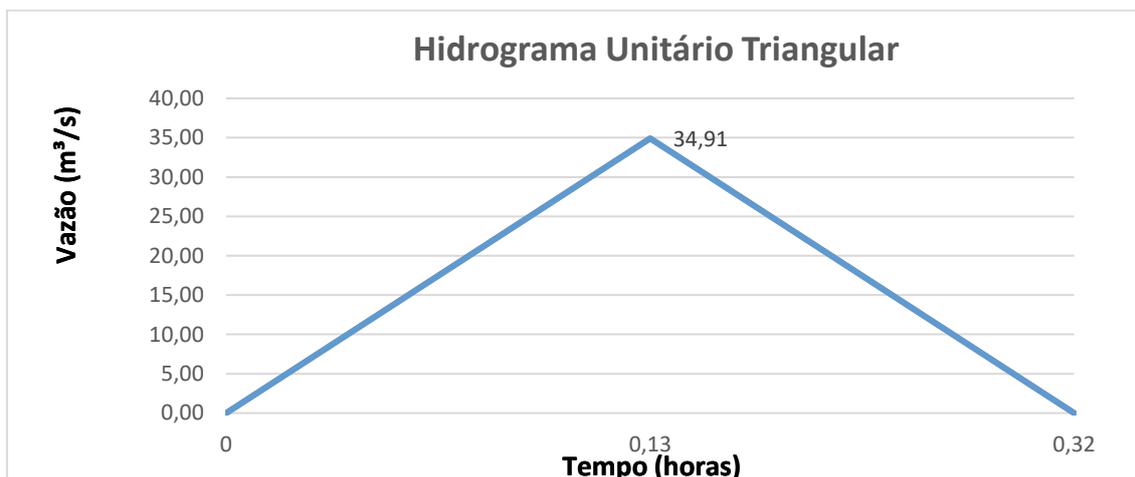
Parâmetro	Valores 1991	Valores 2021	Unidade
Curva-Número (CN)	80,36	79,69	-
Armazenamento (S)	62,06	64,70	mm
Perda inicial (Ia)	12,41	12,94	mm
Tempo de concentração (Tc)	15,10	15,10	min
Tempo de pico (Tp)	0,151	0,151	horas
Intervalo de tempo (Δt)	0,03	0,03	horas
Tempo de ascensão (Tm)	0,166	0,166	horas
Tempo de recessão (tr)	0,252	0,252	horas
Tempo de base (Tb)	0,418	0,418	horas
Período de retorno (T)	2	2	anos
Vazão máxima (Qp)	65,36	65,36	m ³ /s

Fonte: desenvolvido pelo autor.

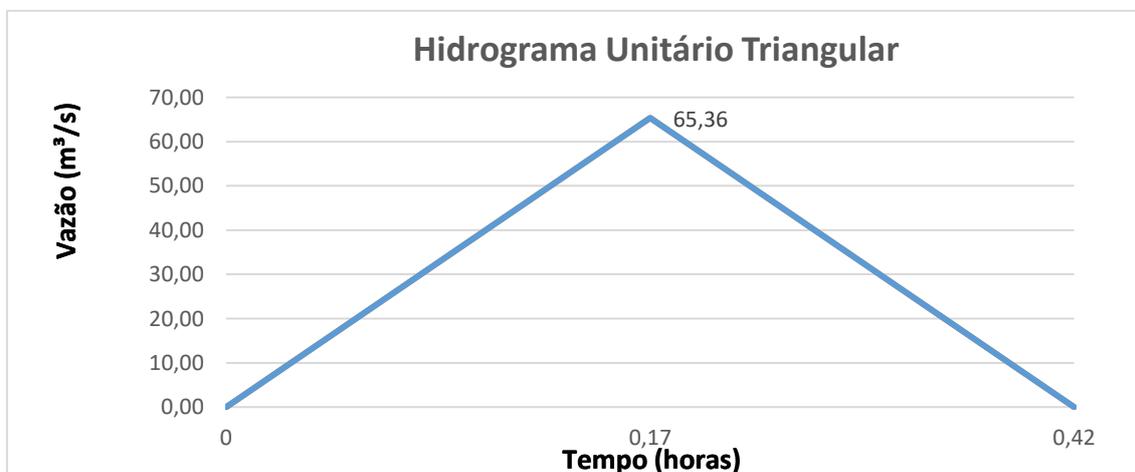
Pode-se perceber que os parâmetros que dependem de questões físicas — como a definição dos tempos do hidrograma triangular — apresentaram os mesmos resultados em cada seção. Entretanto, percebe-se que os parâmetros Curva-Número, armazenamento e perda inicial geraram valores diferentes, pois estes dependem do uso e cobertura do solo. Ademais, foi percebido que nas seções 2 e 3 houve melhora do cenário no que se refere ao escoamento superficial. Os gráficos da convolução do hidrograma retratam essa sutil melhora. As Figuras 40, 41 e 42 apresentam os hidrogramas triangulares das seções 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 40 - Hidrograma triangular – seção 1

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 41 - Hidrograma triangular – seção 2

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 42 - Hidrograma triangular – seção 3

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Determinados todos os hidrogramas unitários, a etapa seguinte foi o cálculo das precipitações efetivas. Para isso foram construídos os Quadros 16, 17, 18, 19, 20 e 21, que representam respectivamente as seções 1, 2 e 3 nos anos de 1991 e 2021.

Quadro 16 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 1 – 1991

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1	3,83	8,06	8,06	1,72	1,72	0,00	0,00
2	7,66	13,84	5,78	2,19	3,91	0,00	0,00
3	11,50	18,27	4,43	2,96	6,87	0,00	0,00
4	15,33	21,84	3,56	4,43	11,30	0,00	0,00
5	19,16	24,79	2,96	8,06	19,36	0,44	0,44
6	22,99	27,31	2,52	5,78	25,14	1,66	1,22
7	26,83	29,50	2,19	3,56	28,70	2,73	1,07
8	30,66	31,42	1,93	2,52	31,22	3,61	0,88
9	34,49	33,15	1,72	1,93	33,15	4,35	0,74
10	38,32	34,70	1,55	1,55	34,70	4,98	0,63

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 17 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 1 – 2021

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1	3,83	8,06	8,06	1,72	1,72	0,00	0,00
2	7,66	13,84	5,78	2,19	3,91	0,00	0,00
3	11,50	18,27	4,43	2,96	6,87	0,00	0,00
4	15,33	21,84	3,56	4,43	11,30	0,00	0,00
5	19,16	24,79	2,96	8,06	19,36	0,47	0,47
6	22,99	27,31	2,52	5,78	25,14	1,72	1,25
7	26,83	29,50	2,19	3,56	28,70	2,81	1,09
8	30,66	31,42	1,93	2,52	31,22	3,70	0,89
9	34,49	33,15	1,72	1,93	33,15	4,45	0,75
10	38,32	34,70	1,55	1,55	34,70	5,09	0,64

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 18 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 2 – 1991

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1	2,35	5,29	5,29	1,61	1,61	0,00	0,00
2	4,70	9,52	4,23	1,98	3,60	0,00	0,00
3	7,05	13,02	3,50	2,55	6,15	0,00	0,00
4	9,40	15,98	2,96	3,50	9,65	0,00	0,00
5	11,75	18,53	2,55	5,29	14,93	0,18	0,18
6	14,10	20,77	2,24	4,23	19,17	0,87	0,69
7	16,45	22,75	1,98	2,96	22,13	1,62	0,74
8	18,80	24,53	1,78	2,24	24,36	2,30	0,69
9	21,15	26,14	1,61	1,78	26,14	2,92	0,61
10	23,50	27,61	1,47	1,47	27,61	3,47	0,55

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 19 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 2 – 2021

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1	2,35	5,29	5,29	1,61	1,61	0,00	0,00
2	4,70	9,52	4,23	1,98	3,60	0,00	0,00
3	7,05	13,02	3,50	2,55	6,15	0,00	0,00
4	9,40	15,98	2,96	3,50	9,65	0,00	0,00
5	11,75	18,53	2,55	5,29	14,93	0,13	0,13
6	14,10	20,77	2,24	4,23	19,17	0,76	0,62
7	16,45	22,75	1,98	2,96	22,13	1,45	0,69
8	18,80	24,53	1,78	2,24	24,36	2,10	0,65
9	21,15	26,14	1,61	1,78	26,14	2,69	0,58
10	23,50	27,61	1,47	1,47	27,61	3,21	0,52

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 20 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 3 – 1991

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1	3,01	6,57	6,57	1,68	1,68	0,00	0,00
2	6,02	11,57	5,00	2,10	3,78	0,00	0,00
3	9,03	15,55	3,98	2,78	6,55	0,00	0,00
4	12,04	18,83	3,28	3,98	10,53	0,00	0,00
5	15,06	21,60	2,78	6,57	17,10	0,33	0,33
6	18,07	24,00	2,39	5,00	22,10	1,31	0,98
7	21,08	26,10	2,10	3,28	25,38	2,24	0,93
8	24,09	27,97	1,87	2,39	27,78	3,05	0,81
9	27,10	29,64	1,68	1,87	29,64	3,74	0,70
10	30,11	31,16	1,52	1,52	31,16	4,35	0,61

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 21 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 3 – 2021

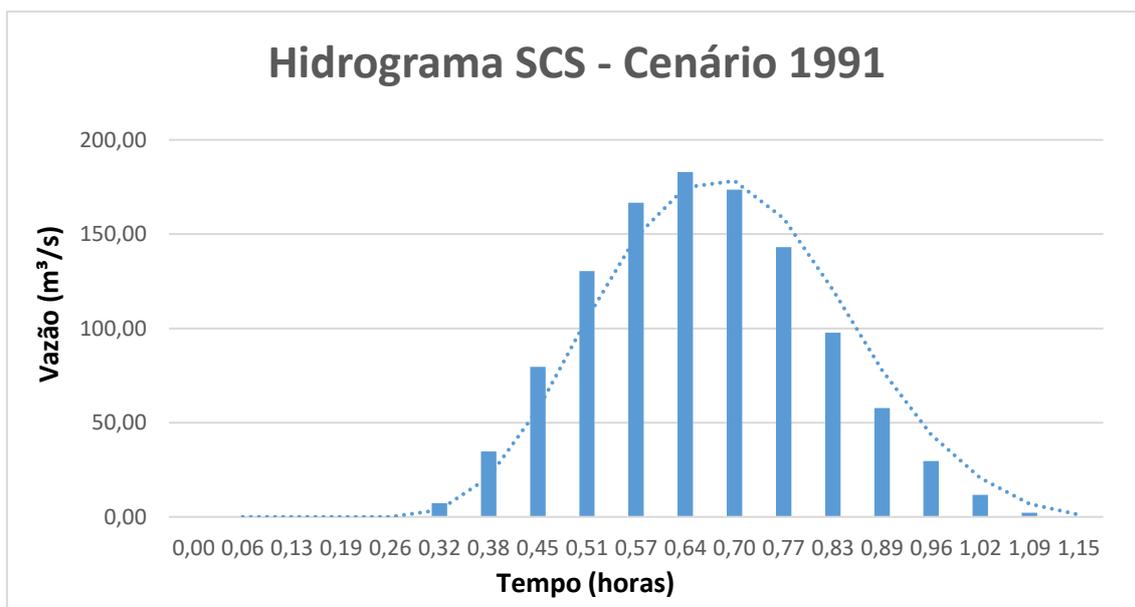
Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1,00	3,01	6,57	6,57	1,68	1,68	0,00	0,00
2,00	6,02	11,57	5,00	2,10	3,78	0,00	0,00
3,00	9,03	15,55	3,98	2,78	6,55	0,00	0,00
4,00	12,04	18,83	3,28	3,98	10,53	0,00	0,00
5,00	15,06	21,60	2,78	6,57	17,10	0,25	0,25
6,00	18,07	24,00	2,39	5,00	22,10	1,14	0,88
7,00	21,08	26,10	2,10	3,28	25,38	2,01	0,87
8,00	24,09	27,97	1,87	2,39	27,78	2,77	0,76
9,00	27,10	29,64	1,68	1,87	29,64	3,43	0,66
10,00	30,11	31,16	1,52	1,52	31,16	4,00	0,58

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Na montagem dos quadros supracitados, todos os cálculos pertinentes são apresentados no apêndice pós-textual deste trabalho.

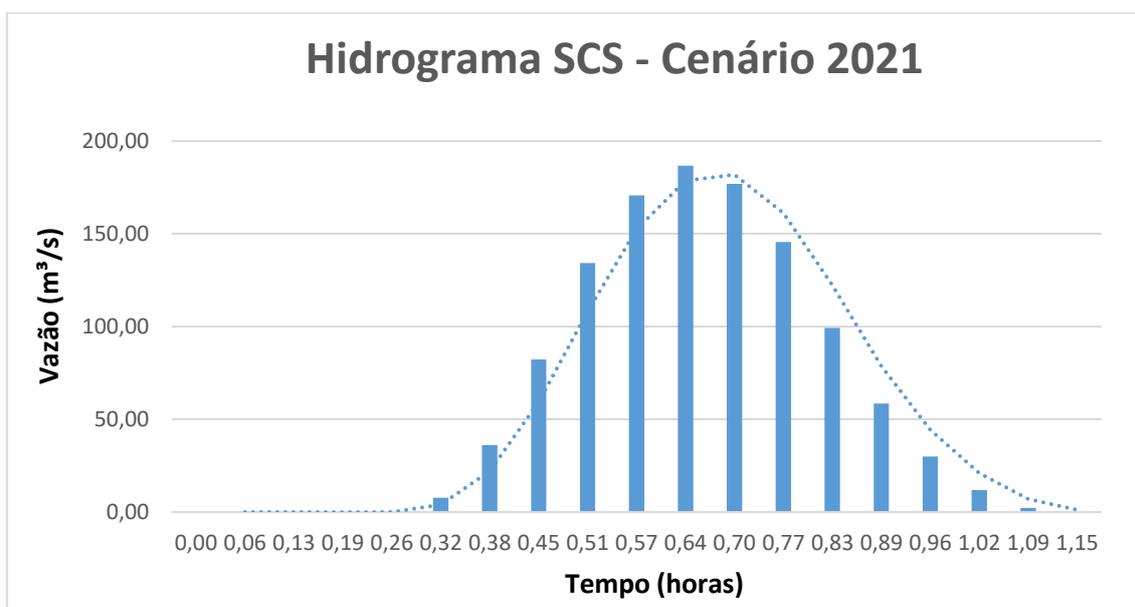
Depois de realizar os cálculos apresentados nos quadros das precipitações efetivas, realizou-se a convolução da chuva para obtenção dos hidrogramas do escoamento superficial acumulado, conforme apresentado nas Figuras 43, 44, 45, 46, 47 e 48 que representam respectivamente, as seções 1, 2 e 3, nos anos respectivos de 1991 e 2021. Todos os cálculos são apresentados no apêndice pós-textual deste trabalho.

Figura 43 - Hidrograma da convolução 1991 – Seção 1



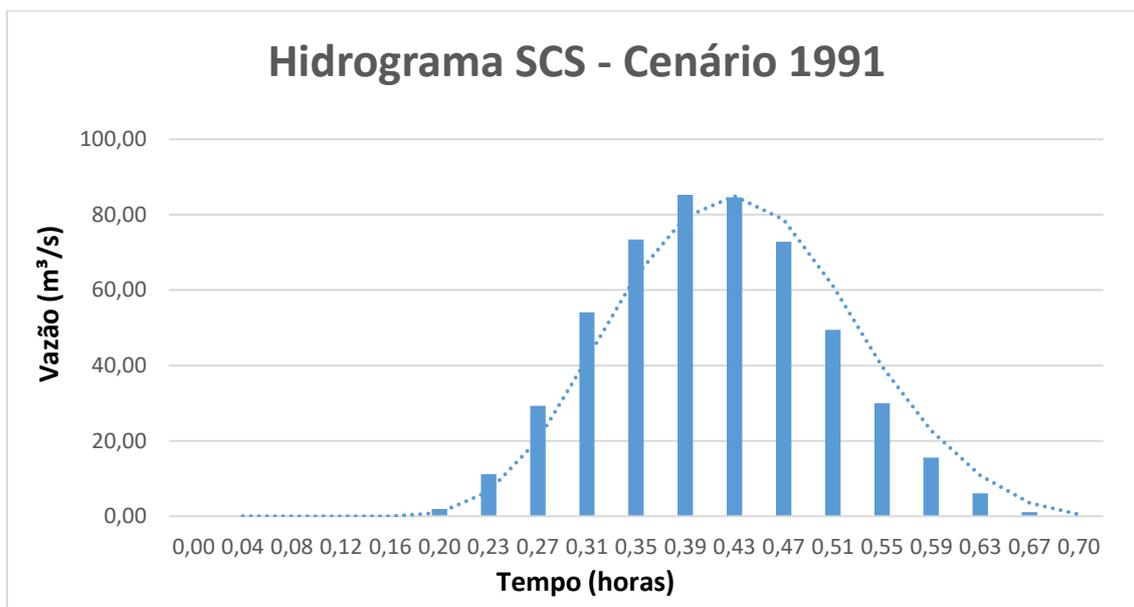
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 44 - Hidrograma da convolução 2021 – Seção 1



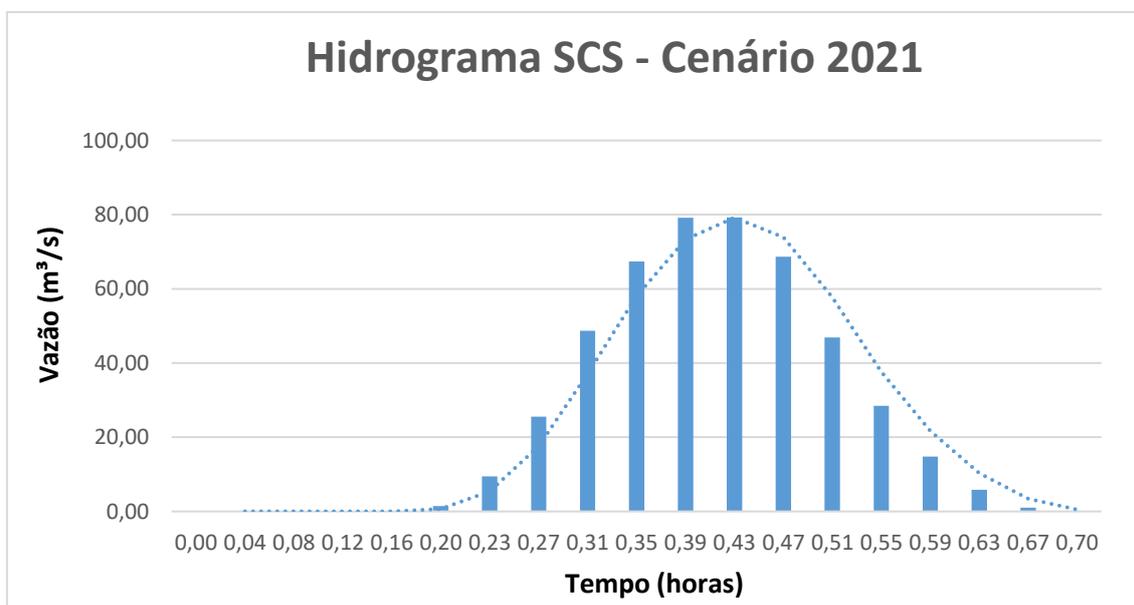
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 45 - Hidrograma da convolução 1991 – Seção 2

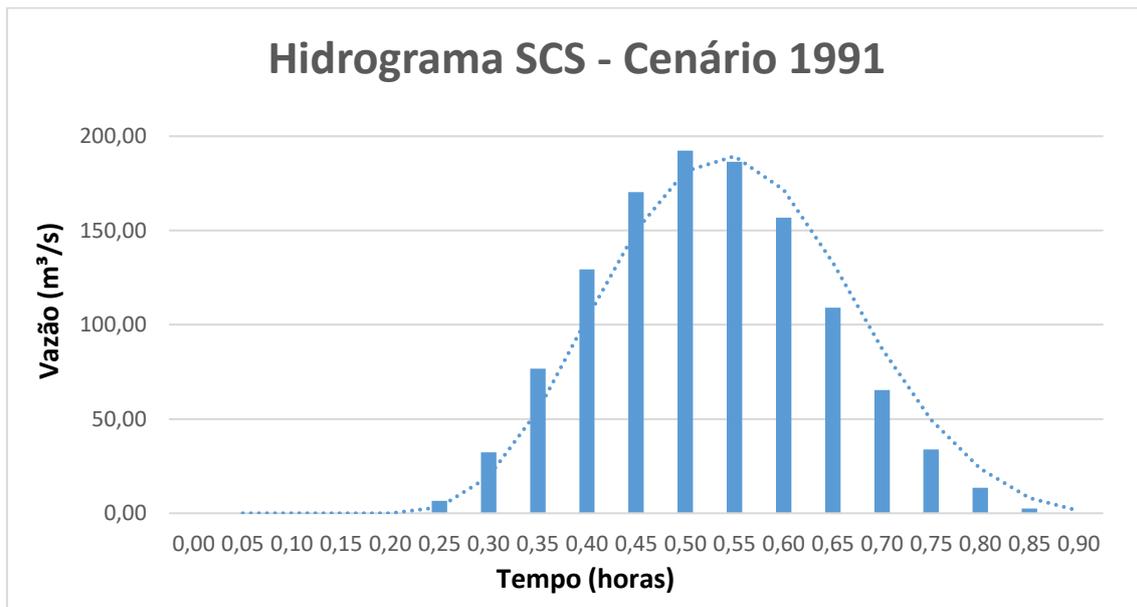


Fonte: desenvolvido pelo autor.

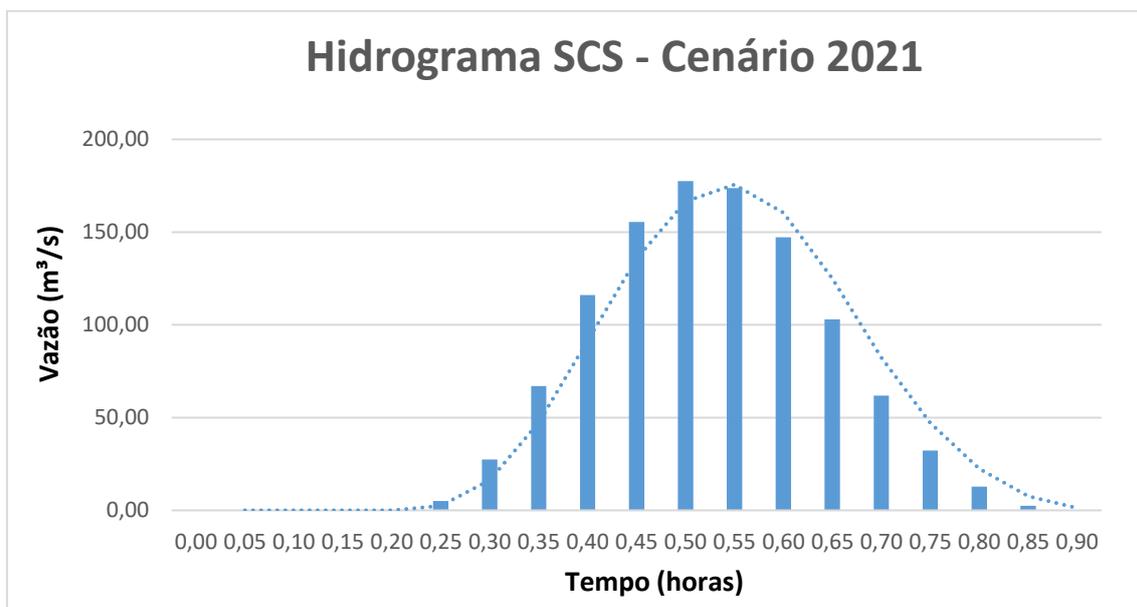
Figura 46 - Hidrograma da convolução 2021 – Seção 2



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 47 - Hidrograma da convolução 1991 – Seção 3

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 48 - Hidrograma da convolução 2021 – Seção 3

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Os valores encontrados nos hidrogramas supracitados viabilizam uma constatação: a mudança do uso e cobertura do solo não representou um aumento que pudesse ser considerado como um fator essencial para justificar o aumento das ocorrências de inundações na municipalidade, pois foi notado que, com a mudança do uso e cobertura do solo, o escoamento superficial manteve-se em uma ordem de grandeza

estável ao longo dos anos. É importante destacar que não foram localizados nas bases de dados disponíveis no site da prefeitura — nem em sites que disponibilizam dados públicos da defesa civil local — os pontos onde ocorrem as inundações urbanas de Espera Feliz, os quais poderiam ser confrontados com os resultados deste trabalho. Entretanto, é importante destacar que a proposta deste trabalho é justamente a realização de procedimentos e métodos que possam apontar locais que merecem atenção do poder público. Assim, a validação desses dados depende de visitas de campo e de estudos topográficos mais detalhados, aumentando o grau de exatidão e acurácia do trabalho. Tal estudo de validação pode ser elaborado mediante o interesse do poder executivo local, para buscar soluções e alternativas para a municipalidade, apontadas em tópico específico desta pesquisa.

Desenvolvidos os hidrogramas e conhecidas as vazões acumuladas nos pontos de baixada de cada seção, utilizou-se o *software* CANAL, (SILVA, D. et. al., 2006), com o objetivo de gerar uma estimativa da altura da lâmina d'água nos pontos de foz, para verificar e desenvolver o mapa da pluma de inundação. Os resultados foram exportados e apresentados nas Figuras 49, 50 e 51, tendo acusado a altura da lâmina d'água, que foi plotada a partir das curvas de nível geradas. Por fim, o resultado final é apresentado nas Figuras 52 e 53. Também foram desenvolvidos mapas específicos que ampliaram o espectro escalar, de modo a identificar os pontos atingidos pela pluma de inundação gerada pelo modelo, utilizando imagem de satélite como base para conhecer efetivamente os locais dentro da cidade que necessitam de atenção. Nas Figuras 54 a 59 é possível observar a ampliação do espectro escalar.

Figura 49 - Relatório canal – seção 1

Data de emissão do relatório: 03/11/2022



Canal

Copyright (2000) © GPRH



RELATÓRIO
Dimensionamento de Canais Triangulares

INCÓGNITA DO PROBLEMA: Profundidade Normal

Vazão: 200,00 m ³ /s	Profundidade Normal: 10,053 m
Declividade: 0,0133 m/m	Coefficiente de Rugosidade: 0,0500
Folga: 0,10 m	Comprimento do Canal: 55000,0 m
Inclinação do Talude: 0,50	

RESULTADOS

Área: 50,5308 m ²	Perímetro Molhado: 22,479 m
Largura da Superfície: 10,053 m	Profundidade Crítica: 7,993 m
Número de Froude: 0,564	Regime de Escoamento: Subcrítico
Velocidade: 3,958 m/s	Energia Específica: 10,851 m
Movimentação de Terra: 2834759,903 m ³	

Fonte: desenvolvido pelo autor através do software CANAL, desenvolvido por Silva, D et. al. (2006).

Figura 50 - Relatório canal – seção 2

Data de emissão do relatório: 03/11/2022



Canal

Copyright (2000) © GPRH



RELATÓRIO
Dimensionamento de Canais Triangulares

DADOS DE ENTRADA

INCÓGNITA DO PROBLEMA: Profundidade Normal

Vazão: 80,00 m ³ /s	Profundidade Normal: 8,850 m
Declividade: 0,0042 m/m	Coefficiente de Rugosidade: 0,0500
Folga: 0,10 m	Comprimento do Canal: 21650,0 m
Inclinação do Talude: 0,50	

RESULTADOS

Área: 39,1594 m ²	Perímetro Molhado: 19,789 m
Largura da Superfície: 8,850 m	Profundidade Crítica: 5,540 m
Número de Froude: 0,310	Regime de Escoamento: Subcrítico
Velocidade: 2,043 m/s	Energia Específica: 9,063 m
Movimentação de Terra: 867069,050 m ³	

Fonte: desenvolvido pelo autor através do software CANAL, desenvolvido por Silva, D et. al. (2006).

Figura 51 - Relatório canal – seção 3

Data de emissão do relatório: 03/11/2022



Canal

Copyright (2000) © GPRH



RELATÓRIO

Dimensionamento de Canais Triangulares

DADOS DE ENTRADA

INCÓGNITA DO PROBLEMA: Profundidade Normal

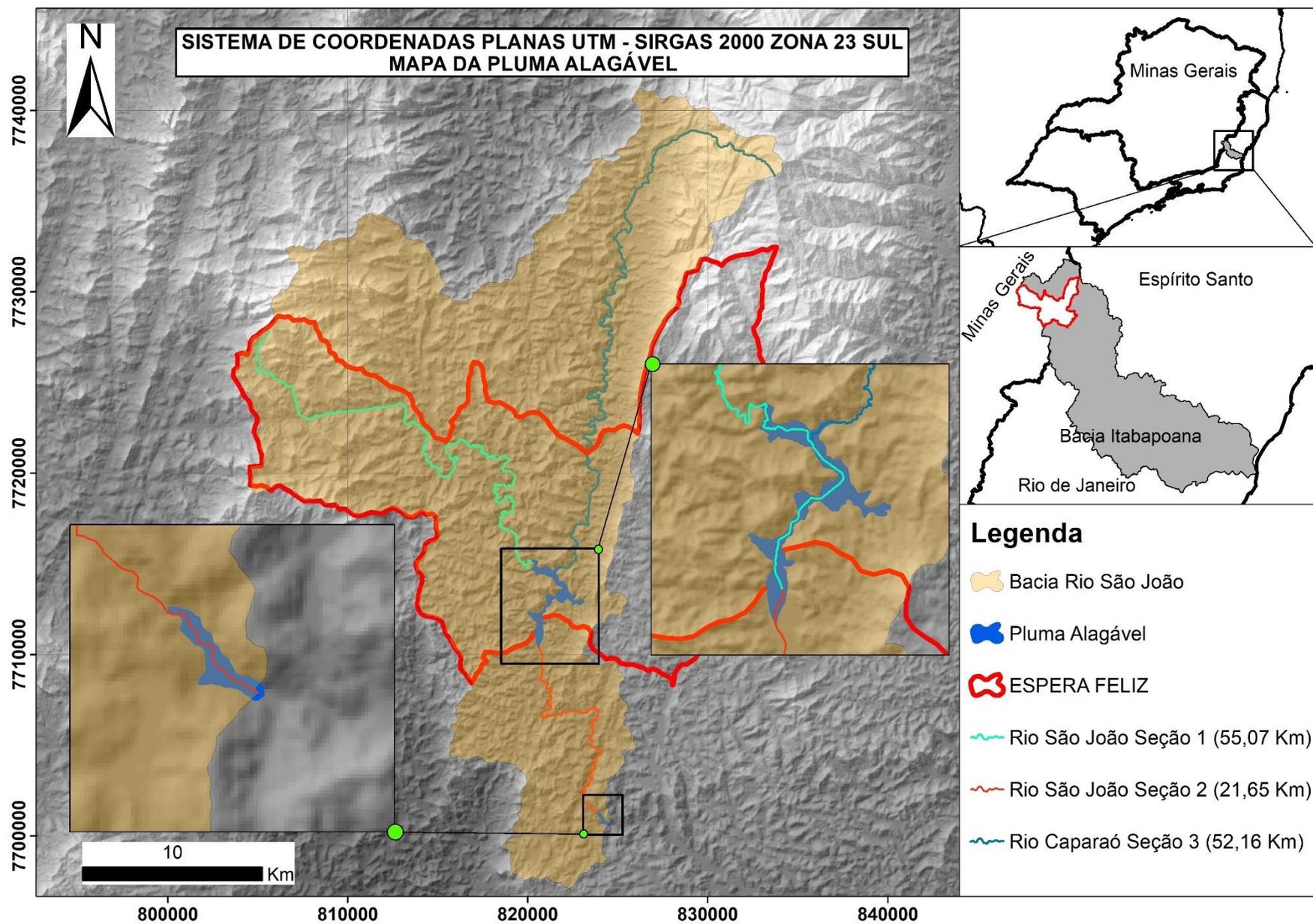
Vazão: 192,00 m ³ /s	Profundidade Normal: 8,131 m
Declividade: 0,0380 m/m	Coefficiente de Rugosidade: 0,0500
Folga: 0,10 m	Comprimento do Canal: 52160,0 m
Inclinação do Talude: 0,50	

RESULTADOS

Área: 33,0586 m ²	Perímetro Molhado: 18,182 m
Largura da Superfície: 8,131 m	Profundidade Crítica: 7,863 m
Número de Froude: 0,920	Regime de Escoamento: Subcrítico
Velocidade: 5,808 m/s	Energia Específica: 9,850 m
Movimentação de Terra: 1767010,955 m ³	

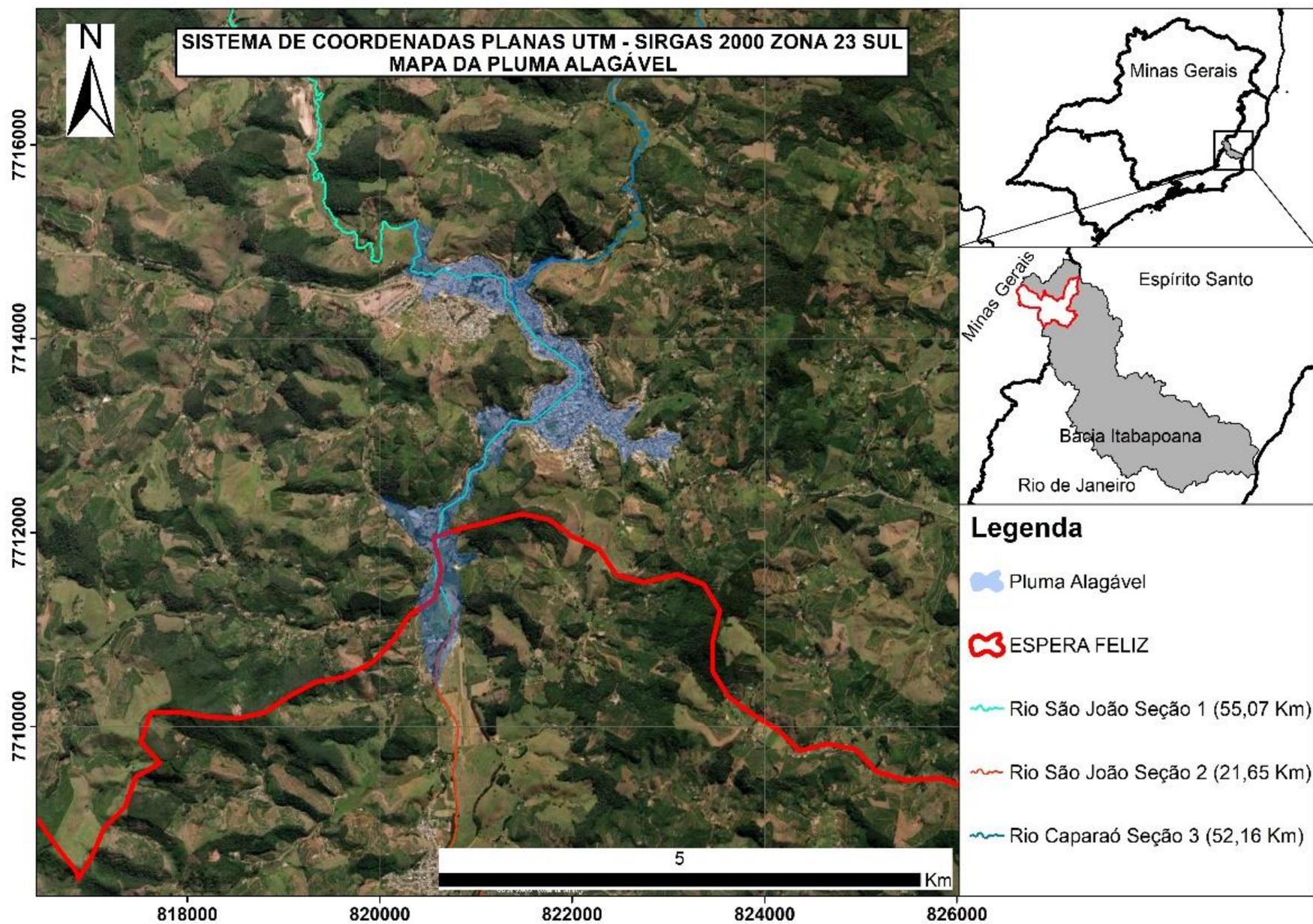
Fonte: desenvolvido pelo autor através do software CANAL, desenvolvido por Silva, D et. al. (2006).

Figura 52 - Pluma alagável geral – Bacia do Rio São João



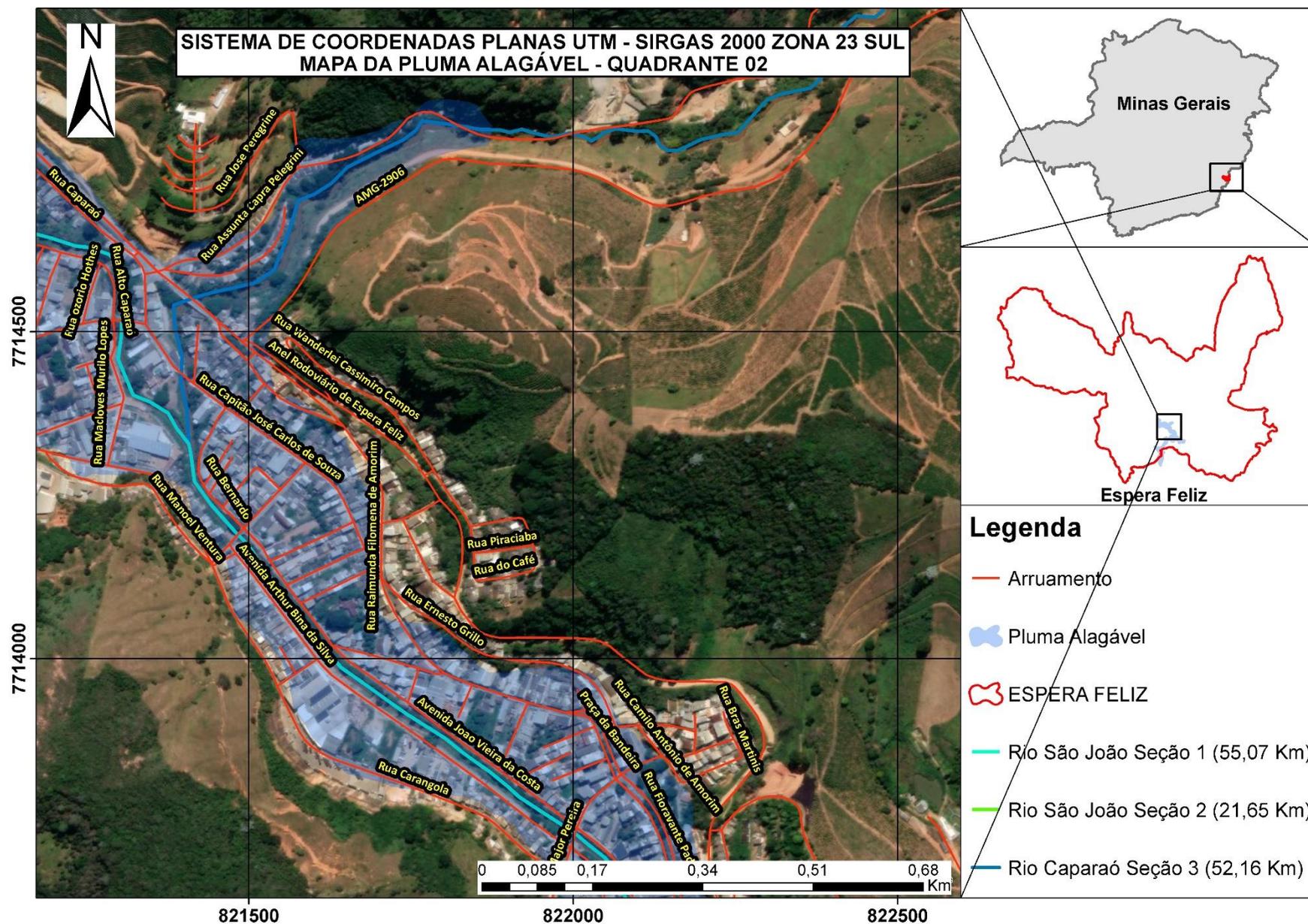
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 53 - Pluma alagável com imagem de satélite



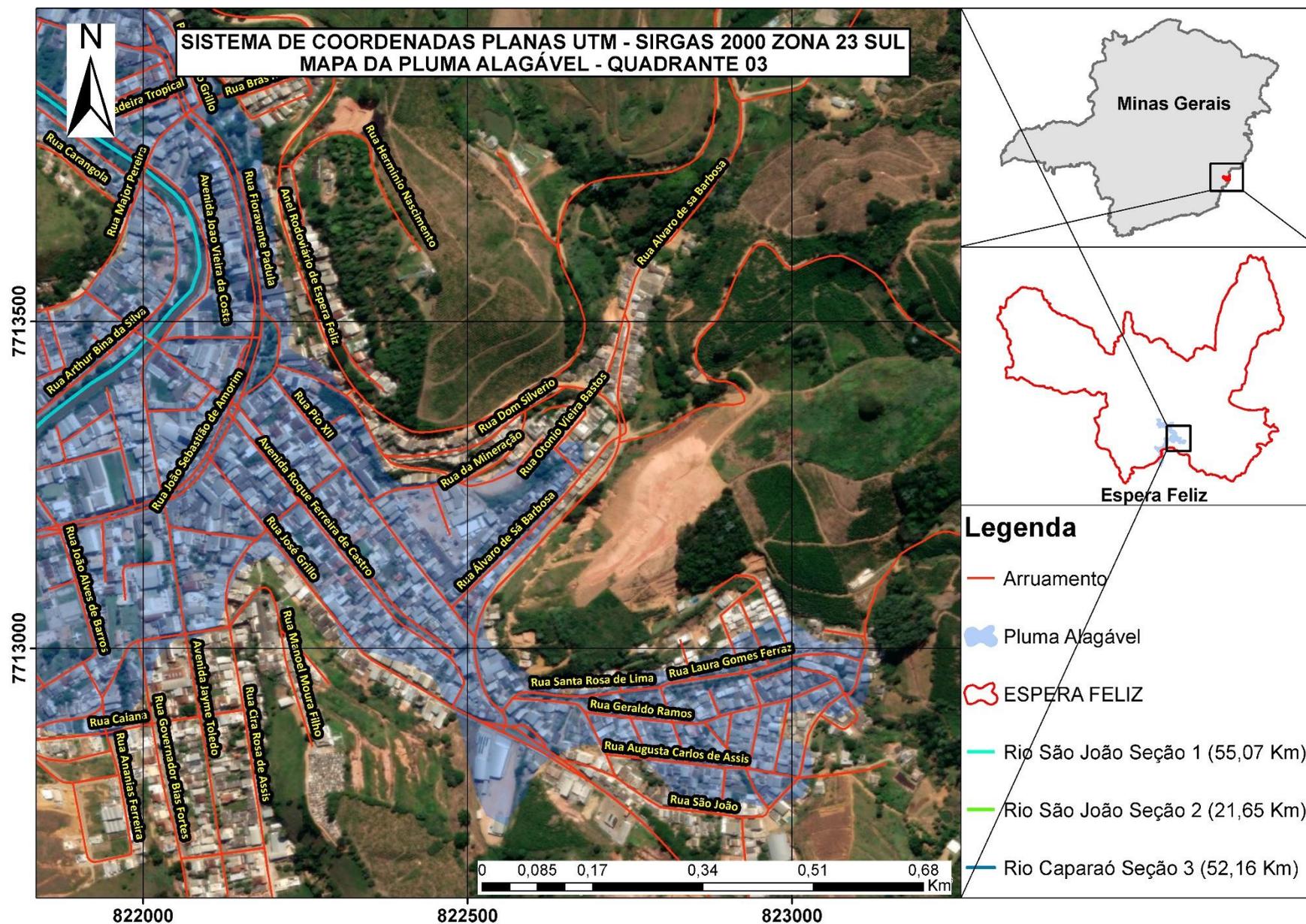
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 55 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 2



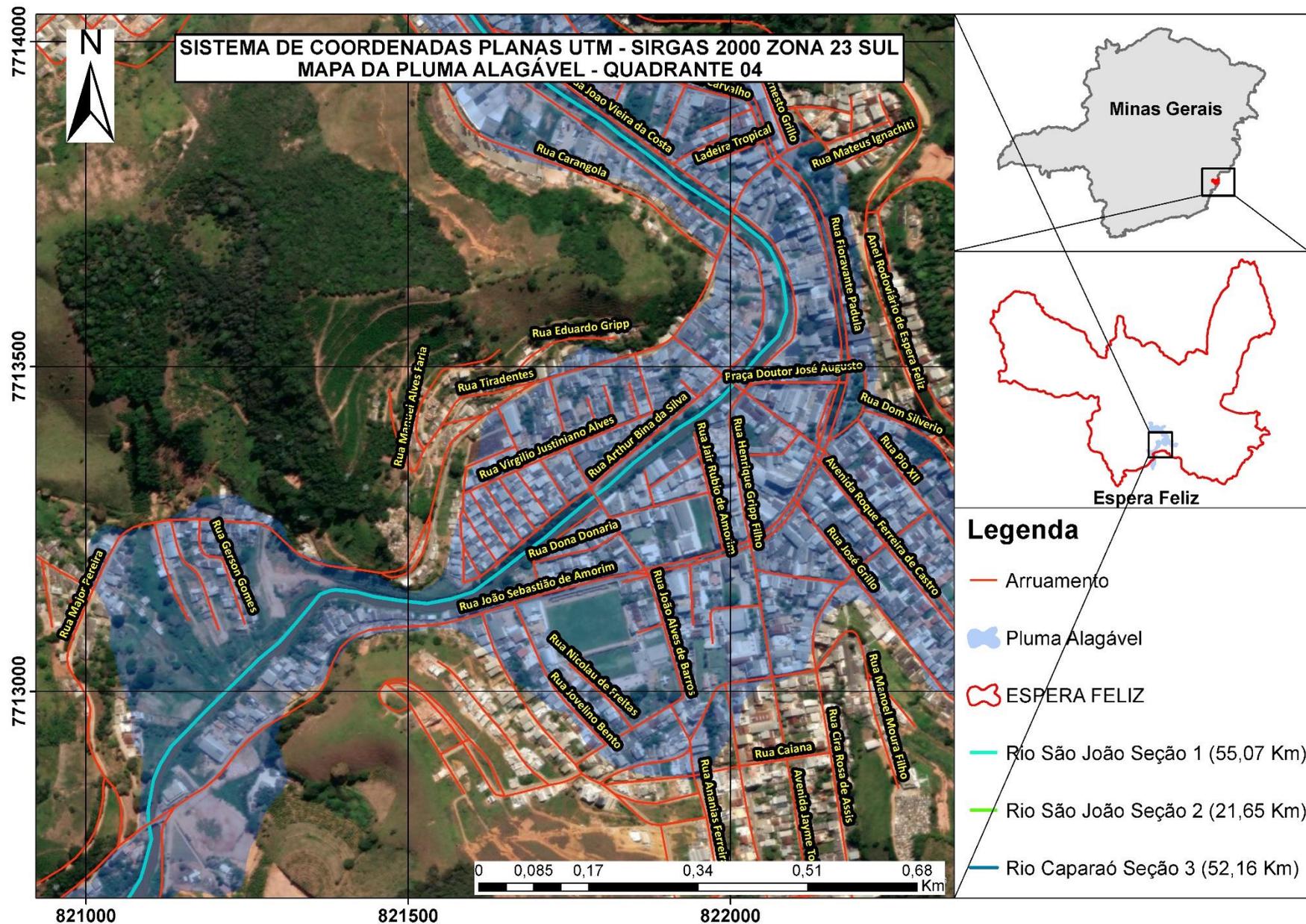
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 56 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 3



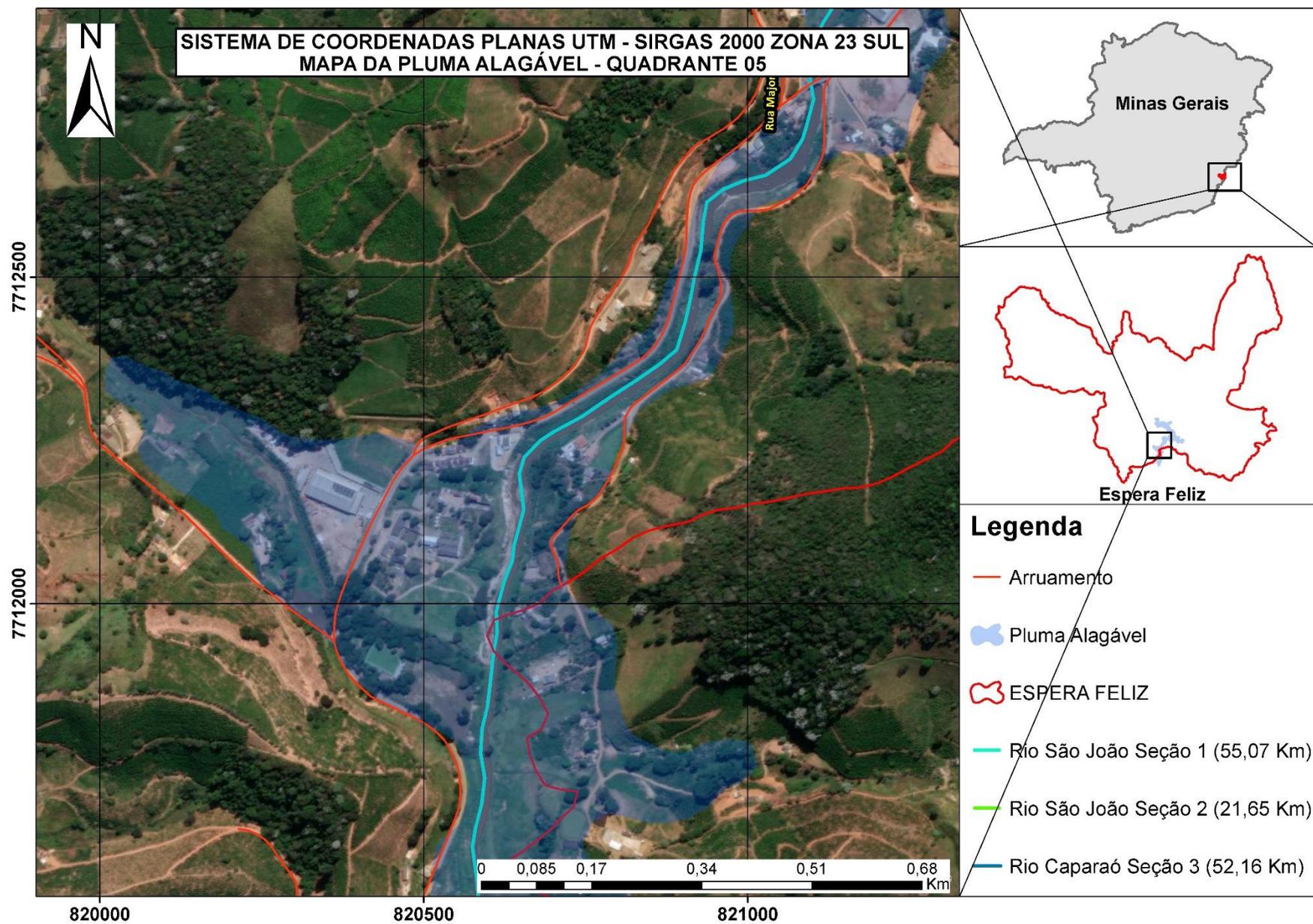
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 57 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 4



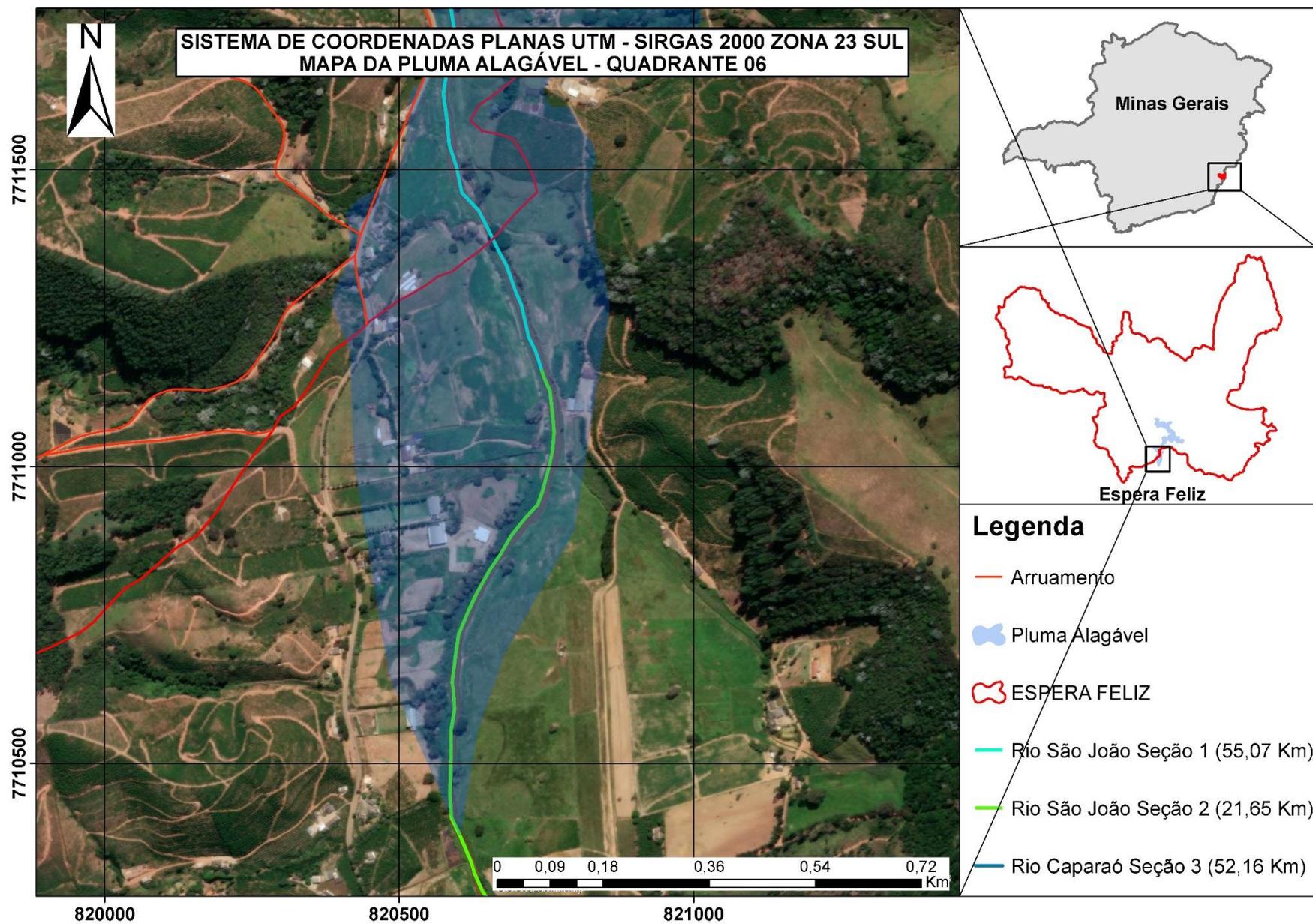
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 58 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 5



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 59 - Pluma alagável com imagem de satélite – Quadrante 6



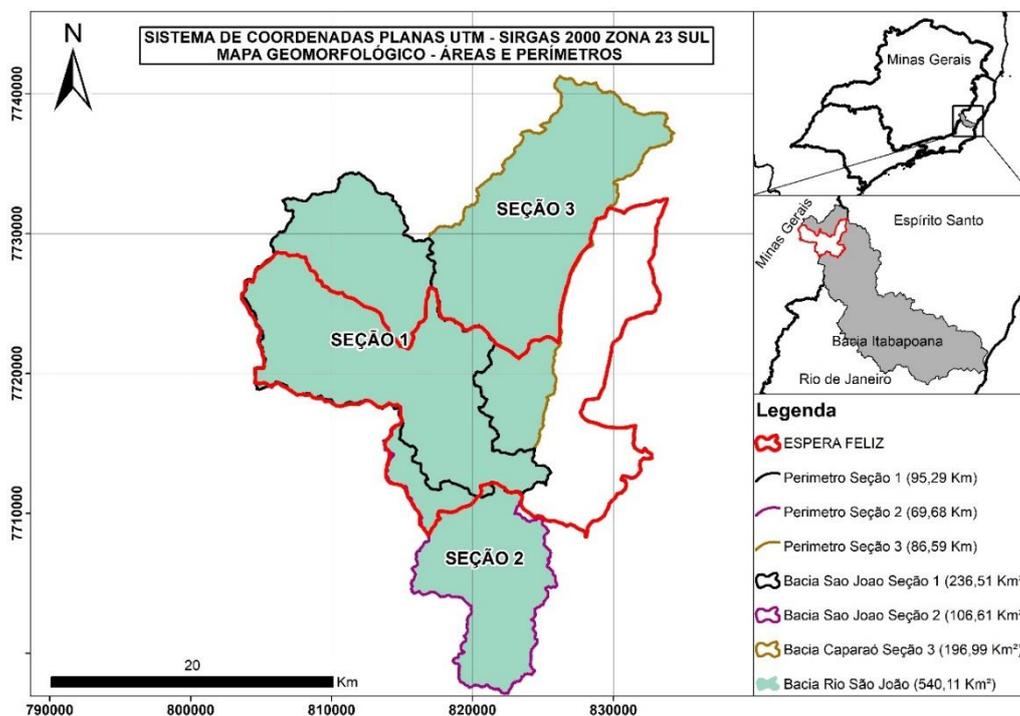
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Nota-se que a pluma alagável do Rio Caparaó ocorre majoritariamente devido ao espriamento das águas do Rio São João Seção 1, na sua várzea, o qual dificulta a drenagem do Rio Caparaó. Outro detalhe notável é o acúmulo de sedimentos nas partes mais planas, que promove a diminuição do raio hidráulico e ocasionalmente pode gerar problemas de alagamento em virtude do acúmulo desses materiais. Portanto, fica evidente a importância do mecanismo de manutenção do escoamento adequado na calha do curso d'água.

5.3 RESULTADOS DAS APLICAÇÕES DOS INDICADORES MORFOLÓGICOS

Os próximos resultados vêm de estudos espaciais utilizando as bases de dados em plataforma SIG. Os primeiros resultados tratam especificamente das áreas (km²) e dos perímetros (km) de cada seção, destinadas às sub-bacias dos Rios Caparaó e São João. A Figura 60 apresenta os detalhes gráficos.

Figura 60 - Parâmetros morfológicos – áreas e perímetros



Fonte: desenvolvido pelo autor.

No intuito de facilitar a compreensão dos dados gerados no mapa, foi desenvolvido o Quadro 22, com os valores de cada um dos parâmetros mencionados.

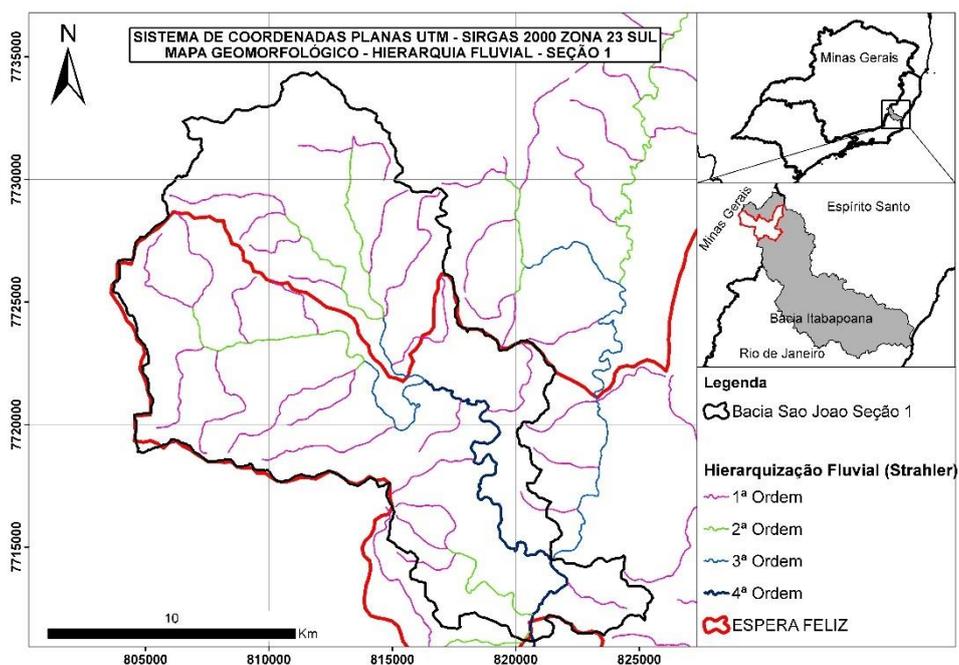
Quadro 22 - Parâmetros morfológicos – áreas e perímetros

Bacias	Perímetro (km)	Área (km ²)
Seção 1	95,29	236,51
Seção 2	69,68	106,61
Seção 3	86,59	196,99

Fonte: desenvolvido pelo autor.

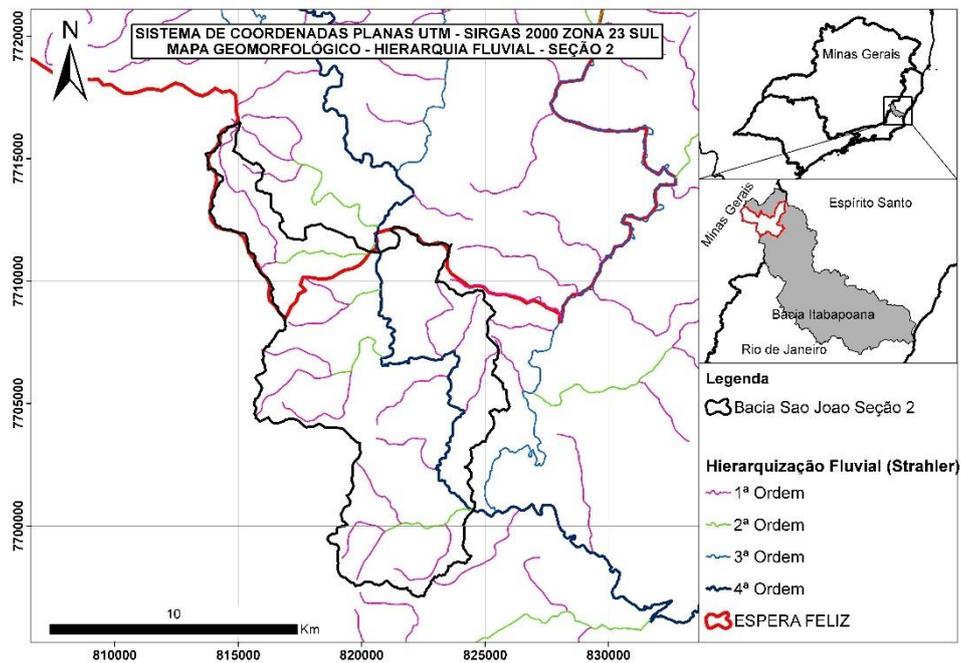
As áreas de cada seção têm caráter relevante para a análise dos dados, uma vez que retratam as áreas de drenagens de contribuições, através dos afluentes tributários. As análises relativas aos perímetros encontrados têm relevância no que se refere às linhas que limitam os divisores de água, sendo parâmetro de entrada para outros indicadores. O próximo resultado é relacionado à hierarquização fluvial, ou seja, o ordenamento dos canais. O método utilizado nesta pesquisa foi informado em tópico específico e os seus resultados podem ser apreciados nas Figuras 61, 62 e 63.

Figura 61 - Parâmetros morfológicos – hierarquização fluvial seção 1



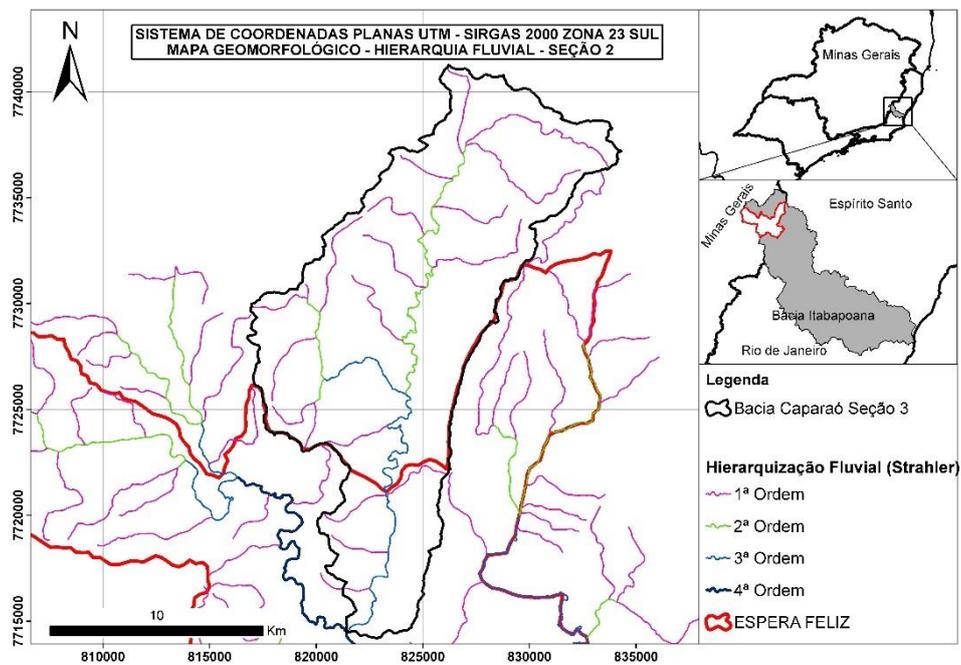
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 62 - Parâmetros morfológicos – hierarquização fluvial seção 2



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 63 - Parâmetros morfológicos – hierarquização fluvial seção 3



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Após a geração dos dados supracitados, os Quadros 23, 24 e 25 foram produzidos para quantificar o somatório dos comprimentos das drenagens de cada ordenamento, que foram produzidos nas três (3) seções estudadas.

Quadro 23 - Hierarquização fluvial - seção 1

Ordem	Método Strahler Nº de segmentos	Comprimento (km)
1ª ordem	28	105,18
2ª ordem	15	31,68
3ª ordem	4	11,18
4ª ordem	8	21,11

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 24 - Hierarquização fluvial - seção 2

Ordem	Método Strahler Nº de segmentos	Comprimento (km)
1ª ordem	18	56,85
2ª ordem	7	13,41
3ª ordem	0	0
4ª ordem	9	18,60

Fonte: desenvolvido pelo autor. Observação: as seções 1 e 2 correspondem ao mesmo curso de água, implicando que seus resultados devem ser somados.

Quadro 25 - Hierarquização fluvial - seção 3

Ordem	Método Strahler Nº de segmentos	Comprimento (km)
1ª ordem	20	81,53
2ª ordem	12	23,59
3ª ordem	7	23,33
4ª ordem	2	0,04

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Com os dados apresentados pode-se verificar algumas tendências. Segundo Machado & Torres (2012), é característico dos canais de primeira ordem representar locais com altitudes mais elevadas e com declividade acentuada, ou seja, tem-se majoritariamente o regime turbulento como tendência, e o resultado esperado são os arrastes de sedimentos. Os canais de maior ordenamento recebem esses sedimentos a jusante, que acabam depositados no leito das áreas de drenagens mais planas. Outro ponto relevante é que quanto menor for o ordenamento do curso de drenagem, mais rápidas serão as respostas hidrológicas à precipitação, uma conclusão corroborada pelo tempo de

concentração encontrado na seção 3 (referente ao rio Caparaó), em relação à seção 1 (referente ao rio São João), sendo a resposta hidrológica da seção 3 mais rápida que a da seção 1. Os canais de drenagem mais a jusante tendem a ter ordens mais elevadas e caracterizam áreas de menor declividade e, portanto, as vazões tendem a estar em regime laminar e uniforme.

É relevante salientar que o método de Strahler (1982) impede que um trecho hidrográfico, segundo sua ordenação, receba contribuições de ordens superiores sem receber imediatamente das ordens inferiores. Este fenômeno é evidenciado na seção 2, onde o terceiro ordenamento não recebe atribuição de valor, ao passo que o quarto ordenamento recebe. É importante notar que esse dado não constitui um erro, pois as seções 1 e 2 referem-se ao mesmo curso de água (Rio São João) e, portanto, os resultados da hierarquia fluvial devem ser somados. As seções 1 e 2 foram subdivididas dessa maneira para garantir a compatibilidade entre o método *Soil Conservation Service* (SCS-CN) e os indicadores morfológicos, mantendo o mesmo recorte para toda a base de dados. A inclusão da seção 2 na presente pesquisa se justifica pelo seu papel na recepção e absorção da vazão proveniente dos rios principais (São João e Caparaó). Embora essa seção não tenha impacto direto na problemática em foco, sua seleção visou avaliar a capacidade de promover o escoamento das águas nessa área específica, visto que a seção 2 refere-se ao baixo curso do rio São João. Dessa forma, a seção 2 está em conformidade com a delimitação do recorte territorial estabelecido para esta pesquisa.

Os resultados desse indicador podem ser empregados no cálculo da relação de bifurcação (adimensional). Segundo Christofletti (1988), essa relação tem relevância para buscar compreender os números de segmentos de um ordenamento em relação aos demais diretamente superiores. Considerando esses dados, pode-se acusar a existência de uniformidade nos sistemas de drenagem, e valores mais altos apontam regiões hidrográficas mais alongadas. Os Quadros 26, 27 e 28 apresentam seus resultados para as seções 1, 2 e 3, respectivamente.

Quadro 26 - Relação de bifurcação, seção 1

Ordem	Relação de bifurcação (Rb)
1ª ordem	1,03
2ª ordem	1,25
3ª ordem	0,50

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 27 - Relação de bifurcação, seção 1 + seção 2

Ordem	Relação de bifurcação (Rb)
1ª ordem	1,06
2ª ordem	1,05
3ª ordem	0,24

Fonte: desenvolvido pelo autor. Observação: as seções 1 e 2 representam o mesmo curso d'água, indicando que, ao calcular a Rb, é necessário somar o número de segmentos antes.

Quadro 28 - Relação de bifurcação, seção 3

Ordem	Relação de bifurcação (Rb)
1ª ordem	0,95
2ª ordem	1,33
3ª ordem	3,50

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Em relação ao comprimento dos rios principais, a já retratada ‘Figura 52 – Pluma alagável geral – Bacia do Rio São João’ os demonstra em sua legenda, assim como outros mapas previamente apresentados. O Quadro 29 foi gerado para fornecer os comprimentos por seção.

Quadro 29 - Comprimento dos rios principais

Bacias	Comprimento (km)
Seção 1 – Rio São João	55,07
Seção 2 – Rio São João	21,65
Seção 3 – Rio Caparaó	52,16

Fonte: desenvolvido pelo autor.

O parâmetro seguinte envolve a densidade de drenagem, que segundo Machado & Torres (2012) tem grande relevância na identificação do potencial da bacia de promover o escoamento superficial em maior ou menor grau. O Quadro 30 foi

desenvolvido por Beltrame (1994) e reproduzido nesta pesquisa para apresentar os valores de referência para o parâmetro em questão.

Quadro 30 - Valores de referência de densidade de drenagem

Valores da Dd (km/km ²)	Qualificação da Dd
Menor que 0,50	Baixa
De 0,50 a 2,00	Mediana
De 2,01 a 3,50	Alta
Maior que 3,50	Muito Alta

Fonte: Beltrame (1994).

O coeficiente de manutenção, outro importante indicador analisado, é inversamente proporcional à densidade de drenagem — seu resultado acusa a área necessária para a manutenção da drenagem na localidade. O Quadro 31 traz os resultados desses dois indicadores.

Quadro 31 - Resultados do Dd e Cm

Critério	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Comprimento total (Lt) [km]	169,17	88,88	128,50
Área da bacia (A) [km ²]	236,51	106,61	196,99
Densidade de drenagem (Dd) [km/km ²]	0,71	0,83	0,65
Coef. de manutenção (Cm) (km ² /km)	1,39	1,19	1,53

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Os valores encontrados nos cálculos da densidade de drenagem acusaram uma tendência mediana de promoção da drenagem nas bacias pesquisadas, corroborando a hipótese de que existe uma tendência natural — pela própria morfologia local — de dificultar o escoamento das águas. Por outro lado, a hierarquização fluvial demonstra que, majoritariamente, os comprimentos dos canais de primeira ordem, se somados, são amplos e oferecem rápidas respostas hidrológicas. Da mesma forma, pode-se dizer que os canais de ordens superiores têm comprimentos uniformes, conforme demonstrado pela relação de bifurcação. A exceção ocorre na relação de bifurcação da seção 3, que é apontada no terceiro ordenamento. Isso demonstra que a ordem imediatamente superior tem um perfil alongado e a relação apresenta valores três vezes maior do que os resultados obtidos nas seções 1 e 2, utilizando a mesma metodologia. Associando essas discussões aos resultados dos hidrogramas gerados pelo escoamento superficial, não foram acusadas

mudanças representativas para o escoamento superficial entre os anos de 1991 a 2021. Isso significa que, sozinha, a análise temporal do escoamento superficial pelos modelos hidrológicos aplicados não justifica os repetidos eventos de inundações ocorridos nos últimos anos no município de Espera Feliz. Portanto, os indicadores morfológicos têm relevância primordial para o diagnóstico local, pois a distribuição da hidrografia de ordenamento quatro tem uma característica natural em ser mal drenada. Outro parâmetro é a manutenção do sistema de drenagem fluvial, que apresentou valores acima de 1 quilômetro quadrado por quilômetro (km^2/km), indicando que para cada quilômetro de drenagem da hidrografia fluvial analisada é necessária uma área maior que 1 quilômetro quadrado (km^2) para a sua manutenção adequada, ou seja, a análise aponta para a demanda de grandes áreas de amortecimento.

O índice de circularidade é um parâmetro crucial para buscar compreender a forma dos hidrogramas gerados nos modelos hidrológicos. Esse indicador tem grande relevância para efetivamente definir o peso do modelo hidrológico em relação ao problema objeto de análise desta pesquisa. Dado que quanto maior for a relação da bacia com uma circunferência, maior é o pico do hidrograma no seu ápice, analogamente tem-se que quanto menor for a relação da bacia com uma circunferência, menor é o pico do hidrograma; portanto, o impacto do escoamento superficial na bacia analisada tende a ser menor. O Quadro 32 apresenta o resultado para cada uma das seções.

Quadro 32 - Resultados do índice de circularidade

Parâmetros	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Perímetro ou comprimento [km]	95,29	69,68	86,59
Área real [km^2]	236,51	106,61	196,99
Raio equivalente (R) [km]	15,16	11,08	13,78
Área do círculo equivalente (A_c) [km^2]	722,57	386,37	596,65
Índice de circularidade	0,32	0,27	0,33

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Os resultados do índice de circularidade devem estar dentro de uma faixa de 0 a 1. Valores mais próximos de 1 são indicativos de bacias mais circulares, ao passo que valores menores indicam menos semelhança com uma circunferência. Como os resultados revelaram incompatibilidade com a forma circular, os hidrogramas analisados em tópico específico tenderam a apresentar valores de pico moderados. O peso do

escoamento superficial, em relação à mudança de uso e cobertura do solo na bacia analisada, revelou-se de baixa relevância para o apontamento da origem do problema. Esses resultados estão em consonância com os obtidos no tópico relacionado à convolução gráfica dos hidrogramas no método Soil Conservation Service, os quais demonstraram valores moderados em relação ao tamanho das áreas de drenagens das bacias hidrográficas estudadas.

O desenvolvimento da declividade média por seção seguiu a metodologia proposta Machado & Torres (2012). O Quadro 33 apresenta os resultados.

Quadro 33 - Resultados da declividade média

Parâmetros	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Somatório dos comprimentos das curvas de nível [km]	8127,29	3100,92	7148,51
Área da bacia [km ²]	236,51	106,61	196,99
Equidistância das curvas de nível [km]	0,01	0,01	0,01
Declividade média [%]	34,36	29,08	36,28

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Os resultados apresentados demonstram uma declividade com média alta. Lemos & Santos (1982) desenvolveram categorias de declividade que analisam a susceptibilidade a erosão e o aumento do arraste de material granular nos cursos de água. Esses fatores resultam no acúmulo de sedimentos em áreas de baixada, que coincide com a confluência dos rios São João e Caparaó, contribuindo para o assoreamento dessas regiões. Além disso, favorecem a diminuição do raio hidráulico, o que, por sua vez, aumenta a probabilidade de ocorrência de inundação, dificultando o escoamento adequado do curso de água nos locais mais planos e no baixo curso. Outro ponto que merece destaque é a rapidez da resposta hidrológica em decorrência da declividade sobre o que efetivamente escoar. O perfil alongado da seção 3 do Rio Caparaó, encontrado na relação de bifurcação, caracteriza um fluxo mais intenso, bem como a formação de paisagens desafiadoras, como cachoeiras e corredeiras. A alta declividade associada a este fato força o rio a percorrer caminhos de vales, promovendo a caracterização de relevos desafiadores e estreitos. Este fenômeno é apresentado no perfil longitudinal, no final deste capítulo.

O Quadro 34 apresenta as classes de declividade segundo Lemos & Santos (1982), que também são citadas por Machado & Torres (2012) como referência.

Quadro 34 - Classificação das declividades médias

Declividade	Relevo	Susceptibilidade à erosão
Até 8%	Plano e Suave Ondulado	Ligeira
De 8 à 20%	Ondulado	Moderada
De 20 à 45%	Forte Ondulado	Forte
Maior que 45%	Montanhoso	Muito Forte

Fonte: adaptado de Lemos & Santos (1982) & Machado & Torres (2012).

Para verificar o coeficiente de rugosidade, foram usadas as densidades de drenagem previamente calculadas, estas multiplicadas pelas declividades médias encontradas. O produto dessa rotina é retratado no Quadro 35.

Quadro 35 - Resultados do coeficiente de rugosidade

Critério	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Densidade de drenagem (Dd) [km/km ²]	0,72	0,83	0,65
Declividade média [%]	34,36	29,08	36,28
Coeficiente de rugosidade [RN]	0,245	0,242	0,236

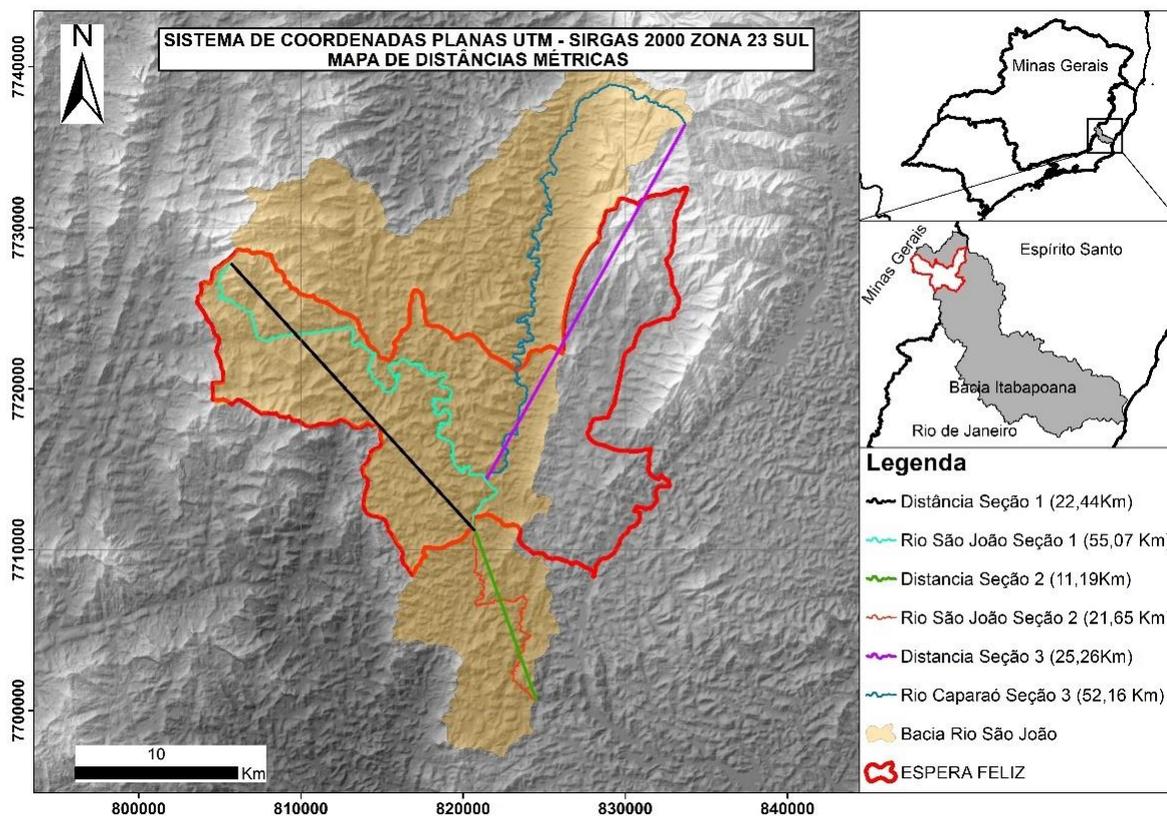
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Para Machado & Torres (2012), o coeficiente de rugosidade deve ser utilizado para fins comparativos. Por comparações adimensionais, nota-se que valores de ‘RN’ maiores implicam em chances mais consistentes de promover erosões, caracterizando uma rugosidade maior no relevo. Entretanto, os resultados evidenciam ordens de grandezas semelhantes, justamente pela proximidade e declividades parecidas, validando a justificativa de que as bacias hidrográficas pesquisadas têm o potencial de promover erosões e assim gerar o assoreamento nas suas várzeas, que neste caso coincidem com o zoneamento urbano.

Os resultados atrelados ao parâmetro do índice de sinuosidade, ao que tudo indica, têm uma relevância enorme nesta pesquisa. Machado & Torres (2012) demonstram com apontamentos bibliográficos que os meandros que geram as sinuosidades têm sua formação através da estabilização física do percurso de drenagem, ou seja, a busca pelo

equilíbrio potencial. O fenômeno de criação dos meandros diz respeito às erosões decorrentes dos percursos e aos assoreamentos nas laterais dos leitos dos cursos de água, promovendo o estrangulamento e a diminuição do raio hidráulico, o que pode apontar tendências de empoçamento e elevação do nível da água em episódios de chuva intensa. A Figura 64 expressa graficamente os dados de entrada do indicador e o Quadro 36 apresenta os resultados dos cálculos.

Figura 64 - Distâncias e comprimentos



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 36 - Resultados do índice de sinuosidade

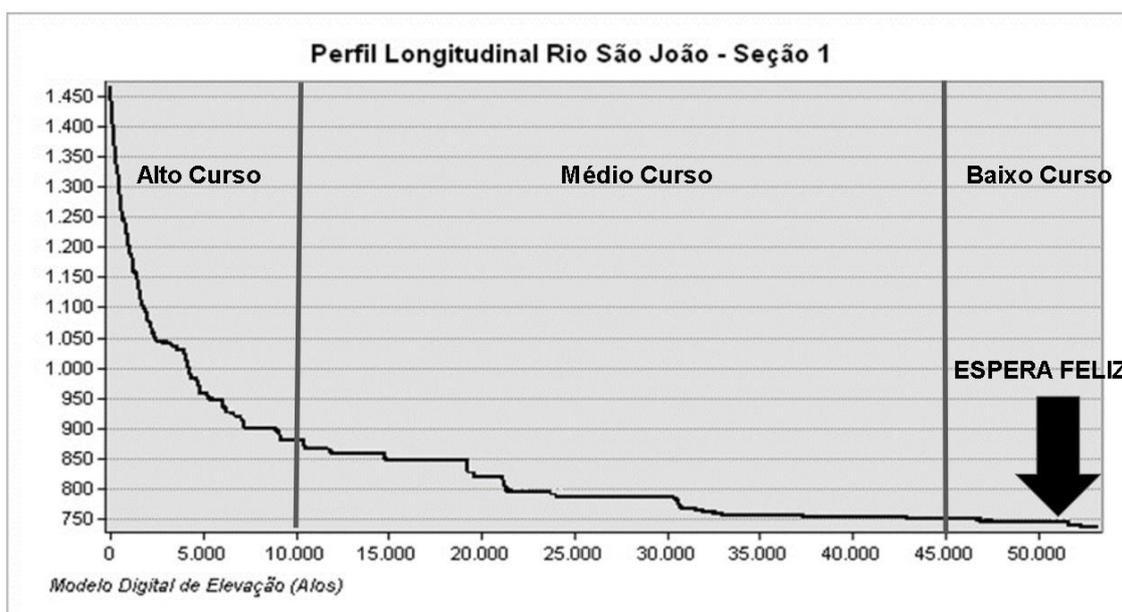
Critério	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Comprimento do curso de água (L) [km]	55,04	21,65	52,16
Distância Cabeceira até a Foz (D) [km]	22,44	11,19	25,26
Índice de Sinuosidade [Is]	2,45	1,93	2,06

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Segundo Machado & Torres (2012), o recurso matemático do índice de sinuosidade requer para a classificação como um curso de água meândrico um valor de 1,5. Pode-se dizer que os índices de sinuosidade das seções estudadas são outro fator que reforça a hipótese de a bacia ter condições naturais de promover inundações em suas várzeas.

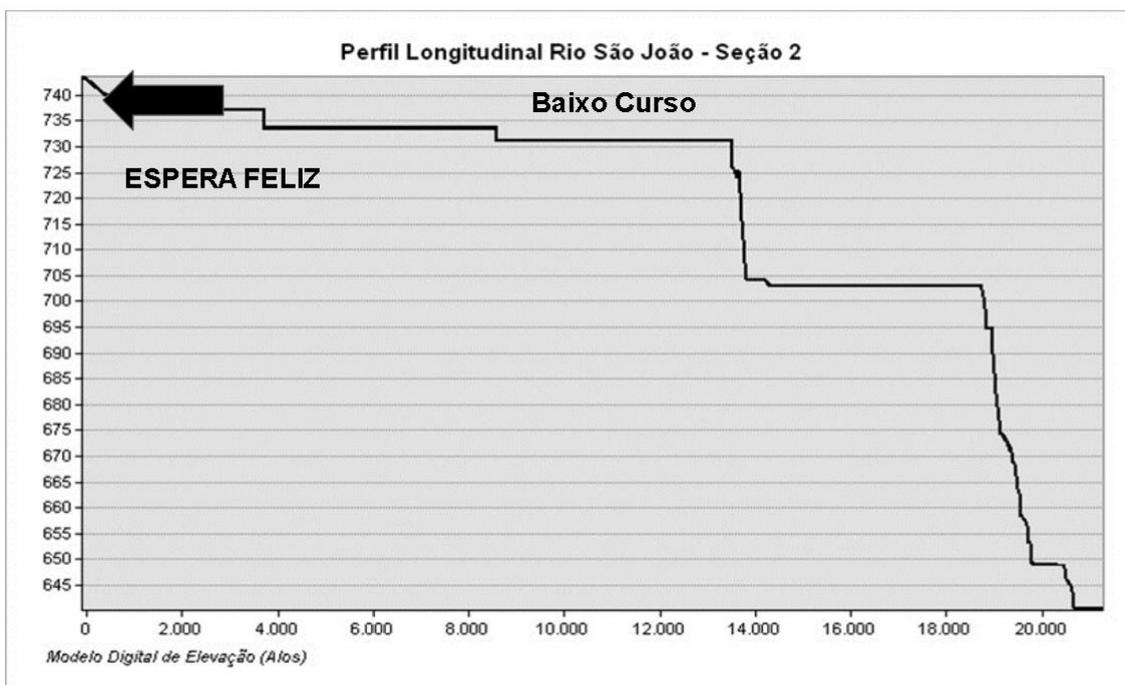
Outro indício importante identificado nos estudos morfológicos foi o perfil longitudinal do curso principal. As Figuras 65, 66 e 67 apresentam os perfis dos principais rios das bacias hidrográficas pesquisadas, obtidos em plataforma SIG através do modelo digital de elevação dos locais.

Figura 65 - Perfil longitudinal seção 1



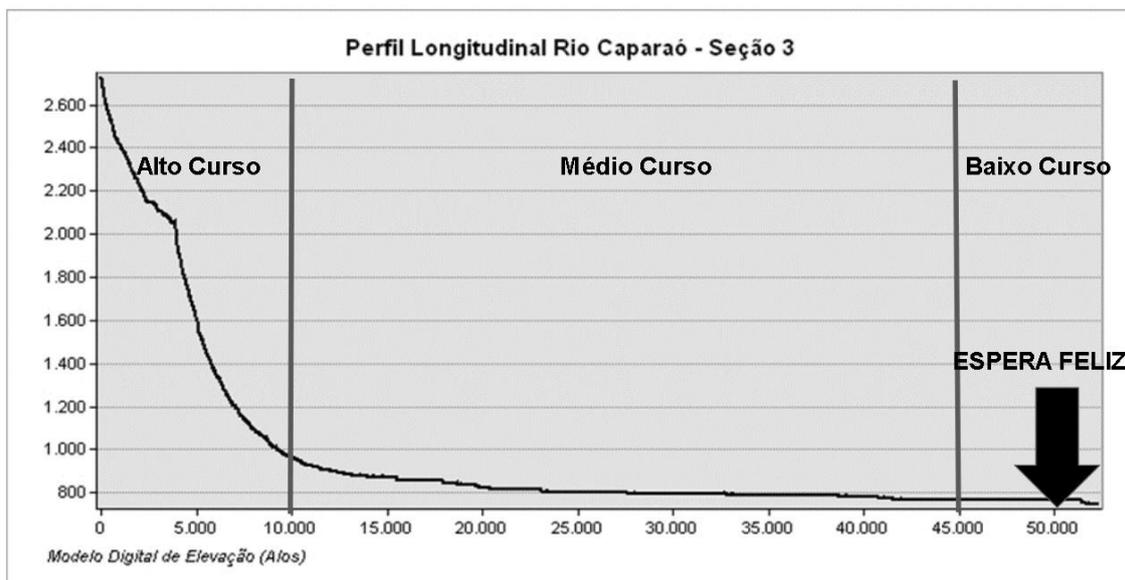
Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 66 - Perfil longitudinal seção 2



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Figura 67 - Perfil longitudinal seção 3



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Da apreciação dos perfis longitudinais decorreu o Quadro 37, no qual foram dispostos os resultados relativos aos gradientes altimétricos, a fim de compreender o percurso dos cursos de água e suas relações com as cotas mais elevadas e menos elevadas.

Quadro 37 - Resultados dos gradientes altimétricos

Critério	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Comprimento do curso de água (L) [km]	55,04	21,65	52,16
Cota máxima (m)	1470,00	746,00	2730,00
Cota mínima (m)	746,00	650,00	750,00
Gradiente altimétrico (m/m)	0,013	0,0044	0,037

Fonte: desenvolvido pelo autor.

O Rio São João possui um comprimento de 55,04 km na seção 1, atravessando uma área que inclui a cidade de Espera Feliz e apresentando uma extensão significativa. Além disso, o rio conta com uma seção adicional fora da cidade de Espera Feliz (seção 2), com comprimento de 21,65 km. Já o Rio Caparaó, localizado na seção 3, tem comprimento total de 52,16 km e atravessa uma região montanhosa conhecida pelo mesmo nome, a Serra do Caparaó. Portanto, ambos os rios são de extensões consideráveis, embora o Rio São João seja ligeiramente mais longo na seção 1.

O Rio São João apresenta uma grande variação altimétrica ao longo de seu curso. Sua altitude máxima é de 1470 m, enquanto sua altitude mínima é de 746 m, dentro da seção 1. Esse intervalo significativo de elevações contribui para a formação de diferentes características ao longo do rio. Já as variações que ocorrem na seção 2 não têm uma grande variação de altitude como na seção 1. A seção 2 encontra-se fora do domínio territorial do município de Espera Feliz e não contribui para a problemática destacada nesta dissertação. Entretanto, vale destacar que a variação de altitude é de 746 m na máxima e 650 m na mínima. Já o Rio Caparaó é caracterizado por uma variação altimétrica ainda mais expressiva, com uma altitude máxima de 2730 m e uma altitude mínima de 750 m, demonstrando uma extensa área de atuação nas regiões montanhosas da Serra do Caparaó.

O gradiente altimétrico, ou declividade, representa a taxa de variação da altitude em relação à distância percorrida pelo rio. No caso do Rio São João, o valor do gradiente altimétrico é de 0,013 metros por metro na seção 1 e de 0,0044 metro por metro na seção 2. Esses valores indicam uma inclinação moderada ao longo do curso do rio. Por outro lado, o Rio Caparaó possui um gradiente altimétrico mais acentuado, com o valor de 0,037 metro por metro. Essa declividade é três vezes maior que a do Rio São João, o que confere ao Rio Caparaó um fluxo mais intenso e a formação de paisagens desafiadoras, como cachoeiras e corredeiras.

Uma das diferenças notáveis entre os dois rios é o comportamento hidrológico em relação à largura e ao encaixamento. O Rio São João tem várzeas mais largas e encaixadas, impondo a tendência de se espalhar por uma área mais ampla em determinados pontos do curso. Isso pode ser resultado de sua inclinação mais suave e extensão. Por outro lado, o Rio Caparaó aparenta ter margens mais estreitas e confinadas. Isso pode ser resultado de sua declividade acentuada e terrenos montanhosos, que forçam o rio a fluir através de gargantas e vales estreitos.

6 CONCLUSÃO

Conforme o objetivo destacado, este trabalho teve como prerrogativa inicial a utilização de bases gratuitas de dados hidrológicos e morfológicos, de modo a identificar os motivos dos eventos de impacto socioambiental decorrentes das inundações urbanas na cidade de Espera Feliz.

A geotecnologia teve importância fundamental no desenvolvimento metodológico desta pesquisa, uma vez que foram conflitados dados complementares de cunho algébrico, hidrológico e morfológico, cujo tratamento viabilizou ponderações e conclusões a respeito dos resultados gerados.

Outro fator relevante para esta pesquisa diz respeito à interdisciplinaridade das aplicações e às considerações sobre as diversas análises detalhadas feitas no processo de geração dos resultados. Entretanto, o que se demonstrou de maior impacto positivo, no tocante à interdisciplinaridade, foi a complementação dos saberes em torno de cada segmentação metodológica, gerando resultados compatíveis e corroboráveis.

Cada metodologia nesta dissertação foi aplicada com o amparo de levantamentos estritamente bibliográficos, que lançaram as bases conceituais para cada etapa, e dessa forma foi possível desenvolver o trabalho pelo conflito dos dados. Todavia, é importante destacar uma limitação metodológica imposta à pesquisa devido à ausência de validação dos dados em campo. Porém, pode-se dizer que houve êxito na proposta inicial, pois um dos objetivos específicos declarados era o uso de dados gratuitos para buscar compreender as dinâmicas do ciclo hidrológico local — nota-se que tal objetivo foi alcançado.

Em relação ao desenvolvimento do modelo digital de susceptibilidade a inundação, observou-se em ambos os cenários 1 e 2 a possibilidade de extrair bons resultados, apontando que as áreas mais susceptíveis à ocorrência dos eventos supracitados estão no zoneamento urbano. É possível perceber que, ao longo dos anos, houve aumento da susceptibilidade a inundações urbanas, em decorrência da evolução da malha urbana no entorno do curso de água principal, o Rio São João. O aumento da exposição se deu à medida que a municipalidade se expandiu no local, dada a concentração com o tempo nos pontos mais baixos do vale do Caparaó.

Sobre a estimativa do escoamento superficial desenvolvida nesta pesquisa, notou-se que os resultados por si só não demonstram aumento do escoamento no horizonte temporal estudado. Pelo contrário: houve um leve amortecimento do escoamento superficial nas bacias hidrográficas do Rio São João, em decorrência do aumento no cultivo de café e na silvicultura, que são em sua maioria culturas plantadas em curvas de nível, melhorando a infiltração da água no solo.

A verificação dos estudos morfológicos corroborou os resultados supracitados, com destaque para uma tendência natural da bacia hidrográfica do Rio São João de arrastar materiais granulares para os pontos mais baixos (assoreamento), diminuindo o raio hidráulico nas suas várzeas e dificultando o escoamento dos canais fluviais nestes locais.

A abordagem transdisciplinar desta pesquisa, em virtude de sua metodologia, tem potencial de promover caminhos de resolução com dados livres disponíveis em outras localidades; com o objetivo de oferecer dados qualitativos e quantitativos com baixo custo inicial, a fim de compreender os melhores caminhos e planejar futuros investimentos e levantamentos de dados mais apurados. Contudo, é importante salientar que a abordagem metodológica deste trabalho deve ser aplicada a outras localidades com cuidado, considerando as particularidades de cada região de estudo.

Diversos estudos sobre a aplicação da morfologia destacam o seu potencial como ferramenta essencial para compreender as relações de causa e efeito e fazer prognósticos precisos. Esses levantamentos são de extrema importância, pois orientam a busca por soluções adequadas. Diversas pesquisas têm enfatizado essa abordagem, ilustrando a relevância das soluções técnicas e científicas propostas. Trabalhos como os de Rodrigues (2005), Silva (2005) e Claro (2013) são exemplos que ressaltam essas perspectivas e

ênfatizam que o conhecimento dos aspectos morfológicos e das práticas de manejo são fundamentais para a proposição de soluções efetivas.

Os estudos de Berges (2013) e Veneziani (2019) destacaram a importância da aplicação da morfologia em conjunto com dados hidrológicos como base teórica e metodológica para avaliar as inundações urbanas. Assim, os resultados desta pesquisa mostram claramente o impacto positivo que os estudos morfológicos tiveram quando associados aos demais resultados.

Um parâmetro especialmente relevante obtido nesta pesquisa, que merece destaque na conclusão, é o Coeficiente de Manutenção, o qual apresentou valores superiores a 1 (km^2/km). Isso indica que nas seções 1 e 3, teoricamente, a área necessária para a manutenção adequada da bacia é maior do que a sua área final, fornecendo argumentos sólidos para a implementação de medidas de controle e projetos hidráulicos que aprimorem a capacidade de retenção de águas nas cabeceiras da bacia. Essas descobertas apontam para a relevância de abordagens morfológicas na gestão e mitigação de inundações urbanas. Portanto, é razoável afirmar que a associação de boas práticas de manejo, limpeza da calha do curso d'água principal e desenvolvimento de projetos de bacias de detenção em áreas mais altas, poderia ser suficiente para mitigar danos socioambientais nas suas várzeas.

Por fim, o desenvolvimento de projetos hidráulicos de detenção deverá ser amplo e englobar várias frentes de trabalho, como solução definitiva, para a mitigação dos problemas aqui mencionados. Também é indispensável a realização concomitante de projetos de engenharia hidráulica, com outras atividades que incentivem a população, por exemplo: (i) manutenção da calha do curso de água principal, (ii) promoção de educação ambiental e (iii) incentivos ambientais. Em suma, é importante que os Poderes Executivo e Legislativo do município de Espera Feliz desenvolvam dispositivos que estimulem o aproveitamento de água de chuva nas zonas rurais e urbanas, promovendo a diminuição do livre escoamento da água para as suas várzeas e mitigando os impactos do escoamento superficial. Outro ponto importante é a promoção de parcerias público-privadas (PPP), principalmente com os produtores de café e silvicultura, incentivando entre estes a preservação das vegetações nativas, das nascentes e das boas práticas de manejo do solo.

A implantação das abordagens aqui sugeridas — como limpeza da calha e projetos hidráulicos — tem potencial de eficácia na mitigação dos danos socioambientais causados

às várzeas. Essas medidas auxiliariam na redução das inundações urbanas e proporcionariam uma melhor gestão das águas pluviais, minimizando os impactos negativos para as comunidades e o meio ambiente. Dessa forma, é de suma importância que tais estratégias sejam consideradas e efetivadas de forma integrada, para promover uma gestão sustentável dos recursos hídricos e garantir a resiliência das áreas afetadas.

7 RECOMENDAÇÕES

Considerando a crescente ocorrência na cidade de Espera Feliz de eventos climáticos capazes de promover inundações, bem como os estudos apontados nesta dissertação, surge a necessidade de um tópico específico nesta pesquisa que aponte recomendações técnicas voltadas ao controle de inundações. Com base nas diretrizes propostas por Tucci & Bertoni (2003), recomenda-se a adoção de medidas de controle, classificadas em duas categorias gerais: não estruturais e estruturais. As medidas não estruturais são aquelas que têm como objetivo melhorar a harmonia entre a população impactada pelos eventos climáticos que geram as inundações, por meio de práticas de cunho educacional e legislativo. As estruturais abrangem as obras de infraestrutura, com a modificação do regime fluvial, buscando a minimização e mitigação dos impactos. É importante destacar que, sejam quais forem as soluções utilizadas, não há como controlar em sua totalidade a existência de inundações, pois trata-se de eventos naturais, conforme já foi abordado em tópico específico deste trabalho. É necessária uma abordagem estruturada que permita à população impactada minimizar suas perdas e conviver em maior harmonia com os eventos climáticos. Independente das soluções adotadas, é crucial tomar cuidado para não incentivar, indevidamente, a ocupação de áreas que são naturalmente susceptíveis aos problemas destacados nesta pesquisa. Em vez disso, é fundamental desencorajar tal ocupação, pois as soluções encontradas podem criar uma falsa sensação de segurança, conforme mencionado por Tucci & Bertoni (2003). É imprescindível considerar as limitações e as susceptibilidades associadas às áreas propensas a inundações ou outros eventos hidrológicos, buscando estratégias de planejamento territorial e gestão que priorizem a prevenção e a proteção das comunidades e do meio ambiente.

O caminho mais efetivo para aprimorar a qualidade de vida da população afetada pelo problema objeto desta pesquisa, consiste em uma abordagem integrada, combinando

medidas estruturais e não estruturais. Com tal solução holística, é possível reduzir significativamente os impactos causados por eventos de inundações, sem prejuízo à viabilidade econômica das abordagens mais dispendiosas.

Conforme apontado por Tucci & Bertoni (2003), as principais medidas estruturais consistem em: (i) controle da cobertura vegetal, (ii) controle da erosão do solo, (iii) construção de reservatórios e barragens, (iv) implementação de diques ou *polders*, e (v) modificações dos cursos dos rios. Essas medidas — bem como os projetos executivos, hidráulicos e estruturais, nos casos que exigem obras — devem ser objeto de estudo posterior, com escala adequada que viabilize um detalhamento suficiente para que os projetos corram sem percalços. Também é de suma importância a seleção de locais apropriados para as intervenções, o que implica na aquisição de áreas via desapropriação — amigável ou judicial — como requisito para o andamento das obras de interesse público.

Das medidas citadas no parágrafo anterior, o controle da cobertura vegetal tem uma importância fundamental na absorção das cheias nas várzeas de cursos de água, pois seu objetivo é a diminuição do escoamento superficial e o aumento da infiltração da água no solo. Outro efeito relevante da cobertura vegetal diz respeito à diminuição da erosão do solo para as várzeas dos cursos d'água, que agrava as inundações. No entanto, é importante reconhecer que essa medida não possui um custo reduzido. Além do investimento na plantação de novas mudas, é necessário um controle eficiente de pragas e uma seleção cuidadosa dos locais mais adequados para garantir o resultado desejado. Em muitos casos, esses fatores aumentam significativamente os gastos, tornando a medida economicamente inviável, especialmente em grandes bacias hidrográficas. Portanto, é imprescindível explorar alternativas viáveis para enfrentar esse desafio. No trabalho de Matoso, Souza & Rocha (2021), denominado “Quantificação de áreas verdes: uma metodologia para o monitoramento e gestão ambiental”, são utilizadas técnicas de sensoriamento remoto para a quantificação de áreas verdes em ambiente urbanizado, com o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) como objeto de monitoramento e gestão ambiental, verificando locais com incidência de vegetação. Essa ferramenta também é capaz de apontar a necessidade de aumentar a cobertura vegetal em ambientes urbanos e rurais, melhorando a identificação dos locais necessários à implantação de novas coberturas vegetais, economizando recursos e tornando o plantio viável sob a ótica dos recursos disponíveis.

O controle da erosão do solo, outra medida elencada, tem como objetivo primordial a estabilização dos taludes nas margens dos cursos d'água, o aumento da cobertura vegetal e a implantação de pequenos reservatórios de retenção, visando evitar o assoreamento das várzeas. Apesar de oferecer vantagens diretas, como a redução do assoreamento, o fator econômico pode inviabilizar esta solução em grandes áreas, em virtude dos elevados custos da estabilização de taludes, como o uso de gabiões. No entanto, é possível tornar esse controle mais viável ao associá-lo à seleção criteriosa de locais com técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. Essa abordagem possibilita a identificação precisa de áreas problemáticas e mais suscetíveis à erosão, permitindo concentrar esforços nas regiões mais críticas e assim reduzir os custos gerais de implantação do projeto.

A terceira medida citada, o uso de reservatórios e barragens, tem algumas vantagens e não é incomum o seu uso múltiplo com outras finalidades além do controle de cheias, como abastecimento de água, produção de energia, irrigação e, em alguns casos específicos, navegação. Os reservatórios têm como vantagens o controle de picos de cheias, mas a sua implantação é muitas vezes de difícil escolha, pois engloba a desapropriação de grandes áreas de inundação para que a bacia hidrográfica passe a ter uma capacidade de reter a água a montante e ser drenada gradativamente após o pico das cheias. Na busca por uma alternativa mais viável, diversos autores recomendam o uso de barragens de pequeno porte em diversas localidades na bacia — para aumentar a infiltração da água no solo em suas cabeceiras — e dessa forma dissipar o ônus da implantação em áreas de menor porte.

Os diques ou *polders*, penúltima técnica sugerida, devem ser construídos com terra compactada ou concreto, podendo ser inclinados ou retos, respeitando sempre os critérios estruturais de cada tecnologia adotada. Esta solução tem um efeito de redução da largura do escoamento fluvial, gerando um confinamento deste e aumentando o nível d'água para a mesma vazão, promovendo o aumento da velocidade da água, mudando o regime de turbulência e provocando erosões nas suas margens. Além disso, é muito comum que após a utilização dos diques a situação problemática seja transferida para outras seções a jusante. Conforme apontado por Tucci & Bertoni (2003), a adoção dessa tecnologia requer extrema cautela, uma vez que sua implementação está associada a riscos significativos. O aspecto crítico reside na definição da vazão de pico, pois o rompimento do dique pode desencadear graves consequências para a população ribeirinha, resultando

em danos sérios, perda de vidas e prejuízos econômicos consideráveis. Para a utilização adequada dessa tecnologia, é essencial priorizar a construção de diques em áreas rurais, reduzindo o risco de colapsos em regiões urbanas. Contudo, caso a solução adotada para mitigação dos impactos seja aplicada em áreas urbanas, é imprescindível o complemento dos sistemas de alerta para previsão de chuvas intensas. Ademais, é necessário instalar estações elevatórias de bombeamento nas áreas adjacentes e drenos com comportas para evitar a infiltração de água em suas proximidades.

As modificações dos cursos d'água, quinta e última medida estrutural a ser discutida, se desdobram em mudanças na morfologia que os caracteriza. Essas mudanças têm como princípio básico o aumento da capacidade de vazão, mantendo o mesmo nível da água, ou o rebaixando. O nível pode ser mantido aumentando a seção transversal do curso de água, reduzindo a rugosidade do seu leito, removendo obstruções por intermédio da dragagem e aumentando a declividade pela retificação dos meandros. A outra opção é simplesmente aprofundar o nível. É importante destacar que esta técnica tem como desvantagens um alto custo de implantação e manutenção, e acaba transferindo a problemática para jusante. Nesse sentido, todas as medidas estruturais destacadas apresentam suas vantagens e desvantagens, e devem ser implementadas de forma conjunta, garantindo que o projeto como um todo, no contexto da bacia hidrográfica, se adeque ao bom gerenciamento das paisagens fluviais.

As medidas não estruturais — em conjunto com as estruturais ou não — podem minimizar significativamente os prejuízos com um custo menor, independentemente da associação definida pelos estudos com o refinamento da base de dados. Tais ações têm foco no médio e no longo prazo. As medidas não estruturais propostas por Tucci & Bertoni (2003) são: (i) ações de planejamento à emergência, (ii) mapa de alerta, (iii) zoneamento de áreas de inundação, (iv) medidas de controle do escoamento e (v) medidas de controle distribuído.

O planejamento para situações de emergência envolve uma série de rotinas junto à prefeitura e à defesa civil, como palestras, treinamentos e procedimentos de evacuação, em um ambiente de aprendizado e acolhimento para que as populações impactadas aprendam a conviver com a inundação em diferentes partes da cidade, observando os lugares emergenciais identificados nos estudos hidrológicos e morfológicos.

A elaboração de mapeamentos de alerta demanda um detalhamento planialtimétrico minucioso em cada área identificada como de alta susceptibilidade. É essencial realizar um levantamento cadastral completo do arruamento local e, em seguida, confrontar essas informações com as redes de drenagens já existentes. O mapeamento resultante deve apresentar de maneira precisa as bacias de drenagem e suas características, além de estabelecer a base de cotas em cada trecho considerado de alta susceptibilidade. Dessa forma a administração pública cria um sistema com referência em nível (régua) que aponta o aumento do nível da água, antes que ele comece a invadir as residências, e assim o plano de ação à emergência entra em vigor.

O zoneamento de áreas de inundação tem um papel relevante na implantação de novas edificações ou loteamentos. A regulamentação do uso da terra deve ser realizada de forma a definir a ocupação autorizada para cada localidade. No caso, é preciso que essas informações constem no plano diretor, ou no código de obras, visando esclarecer os usos e ocupações em cada trecho da municipalidade. No desenvolvimento desses zoneamentos, é essencial delimitar diferentes áreas em uma escala de susceptibilidade nas várzeas dos cursos d'água, a fim de permitir ou proibir a habitação. Caso a habitação seja permitida, é imprescindível incluir projetos que garantam a segurança das residências. No entanto, se a habitação não for viável, essas áreas ainda podem ser utilizadas para fins recreativos, desde que o investimento não seja comprometido pela provável inundação. Por exemplo, é possível criar parques municipais, campos de esportes e outras atividades similares.

As medidas de controle do escoamento visam garantir o correto funcionamento da macrodrenagem, atuando sobre o hidrograma resultante. Para tanto, é fundamental estabelecer um plano de manutenção para as redes de drenagem cadastradas no mapeamento de alerta. Além disso, é de suma importância manter um monitoramento contínuo dos córregos e afluentes dos rios principais. Essa vigilância permite detectar com antecedência o aumento do nível de água nesses canais, assim como possíveis falhas ou obstruções na drenagem, que na maioria dos casos é feita por encanamentos ou manilhas. Outra medida de controle interessante refere-se ao uso de áreas já construídas em ambiente urbano, para aumentar a infiltração e a percolação da água, que normalmente se dá pela criação de espaços urbanísticos, com a função de promover a infiltração da água no solo, utilizando o armazenamento de parte do escoamento superficial para retardar este em sua vazão de pico. O efeito deste tipo de solução, se associada a alguma

alternativa estrutural, como reservatórios de retenção, diques e estações elevatórias de bombeamento, transfere o problema para outras áreas, o que pode ser interessante desde que essa problemática seja deslocada para uma área desocupada.

As medidas de controle distribuído englobam diversos dispositivos que têm como finalidade a melhoria do sistema de drenagem como um todo. Os dispositivos hidráulicos permeáveis são uma solução bem frisada por Tucci & Bertoni (2003), que caracterizam estes dispositivos de maneira a utilizá-los na entrada dos sistemas de drenagem já existentes, a exemplo do emprego de grades (filtros) na parte superior das bocas de lobo para evitar entupimento na rede de drenagem. Outro dispositivo interessante é a criação de trincheiras ou valas permeáveis, adicionando cascalho e condutos porosos ou permeáveis que direcionam essas águas para a infiltração no solo, diminuindo a sobrecarga do sistema de drenagem. Uma outra alternativa digna de consideração é a utilização de pavimentos permeáveis, que podem ser colocados em passeios, estacionamentos, quadras esportivas e ruas com pouco tráfego de automóveis. Por fim, um último dispositivo que pode ser implantado com subsídio aos moradores, seja este de cunho legislativo ou fiscal, é o armazenamento das águas de chuvas e seu reúso nas propriedades de cada morador, retendo as águas em seus lotes e diminuindo a contribuição do escoamento superficial para os pontos problemáticos.

Conclui-se, portanto, que a adoção das medidas supracitadas, pautadas no caráter sustentável e na integração adequada, possui um potencial significativo de aprimorar o sistema de drenagem. Ao aumentar a capacidade de lidar com inundações, essas ações promovem um impacto positivo na gestão das águas pluviais. A abordagem colaborativa, com o engajamento tanto da comunidade quanto do poder público, desempenha um papel fundamental nesse processo, proporcionando um ambiente mais resiliente e harmonioso.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA, *Informações hidrográficas*. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>> Acessado em: 05/10/2021.

ARAÚJO, B. A. M. et al. *Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias urbanas*. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1-18, 2011.

BELTRAME, A. V. *Diagnostico do meio físico de bacias hidrográficas: modelo e aplicação*. Florianópolis: UFSC, 1994.

BERGES, B. *Geomorfologia Urbana Histórica aplicada à análise das inundações na bacia hidrográfica do Córrego da Mooca-São Paulo/SP*. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BRANDÃO, V. S.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. *Escoamento Superficial*. 2ª edição. Editora UFV. Viçosa, MG. p.87. 2004.

BRASIL. (08 DE JANEIRO DE 1997). LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. *Política Nacional de Recursos Hídricos*.

CHRISTOFOLETTI, A. et al. *Geomorfologia fluvial*. Instituto de Geociência e Ciências Exatas da UNESP, Campus de Rio Claro, São Paulo. V.1. Editora Edgard Blucher LTDA. Reimpressão - 1988.

CLARO, M. S. *Unidades Morfológicas Complexas na bacia hidrográfica do Córrego da Tapera, São Paulo, SP: contribuições ao planejamento urbano e ambiental*. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

COUTINHO FILHO, O. S. *Análise do índice ponderado de áreas verdes baseado no Lidar (ALS) como parâmetro da qualidade ambiental urbana*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. p. 135, 2015.

DA SILVA, F. S., DE OLIVEIRA, F. S., SOUZA FILHO, C. R. *Distribuição e contexto geológico-geomorfológico da bauxita na região de Espera Feliz, sul da serra do Caparaó, Minas Gerais/Espírito Santo*. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 20, n. 3, 2019.

DA COSTA, M. D. A., FIDALGO, ECC, SCHULER, A. E. *Procedimentos para elaboração de mapas de declividade e comprimento de rampa para os estados da região Sul do Brasil*. 2011.

DE OLIVEIRA FERREIRA, L., GONÇALVES, W. H., ARAÚJO, W. R. M. *Análise do cultivo de café em Espera Feliz (MG) em meados do século XX*. REVES-Revista Relações Sociais, v. 3, n. 1, p. 0106-0120, 2020.

FERRAZ, C. M. L. et al. *Uso de geotecnologias para mapeamento da suscetibilidade a inundações e escorregamentos em Teófilo Otoni, Minas Gerais: potencialidades e limitações*. Revista Vozes dos Vales, v. 1, p. 1-31, 2018.

FERREIRA, J. P. (org.). *Enciclopédia dos municípios brasileiros*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1959. 482 p. v. 25: Minas Gerais: D-L. R-enc/FERe/1959/v.25

FREITAS, A. J., SILVA, D., PRUSKI, F. A., PEREIRA, S. B., GOMES FILHO, R. R., TEIXEIRA, A. *Equação de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte; Companhia de Saneamento de Minas Gerais; Viçosa; Universidade Federal de Viçosa. p. 65, 2001.

G1 Zona da Mata – *notícia local* (2017) <<https://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/mp-fixa-prazo-para-implantacao-de-esgoto-sanitario-em-espera-feliz-e-caiana-mg.ghtml>> Acessado em 19/07/2022.

HORN, A. H., SOARES, A. C. P. *Geologia da folha Espera Feliz SF. 24-VA-IV*. 2007.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2017. <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/espera-feliz/historico>> acessado em 30/06/2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf>> acessado em 30/06/2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2010. <<https://censo2010.ibge.gov.br/>> acessado em 30/06/2021.

Informações Compiladas sobre o Saneamento e Saúde InfoSabras (2021) - <<https://infosabras.org.br/municipio/espera-feliz-mg/#>> Acessado em 19/07/2021.

JANKOWSKI, P.; NYERGES, T. *GIS for group decision making*. New York: Taylor & Francis, 2003.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA, 2006). *ALOS Data Users Handbook* - <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf>. Acesso em 26/09/2022.

GARCIA LEITE JÚNIOR, E. *Parque nacional do Caparaó: Breve análise do marketing turístico*. Repositório de Trabalhos de Conclusão de Curso, 2018.

KOKUBUN, F. *Complexidade versus simplicidade na física*. Revista eletrônica Mestrado em Educação Ambiental, p. 110, 2004.

LEFEBVRE, Henri. *A produção do espaço*. Trad. Doralice Barros Pereira e Sérgio Martins (do original: *La production de l'espace*. 4e éd. Paris: Éditions Anthropos, 2000). Primeira versão: início - fev.2006.

LEMOS, R. C., SANTOS, R. D. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Campinas: SBCS, 1982.

LICCO, E. A., MAC DOWELL, S. F. *Alagamentos, Enchentes Enxurradas e Inundações: Digressões sobre seus impactos sócio econômicos e governança*. Revista de Iniciação Científica, Tecnológica e Artística, v. 5, n. 03, 2015.

MACHADO, P.J.O., TORRES, F. T. P. *Introdução à hidrogeografia*. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

MACHADO, R. A. S. et al. *Análise morfométrica de bacias hidrográficas como suporte a definição e elaboração de indicadores para a gestão ambiental a partir do uso de geotecnologias*. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba, v. 5, p. 1441-1448, 2011.

MAGALHÃES, I. L. et al. *Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: uma análise comparativa entre dois métodos*. Cadernos de Geociências, v. 8, n. 2, p. 63-70, 2011.

MAPBIOMAS – *Coleções 8 de mapas do lansat*. 2021. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>> Acessado em: 15/09/2023.

- MARCIANO, A. G., BARBOSA, A. A., SILVA, A. P. M. *Estudo de cenários na simulação de eventos de cheia no Rio Piranguçu e sua influência no distrito industrial de Itajubá-MG*. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 7, n. 1, 2018.
- MATOSO, R. O. C., SOUZA, L. V., & ROCHA, C. H. B. (2021). *Quantification of green areas: A methodology for monitoring and environmental management*. Revista Nacional De Gerenciamento De Cidades, 9(74).
- MCHARG, I. *Design with Nature*. Nova Iorque: Natural History Press, 1969.
- MOURA, A. C.M. *Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritérios*. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 13, p. 2899-2906, 2007.
- MULLER, V. C. *A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristic in the Clinch Mountain Area*. New York: Virginia and Tennessee Dept. of Geology, 1953.
- MURARA, P. G. *Técnicas de interpolação para a pesquisa em climatologia regional e agroclimatologia*. Revista Brasileira de Climatologia, 2019.
- NUNES, F. G., FIORI, A. P.A. *Utilização do Método de Ven Te Chow Soil Conservation Service (SCS) na estimativa da vazão máxima da bacia hidrográfica do Rio Atuba*. Revista Geografar, v. 2, n. 2, 2007.
- PAIXÃO, M. A., KOBAYAMA, M., CAMPAGNOLO, K. *Importância da geomorfologia fluvial no contexto do saneamento ambiental*. Revista Afluente. Porto Alegre: ABES-RS. Vol. 1, n. 2 (dez. 2017), p. 6-11, 2018.
- PLANO DE DRENAGEM DE JUIZ DE FORA, Parte 1-Zona Norte. Volume 3 – *Manual de Drenagem*, p. 221, 2011.
- PORTAL DO SANEAMENTO - *Imagem ilustração alagamento urbano*. <<https://saneamentobasico.com.br/outros/meio-ambiente/falta-planejamento-urbano-causa-alagamentos-foz/>> acessado em 10/09/2021.
- RATCLIFFE, D. A. *Criteria for the selection of nature reserves*. Advancement of Sciences, 27. pp. 294-296, 1971.
- RATCLIFFE, D. A. *A Nature Conservation Review*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1977.

- ROCHA, C. H. B.; *Geomática na prática*. 1. ed. Curitiba: Editora CRV, 2019. v. 1000. 290p.
- ROCHA, C. H. B. & DIAS, J. S. (Org.) *QGIS para monitoramento ambiental*. Juiz de Fora: Editora da UFJF, 2023, no prelo.
- RODRIGUES, C. *Morfologia original e morfologia antropogênica na definição de unidades espaciais de planejamento urbano: exemplo na metrópole paulista*. Revista do Departamento de Geografia, v. 17, p. 101-111, 2005.
- SAATY, T. L. *A scaling method for priorities in hierarchical structures*. *Journal of mathematical psychology*, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977.
- SAATY, T. L. *How to make a decision: the analytic hierarchy process*. *European journal of operational research*, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.
- SAGA – UFRJ – *Sistema de Análise Geo-Ambiental, Sistema de Apoio à Decisão* – versão 31.07.2000 (beta) © Lageop – Xavier-da-Silva.
- SALES, L. O., FERREIRA, M. M., OLIVEIRA, M. D., CURI, N. *Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 34, n. 11, p. 2091-2095, 1999.
- SANTOS, A. R., LOUZADA, F. L. R. O., EUGENIO, F. C. (Coord.). *ArcGIS 9.3 total: aplicações para dados especiais*. Alegre, ES: Ciências Agrárias. Universidade Federal do Espírito Santo/CAUFES, 180 p., 2010.
- SANTOS, M. *O retorno do território*. Território: globalização e fragmentação, 2002.
- SANTOS, D., VELLOSO, S., GERALDO, A. F. F.J. *Determinação da Taxa de Infiltração de Água no Solo e Lâmina Infiltrada em Latossolo Vermelho-Amarelo*. Enciclopédia Biosfera. p. 957-966, 2015.
- SHERMAN, L.K. *Streamflow from rainfall by unit-graph method*. *Engineering News-Record*, v. 108, p. 501-505, 1932.
- SILVA, D. D., DENÍCULI, W., TEIXEIRA, A. F., PRUSKI, F. F., CECÍLIO, R. A. *CANAL: sistema para dimensionamento de canais*. 1ed. VIÇOSA: Editora UFV, 2006, v. 1, p. 27-60.

SILVA, J. P. *Expansão urbana e evolução geomorfológica em remansos de reservatórios: Análise comparativa de duas bacias hidrográficas em Guarapiranga, São Paulo*. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SILVA, M. K. A., ROSA, R. *Metodologia para simulação de vazão em bacias hidrográficas: o caso da sub-bacia hidrográfica Fazenda Letreiro – MG*. Caderno Geografia, v.27, n.48, p. 44-72, 2017.

SIQUEIRA, R. M. B., HENRY-SILVA, G. G. *A bacia hidrográfica como unidade de estudo e o funcionamento dos ecossistemas fluviais*. Boletim da Associação Brasileira de Limnologia, v. 39, n. 2, p. 1-15, 2011.

Sistema Nacional de Informação sobre o Saneamento SNIS (2021) - <http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua_esgoto/mapa-agua> Acessado em 19/07/2021.

SMITH, P. G. R. E THEBERGE, J. B. *A review of criteria for evaluating natural areas*. Environment Management 10. 1986.

Soil Conservation Service (SCS) – *Urban hydrology for small watersheds*. 1nd edition. Washington: U.S. Dept. Agr. (TR, 55), 1975.

Soil Conservation Service (SCS) – *Urban hydrology for small watersheds*. 2nd edition. Washington: U.S. Dept. Agr. (Technical Release, 55), 1986. <<https://tamug-ir.tdl.org/handle/1969.3/24438>> Acessado em 26/08/2022.

STRAHLER, ARTHUR N.; *Geografia Física*. Universidade de Columbia. Editora Omega, Barcelona 1982.

TOMAZ, P. *Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais: Piscinões, galerias, bueiros, canais, método SCS, Denver, Santa Bárbara, Racional, TR-55*. Editora Navegar. São Paulo, SP, p. 452.2002.

TRICART, J. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

TUCCI, E. M. C., SILVEIRA, A. L. L. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Ed. Universidade UFRGS; Coleção ABRH, Porto Alegre, RS, p. 145. 2001.

TUCCI, E. M. C., BERTONI, C. J. *Inundações urbanas na América do Sul*. Ed. dos Autores, 2003.

TUNDISI, J. G., MATSUMURA, T. T., PARESCHI, D. C., LUZIA, A. P.; VON HAELING, P. H., FROLLINI, E. H. *A bacia hidrográfica do Tietê/Jacaré: estudo de caso em pesquisa e gerenciamento*. Estudos avançados, v. 22, n. 63, p. 159-172, 2008.

VALENTE, O. F. *Reflexões hidrológicas sobre inundações e alagamentos urbanos*. Cidades do Brasil, p. 270, 2009.

VENEZIANI, Y. *Inundações em sistemas fluviais meândricos: geomorfologia e hidrologia de paleoinundações aplicadas à identificação de eventos holocênicos extremos no baixo Rio Ribeira de Iguape*. Tese de doutorado em Geografia Física - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, Brasil, 2019.

9 APÊNDICE PÓS-TEXTUAL

1 CÁLCULO DOS HIDROGRAMAS

1) Assim foi feito o cálculo dos hidrogramas:

- A Coluna 1 informa o número de intervalos adotados (foi adotado $N=10$);
- A Coluna 2 informa o intervalo de tempo adotado utilizando a equação $\Delta t=Tc/5$ (em minutos);

• A Coluna 3 traz a precipitação acumulada obtida a partir da curva IDF para Espera Feliz, em milímetros, conforme esta equação:

$$P_{acum} = IDF \times \frac{\Delta t}{60};$$

• A Coluna 4 traz a precipitação desagregada, em milímetros, resultante desta equação:

$$P_{des} = P_{acum}(N \text{ int}) - P_{acum}(N \text{ int} - 1);$$

• A Coluna 5 informa a precipitação reordenada, em milímetros, segundo a distribuição temporal proposta no Plano de Drenagem de Juiz de Fora (2011), recebendo o nome de P projeto;

• A Coluna 6 é o somatório das precipitações reordenadas, em milímetros, conforme esta equação:

$$P_{projetoaum} = P_{proj}(N \text{ int} - 1) - P_{proj}(N \text{ int});$$

• A Coluna 7 informa a precipitação efetiva, em milímetros, obtida seguindo a equação (4):

$$P_{ef} = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S};$$

• A Coluna 8 traz a precipitação não acumulada e reordenada, em milímetros;

Quadro 16 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 1 – 1991

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1	3,83	8,06	8,06	1,72	1,72	0,00	0,00
2	7,66	13,84	5,78	2,19	3,91	0,00	0,00
3	11,50	18,27	4,43	2,96	6,87	0,00	0,00
4	15,33	21,84	3,56	4,43	11,30	0,00	0,00
5	19,16	24,79	2,96	8,06	19,36	0,44	0,44
6	22,99	27,31	2,52	5,78	25,14	1,66	1,22
7	26,83	29,50	2,19	3,56	28,70	2,73	1,07
8	30,66	31,42	1,93	2,52	31,22	3,61	0,88
9	34,49	33,15	1,72	1,93	33,15	4,35	0,74
10	38,32	34,70	1,55	1,55	34,70	4,98	0,63

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 17 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 1 – 2021

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1	3,83	8,06	8,06	1,72	1,72	0,00	0,00
2	7,66	13,84	5,78	2,19	3,91	0,00	0,00
3	11,50	18,27	4,43	2,96	6,87	0,00	0,00
4	15,33	21,84	3,56	4,43	11,30	0,00	0,00
5	19,16	24,79	2,96	8,06	19,36	0,47	0,47
6	22,99	27,31	2,52	5,78	25,14	1,72	1,25
7	26,83	29,50	2,19	3,56	28,70	2,81	1,09
8	30,66	31,42	1,93	2,52	31,22	3,70	0,89
9	34,49	33,15	1,72	1,93	33,15	4,45	0,75
10	38,32	34,70	1,55	1,55	34,70	5,09	0,64

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 18 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 2 – 1991

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1	2,35	5,29	5,29	1,61	1,61	0,00	0,00
2	4,70	9,52	4,23	1,98	3,60	0,00	0,00
3	7,05	13,02	3,50	2,55	6,15	0,00	0,00
4	9,40	15,98	2,96	3,50	9,65	0,00	0,00
5	11,75	18,53	2,55	5,29	14,93	0,18	0,18
6	14,10	20,77	2,24	4,23	19,17	0,87	0,69
7	16,45	22,75	1,98	2,96	22,13	1,62	0,74
8	18,80	24,53	1,78	2,24	24,36	2,30	0,69
9	21,15	26,14	1,61	1,78	26,14	2,92	0,61
10	23,50	27,61	1,47	1,47	27,61	3,47	0,55

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 19 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 2 – 2021

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1	2,35	5,29	5,29	1,61	1,61	0,00	0,00
2	4,70	9,52	4,23	1,98	3,60	0,00	0,00
3	7,05	13,02	3,50	2,55	6,15	0,00	0,00
4	9,40	15,98	2,96	3,50	9,65	0,00	0,00
5	11,75	18,53	2,55	5,29	14,93	0,13	0,13
6	14,10	20,77	2,24	4,23	19,17	0,76	0,62
7	16,45	22,75	1,98	2,96	22,13	1,45	0,69
8	18,80	24,53	1,78	2,24	24,36	2,10	0,65
9	21,15	26,14	1,61	1,78	26,14	2,69	0,58
10	23,50	27,61	1,47	1,47	27,61	3,21	0,52

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 20 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 3 – 1991

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1	3,01	6,57	6,57	1,68	1,68	0,00	0,00
2	6,02	11,57	5,00	2,10	3,78	0,00	0,00
3	9,03	15,55	3,98	2,78	6,55	0,00	0,00
4	12,04	18,83	3,28	3,98	10,53	0,00	0,00
5	15,06	21,60	2,78	6,57	17,10	0,33	0,33
6	18,07	24,00	2,39	5,00	22,10	1,31	0,98
7	21,08	26,10	2,10	3,28	25,38	2,24	0,93
8	24,09	27,97	1,87	2,39	27,78	3,05	0,81
9	27,10	29,64	1,68	1,87	29,64	3,74	0,70
10	30,11	31,16	1,52	1,52	31,16	4,35	0,61

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 21 - Cálculos da precipitação efetiva para a seção 3 – 2021

Para o solo do tipo C escolhido para a área							
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8
Nint	$\Delta t(\text{min})$	Pac.IDF(mm)	Pdesag	Pprojeto	Pprojetoacum	Pef	Pef'
1,00	3,01	6,57	6,57	1,68	1,68	0,00	0,00
2,00	6,02	11,57	5,00	2,10	3,78	0,00	0,00
3,00	9,03	15,55	3,98	2,78	6,55	0,00	0,00
4,00	12,04	18,83	3,28	3,98	10,53	0,00	0,00
5,00	15,06	21,60	2,78	6,57	17,10	0,25	0,25
6,00	18,07	24,00	2,39	5,00	22,10	1,14	0,88
7,00	21,08	26,10	2,10	3,28	25,38	2,01	0,87
8,00	24,09	27,97	1,87	2,39	27,78	2,77	0,76
9,00	27,10	29,64	1,68	1,87	29,64	3,43	0,66
10,00	30,11	31,16	1,52	1,52	31,16	4,00	0,58

Fonte: desenvolvido pelo autor.

2) Para gerar os Quadros 38, 39, 40, 41, 42 e 43 de convolução apresentados neste apêndice, aplicaram-se os seguintes cálculos:

- A Coluna 1 refere-se ao número de ordenadas;
- A Coluna 2 informa o intervalo de tempo em minutos Δt ;
- A Coluna 3 traz o intervalo de tempo em horas Δt ;
- A Coluna 4 traz os valores das ordenadas do hidrograma unitário triangular (HU), obtidas desta forma:

Se $\Delta t < T_p$:

$$HU = \frac{Q_p}{T_p} \times \Delta t ;$$

Se $\Delta t > T_p$:

$$HU = \frac{Q_p(T_b - \Delta t)}{T_b - T_p} ;$$

- A Coluna 5 informa a precipitação efetiva (P_{ef}), definida no item 1 deste apêndice, na descrição da Coluna 7 do roteiro de cálculo anterior;
- Na Coluna 6, para o primeiro intervalo de tempo aplica-se a multiplicação descrita abaixo:

$$P_{ef}(1) \times HU(1) ;$$

- Nas Colunas 7 a 15, o mesmo padrão de cálculo foi usado, conforme o procedimento de cálculo da Coluna 6;
- Na Coluna 16 é lançado o somatório das vazões calculadas em cada linha da planilha;

Quadro 38 - Convolução da vazão de drenagem do Rio São João seção 1 – 1991

Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col 13	Col 14	Col 15	Col 16	
Ordem	T (min)	T(h)	HUSCS	Pef' (mm)	Q1=P1*hu	Q2=P2*hu	Q3=P3*hu	Q4=P4*hu	Q5=P5*hu	Q6=P6*hu	Q7=P7*hu	Q8=P8*hu	Q9=P9*hu	Q10=P10*hu	Q11=P11*hu	
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00										0,00	
2,00	3,83	0,06	16,43	0,00	0,00	0,00									0,00	
3,00	7,66	0,13	32,87	0,00	0,00	0,00	0,00								0,00	
4,00	11,50	0,19	49,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							0,00	
5,00	15,33	0,26	46,76	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						0,00	
6,00	19,16	0,32	35,96	1,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,31	0,00				7,31	
7,00	22,99	0,38	25,16	1,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,62	20,03	0,00			34,65	
8,00	26,83	0,45	14,35	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,92	40,07	17,53	0,00		79,52	
9,00	30,66	0,51	3,55	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,79	60,10	35,06	14,45	0,00	130,40	
10,00	34,49	0,57	0,00	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,99	57,00	52,58	28,90	12,11	0,00	166,58
11,00	38,32	0,64				0,00	0,00	0,00	0,00	11,19	43,83	49,88	43,34	24,22	10,38	182,84
12,00	42,16	0,70					0,00	0,00	0,00	6,38	30,67	38,35	41,11	36,33	20,76	173,60
13,00	45,99	0,77						0,00		1,58	17,50	26,83	31,61	34,46	31,15	143,12
14,00	49,82	0,83								0,00	4,33	15,31	22,12	26,50	29,54	97,79
15,00	53,65	0,89									0,00	3,79	12,62	18,54	22,72	57,66
16,00	57,49	0,96										0,00	3,12	10,58	15,89	29,59
17,00	61,32	1,02											0,00	2,62	9,07	11,69
18,00	65,15	1,09												0,00	2,24	2,24
19,00	68,98	1,15												0,00	0,00	0,00

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 39 - Convolução da vazão de drenagem do Rio São João seção 1 – 2021

Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col 13	Col 14	Col 15	Col 16
Ordem	T (min)	T(h)	HU SCS	Pef' (mm)	Q1=P1*hu	Q2=P2*hu	Q3=P3*hu	Q4=P4*hu	Q5=P5*hu	Q6=P6*hu	Q7=P7*hu	Q8=P8*hu	Q9=P9*hu	Q10=P10*hu	Q11*P11*hu
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00										0,00
2,00	3,83	0,06	16,43	0,00	0,00	0,00									0,00
3,00	7,66	0,13	32,87	0,00	0,00	0,00	0,00								0,00
4,00	11,50	0,19	49,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							0,00
5,00	15,33	0,26	46,76	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						0,00
6,00	19,16	0,32	35,96	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	7,79	0,00					7,79
7,00	22,99	0,38	25,16	1,09	0,00	0,00	0,00	0,00	15,58	20,54	0,00				36,12
8,00	26,83	0,45	14,35	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	23,37	41,09	17,85	0,00			82,30
9,00	30,66	0,51	3,55	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	22,16	61,63	35,70	14,67	0,00		134,17
10,00	34,49	0,57	0,00	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	17,04	58,46	53,54	29,35	12,28	0,00	170,67
11,00	38,32	0,64				0,00	0,00	0,00	11,92	44,95	50,79	44,02	24,56	10,52	186,76
12,00	42,16	0,70					0,00	0,00	6,80	31,45	39,05	41,75	36,84	21,04	176,94
13,00	45,99	0,77						0,00	1,68	17,94	27,32	32,11	34,94	31,56	145,56
14,00	49,82	0,83							0,00	4,44	15,59	22,46	26,87	29,93	99,29
15,00	53,65	0,89								0,00	3,86	12,82	18,80	23,02	58,49
16,00	57,49	0,96									0,00	3,17	10,73	16,10	30,00
17,00	61,32	1,02										0,00	2,65	9,19	11,84
18,00	65,15	1,09											0,00	2,27	2,27
19,00	68,98	1,15												0,00	0,00

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 40 - Convolução da vazão de drenagem do Rio São João seção 2 – 1991

Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col 13	Col 14	Col 15	Col 16	
Ordem	T (min)	T(h)	HU SCS	Pef' (mm)	Q1=P1*hu	Q2=P2*hu	Q3=P3*hu	Q4=P4*hu	Q5=P5*hu	Q6=P6*hu	Q7=P7*hu	Q8=P8*hu	Q9=P9*hu	Q10=P10*hu	Q11*P11*hu	
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00									0,00	
2,00	2,35	0,04	10,60	0,00	0,00	0,00									0,00	
3,00	4,70	0,08	21,20	0,00	0,00	0,00	0,00								0,00	
4,00	7,05	0,12	36,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							0,00	
5,00	9,40	0,16	29,96	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						0,00	
6,00	11,75	0,20	22,95	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,92	0,00				1,92	
7,00	14,10	0,23	15,94	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,85	7,34	0,00			11,19	
8,00	16,45	0,27	8,93	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,71	14,68	7,88	0,00		29,27	
9,00	18,80	0,31	1,92	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,44	25,60	15,77	7,26	0,00	54,07	
10,00	21,15	0,35	0,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,17	20,75	27,50	14,52	6,51	0,00	73,44
11,00	23,50	0,39				0,00	0,00	0,00	0,00	2,89	15,89	22,29	25,33	13,01	5,82	85,23
12,00	25,85	0,43					0,00	0,00	0,00	1,62	11,04	17,07	20,53	22,69	11,64	84,59
13,00	28,20	0,47						0,00	0,00	0,35	6,18	11,86	15,72	18,39	20,30	72,80
14,00	30,55	0,51							0,00		1,33	6,64	10,92	14,09	16,45	49,43
15,00	32,90	0,55									0,00	1,42	6,12	9,78	12,60	29,93
16,00	35,25	0,59										0,00	1,31	5,48	8,75	15,54
17,00	37,60	0,63											0,00	1,18	4,90	6,08
18,00	39,95	0,67												0,00	1,05	1,05
19,00	42,30	0,70													0,00	0,00

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 41 - Convolução da vazão de drenagem do Rio São João seção 2 – 2021

Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col 13	Col 14	Col 15	Col 16
Ordem	T (min)	T(h)	HU SCS	Pef' (mm)	Q1=P1*hu	Q2=P2*hu	Q3=P3*hu	Q4=P4*hu	Q5=P5*hu	Q6=P6*hu	Q7=P7*hu	Q8=P8*hu	Q9=P9*hu	Q10=P10*hu	Q11*P11*hu
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00									0,00
2,00	2,35	0,04	10,60	0,00	0,00	0,00									0,00
3,00	4,70	0,08	21,20	0,00	0,00	0,00	0,00								0,00
4,00	7,05	0,12	36,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							0,00
5,00	9,40	0,16	29,96	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						0,00
6,00	11,75	0,20	22,95	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	1,42	0,00					1,42
7,00	14,10	0,23	15,94	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	2,85	6,62	0,00				9,47
8,00	16,45	0,27	8,93	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	4,97	13,23	7,36	0,00			25,56
9,00	18,80	0,31	1,92	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	4,03	23,08	14,73	6,87	0,00		48,70
10,00	21,15	0,35	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00	3,08	18,70	25,69	13,73	6,19	0,00	67,40
11,00	23,50	0,39				0,00	0,00	0,00	2,14	14,33	20,81	23,95	12,38	5,56	79,18
12,00	25,85	0,43					0,00	0,00	1,20	9,95	15,94	19,41	21,60	11,12	79,22
13,00	28,20	0,47						0,00	0,26	5,57	11,07	14,87	17,50	19,40	68,67
14,00	30,55	0,51							0,00	1,20	6,20	10,33	13,41	15,72	46,85
15,00	32,90	0,55								0,00	1,33	5,78	9,31	12,04	28,47
16,00	35,25	0,59									0,00	1,24	5,21	8,36	14,82
17,00	37,60	0,63										0,00	1,12	4,68	5,80
18,00	39,95	0,67											0,00	1,01	1,01
19,00	42,30	0,70												0,00	0,00

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 42 - Convolução da vazão de drenagem do Rio Caparaó seção 3 – 1991

Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col 13	Col 14	Col 15	Col 16	
Ordem	T (min)	T(h)	HUSCS	Pef' (mm)	Q1=P1*hu	Q2=P2*hu	Q3=P3*hu	Q4=P4*hu	Q5=P5*hu	Q6=P6*hu	Q7=P7*hu	Q8=P8*hu	Q9=P9*hu	Q10=P10*hu	Q11=P11*hu	
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00									0,00	
2,00	3,01	0,05	19,76	0,00	0,00	0,00									0,00	
3,00	6,02	0,10	39,52	0,00	0,00	0,00	0,00								0,00	
4,00	9,03	0,15	59,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							0,00	
5,00	12,04	0,20	56,34	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						0,00	
6,00	15,06	0,25	43,33	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,52	0,00				6,52	
7,00	18,07	0,30	30,31	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,03	19,33	0,00			32,36	
8,00	21,08	0,35	17,30	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,55	38,66	18,45	0,00		76,66	
9,00	24,09	0,40	4,28	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,58	57,99	36,89	15,95	0,00	129,41	
10,00	27,10	0,45	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,29	55,12	55,34	31,89	13,74	0,00	170,39
11,00	30,11	0,50					0,00	0,00	0,00	10,00	42,39	52,60	47,84	27,49	11,99	192,30
12,00	33,12	0,55					0,00	0,00	0,00	5,70	29,65	40,45	45,47	41,23	23,97	186,48
13,00	36,13	0,60						0,00	0,00	1,41	16,92	28,30	34,97	39,19	35,96	156,75
14,00	39,15	0,65								0,00	4,19	16,15	24,46	30,13	34,18	109,11
15,00	42,16	0,70									0,00	4,00	13,96	21,08	26,28	65,32
16,00	45,17	0,75										0,00	3,45	12,03	18,39	33,87
17,00	48,18	0,80											0,00	2,98	10,49	13,47
18,00	51,19	0,85												0,00	2,60	2,60
19,00	54,20	0,90													0,00	0,00

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Quadro 43 - Convolução da vazão de drenagem do Rio Caparaó seção 3 – 2021

Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col13	Col 14	Col 15	Col 16	
Ordem	T (min)	T(h)	HU SCS	Pef' (mm)	Q1=P1*hu	Q2=P2*hu	Q3=P3*hu	Q4=P4*hu	Q5=P5*hu	Q6=P6*hu	Q7=P7*hu	Q8=P8*hu	Q9=P9*hu	Q10=P10*hu	Q11*P11*hu	
1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00									0,00	
2,00	3,01	0,05	19,76	0,00	0,00	0,00									0,00	
3,00	6,02	0,10	39,52	0,00	0,00	0,00	0,00								0,00	
4,00	9,03	0,15	59,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							0,00	
5,00	12,04	0,20	56,34	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						0,00	
6,00	15,06	0,25	43,33	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,97	0,00				4,97	
7,00	18,07	0,30	30,31	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,95	17,47	0,00			27,42	
8,00	21,08	0,35	17,30	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,92	34,94	17,20	0,00		67,06	
9,00	24,09	0,40	4,28	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,19	52,41	34,40	15,04	0,00	116,03	
10,00	27,10	0,45	0,00	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,91	49,82	51,60	30,07	13,04	0,00	155,43
11,00	30,11	0,50				0,00	0,00	0,00	7,63	38,31	49,04	45,11	26,07	11,41	177,58	
12,00	33,12	0,55					0,00	0,00	4,35	26,80	37,71	42,87	39,11	22,83	173,68	
13,00	36,13	0,60						0,00	1,08	15,29	26,38	32,97	37,17	34,24	147,14	
14,00	39,15	0,65							0,00	3,78	15,05	23,06	28,58	32,55	103,03	
15,00	42,16	0,70								0,00	3,72	13,16	20,00	25,03	61,91	
16,00	45,17	0,75									0,00	3,26	11,41	17,51	32,18	
17,00	48,18	0,80										0,00	2,82	9,99	12,81	
18,00	51,19	0,85											0,00	2,47	2,47	
19,00	54,20	0,90												0,00	0,00	

Fonte: desenvolvido pelo autor.