

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Júlio Ramissés Ladeia Ramos

**LÓGICA *FUZZY* NA IDENTIFICAÇÃO DE LOTES ASSOCIADOS AO RISCO DE
INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA/MG**

Belo Horizonte

2018

Júlio Ramissés Ladeia Ramos

**LÓGICA *FUZZY* NA IDENTIFICAÇÃO DE LOTES ASSOCIADOS AO RISCO DE
INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA/MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Dr. Marcos Antônio Timbó Elmiro

Belo Horizonte
Instituto de Geociências da UFMG

2018

R175I Ramos, Júlio Ramissés Ladeia.
2018 Lógica Fuzzy na identificação de lotes associados ao risco de inundação no município de Nova Lima/ MG [manuscrito] / Júlio Ramissés Ladeia Ramos. – 2018.
113 f., enc.: il. (principalmente color.)
Orientador: Marcos Antônio Timbó Elmiro.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Cartografia, 2018.
Bibliografia: f. 100-107.
Inclui anexos.
1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Sensoriamento remoto – Teses. 3. Geoprocessamento – Teses. 4. Inundações – Minas Gerais – Teses. 5. Sistemas de informação geográfica – Teses. I. Elmiro, Marcos Antônio Timbó. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Cartografia. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)




FOLHA DE APROVAÇÃO

Lógica FUZZY na Identificação de Lotes Associados ao Risco de Inundação no Município de Nova Lima – MG

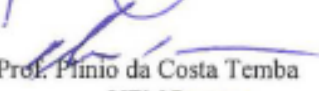
JULIO RAMISSÉS LADEIA RAMOS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Aprovada em 15 de maio de 2018, pela banca constituída pelos membros:


Prof. Marcos Antônio Timbó Elmiro - Orientador
UFMG


Prof. Marcelo Antonio Nero
UFMG


Prof. Pinio da Costa Temba
UFMG


Prof. Gilmar Rosa
Centro Universitário Unihorizontes

Belo Horizonte, 15 de maio de 2018.

Dedicatória

Dedico esta dissertação à família em especial minha mãe e irmã, minha noiva, amigos e colegas que me deram força e foco para realizar tal trabalho.

Agradecimentos

A minha mãe, Délia, que enaltece minha capacidade e prova cada dia com ser amorosa em sua presença proporcionando todo o apoio no meu percurso acadêmico.

A minha irmã, Ramatisa, pelos incentivos constantes e por ser tão atenciosa na forma de auxiliar em momentos chaves para consecução deste trabalho.

A minha noiva e futura esposa, Késia, por me compreender e colaborar nos objetivos pessoais e colaborar na minha formação intelectual e pessoal.

À toda minha família, pela confiança e incentivo.

A Prefeitura Municipal de Nova Lima/MG pelo colaboração com dados espaciais e apoio principalmente pelo Departamento de Geoprocessamento Municipal, em especial meu colega Giovanni Egg.

Aos professores especialistas que colaboraram com os pesos de mapas em suas respostas com a devida propriedade.

Ao Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó Elmiro, orientador deste trabalho, pelo apoio, conhecimento, profissionalismo e paciência.

Aos colegas da minha turma, pelos momentos compartilhados.

Ao amigo, Ricardo Gomes, por idéias e conjecturas em pontos de resiliência existentes.

Ao amigo e companheiro de pós Hugo Henrique Salis, pelos incentivos constantes e dicas sempre valiosas.

Ao programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da UFMG, pela oportunidade de realização deste trabalho.

RESUMO

O Sensoriamento Remoto (SR) é uma das práticas usuais nas ciências da Terra com aplicação em áreas urbanas. Os dados obtidos com tal processo e integrado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG) permite identificar, reduzir e reestruturar diferentes problemáticas no planejamento da cidade. A inundação, por ser um fenômeno natural de transbordamento das águas resultado da concentração de chuva em excesso, danifica os bens materiais, interfere nas vidas humanas e nas bases estruturantes da urbanização. O presente trabalho propõe desenvolver um modelo de análise multicritério de apoio à decisão do tipo *fuzzy* com pesos de evidências aliado à Análise Hierárquica de Processos (AHP) e ferramentas de Sensoriamento Remoto com apoio de geoprocessamento para determinar riscos à inundação no município de Nova Lima/MG, o qual está localizado na região metropolitana de Belo Horizonte. Para a consecução da pesquisa, foram confeccionados os mapas de entrada como modelo digital de elevação, declividade, uso e ocupação do solo, área de preservação permanente hidrográfica, isoietas climáticas, geológico e tipos de solo. Esses mapas de entrada foram submetidos à lógica *fuzzy* por pesos de evidência, possibilitando ponderar regiões aptas e não aptas frente à inundação considerando cada variável, produzindo mapas individuais ponderados de 0 a 1. Aliado a esta técnica utilizou-se o método da Análise Hierárquica de Processos para multiplicação dos mapas submetidos à lógica *fuzzy* por meio de notas de especialistas e pesquisa bibliográfica, um mapa crítico originou-se dessa aplicação com os níveis de susceptibilidade à inundação no município. Um mapa de validação foi previamente construído onde se atingiu correspondência de oitenta e seis por cento (86 %) nas manchas de inundação. Os dados de validação foram gerados a partir do cruzamento das informações processadas sobre inundação da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e de notícias locais. A fim de apontar a vulnerabilidade urbana dos lotes suscetíveis à inundação realizou-se novo cruzamento sendo obtido um mapa categorizado em manchas de risco à inundação para todos os lotes no município de estudo. A análise das manchas de inundação, com base na metodologia *fuzzy* e AHP mostrou-se eficaz, de fácil execução, com implementação simples e baixo custo financeiro. É importante salientar que essa maneira de identificar áreas necessitadas de atenção do poder público, bem como de investimentos em ações de proteção, prevenção e mitigação se mostrou útil para gestão de risco e desastres em casos de inundação.

Palavras-chave: SR, Geoprocessamento, *Fuzzy*, AHP, SIG, Inundações.

ABSTRACT

Remote Sensing (SR) is one of the usual practices in Earth sciences with applications in urban areas. The data obtained with such process, integrated with a Geographic Information System (GIS) allows identifying, reducing and restructuring different problems in city planning. Flooding, as a natural phenomenon of water overflow, resulting from the concentration of excessive rainfall, damages material goods, interferes in human lives and in the structuring bases of urbanization. The present work proposes to develop a multicriteria analysis model to support the fuzzy type decision with evidence weights allied to the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Remote Sensing tools with support of geoprocessing to determine the risks to the flood in the city of Nova Lima / MG, which is located in the metropolitan area of Belo Horizonte. In order to achieve the research, there was a preparation of input maps, like the digital model of elevation, slope, land use and occupation, permanent hydrographic preservation area, climatic isoietas, geological and soil types. These input maps were submitted to the fuzzy logic by weights of evidence, making it possible to ponder suitable and unsuitable regions for flooding, considering each variable and producing individual maps weighted from 0 to 1. Allied to this technique, the method of Analytic Hierarchy Process was used for the multiplication of the maps that were submitted to fuzzy logic by the use of experts notes and literature research. From this application, resulted a critical map with the levels of flood susceptibility in the city. A validation map was previously constructed in which eighty-six percent (86%) of correspondence was reached in the flood spots. The validation data was generated by crossing the information processed about flooding of the Secretariat of State for Environment and Sustainable Development (SEMAD), the Company Mineral Resource Research (CPRM) and local news. In order to point out the urban vulnerability of the lots susceptible to flooding, a new crossing was performed and a map categorizing flood risk spots was obtained for all of the lots in the studied city. Flood-spot analysis based on fuzzy methodology and on AHP proved to be effective, easy to execute, with simple implementation and low financial costs. It is important to point out that this way of identifying areas which need public attention, as well as investments in protection, prevention and mitigation actions, has proved useful for managing risk and disasters in of flood cases.

Keywords: Remote Sensing, Geoprocessing, Fuzzy, AHP, GIS, Flooding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, onde se insere a bacia do Rio das Velhas e o município de Nova Lima/MG.....	22
Figura 2. Fluxograma dos processos decorrentes da urbanização e impactos.....	24
Figura 3. Eventos de Inundação nos países do mundo.	26
Figura 4. Modelo simplificado e esquemático de árvore hierárquica.	31
Figura 5. Comparativo de Lógica Clássica e Lógica Fuzzy.	33
Figura 6. Sistema Lógico <i>Fuzzy</i>	35
Figura 7. Mapa de Localização do Município de Nova Lima/MG em relação a Minas Gerais e o Brasil.....	39
Figura 8. Fluxograma da Metodologia Proposta.	41
Figura 9. Mapa de curvas de nível com equidistância vertical de 5 (cinco) em 5 (cinco) metros	43
Figura 10. Mapa de MDE do município de Nova Lima/MG gerado no ArcMap por meio de curvas de nível com equidistância vertical de 5 (cinco) metros fornecidos pela VALE S/A e adaptado pelo autor.....	45
Figura 11. Mapa de Declividade de Nova Lima/MG baseado no MDE da Figura 10.	47
Figura 12. Ortofoto de 2014 de Nova Lima/MG.....	49
Figura 13. Mapa de uso e cobertura do solo baseado na ortofoto da Figura 12.	50
Figura 14. Mapa de Tipo de Solo. Adaptado do Mapa de Solos de Minas Gerais.....	52
Figura 15. Mapa geológico municipal adaptado do mapa geológico das folhas Belo Horizonte e Itabirito 1:50.000 da UFMG /CODEMIG (2005).....	54
Figura 16. Mapa de Isoietas, das chuvas médias anuais de 1977 a 2006, do Município de Nova Lima/MG.	56
Figura 17. Mapa de APP Drenagem do Município de Nova Lima/MG.....	58
Figura 18. Mapa de lotes cadastrados em um total de 41.521.....	61
Figura 19. Mapa Fuzzy correspondente às classes de altitude em relação ao risco à inundação no município de Nova Lima/MG.....	64
Figura 20. Mapa Fuzzy correspondente às classes de declividade em relação ao risco à inundação no município de Nova Lima/MG.	67
Figura 21. Mapa Fuzzy correspondente às classes uso e cobertura do solo relação ao risco à inundação no município de Nova Lima/MG.	70
Figura 22. Mapa Fuzzy correspondente às classes de tipo de solo em relação ao risco à inundação no município de Nova Lima/MG.	73
Figura 23. Mapa Fuzzy correspondente às classes de geologia em relação ao risco à inundação no município de Nova Lima/MG.....	76
Figura 24. Mapa Fuzzy correspondente à precipitação em relação ao risco de inundação no município de Nova Lima/MG.	79
Figura 25. Mapa Fuzzy correspondente à classe hidrológica em relação ao risco de inundação no município de Nova Lima/MG.....	82
Figura 26. Mapa Fuzzy de risco à inundação no município de Nova Lima/MG.	85
Figura 27. Classes de risco à inundação no Município de Nova Lima/MG.....	87
Figura 28. Classes de risco à inundação em regiões vulneráveis previamente mapeadas, no Município de Nova Lima/MG.	90
Figura 29. Eventos em áreas classificadas com muito alto risco à inundação no Município de Nova Lima/MG.	93
Figura 30. Inundações em regiões classificadas de alto risco à inundação ocorridas no município de Nova Lima/MG.	Erro! Indicador não definido.
Figura 31. Classes de risco à inundações nos lotes cadastrados no município de Nova Lima/MG.	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Distribuição da função Fuzzy Gamma modificado.....	37
Gráfico 2. Dados de precipitação médio mensal e anual para cada uma das estações.....	55
Gráfico 3. Escala de risco de inundação de acordo com o gradiente de altitude presente no município de Nova Lima/MG.	63
Gráfico 4. Escala de risco de inundação de acordo com as classes de declividade presente no município de Nova Lima/MG.	66
Gráfico 5. Escala de risco de inundação de acordo com as classes de uso e cobertura do solo presente no município de Nova Lima/MG.	69
Gráfico 6. Escala de risco de inundação de acordo com as classes de tipos de solos presentes no município de Nova Lima/MG.....	72
Gráfico 7. Escala de risco de inundação de acordo com as classes de geologia presente no município de Nova Lima/MG.	75
Gráfico 8. Escala de risco de inundação de acordo com os intervalos de precipitação (mm) presentes no município de Nova Lima/MG.....	78
Gráfico 9. Escala de risco de inundação de acordo com a proximidade a cada classe hidrológica presentes no município de Nova Lima/MG.	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Definição e explicação dos 9 pesos fundamentais de julgamento comparativo.....	31
Quadro 2. Pesos atribuídos conforme pesquisa bibliográfica para as classes de geologia mapeadas no município de Nova Lima- MG.	74
Quadro 3. Exemplos de pontos de inundações em regiões vulneráveis à inundação no município de Nova Lima/MG.	92

LISTADE TABELAS

Tabela 1. Classes de Declividade do Município de Nova Lima/MG.	46
Tabela 2. Classes de Uso e Cobertura do Solo.	48
Tabela 3. Matriz de comparação pareada entre as variáveis utilizadas no estudo do risco à inundação no Município de Nova Lima/MG.	59
Tabela 4. Pesos atribuídos pelos especialistas para as classes de altitude mapeadas para o município de Nova Lima/MG.	62
Tabela 5. Pesos atribuídos pelos especialistas para as classes de declividade mapeadas no município de Nova Lima/MG.	65
Tabela 6. Pesos atribuídos pelos especialistas para as classes de uso e cobertura do solo mapeadas no município de Nova Lima/MG.	68
Tabela 7. Pesos atribuídos pelos especialistas para as classes de tipo de solo mapeadas no município de Nova Lima/MG.	71
Tabela 8. Pesos atribuídos pelo especialista para as isoietas climáticas mapeadas no município de Nova Lima- MG.	77
Tabela 9. Pesos atribuídos por especialistas para a proximidade a cada classe hidrológica presente no município de Nova Lima/MG.	80
Tabela 10. Peso (autovalor) obtido para cada variável ambiental utilizada quanto ao risco � inundação no município de Nova Lima- MG.	83
Tabela 11. Intervalo Fuzzy associado a abrangência espacial de cada classe de risco � inundação presente no município de Nova Lima/MG.	88
Tabela 12. Abrangência espacial das classes de riscos nas regiões vulneráveis previamente mapeadas no município de Nova Lima/MG.	91
Tabela 13. Número e percentual de lotes cadastrados ocupando cada classe de risco � inundação no município de Nova Lima/MG.	97

LISTADE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
AHP	Análise Hierárquica de Processos
AMD	Análise Multicritério de Decisão
APASUL	Área de Preservação Ambiental Sul
CODEMIG	Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DGEO	Departamento de Geoprocessamento de Nova Lima
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
IC	Índice de Consistência
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	<i>Inverse Distance Weight</i>
IEF	Instituto Estadual de Florestas
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IGTEC	Instituto de Geoinformação e Tecnologia
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
MNT	Modelos Numéricos do Terreno
PDM-NL	Plano Diretor do Município de Nova Lima
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
PMNL	Prefeitura Municipal de Nova Lima
RMBH	Regional Metropolitana de Belo Horizonte
SEMAD	Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SR	Sensoriamento Remoto
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SAD 69	<i>South American Datum 69</i>
SIG	Sistema de Informações Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SISEMA	Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO	14
1.1 INTRODUÇÃO	14
1.2 JUSTIFICATIVA	17
2. OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
3.1 BACIA HIDROGRÁFICA.....	21
3.2 O USO DO SOLO NO CRESCIMENTO URBANO DESORDENADO	23
3.3 INUNDAÇÃO EM ÁREAS URBANAS	25
3.4 MODELAGEM E GEOTECNOLOGIAS NA TOMADA DE DECISÃO.....	27
3.4.1 MODELAGEM.....	27
3.4.2 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) E APLICAÇÕES	28
3.5 ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS (AHP)	29
3.6 LÓGICA <i>FUZZY</i> NO APOIO A DECISÃO E SUAS APLICAÇÕES.....	32
4. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	38
4.1 CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	38
4.2 DADOS E MATERIAIS	40
4.3 MÉTODOS	40
4.3.1 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA	41
4.3.1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)	41
4.3.1.2 MAPA DE DECLIVIDADE.....	46
4.3.1.3 MAPA DE USO E COBERTURA DO SOLO	48
4.3.1.4 TIPO DE SOLO	51
4.3.1.5 MAPA GEOLÓGICO	53
4.3.1.6 MAPA DE ISOIETAS CLIMÁTICAS.....	55
4.3.1.7 MAPA APP HIDROGRÁFICO.....	57
4.3.2 APLICAÇÃO DE QUESTIONÁRIO AOS ESPECIALISTAS	59
4.3.3 ANÁLISE HIERARQUICA DE PROCESSOS (AHP).....	59
4.3.4 PROCESSAMENTO <i>FUZZY</i>	59
4.3.5 COMPARAÇÃO COM ÁREAS VULNERÁVEIS E PONTOS DE INUNDAÇÃO PREVIAMENTE MAPEADOS.....	60
4.3.6 ANÁLISE DOS LOTEAMENTOS CADASTRADOS QUANTO AO RISCO À INUNDAÇÃO.....	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
5.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO <i>FUZZY</i> NOS MAPAS DE ENTRADA.....	62
5.1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE).....	62

5.1.2 DECLIVIDADE	65
5.1.3 USO E COBERTURA DO SOLO.....	68
5.1.4 TIPOS DE SOLOS	71
5.1.5 MAPA GEOLÓGICO.....	74
5.1.6 MAPA DE ISOIETAS	77
5.1.7 HIDROGRAFIA	80
5.2 VALORES DE PONDERAÇÃO DOS MAPAS DE ENTRADA	83
5.3 MAPA DE RISCO À INUNDAÇÃO.....	84
5.4 COMPARAÇÃO COM ÁREAS VULNERÁVEIS À INUNDAÇÃO PREVIAMENTE MAPEADAS	89
5.5 CARACTERIZAÇÃO DOS LOTES EM RELAÇÃO AO RISCO À INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA/MG.....	95
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
ANEXO A – QUESTIONÁRIO AOS ESPECIALISTAS – ÁREA DE GEOMÁTICA ...	108
ANEXO B – QUESTIONÁRIO AOS ESPECIALISTAS – ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE	109
ANEXO C – QUESTIONÁRIO AOS ESPECIALISTAS – ÁREA DE SOLOS	110
ANEXO D – TABELA DE RESULTADOS DOS ESPECIALISTAS.....	111

1. APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A qualidade de vida da população em centros urbanos nos países de terceiro mundo possui dinâmica própria e é marcada por influência decisiva nos desajustes estruturais da falta de planejamento urbano. A desorganização é assinalada de vários modos como, por exemplo, mediante a utilização de áreas potencialmente interessantes para determinados empreendimentos (turismo, agricultura, pecuária, entre outros) invadidas pela expansão urbana desordenada (inchaço das cidades) ou então áreas com sérios riscos ambientais (inundações, deslizamentos, entre outros) usadas como moradias (SILVA e Z Aidam, 2004). O caos ambiental urbano é uma tendência atual decorrente do pouco planejamento que eleva, e muito, o custo para a sociedade (CUNHA e GUERRA, 2004).

Segundo SANTOS (2007), na sociedade brasileira, o aumento da vulnerabilidade humana, a intensidade do impacto de acidentes e o avanço da degradação ambiental possuem uma relação muito estreita. Aliado à baixa atuação no poder público e a dificuldade de acesso à terra e moradia nas áreas urbanas, intensificou a ocupação indiscriminada de zonas impróprias quanto ao relevo, como terrenos com elevadas declividades, regiões de várzeas e localidades propensas aos regimes erosivos, potencializando o aparecimento de tragédias naturais.

Diante deste quadro, é recomendável que os pesquisadores e estudiosos de “riscos naturais” intensifiquem as pesquisas dedicadas à prevenção de desastres, pois a perda de vidas humanas e de bens materiais acontece constantemente e não pode esperar para ser registrada, de maneira que as medidas tomadas não deveriam ser corretivas e sim preventivas (CRISTO, 2004).

As inundações e os desabamentos de encostas não seriam tão calamitosos nas cidades, se a população não fosse induzida a ocupar essas áreas de risco. O fato destes fenômenos serem registrados na região Centro-Sul do Brasil com intensidade e frequência, nas metrópoles em especial, não deixa dúvidas que a participação humana tende a agravá-los (MONTEIRO, 1991)

O município de Nova Lima/MG, a exemplo de outras cidades brasileiras, apresenta um cenário de significativas alterações do ambiente natural e de evolução no adensamento populacional. O desenvolvimento urbano das últimas décadas vem se mostrando deficiente no

que diz respeito à drenagem das águas pluviais. As áreas impermeabilizadas cada vez maiores, a capacidade de infiltração do solo sendo reduzida e a velocidade do escoamento superficial acelerada formam uma sequência que resulta na ampliação das áreas de riscos hidrológicos.

De acordo com Brasil (2007), riscos hidrológicos são aqueles em que a água atua de modo direto na instalação do risco, seja através de enchente, inundações (transbordamento de rios) ou alagamentos. Eles são resultados de fenômenos de natureza hidro meteorológica, que fazem parte da dinâmica natural, sendo intensificados pelas alterações ambientais e intervenções urbanas produzidas pela sociedade, por intermédio da impermeabilização do solo, retificação dos cursos d'água e redução no escoamento dos canais devido obras de engenharia.

Os impactos dos eventos de enchente, inundação ou alagamento atacam a integridade urbana, sendo percebidos pelos transtornos na circulação de transportes, na comunicação, nas atividades e nos serviços, pelos problemas sanitários e de abastecimento, pelas perdas e pelos danos econômicos e sociais, dentre muitos outros.

A ênfase da análise espacial de dados, de acordo com Câmara *et al.* (2002) é mensurar propriedades e relacionamentos, levando em conta a localização espacial do fenômeno em estudo. Por meio de suas variadas técnicas é possível avaliar tanto dados ambientais quanto socioeconômicos. Essa avaliação é composta por um conjunto de procedimentos encadeados cuja finalidade é a escolha de um modelo inferencial que considere os relacionamentos espaciais presentes no fenômeno. Para que a verificação dessas transformações seja melhor observada, os fatores relevantes da dinâmica de uma cidade devem ser conhecidos e ferramentas eficientes devem ser incorporadas para uma boa gestão desses territórios.

A análise de eventos dinâmicos e complexos, como as inundações, é realizada mediante o entendimento de processos físicos, econômicos e/ou sociais que interagem. Estes processos são então simulados, por meio de modelos, com o propósito de se verificar cenários, realizar previsões, organizar estratégias de planejamento para o desenvolvimento de regiões (MENDES e CIRILO, 2001).

Os Sistemas de Informações Geográficas(SIGs) são usualmente aceitos como sendo uma tecnologia que possui o ferramental necessário para realizar análises com dados espaciais e, portanto, oferece, ao serem implementados, alternativas para o entendimento da ocupação e utilização do meio físico, compondo o chamado universo da Geotecnologia, ao lado do Processamento de Imagens Digitais e da Geoestatística (SILVA, 1999).

Diversos trabalhos foram realizados utilizando-se das geotecnologias como ferramenta para o mapeamento das áreas de ocorrências de acidentes naturais, visando contribuir para um melhor planejamento urbano e uma diminuição dos efeitos provocados por esses desastres (FRANÇA e RIBEIRO, 2003; MARCELINO *et al.*, 2006; ECKHARDT *et al.*, 2008; HIRATA *et al.*, 2013).

Segundo Mendes e Cirilo (2001), um dos grandes ganhos da integração dos SIGs nos estudos de recursos hídricos diz respeito ao suporte que estes podem proporcionar na obtenção e análise de informações espaciais, suprimento de dados para ferramentas como modelos de simulação e sistemas de suporte à decisão. Uma interação bastante desenvolvida, diz respeito à simulação hidrodinâmica do escoamento fluvial. A simulação do que poderá ocorrer ao longo de um rio durante uma enchente, com os impactos sobre a região de entorno, é prática recorrente em diversos países.

Os SIGs, ao oferecerem capacidades únicas na automatização, gestão e análise de dados espaciais para a tomada de decisão, têm papel importante na análise de problemas de decisão multicritério. A avaliação multicritério oferece uma vasta coleção de técnicas e procedimentos que permitem revelar as preferências de decisões e incorporá-las em tomadas de decisão baseadas na utilização do SIG, entre as quais estão as lógicas booleana e *Fuzzy* (RODRIGUES *et al.*, 2002)

Estas análises são feitas com o cruzamento de diferentes informações que resultarão em áreas que conterão atributos condizentes com o modelo adotado. Isto, sob o aspecto da lógica Booleana, é o princípio da simultaneidade, no qual vários procedimentos matemáticos, que suportam as diversas relações topológicas entre os objetos espaciais, são representados por um SIG, associados sempre a um atributo ou não (BRAGHIN e SILVA, 1997). A lógica *Fuzzy* por utilizar valores contínuos, necessita de uma representação por conjuntos, descritos por funções matemáticas, sua distinção da lógica Booleana se mostra na utilização de um intervalo contínuo e não apenas valores discretos ou binários. (SUI, 1992).

Uma das principais preocupações da sociedade contemporânea referente às projeções futuras do clima diz respeito às possíveis mudanças na frequência e intensidade dos eventos extremos de curta duração. Nesse sentido este trabalho buscou identificar as áreas de inundação por meio de ferramentas de geoprocessamento e de modelagem hidrológica a fim de mapear manchas de vulnerabilidade relacionadas com os custos e prejuízos possíveis para o determinado fenômeno.

A adaptação a impactos adversos em virtude das enchentes e inundações tem sido reconhecida como área prioritária para as políticas nacionais e internacionais. Assim o futuro

de Nova Lima/MG, como de outras cidades, irá depender cada vez mais de ações de planejamento e sistemas de gestão integrada, uma vez que as transformações da realidade econômica, social e política contribuirão no investimento correto de planos estruturantes evitando prejuízos materiais e perdas de vidas humanas.

Este trabalho de pesquisa aborda as seguintes questões: como as ferramentas de geoprocessamento operando com mapas sobrepostos representando diferentes variáveis ambientais consegue determinar com alta probabilidade o risco à inundação? A análise e a modelagem de um sistema ambiental, no decorrer da aplicação de lógica *fuzzy* e AHP pode contribuir com a identificação de áreas com risco categorizado à inundação no município de Nova Lima? Quais localidades em Nova Lima estariam mais vulneráveis à inundação e devem ser priorizadas pelo poder público municipal?

O texto do trabalho está organizado de forma que o primeiro e o segundo capítulo contemplam em caráter explicativo a justificativa e os objetivos, geral e específicos, para a realização dessa dissertação. O terceiro capítulo se ocupa em propor uma reflexão a respeito dos conceitos de bacia hidrográfica, uso do solo no crescimento urbano desordenado, inundação em áreas urbanas, utilização da modelagem e geotecnologias na tomada de decisão e como ponto principal a lógica *fuzzy* com uma breve explanação da sua teoria, conjuntos, estrutura e operadores.

O quarto capítulo apresenta a metodologia desenvolvida, com a caracterização e localização da área de estudo, os dados e materiais utilizados e a proposição dos processamentos. O quinto capítulo traz uma série de resultados e discussões sobre o processo de aplicação da lógica *fuzzy* nos mapas de entrada, obtendo um mapa geral do município frente ao risco da inundação, foi feita uma comparação com áreas previamente mapeadas para sua validação, a qual se obteve um mapa categorizado do risco de inundação dos loteamentos com sua respectiva vulnerabilidade. O capítulo final se ocupa em desenvolver a análise dos resultados obtidos nesta dissertação, com a intuito de direcionar novos caminhos e reflexões em futuras pesquisas a respeito do tema em questão.

1.2 JUSTIFICATIVA

A questão ambiental tem se destacado nas últimas décadas na sociedade devido aos resultados danosos da ação do homem sobre a natureza. Os impactos ambientais e sociais, observados na atualidade são os decorrentes da ocupação urbana de forma desordenada e irregular que trazem consigo problemas, como enchentes e inundações.

No Brasil, nas últimas décadas, observou-se um intenso processo de urbanização da população. Dos 190 milhões de brasileiros, 84,36% vivem em áreas urbanas, de acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010). Nota-se uma tendência da população em viver em áreas urbanas, onde muitas vezes não apresentam condições de infraestrutura mínimas para sustentar esses habitantes, causando problemas sociais, ambientais e de segurança.

Essa concentração da populacional nos grandes centros urbanos não tem sido acompanhada de ações governamentais eficientes para o ordenamento do uso e ocupação do solo, levando os setores carentes da sociedade a ocupar áreas naturalmente inadequadas ou, suscetíveis a eventos naturais. Essas áreas são ocupadas sem os mínimos preceitos técnicos e sem observância da legislação vigente (PFALTZGRAFF, 2007).

Nesse contexto surge a preocupação com a ocorrência de desastres naturais que podem ser definidos como o resultado do impacto de fenômenos naturais extremos ou intensos sobre um sistema social, capazes de causar sérios danos e prejuízos que excedem a capacidade da comunidade ou da sociedade atingida em conviver com o impacto (MARCELINO, 2008).

No ano de 2013 os desastres naturais tiveram um impacto significativo na sociedade brasileira. Foi relatada a ocorrência de 493 desastres naturais, os quais causaram 183 óbitos e afetaram em torno de 18.557.233 pessoas (BRASIL, 2014). Desse total, cerca de 36 óbitos foram causados por inundação e aproximadamente 1.389.454 pessoas foram afetadas. Dos desastres que causaram mortes à população brasileira, as inundações corresponderam a 19,67% dos óbitos (BRASIL, 2014). Nesse cenário surge a necessidade de ferramentas que possibilitem estudar de maneira integrada esses fenômenos.

A inundação urbana é um sério desafio para o desenvolvimento municipal e coloca a vida das pessoas em risco, particularmente os habitantes de cidades em rápida expansão urbana situadas nos países em desenvolvimento. Segundo Barbosa (2015), no Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos foram identificadas 6.776 áreas vulneráveis à inundação no trecho da bacia do rio São Francisco que se encontra inserido no município de Nova Lima/MG.

Compete à Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD, realizar ações de prevenção dos eventos hidrológicos adversos no estado de Minas Gerais. O Decreto nº 45.824, de 20 de dezembro de 2011 atribui à SEMAD a finalidade de planejar, organizar, dirigir, coordenar, executar, controlar, fiscalizar e avaliar as ações setoriais a cargo do estado, relativas à proteção e à defesa do meio ambiente, ao gerenciamento dos recursos

hídricos e à articulação das políticas de gestão dos recursos ambientais, visando ao desenvolvimento sustentável.

Assim como a SEMAD, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) apresentou em 2015 a carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações que considera as diretrizes contidas no manual para zoneamento de suscetibilidade, perigo e risco a deslizamentos. A carta tem caráter informativo e foi elaborada para uso exclusivo em atividades de planejamento e gestão do território, apontando as áreas sujeitas ao desenvolvimento de processos de meio físico que podem ocasionar desastres naturais.

Com o objetivo de aprimorar o trabalho da SEMAD e da CPRM para a cidade de Nova Lima/MG, a modelagem das áreas inundáveis por determinada enchente e a caracterização da ocupação do solo das áreas sujeitas a esse fenômeno serão alvo de estudo nesta dissertação. Vale ressaltar, que a pesquisa não terá o objetivo de caracterizar extensivamente todas as variáveis que influenciam na ocorrência e na intensidade do fenômeno das inundações.

Como as inundações são um fato consumado na área de estudo, em decorrência das características naturais da bacia hidrográfica, será enfoque desse estudo o uso de geotecnologias, dados de Sensoriamento Remoto (SR) e técnicas de geoprocessamento como ferramentas que auxiliam na geração de informações sobre a dinâmica do fenômeno quando da sua ocorrência e o impacto sobre a sociedade.

No contexto atual, devido a acessibilidade a dados ambientais especializados, é possível a sua integração em SIG por meio da aplicação de técnicas de inferência espacial. Segundo Meirelles *et al.* (2007), de maneira geral os modelos de inferência mais utilizados são: operadores booleanos, lógica *Fuzzy*, sobreposição por índice ou média ponderada com pesos. Seus estudos constataram que, dentre os métodos de inferência geográfica realizados em SIG, os baseados na Lógica *Fuzzy* obtiveram os melhores resultados na realização de diversos estudos ambientais.

Espera-se que os resultados apresentados nessa pesquisa tenham aplicação direta em vários setores da sociedade. Com relação aos resultados diretos, o mapeamento das áreas inundáveis e o conhecimento das localidades permitirá maior agilidade na remoção de pessoas e bens materiais atingidos por determinada mancha de inundação. No médio e longo prazos, as mesmas informações permitirão readequação na utilização das áreas em função do risco de inundação que apresentam. Em última análise, as informações a serem obtidas, se utilizadas pelos gestores públicos municipais, servirão para reduzir os efeitos negativos associados às inundações, tanto no que se refere aos prejuízos diretos, como nos problemas de saneamento e

transtornos diversos.

Assim, justifica-se a necessidade de aplicação de uma análise multicritério de apoio à decisão para estabelecer manchas com maior grau de risco à inundação, proporcionando uma eficiente resposta na previsão, simulação e mapeamento da área inundável, caracterizando as regiões atingidas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desta dissertação é desenvolver um modelo de análise multicritério de apoio a decisão aplicando conceitos integrados de lógica *fuzzy*, Análise Hierárquica de Processos, ferramentas de SR e ambientes de geoprocessamento para determinar as áreas em detalhe a nível de de lotes susceptíveis à inundação no município de Nova Lima/MG.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral foram definidos alguns objetivos específicos, tais como:

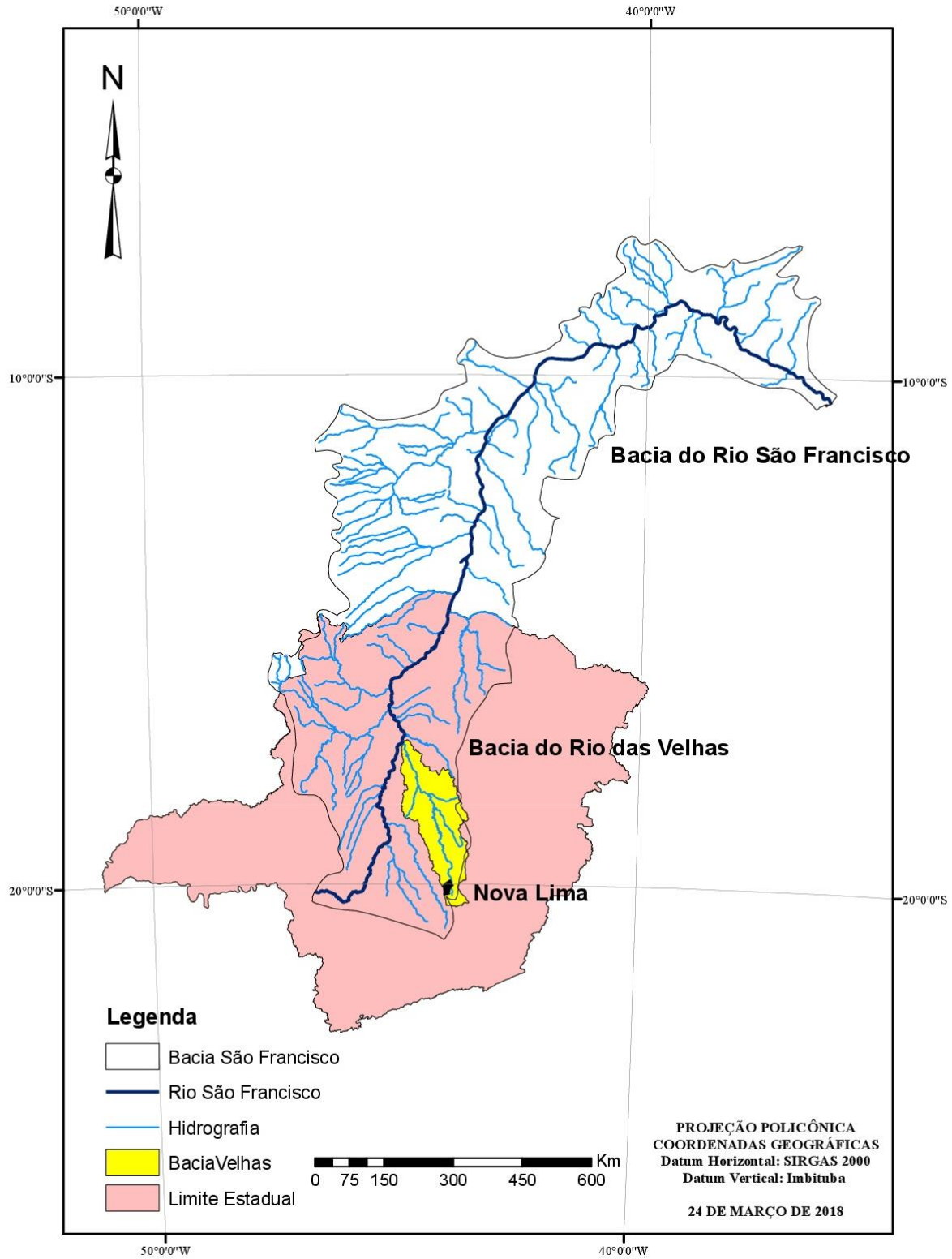
- i. Identificar e testar a eficácia de modelos espaciais capazes de ajudar a resolver problemas de risco de inundação em lotes urbanos;
- ii. Avaliar a capacidade de métodos diferentes de análise de decisão, na apresentação de dados em diferentes níveis de detalhe, dentro do enfoque holístico ou analítico com que se estuda o risco de inundação;
- iii. Testar a aplicabilidade e viabilidade do uso de SIG na identificação de lotes associados ao risco de inundações;
- iv. Identificar e apresentar as áreas de vulnerabilidade às inundações no município de Nova Lima.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 BACIA HIDROGRÁFICA

As características principais da bacia hidrográfica são a área de drenagem, o comprimento do rio principal e dos tributários, a declividade do rio e da bacia. Conforme Rafaeli Neto (2000), as bacias hidrográficas, unidades naturais da água, como delimitação de uma paisagem para estudos e intervenções, fornecem elementos concretos de referência, facilmente estabelecidos no território e na cartografia. As bacias ocupam superfície determinada e delineada por espigões e vales, e neste espaço, pode-se avaliar o desempenho da paisagem em relação à utilização dos recursos hídricos no decorrer da visualização do ciclo hidrológico. A água é um elemento que confere dinâmica, unidade e continuidade à paisagem em uma bacia, conforme se verifica na Figura 1.

Figura 1. Delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, onde se insere a bacia do Rio das Velhas e o município de Nova Lima/MG.



Fonte: Adaptado pelo autor com dados obtidos do IDE-SISEMA (2018).

Os crescentes problemas de degradação e desequilíbrios ambientais ocasionados pelas intervenções humanas alteram os elementos do cenário natural, neste sentido a rede fluvial é

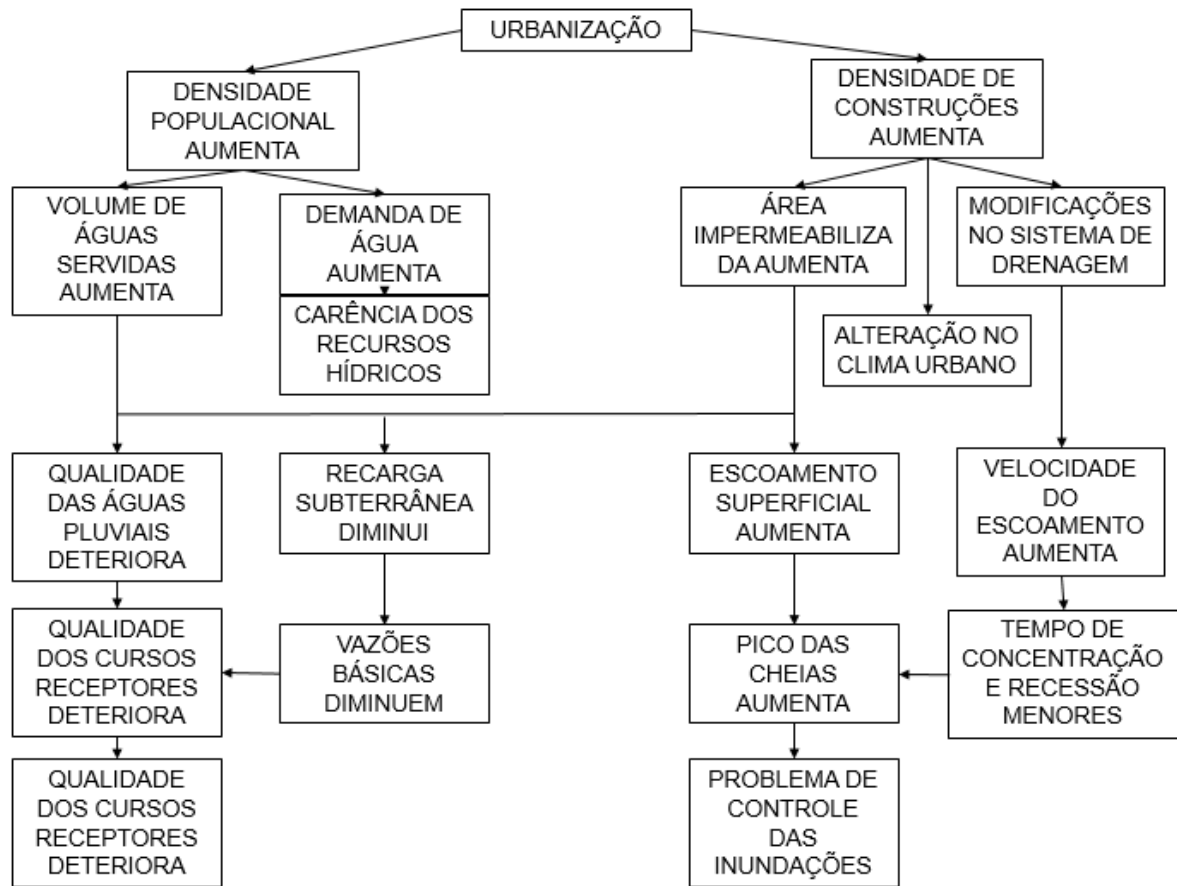
um importante recurso natural que, juntamente com sua bacia de captação, deve ser preservada. Dessa forma, a bacia hidrográfica é um excelente laboratório de estudo de problemas ambientais e como unidade integradora dos setores naturais e sociais deve ser administrada com esta função, a fim de que os impactos ambientais sejam minimizados (CUNHA e GUERRA, 1999).

A bacia hidrográfica do rio das Velhas, que engloba todo o município de Nova Lima/MG, é caracterizada como uma bacia urbana (Figura 1), e vem sofrendo com o crescimento populacional desordenado que é o principal fator de prejuízo em processos ambientais. As alterações nas características naturais dos rios são ocasionadas por sucessivas obras de engenharia e ocupações em loteamentos pelo grande poder do setor imobiliário da região, que muitas vezes não levam em consideração o conjunto da rede de drenagem e modificam as seções transversais e o perfil longitudinal dos rios, alterando assim a eficiência do fluxo de água, e causando mudanças nos processos hidrológicos.

3.2 O USO DO SOLO NO CRESCIMENTO URBANO DESORDENADO

O processo de urbanização gera impactos significativos sobre o ambiente ocupado, como foi exposto. Ações antrópicas que transformam o meio natural em um meio adequado aos interesses de desenvolvimento do ser humano originam grandes superfícies impermeáveis, que dificultam a infiltração das águas de chuvas nas superfícies urbanas, promovendo o desequilíbrio do balanço hídrico e, conseqüentemente, mudanças no comportamento do hidrograma de uma bacia ou de uma micro bacia (PORTO,1991). A Figura 2 mostra uma síntese das variáveis inter-relacionadas e associa alguns aspectos da urbanização com os respectivos impactos gerados.

Figura 2. Fluxograma dos processos decorrentes da urbanização e impactos.



Fonte: Adaptado de Porto, 1991.

O esquema mostra que o aumento da vazão de escoamento superficial, associado a fatores de um processo urbanístico mal planejado, caracterizado por ocupações indevidas de áreas de risco, ineficiência e falta de manutenção dos sistemas públicos de captação pluvial, falhas no processo de coleta e disposição de lixo, entre outros fatores, geram riscos à saúde pública e prejuízos socioeconômicos consideráveis à toda comunidade, devido ao sucessivo processo de ocorrência de enchentes e inundações.

Segundo Spirn (1995), o ambiente natural de uma cidade e sua forma urbana, tomados em conjunto, compreendem um registro da interação entre os processos naturais e os propósitos humanos através do tempo. Juntos, contribuem para a identidade única de cada cidade.

A natureza é uma força fundamental que determina a morfologia das cidades e os esforços humanos (MCHARG, 1992), daí a necessidade de compatibilizar processos naturais e sociais nas propostas de intervenção paisagística, onde a procura de locais apropriados para a agricultura, pecuária, lazer e urbanização segundo a geologia e o relevo deveriam ser dominantes na definição da paisagem.

A paisagem deve ser entendida como um sistema ecológico onde a topografia, a classe de solo, as águas, a vegetação, a fauna e também as intervenções antrópicas são elementos fundamentais. Essa classificação deve estar correlacionada com a geologia, a geomorfologia e o clima. As diferentes partes desse sistema constituem as paisagens relacionadas com a escala de percepção humana (FRANCO, 1997).

Os recursos hídricos são elementos fundamentais nos cenários urbanos, muitas vezes determinantes da própria configuração espacial das cidades, e por isso merecem atenção especial no processo de planejamento de ocupação do território.

Devido ao seu caráter integrador de diversos fatores naturais e antrópicos, o uso do solo nas bacias hidrográficas deve considerar diversas características da área, com especial atenção para os aspectos morfológicos. Na maioria das cidades brasileiras, por causa da ocupação do espaço urbano pela população e pela falta de restrição dessa ocupação vem ocorrendo grandes problemas relacionados com a impermeabilização do solo, inundação e enchentes, seguidos por diversos danos e transtornos aos próprios habitantes da bacia.

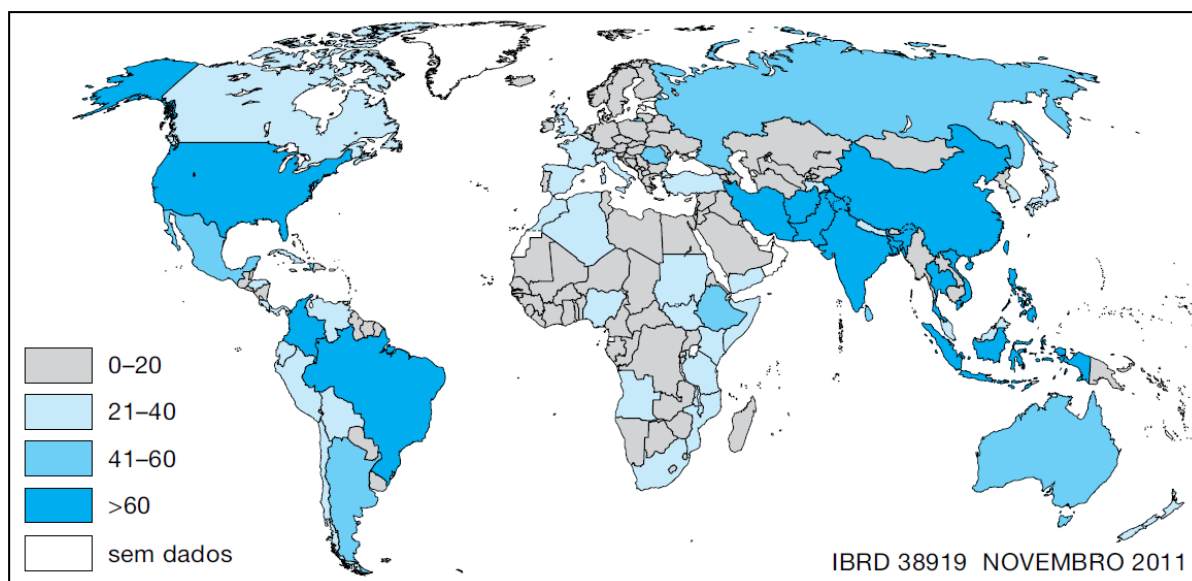
3.3 INUNDAÇÃO EM ÁREAS URBANAS

As enchentes ocorrem quando a precipitação é intensa e a quantidade de água que chega simultaneamente ao rio, é superior à sua capacidade de drenagem resultando em inundações das áreas ribeirinhas (TUCCI, 2004).

Segundo Vianna (2000), as cheias são definidas como eventos em que são verificados valores extremos de vazão associados a inundações das planícies ou áreas adjacentes ao canal principal dos cursos d'água. As enchentes são fenômenos naturais dos regimes dos rios e de outros corpos d'água, sendo que todo rio tem sua área natural de inundação. As cheias passam a ser um problema quando o homem deixa de respeitar os limites naturais dos rios.

A frequente ocorrência de inundações em várias cidades de todo o mundo, conforme a Figura 3, sinaliza para a necessidade de reflexão sobre a expansão das mesmas e os impactos gerados sobre o sistema hídrico natural, tais como a impermeabilização do solo, a ocupação de fundos de vale e o desmatamento das Áreas de Proteção Permanente (APP) próximas às nascentes dos rios e córregos urbanos. Uma análise histórica nos mostra que tal entendimento nem sempre foi difundido.

Figura 3. Eventos de Inundação nos países do mundo.



Fonte: EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database www.emdat.be - Université Catholique de Louvain - Bruxelas- Bélgica”. Novembro 2011.

O entendimento das causas e desenvolvimento das medidas preventivas às inundações, modificaram-se ao longo dos tempos. Em Northern Hesse, na Alemanha, as medidas preventivas foram divididas em três fases (TOENSMANN, 2000).

A primeira fase, de 1850 a 1945, foi marcada por obras hidráulicas nas cidades de Diemel e Edere pelo levantamento de dados realizado na cidade de Kassel. Esta fase se caracteriza pela construção dos recursos hídricos a partir de uma visão apoiada no desenvolvimento técnico, crescente nesse período, mas sem nenhuma preocupação em estabelecer compatibilidade com o meio físico.

A segunda fase, de 1945 a 1980, foi marcada pela criação de associações e elaboração de projetos de desenvolvimento dos recursos hídricos e controle de vazões, mas poucos foram implementados. A forte ênfase nas medidas técnicas, característica da primeira fase, foi modificada com o Relatório Ambiental (*Um Welf Bericht*) do governo alemão, que definiu os impactos e medidas compensatórias a eles relacionados.

Na terceira fase, de 1980 a 2000, as questões vinculadas à sustentabilidade e compatibilidade com o ambiente ganharam maior destaque, representadas na prevenção e na implantação de retenções naturais, bastante enfatizadas. Porém, esse período foi também marcado por um certo distanciamento das medidas técnicas, fato ao qual Toensmann (2000) faz algumas ressalvas, alertando que a eficácia de um projeto depende de uma boa mistura desses três estágios de prevenção das inundações.

Uma forma de solucionar o problema de inundação é a partir da delimitação dessas

áreas, ou seja, fazer um zoneamento de áreas sujeitas à inundação. Desta forma, será possível analisar as dimensões das áreas de inundação, e, portanto, caracterizar as regiões mais favoráveis à ocupação urbana na bacia sem o perigo de inundação. A possibilidade de previsão das inundações, com antecedência apropriada, estimula ações de prevenção e respostas que podem reduzir ou eliminar perdas humanas e materiais (PEREIRA e SILVA, 2007).

Segundo Tucci (2004) as principais condições naturais para a ocorrência de enchentes são relevo, tipo de precipitação, a cobertura vegetal e a capacidade de drenagem. Já as principais condições artificiais são as obras hidráulicas, a urbanização, os desmatamentos, o reflorestamento e o uso agrícola.

3.4 MODELAGEM E GEOTECNOLOGIAS NA TOMADA DE DECISÃO

Segundo Forman (1995), um dos maiores desafios do planejamento do uso da terra é o que se refere ao uso sustentável do ambiente, que se baseia em uma dinâmica de transformação com igual ênfase, nas dimensões ambientais e humanas da paisagem e na consideração de intervalo temporal que abranja diferentes gerações humanas. Assim, a utilização de produtos de sensoriamento remoto, tais como, imagens e fotografias aéreas, associadas aos SIGs, tornam-se de fundamental importância, pois contribuem com a análise da dinâmica temporal da transformação de importantes áreas como as bacias hidrográficas. O monitoramento e a aquisição de dados contínuos, proporcionam um controle sobre o comportamento das bacias.

Desta forma, o conjunto de dados adquiridos requer ajustes constantes, e neste sentido os SIGs são importantes ferramentas nas análises, no armazenamento, na utilização e na atualização de dados espaciais. Desta forma, as Geotecnologias, por meio dos SIGs e do SR vêm sendo utilizadas como ferramentas fundamentais, a fim de subsidiar o planejamento, as análises e as ações em diversas áreas de aplicação do conhecimento (SILVA, 2006).

3.4.1 MODELAGEM

De acordo com Tucci (1998), o modelo é a representação de algum objeto ou sistema, em uma linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Quanto mais complexos os sistemas, mais

desafiadores e necessários são os modelos. Segundo Rennó e Soares (2000), um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade. De maneira geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros que estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso da terra e a prever alterações futuras nos ecossistemas.

Baseando-se nestes conceitos, a modelagem de fenômenos naturais, incluindo os de características hidrológicas e hidráulicas de rios, vêm alcançando consideráveis níveis de desenvolvimento, especialmente, por estarem apoiados nos avanços e acessibilidade de computadores com alta capacidade de manipulação numérica. No entanto, esta evolução dos modelos pode apresentar aspectos negativos, considerando que será gerado um número muito maior de resultados nem sempre relacionados qualitativamente ao fenômeno estudado. Neste ponto, faz-se importante manter o apuro e equilíbrio na análise dos aspectos quantitativos e qualitativos do processo modelado (TAVARES, 2005).

3.4.2 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) E APLICAÇÕES

A integração do SIG com os modelos hidrológicos e a sua aplicação em bacias hidrográficas permite a realização de um grande número de operações, como projeto, calibração, simulação e comparação entre os modelos. O uso do SIG possibilita, ainda, subdividir a bacia hidrográfica em subáreas homogêneas de mesma resposta hidrológica (MACHADO, 2004).

Os SIGs são empregados na criação do banco de dados, na geração de Modelos Numéricos do Terreno (MNT), na análise de imagens de satélite e na recuperação de informações. Os SIGs são destinados ao acoplamento e ao tratamento de informações georreferenciadas, permitindo a manipulação de dados de diversas fontes, recuperando e combinando informações e efetuando vários tipos de análises, inclusive podem ser combinados com modelos hidrológicos para a utilização em Sistema de Apoio à Decisão (SAD).

Os SADs são sistemas de informação dotados de capacidades de modelagem científica, ferramentas de manipulação e de análise de dados, configurados para atender processos de tomada de decisão sobre problemas semiestruturados e não-estruturados, com intenso envolvimento do usuário. Seus objetivos gerais são melhorar a eficácia ou qualidade

da decisão e eficiência do processo de tomada de decisão no planejamento e gerência (NETO, 2000).

Aronoff (1989) descreve aplicações representativas para as quais um SIG pode ser utilizado com sucesso. Os exemplos se fazem presentes em várias disciplinas, incluindo aplicações amplamente aceitas, tais como agricultura e planejamento do uso da terra, silvicultura e gerenciamento da vida silvestre, arqueologia, geologia e aplicações municipais. A maioria da informação necessária para operar um município é georreferenciada, ou seja, é referenciada a uma específica localização geográfica.

As informações sobre zoneamento, propriedades, estradas, escolas e parques, todas se relacionam a localizações geográficas. Embora o uso do computador seja comum, a adoção de ambientes SIGs pelos municípios tem sido lenta. Em parte, isso tem sido um resultado de altos custos iniciais de criação da base de dados para o SIG. Talvez mais fundamentais sejam os custos de mudança da organização administrativa da municipalidade, tal que o ambiente SIG possa ser efetivamente implementado.

Os SIGs municipais são usados para a tomada de decisão legal, administrativa e econômica, assim como para as atividades de planejamento. Os municípios começaram a reconhecer os benefícios potenciais de uma abordagem mais integrada aos seus dados computadorizados em geral, e à organização da informação georreferenciada em particular (STASSUM e FILHO, 2012). Uma base de dados municipal bem concebida pode aprimorar a eficácia da organização e manutenção da base de informações da qual a municipalidade depende, além de fazer o melhor uso de seu investimento em informação sobre o território.

3.5 ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS (AHP)

O Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process* – AHP) foi desenvolvido por Saaty (1980) e pode ser definido como “uma metodologia matemática destinada a ponderar quantitativamente variáveis mediante a interação do pesquisador com o modelo matemático, fazendo isso em forma de considerações qualitativas” (RAFFO, 2012, p. 26). A AHP envolve a identificação de um problema de decisão e, em seguida, decompõe este em uma hierarquia de “subproblemas” menores e mais simples, onde cada um poderia então ser analisado de forma independente, sem perder o foco do problema de decisão (SOUZA *et al.*, 2010).

Vargas (1990) apresenta a AHP como uma teoria para medições, que possibilita à

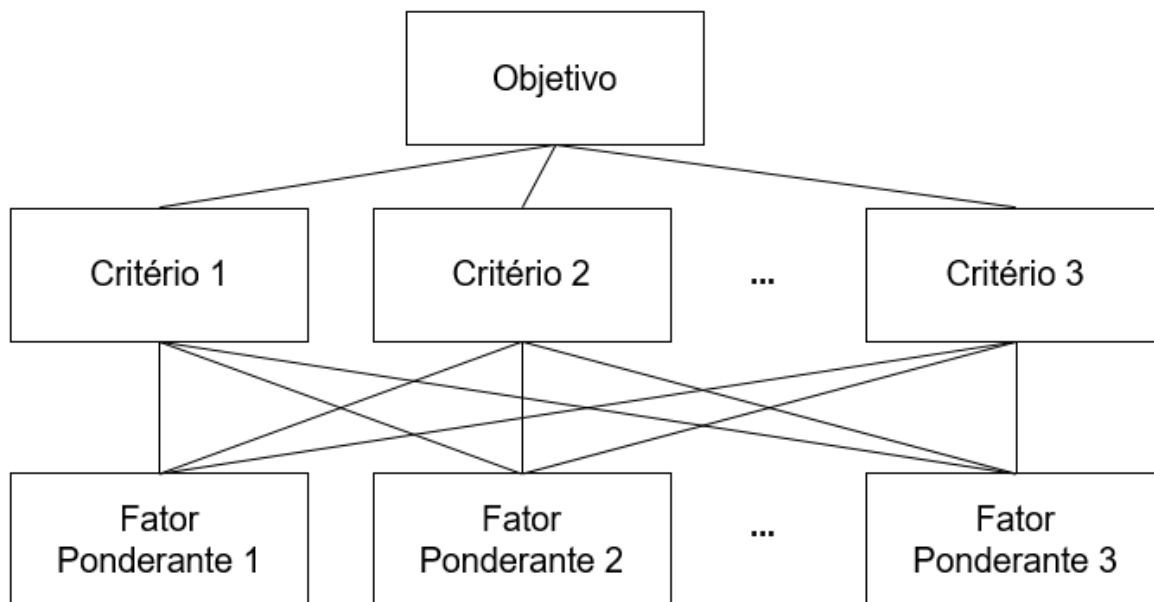
avaliação de atributos tangíveis e/ou intangíveis. A premissa na AHP é que no processo de decisão o conhecimento acumulado e intuitivo de um especialista é, no mínimo, tão valioso quanto o conjunto de dados disponíveis. Por isso, é previsível que diferentes decisões desenvolverão estruturas diversas no decorrer da dinâmica decisória.

O método AHP, determina por meio de síntese dos valores dos agentes de decisão, uma medida global para cada alternativa, priorizando-as ou classificando-as ao finalizar o método (GOMES *et al.*, 2004). Promove também a decomposição e síntese das relações entre os critérios até que se chegue a uma priorização dos seus indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho (SAATY, 1991). A AHP desenvolve-se em duas etapas principais, o desenho das hierarquias e a avaliação.

Uma vez construída a hierarquia, avalia-se sistematicamente seus elementos, a partir da comparação paritária de um elemento em relação a outro, situado no nível imediatamente acima daquele que está sendo comparado. Prossegue-se a comparação para todos os elementos nos níveis abaixo (SOUZA, 2006). Ao fazer as comparações, utilizam-se dados concretos sobre os elementos, ou julgamentos sobre o significado relativo ou a importância dos elementos (SHAHABI *et al.*, 2014). A AHP converte os julgamentos em valores numéricos que podem ser processados e comparados sobre toda a extensão do problema. Um peso numérico, ou prioridade, é derivado para cada elemento da hierarquia, permitindo que elementos distintos e frequentemente imensuráveis sejam comparados entre si (SHAHABI *et al.*, 2014).

As comparações entre os atributos e as alternativas são registradas em matrizes na forma de frações entre 1/9 e 9. Cada matriz é avaliada pelo seu autovalor para verificar a coerência dos julgamentos. Este procedimento gera uma razão de coerência que será igual a 1, se todos os julgamentos forem coerentes entre os mesmos, Figura 4 (PINESE e RODRIGUES, 2012).

Figura 4. Modelo simplificado e esquemático de árvore hierárquica.



Fonte: Adaptado de Carvalho e Mingoti (2005).

A comparação paritária é feita com o auxílio da escala fundamental definida por Saaty (1990) com valores de 1 a 9, conforme Quadro 1. Por intermédio dessa escala o decisor expressa as suas preferências quanto à importância dos elementos que estão sendo comparados.

Quadro 1. Definição e explicação dos 9 pesos fundamentais de julgamento comparativo.

Importância	Definição	Explicação
1	Importância Equiparada	Contribuição equiparada para o objetivo.
3	Importância Moderada	Um objetivo ligeiramente favorável em detrimento de outro.
5	Importância Forte	Um objetivo fortemente favorável em detrimento de outro.
7	Importância Muito Forte	Um objetivo muito fortemente favorável em detrimento de outro; domínio demonstrado na prática.
9	Importância Absoluta	É a maior ordem de afirmação possível de um objetivo em detrimento de outro.
2,4,6,8	Valores intermediários entre os dois julgamentos	Possível necessidade de se interpolar julgamentos numéricos.

Fonte: PINESE e RODRIGUES (2012, p. 9).

Existem vários instrumentos disponíveis na rede mundial de computadores que facilitam o uso da AHP, onde essa ferramenta já está implementada, e possui uma interface gráfica de usuário amigável que facilita o seu uso para os mais diversos fins. Segundo Raffo

(2012) Os procedimentos matemáticos da metodologia AHP podem ser implementados usando uma calculadora eletrônica, um programa como o Excel da Microsoft, mas nestes casos o usuário deve conhecer bastante dos fundamentos teóricos da metodologia, no entanto, existem programas de computador onde a metodologia já está implementada e pode utilizar recursos interativos com o sistema, como o programa SPRING (CÂMARA *et al.*, 1996) e o IDRISI (EASTMAN, 2000).

3.6 LÓGICA *FUZZY* NO APOIO A DECISÃO E SUAS APLICAÇÕES

O conjunto *Fuzzy* foi introduzido no contexto científico por Zadeh (1965), conforme a publicação do artigo intitulado “*Fuzzy Sets*” no *Journal Information and Control* (JANÉ, 2004). Em meados da década de 60, Zadeh observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na lógica booleana (ZADEH, 1965). Visto que o processo de decisão acontece no grau do conhecimento, pois envolve a formulação de um modelo abstrato que sintetize a situação analisada, quanto mais próximo da realidade concreta do mundo exterior e do universo subjetivo do decisor, mais robusto será o modelo.

A utilização de lógica *Fuzzy* e dos conjuntos *Fuzzy*, por suas capacidades de manipulação de conceitos semânticos, incertezas e imprecisões pode agregar valor ao desenvolvimento de sistemas de Apoio Multicritério a Decisão (AMD) (SOUZA, 2006). Quinhoneiro (2015) desenvolveu um novo modelo de análise de correlação entre as variáveis energia, água, uso do solo e clima, utilizando inteligência artificial, por meio da lógica *Fuzzy*, cuja base de dados, são indicadores que representem um ou mais recursos, considerando uma distribuição temporal relativa e necessária para a investigação de resultados e comportamentos.

Já Souza (2006) explorou o campo da AMD no decurso da utilização de lógica *Fuzzy* com o intuito de agregar valor no que tange às decisões complexas face às dificuldades características do mundo real. Para tal, escolheu uma abordagem comparativa, onde os desempenhos das metodologias clássicas (AHP e teoria da utilidade multiatributo) e do sistema *Fuzzy* em questão, são observados com relação a um problema simples como a compra de um carro.

Santana (2014) caracterizou áreas com maiores riscos de inundação no município de

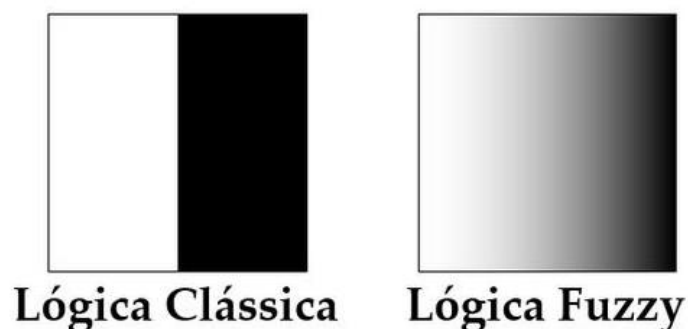
João Monlevade/MG, utilizando mapas de declividade, uso e ocupação do solo, tipo de solo e altimetria. Também foi realizado o processamento da análise de multicritério, com o cruzamento das informações e ponderando cada item pelo grau de influência no processo de inundação, gerando mapa-síntese da situação, demonstrando as áreas de baixa, média e alta susceptibilidade à inundação. Por fim, Silva Junior (2015) apresentou um panorama do uso da lógica *Fuzzy* e do AHP para o zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos. Nesse panorama descreveu duas ferramentas, que se demonstram eficientes e úteis do ponto de vista metodológico, com os operadores *Fuzzy*, média ponderada AHP e *Gamma*, além da concreta eficiência no uso do AHP com o objetivo de tratar as incertezas inerentes ao uso do conhecimento empírico de especialista.

3.6.1 TEORIA FUZZY

A lógica *Fuzzy* é “também conhecida como lógica nebulosa ou difusa” (AGUADO e CANTANHEDE, 2010, p. 1), essa teoria tem como principal objetivo lidar com dados que contêm algum tipo de incerteza. Ao usar a teoria difusa, cada objeto ou declaração é dado em um valor no intervalo entre 0 e 1, indicando a sua adesão a um determinado conjunto. Cada objeto pode ser membro de vários grupos com diferentes valores de adesão. Este conceito é muito útil para a categorização de dados e para a tomada de decisão, ao contrário da lógica booleana que produz resultados com respostas rígidas (MARJANOVIC e CAHA, 2011).

A ideia da Teoria *Fuzzy* não fica restrita entre verdadeiro e falso, existem vários níveis entre o verdadeiro e falso. A Figura 5, mostra de modo figurativo a lógica clássica onde se enxerga apenas o preto e o branco, enquanto a lógica *fuzzy* é capaz de, além do preto e do branco, vislumbrar vários tons de cinza (KOHAGURA, 2007).

Figura 5. Comparativo de Lógica Clássica e Lógica Fuzzy.



Fonte: Adaptado de Kohagura, 2007.

Nesse sentido, a Teoria *Fuzzy* cria linguisticamente escalas de valores que buscam

quantificar o objeto a ser estudado. O uso dessa teoria implica na criação das chamadas variáveis linguísticas que, diferentemente da lógica clássica, são de extrema relevância pois possibilitam captar o grau de incerteza presente nessas variáveis e traduzir para um modelamento matemático. Esta possibilidade da lógica *fuzzy* é chamada grau de participação, ou também conhecido como função de pertinência (AGUADO e CANTANHEDE, 2010).

3.6.2 CONJUNTOS FUZZY

O conjunto de valores *fuzzy* A em X é definido matematicamente como o par ordenado: $A = \{x, \mu_A(x)\}$, $x \in X$, em que $X = (x)$ é o universo de atributos, $\mu_A(x)$ é conhecido como o grau de pertinência de x em A . O valor $\mu_A(x)$ é um número que pertence ao intervalo $[0, 1]$, onde 1 representa a associação total do conjunto, e 0 a não-associação (MEIRELLES *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2009; ZADEH, 1965).

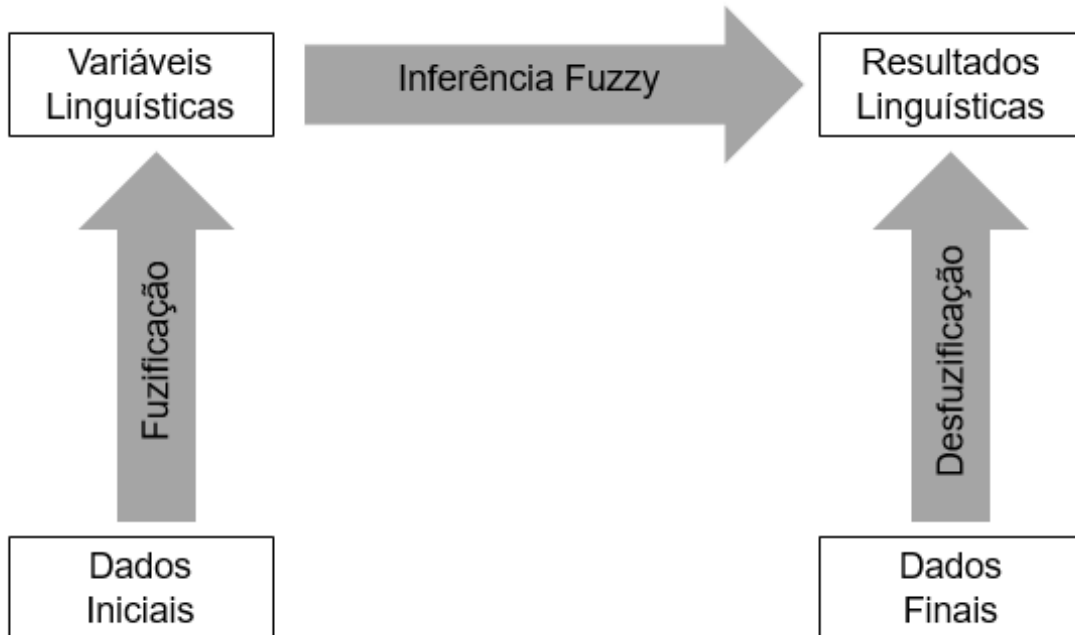
Os graus de associações de x em A refletem uma espécie de ordem que não é baseada na probabilidade, mas na possibilidade. Estes Valores são obtidos por funções de pertinência (MEIRELLES *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2009; ZADEH, 1965): $\mu_A(x) : X \rightarrow A : [0, 1]$.

As seguintes notações são utilizadas para representar os conjuntos *Fuzzy*: $A = \int x \mu_A(x)/x$, quando A é contínuo ou $A = \sum \mu_{Aj}(x)/x_j$, ou seja, $\mu_{A1}(x)/x_1 + \mu_{A2}(x)/x_2 + \dots + \mu_{An}(x)/x_n$, quando A é finito por um conjunto contável de n elementos (MEIRELLES *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2009; ZADEH, 1965). “O símbolo ‘/’ deve ser interpretado como com respeito a e ‘x’ como união” (MEIRELLES *et al.*, 2007, p. 126).

3.6.3 ESTRUTURA DO SISTEMA LÓGICO FUZZY

A estrutura de todo o sistema lógico *fuzzy* é baseada em três operações que estão explicitadas na Figura 6.

Figura 6. Sistema Lógico *Fuzzy*



Fonte: Adaptado de Cox, 1995.

Na etapa de fuzificação ocorre a transformação dos dados de entrada iniciais em suas respectivas variáveis linguísticas. Nesta etapa, todas as informações relativas à imprecisão ou incerteza associada a estas variáveis devem ser respeitadas, e a consulta a especialistas da área estudada para a atribuição de valores relacionados aos graus de pertinência para cada uma das variáveis em estudo precisa ser considerada, contribuindo assim para maior precisão nos resultados ou o uso de conhecimento já estabelecido sobre a área (JANÉ, 2004).

Na etapa de inferência *Fuzzy*, cuja finalidade é relacionar as possíveis variáveis entre si, mediante regras pré-estabelecidas, são cumpridos os objetivos do algoritmo, também denominados operadores *Fuzzy* (JANÉ, 2004). A terceira e última etapa do sistema lógico *fuzzy* é chamada desfuzificação, e de acordo com Von-Altrock (1996), consiste na tradução do resultado linguístico do processo de inferência *fuzzy*, em um valor numérico (processo de fatiamento). Entretanto Cox (1995), apresenta um outro conceito onde diz que compreende o processo como a conversão de um número *fuzzy* em um número real.

3.6.4 OPERADORES FUZZY

Existem vários operadores *fuzzy* para a combinação de funções de pertinência. Os operadores mais conhecidos são: produto algébrico, soma algébrica, operador *gamma* e média ponderada AHP (MARJANOVI e CAHA, 2011; MEIRELLES *et al.*, 2007). O operador produto algébrico é dado pela Equação 1.

$$U_i = \prod_{i=1}^n W_i \quad (1)$$

Onde W_i é o valor de pertinência *fuzzy* para cada mapa que deverá ser combinado, U_i é o valor do pixel resultante. Os resultados tendem a ser muito pequenos quando se utiliza este operador, devido ao efeito de se multiplicar diversos números menores do que 1 (CÂMARA *et al.*, 2004). A soma algébrica “é complementar ao produto algébrico *Fuzzy*” (CÂMARA *et al.*, 2004, p. 11), e é representada pela Equação 2.

$$U_i = 1 - \prod_{i=1}^n W_i (1 - W_i) \quad (2)$$

“O resultado desta operação é sempre um valor maior ou igual ao maior valor de pertinência *fuzzy* de entrada. O efeito desta operação é, portanto, de aumentar o valor de pertinência” (CÂMARA *et al.*, 2004, p. 11). Observando-se as equações, conclui-se que enquanto o produto algébrico é um produto algébrico, a soma algébrica *Fuzzy*, não é uma simples soma algébrica (ESCADA, 1998). Já o operador *Gamma* inclui o produto entre a soma algébrica *Fuzzy* e produto algébrico *Fuzzy*, de acordo com a Equação 3 (ESCADA, 1998, p. 9; KAYASTHA *et al.*, 2013a; MARJANOVI e CAHA, 2011).

$$U_i = (1 - \prod_{i=1}^n W_i (1 - W_i))^\gamma (\prod_{i=1}^n W_i)^{1-\gamma} \quad (3)$$

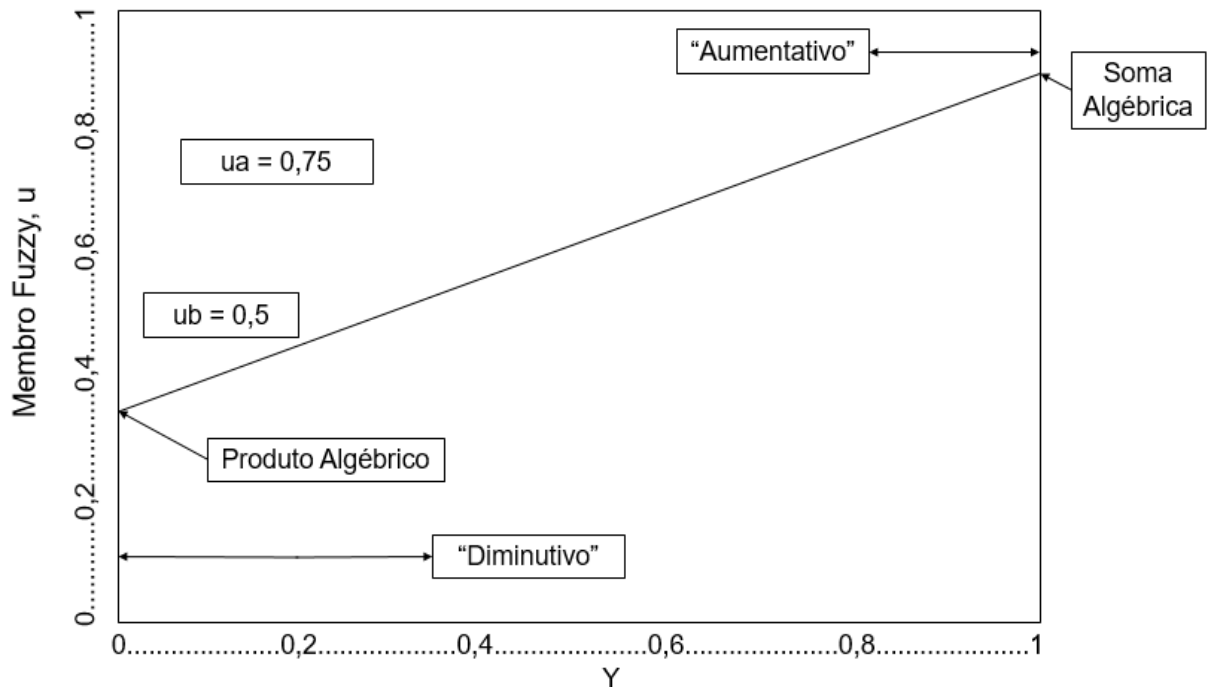
Onde γ é o valor *Gamma* que varia de 0 a 1 e W_i é o valor de pertinência *Fuzzy* para cada mapa que deverão ser combinados. “No operador *Gamma* pode-se variar a importância de cada termo (soma algébrica e produto algébrico *Fuzzy*). A importância de cada termo no operador *Gamma* é definida atribuindo-se valores entre (0,1) para o expoente γ ” (CÂMARA *et al.*, 2004, p. 11).

Esse operador executa a multiplicação dos membros dos diferentes mapas, sendo que o valor de saída de um dado ponto é sempre menor ou igual ao valor do menor membro *Fuzzy*. Isto ocorre devido a multiplicação de valores iguais ou menores que 1 (CÂMARA *et al.*, 2004).

Quando o valor *Gamma* for igual a 0, o resultado será igual ao produto algébrico, e quando igual a 1, o resultado será igual à soma algébrica. Os valores de *Gamma* entre 0 e 0,35 apresentam um caráter “diminutivo”, ou seja, sempre menor ou igual ao menor membro *Fuzzy* de entrada. Valores *Gamma* entre 0,8 e 1,0 terão um caráter “aumentativo” onde o valor de

saída será igual, ou maior que o valor do maior membro *Fuzzy* de entrada. Os valores de *Gamma* entre 0,35 e 0,8 não apresentam resultados nem de caráter “aumentativo” nem “diminutivo”, os valores de saída, cairão sempre entre o menor e o maior valor de entrada (BONHAM-CARTER, 1994). O Gráfico 1 demonstra de forma ilustrativa o comportamento desse operador.

Gráfico 1. Distribuição da função Fuzzy Gamma modificado.



Fonte: Câmara et al.(2004, p. 13).

No operador média ponderada AHP, os pesos de cada membro *Fuzzy* de entrada (evidência) assim como o valor de ponderação são definidos segundo a técnica de tomada de decisão AHP (CÂMARA *et al.*, 2004; SAATY, 1980). A equação desse operador é obtida da equação da média ponderada e pode ser descrita conforme Equação 4.

$$U_i = \frac{\sum_{i=1}^n W_i x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (4)$$

Onde W_i é o valor do peso da evidência de entrada calculada a partir do uso do AHP, e x_i é o valor de entrada da evidência, que pode ser obtida a partir de métodos empíricos com a ajuda de especialista, ou ainda com o uso do empirismo com auxílio do AHP (CÂMARA *et al.*, 2004).

De acordo com Meirelles *et al.* (2007), na comparação de vários operadores *Fuzzy* com o objetivo de realizar mapeamento a respeito de pesquisas minerais, foi concluído que o operador média ponderada AHP apresentou os melhores resultados de acurácia da validação

dos dados em campo.

4. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

4.1 CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

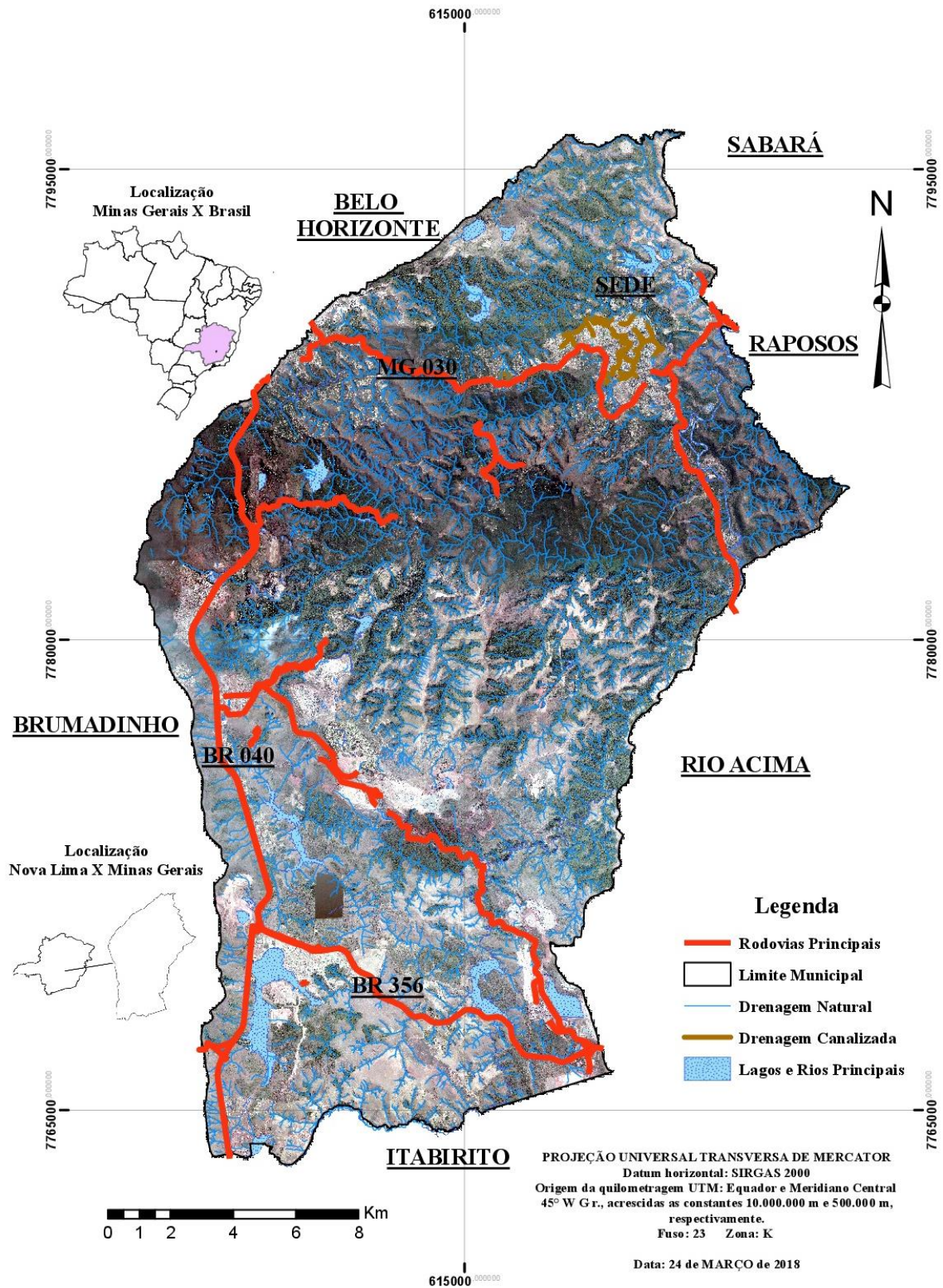
Á área de estudo localiza-se no município de Nova Lima/MG, situado na porção central do Estado de Minas Gerais e na Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH (Figura 7). Com área de aproximadamente 429 km², a cidade possui população estimada de 81 mil habitantes (IBGE, 2010) e está situada a 745 metros de elevação acima do mar, em região montanhosa caracterizada por formações geológicas, principalmente, dos supergrupos Minas e Rio das Velhas, bem como solos predominantemente de categorias Cambissolos e Neossolos (CPRM, 2015; UFV et al. 2010).

De acordo com IGAM (2015), a Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas compreende um território de 29.173 km², que corresponde cerca de 5% da superfície de todo o Estado de Minas Gerais e onde estão localizados 51 municípios. Suas águas são drenadas pelo Rio das Velhas na direção norte. O Rio das Velhas nasce na Cachoeira das Andorinhas, localizada no município de Ouro Preto/MG, a uma altitude de aproximadamente 1.500 m, percorre cerca de 800 km e deságua no rio São Francisco em Barra Guaicuí, distrito de Várzea da Palma, a uma altitude de 478 m, tendo uma vazão média de 300 m³ /s. O padrão da rede de drenagem da maioria dos cursos d'água da bacia tem características dendrítico, comum nas regiões de rochas cristalinas ou rochas do embasamento.

O município de Nova Lima/MG encontra-se inserido no trecho pertencente ao Alto do Rio das Velhas e ocupa 1,10% da área territorial da bacia. Segundo Nonato (2007) um dos principais mananciais de abastecimento urbano de água da cidade de Belo Horizonte é representado por parte do Rio das Velhas pertencente a Nova Lima/MG, atendendo cerca de 50% da população belorizontina.

A hidrografia da região de Nova Lima/MG, assim como a do alto curso do Rio das Velhas, é marcada por uma dinâmica fluvial descontínua afetada por variações nas características geomorfológicas e geológicas.

Figura 7. Mapa de Localização do Município de Nova Lima/MG em relação a Minas Gerais e o Brasil.



Fonte: adaptado de CPRM (2015).

A precipitação média anual na região pode variar entre 1566 a 1712 mm, além disso o município margeia parte do Rio das Velhas, em local próximo das sub-bacias do Rio Peixe,

Ribeirão dos Macados, Ribeirão Água suja e Córrego Cambibe (CPRM, 2011; PMSB, 2016)

4.2 DADOS E MATERIAIS

Os materiais utilizados no presente estudo foram:

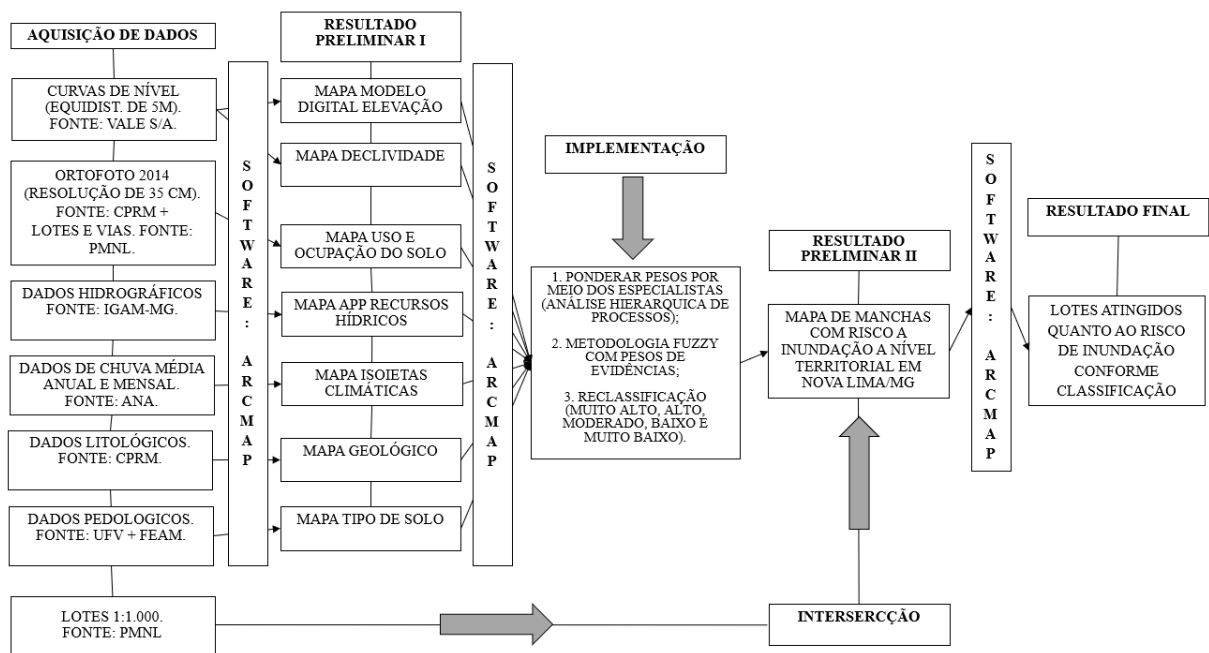
- i. MDE obtido por meio de interpolação das curvas de nível com equidistância de 5 metros na escala 1:10.000 (**PMSB, 2016**);
- ii. Mapa de declividade na escala 1:10.000 com classes determinadas conforme plano diretor do município Lei n° 2007/2007 (**PDM-NL, 2015**);
- iii. Mapa de uso e cobertura do solo na escala 1:50.000 (**CPRM, 2005**);
- iv. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais, Folha 04, escala 1:650.000 (**UFV et al, 2010**);
- v. Mapa Geológico de Minas Gerais, escala 1:50.000 (**UFMG/CODEMIG, 2005**);
- vi. Mapa de isoietas climáticas retirados do Atlas Pluviométrico do Brasil na escala 1:5.000.000 (**CPRM, 2011**);
- vii. Mapa da hidrografia escala 1:10.000 (**PMSB-NL, 2016**);
- viii. Mapas de áreas sob risco e suscetibilidade de inundação na escala 1:50.000 (**CPRM, 2015**; **SEMAD, 2015**);
- ix. Mapa de delimitação de lotes de Nova Lima/MG na escala 1:1.000 (**PMNL, 2017**); e
- x. Programa ArcGIS versão 10.5 (**ESRI, 2016**).

4.3 MÉTODOS

A metodologia, conforme fluxograma da Figura 8, foi desenvolvida em 7 partes principais: i) compilação e pre-processamento dos dados de entrada (recorte para a área de interesse, padronização de datum e sistema de projeção para todos os mapas de entrada); ii) envio de questionário para especialistas das áreas sobre a probabilidade de cada classe mapeada favorecer ou não ao evento de inundação, bem como consulta à bibliografia específica sobre o assunto; iii) aplicação da AHP para determinar quais variáveis têm mais influência no fenômeno de inundação para o município de Nova Lima/MG ; iv) processamento dos dados de entrada por meio da aplicação da lógica fuzzy com base nos valores de classe obtidos das respostas dos especialistas; v) aplicação da álgebra de mapas

nos dados processados e categorização do resultado final; vi) validação dos resultados por meio do seu cruzamento com informações sobre áreas vulneráveis à inundação, compiladas do Atlas de Vulnerabilidade à Inundação de Minas Gerais de 2015, do Mapas de áreas sob risco e suscetibilidade de inundação de 2015 e de relatos de moradores, notícias na mídia local e estadual nos anos de 2012, 2017 e 2018; e vii) cruzamento e análise dos dados obtidos com os lotes cadastrados do município de Nova Lima/MG para determinar seu risco de inundação.

Figura 8. Fluxograma da Metodologia Proposta.



Fonte: Elaboração do Autor.

4.3.1 PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA

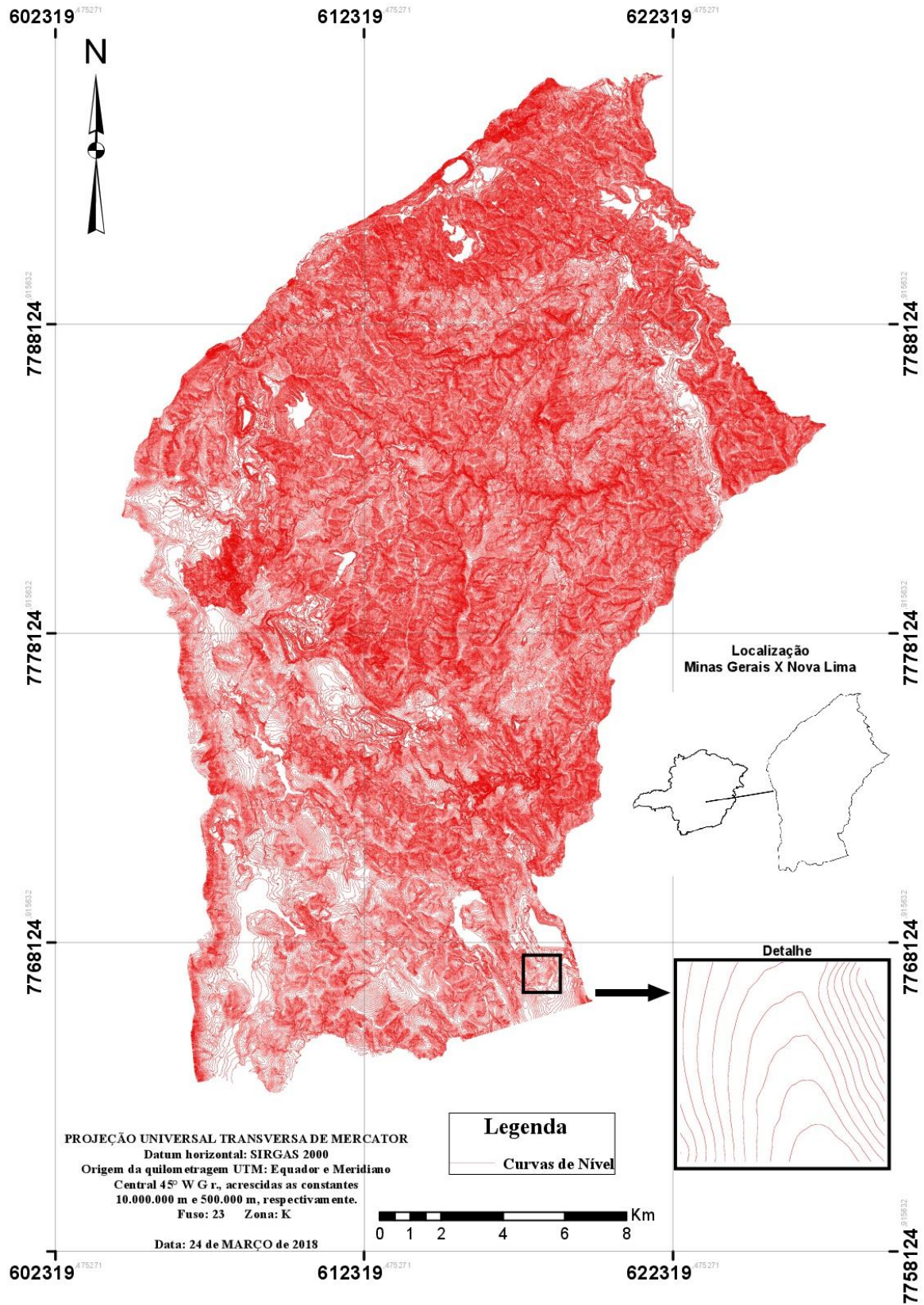
Na Primeira etapa, o sistema de coordenadas planas UTM, Zona 23 Sul e Datum SIRGAS 2000 foram definidos como referência. Em seguida foram realizados os recortes para a área referente ao limite do Município de Nova Lima/MG. O processamento para cada base cartográfica utilizada é descrito no texto que se segue:

4.3.1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)

A elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo foi realizada com base em levantamentos planialtimétricos realizados nos anos de 2008, 2009 e 2012 disponibilizados pela empresa VALE S.A junto ao Plano Municipal de Saneamento Básico do

município de Nova Lima/MG cedidos pelo Departamento de Geoprocessamento (DGEO) da prefeitura municipal. A base planialtimétrica original é composta por mosaicos de curvas de nível com equidistância vertical de 5 (cinco) metros no Datum SAD 69, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9. Mapa de curvas de nível com equidistância vertical de 5 (cinco) em 5 (cinco) metros

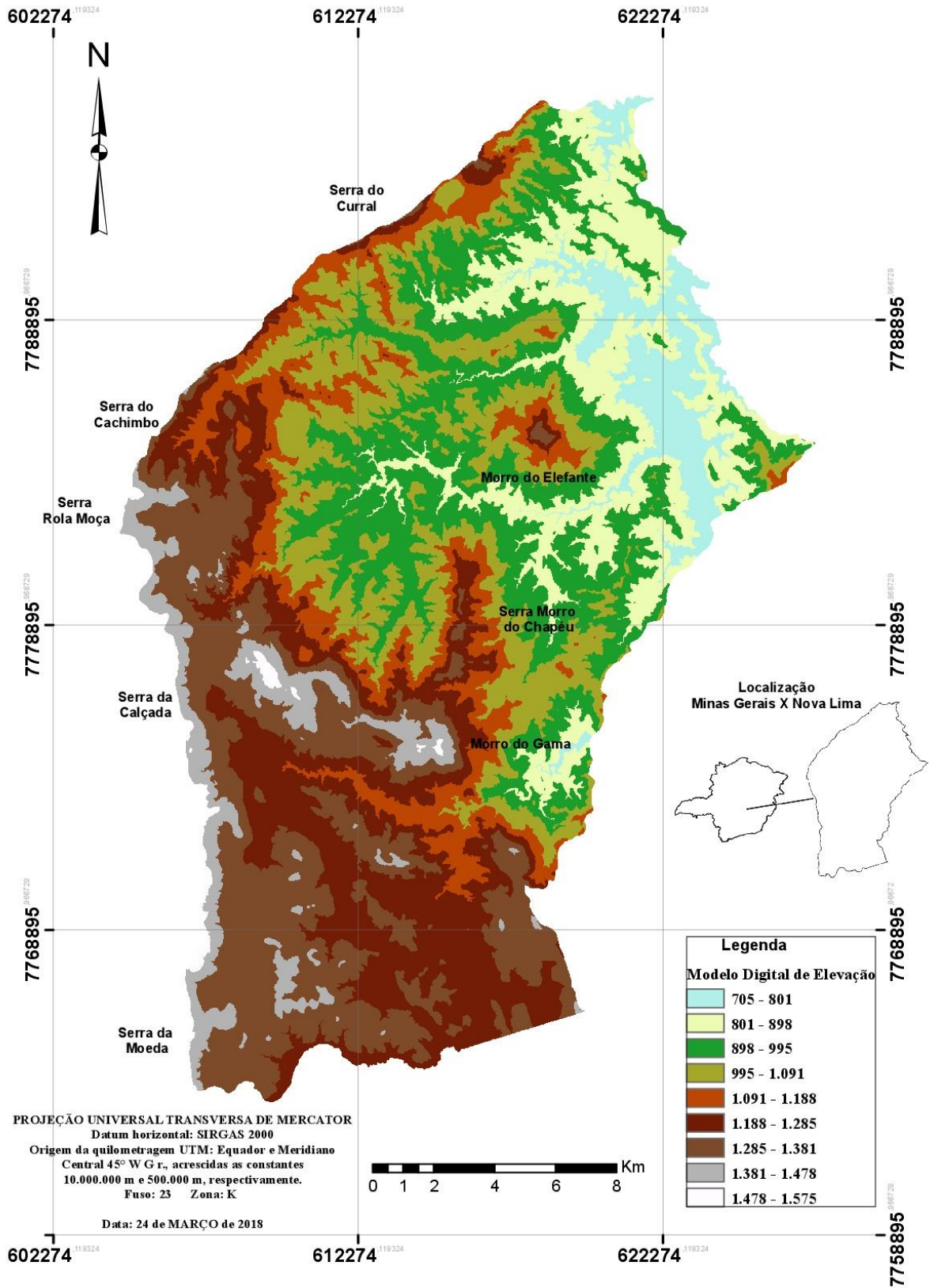


Fonte: Adaptado de PMSB (2016).

Após a mosaicagem, foi realizada a conversão do Datum SAD 69 para SIRGAS

2000 utilizando os parâmetros definidos em BRASIL (2005) e IBGE (2005). Em seguida, por meio do *ArcGIS 3D Analyst Tools* e da ferramenta *Raster Interpolation* módulo *Topo to Raster*, obteve-se o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC). Neste processamento, o método realizado pelo *software* (baseado no algoritmo ANUDEM – ESRI, 2012) permitiu criar uma malha regular retangular a partir da entrada de dados distribuídos irregularmente, em formato como os de pontos, polígonos e linhas, para gerar a representação da superfície estudada, conforme é possível observar na Figura 10.

Figura 10. Mapa de MDE do município de Nova Lima/MG gerado no ArcMap por meio de curvas de nível com equidistância vertical de 5 (cinco) metros fornecidos pela VALE S/A e adaptado pelo autor.



Fonte: adaptado do PMSB (2016).

4.3.1.2 MAPA DE DECLIVIDADE

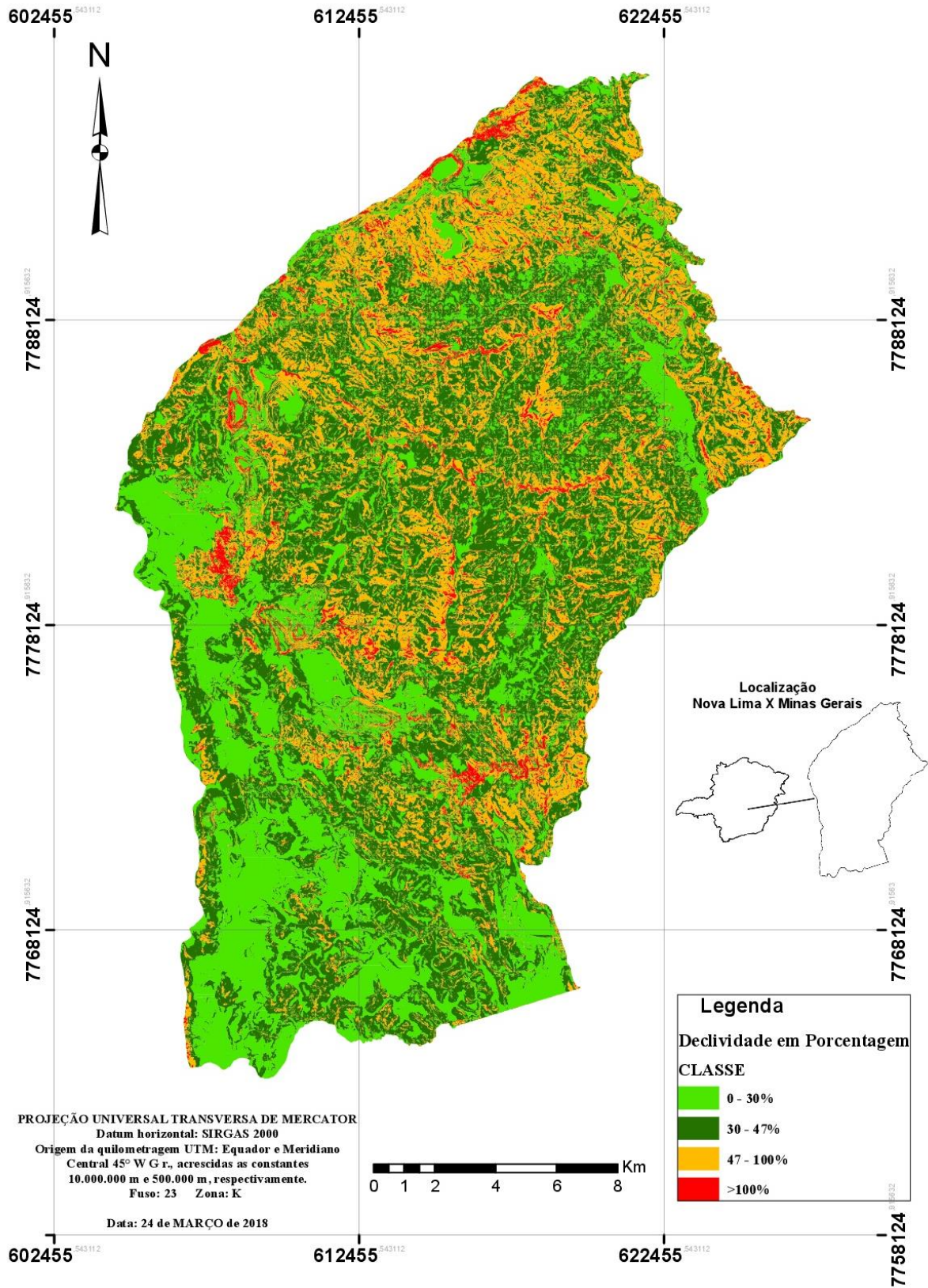
O mapa de declividade foi gerado mediante o arquivo vetorial de curvas de níveis com equidistância vertical de cinco metros disponibilizados pela Vale S/A. utilizando-se o *software ArcGIS* e aplicando-se a ferramenta *slope* da extensão *3D Analyst*. Com a obtenção do mapa de declividade, a próxima etapa foi a determinação das classes de declividade, baseados nos intervalos em porcentagem propostos pelo plano diretor (Lei Municipal 2007/2007) ou aprovadas por lei municipal conforme estipula o art. 3º da Lei Federal nº 6.766/1979 que versa sobre o parcelamento de solos urbanos. Esses intervalos são definidos de acordo com a Lei Municipal 2007/2007, de acordo com a Tabela 1 e Figura 11.

Tabela 1. Classes de Declividade do Município de Nova Lima/MG.

Classes de Declividade em %	Área (ha)	%
0 – 30%	12.392,305	27,12
30 – 47%	20.887,185	45,70
47 – 100%	10.403,063	22,76
>100%	2.017,818	4,42
Total	45.700,37	100,00

Fonte: adaptado do PMSB (2016).

Figura 11. Mapa de Declividade de Nova Lima/MG baseado no MDE da Figura 10.



Fonte: adaptado do PMSB (2016).

4.3.1.3 MAPA DE USO E COBERTURA DO SOLO

A definição das classes de uso e ocupação do solo e cobertura vegetal do município (Figura 13) foi realizada a partir da compilação das classificações de uso e ocupação do solo realizadas anteriormente pelo projeto APASUL RMBH, em estudos do meio físico (2005) e pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF), resultando no conjunto de classes apresentado na Tabela 2.

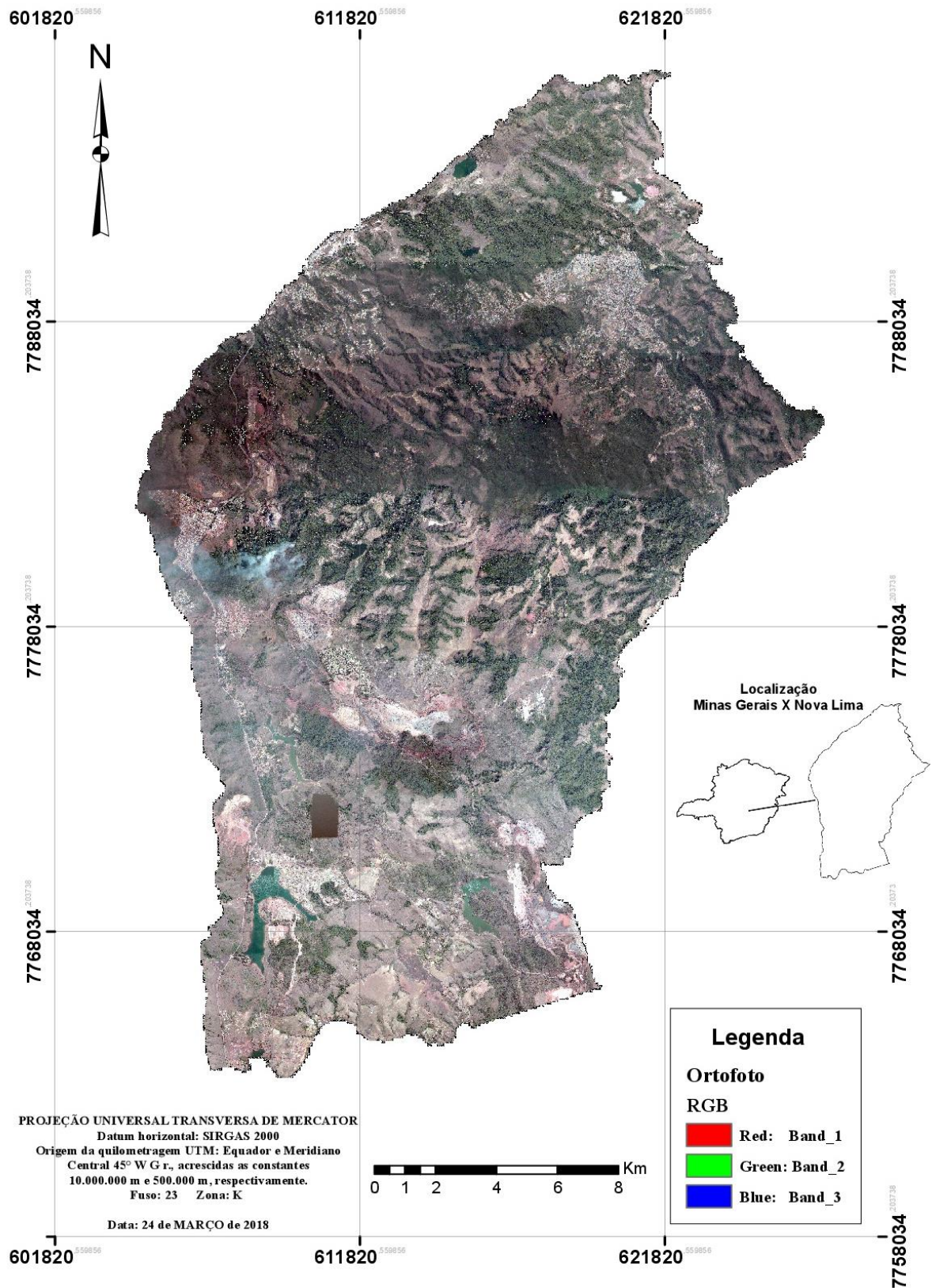
Tabela 2. Classes de Uso e Cobertura do Solo.

Classes de Uso e Cobertura do Solo	Área (ha)	Porcentagem (%)
Campo, Cerrado e Pastagem	19.306,06	45,08
Cultivo – Agricultura	71,17	0,17
Edificações e Sistema Viário	2.107,88	4,92
Espelho d' Agua	957,57	2,24
Floresta Nativa	16.706,16	39,68
Silvicultura	1.577,73	3,68
Solo Exposto	2.098,70	4,19
Total	42.825,29	100,00

Fonte: Adaptado do Projeto APASUL RMBH e do PMSB (2016).

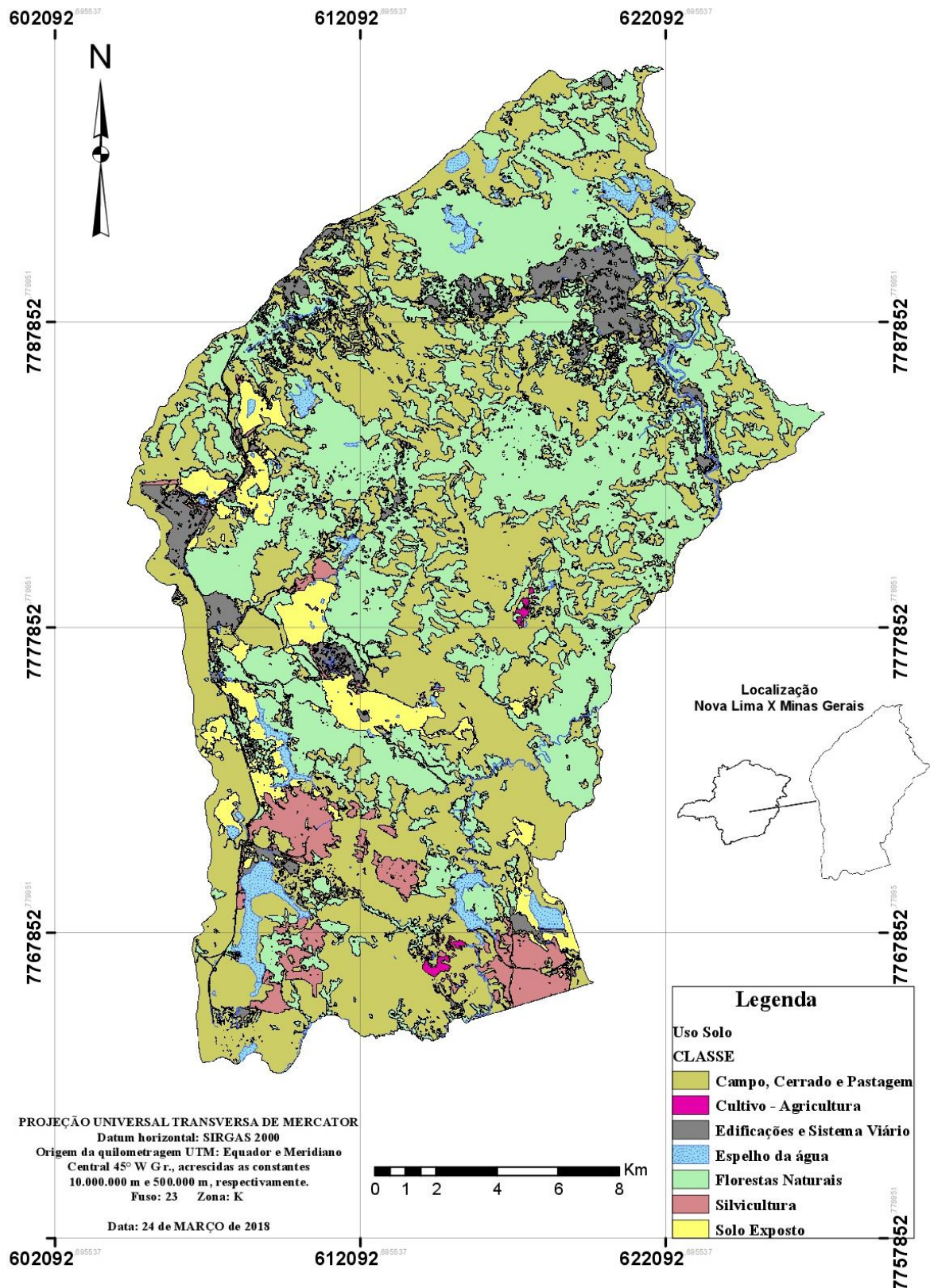
O processamento utilizou o método de classificação orientada a objeto para definição da ocorrência das tipologias presentes no terreno que abrangem o perímetro do município. A aplicação deste método iniciou-se pela segmentação baseada em objeto (multiresolução) (Figura 12), a qual, basicamente considera a heterogeneidade espacial (forma), a heterogeneidade espectral (cor) e a diferença dos objetos de entorno. A partir desses critérios, executa o crescimento de regiões para agregar pixels vizinhos. Esse processo termina quando o objeto excede o limiar (escala) definido pelo usuário. Após a segmentação é realizada a classificação onde os pixels separados pelo conjunto de critérios antes mencionado e correlacionado a tipologias do mundo real existentes na área de mapeamento. Para consolidação da segmentação são coletadas amostras características das tipologias que embasarão a classificação.

Figura 12. Ortofoto de 2014 de Nova Lima/MG



Fonte: Imagens disponibilizada pela CPRM (2015) convênio com IGTEC/Fototerra, nas bandas vermelho, verde e azul com resolução espacial de 35 centímetros e adaptado pelo autor.

Figura 13. Mapa de uso e cobertura do solo baseado na ortofoto da Figura 12.



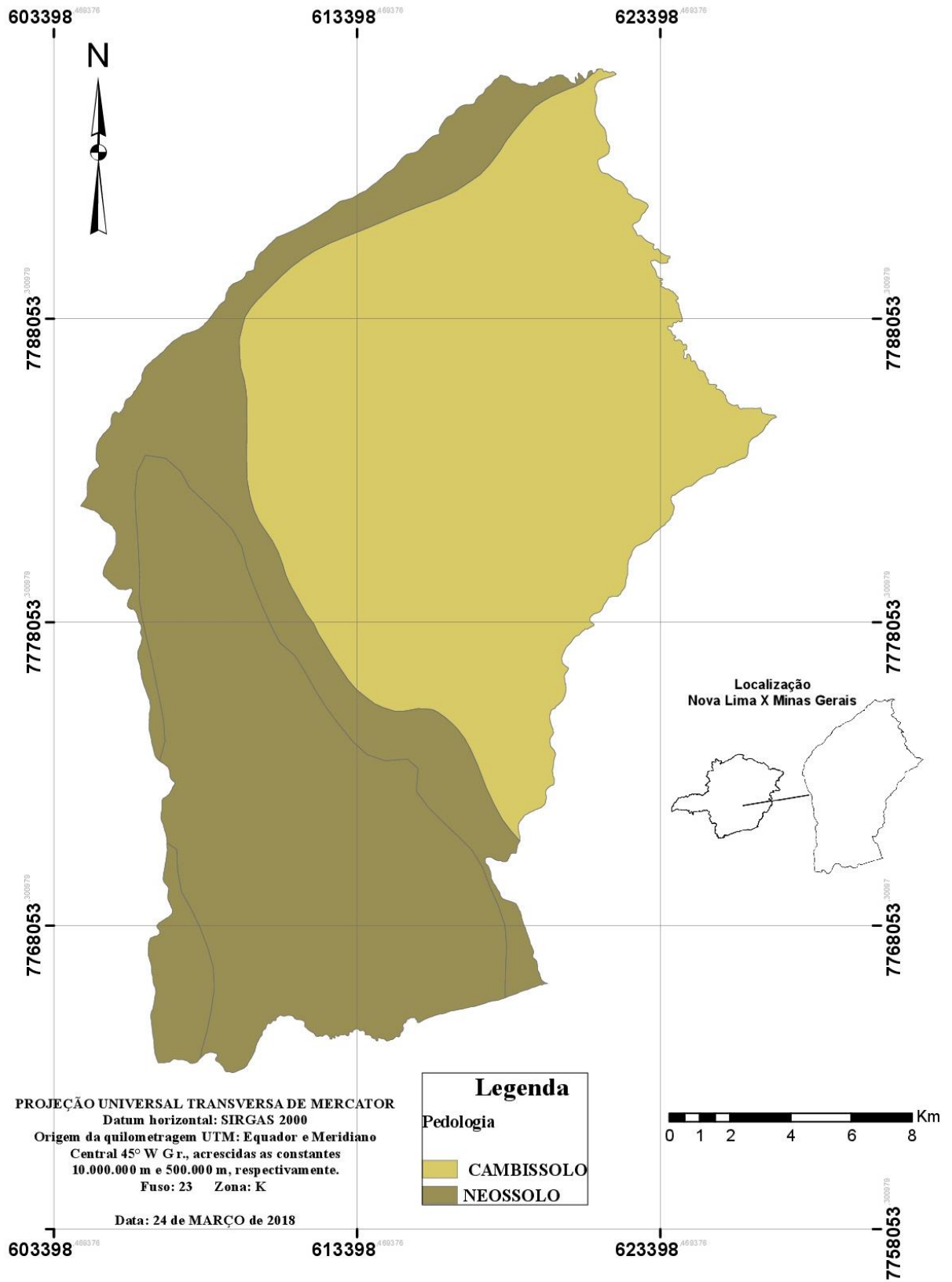
Fonte: disponibilizada pela CPRM (2015) e adaptado pelo autor.

4.3.1.4 TIPO DE SOLO

O mapa dos tipos de solos foi obtido por intermédio da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), que disponibiliza na rede os dados sobre o mapeamento de solos no estado de Minas Gerais (Figura 14). A FEAM, entidade que faz parte do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA), publica os manuais que são resultados das ações desenvolvidas dentro do projeto: “Banco de Solos do Estado de Minas” que faz parte do Programa Solos de Minas, uma das ações do projeto estruturador “Resíduos Sólidos”.

Os manuais foram elaborados em parceria com as Universidades Federais de Viçosa, Lavras e Ouro Preto, além da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Os manuais têm o objetivo de fixar procedimentos de amostragem e análises químicas de solos de forma a torná-los padronizados para o estado de Minas Gerais, possibilitando assim a comparação de resultados de análises de metais e semi-metais em áreas minimamente antropizadas.

Figura 14. Mapa de Tipo de Solo. Adaptado do Mapa de Solos de Minas Gerais.

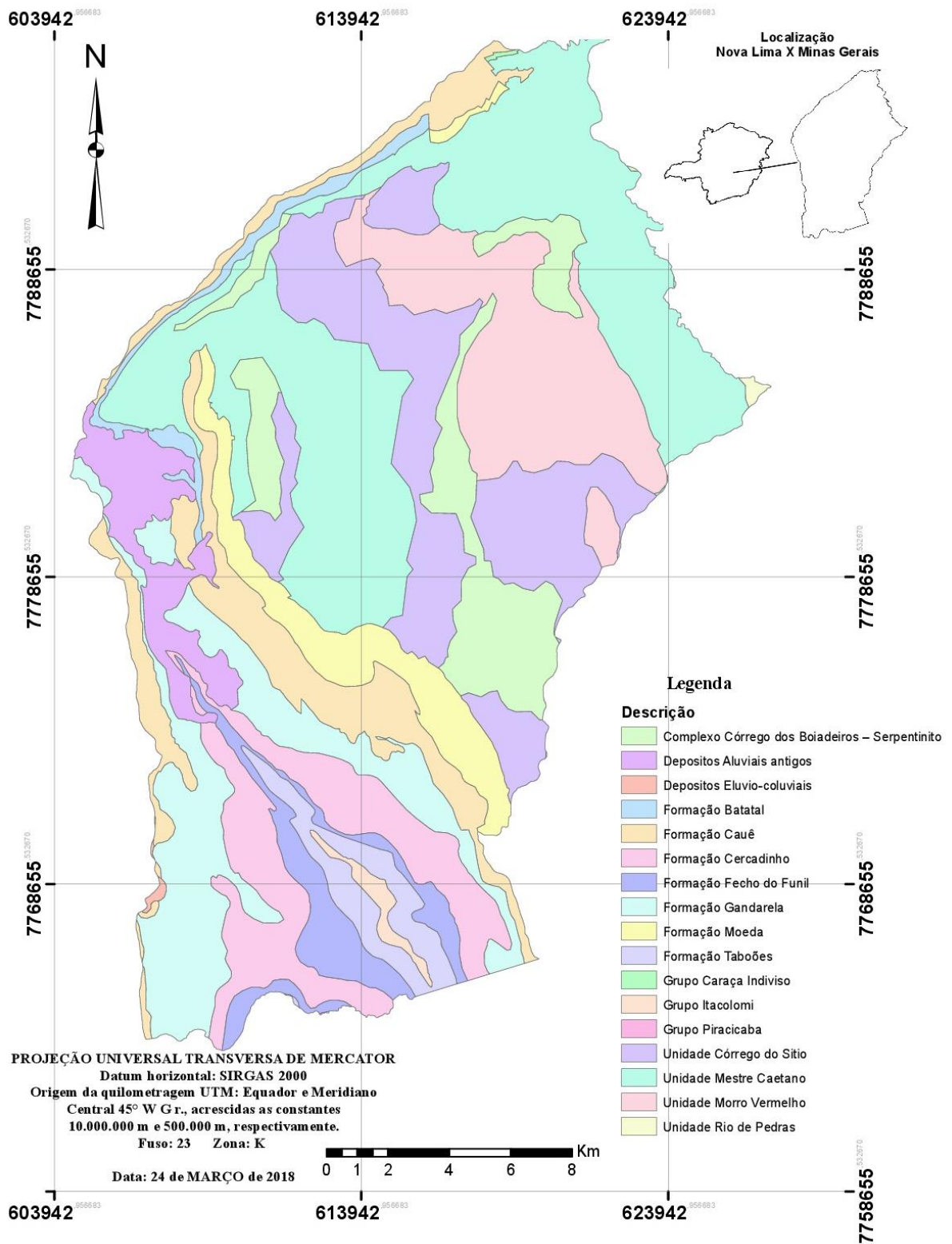


Fonte: (UFV, 2010).

4.3.1.5 MAPA GEOLÓGICO

A caracterização geológica do município de Nova Lima/MG foi realizada com base no mapa geológico das folhas de Belo Horizonte e Itabirito 1:50 000 da UFMG /CODEMIG (2005). A distribuição espacial das principais unidades geológicas em sua litologia que ocorrem na área de estudo pode ser verificada na Figura 15.

Figura 15. Mapa geológico municipal adaptado do mapa geológico das folhas Belo Horizonte e Itabirito 1:50.000 da UFMG /CODEMIG (2005).

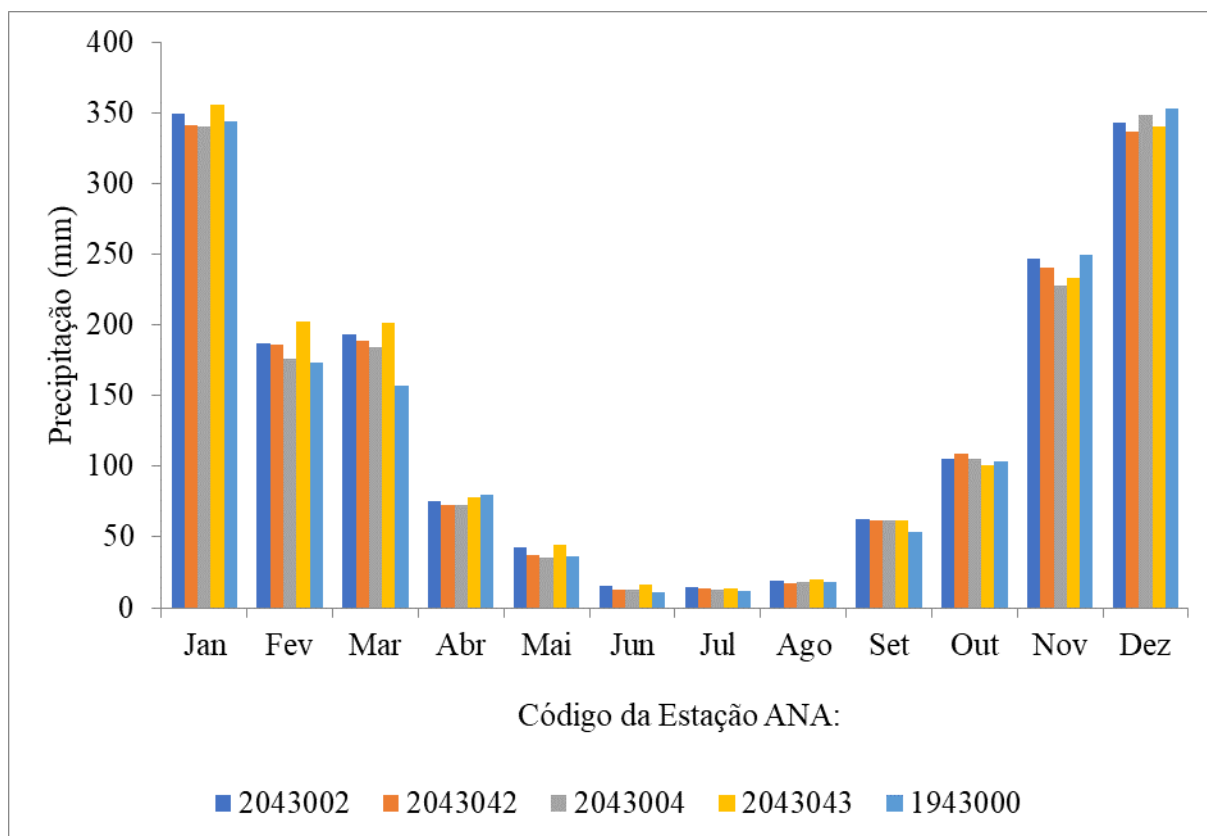


Fonte: Adaptado de CPRM(2005).

4.3.1.6 MAPA DE ISOIETAS CLIMÁTICAS

Os dados de precipitação do município de Nova Lima/MG e região foram obtidos através de 5 (cinco) estações pluviométricas, apresentados no Gráfico 2, retirados do Atlas Pluviométrico do Brasil disponibilizado pela CPRM (2014), no período de 1977 a 2006.

Gráfico 2. Dados de precipitação médio mensal e anual para cada uma das estações.

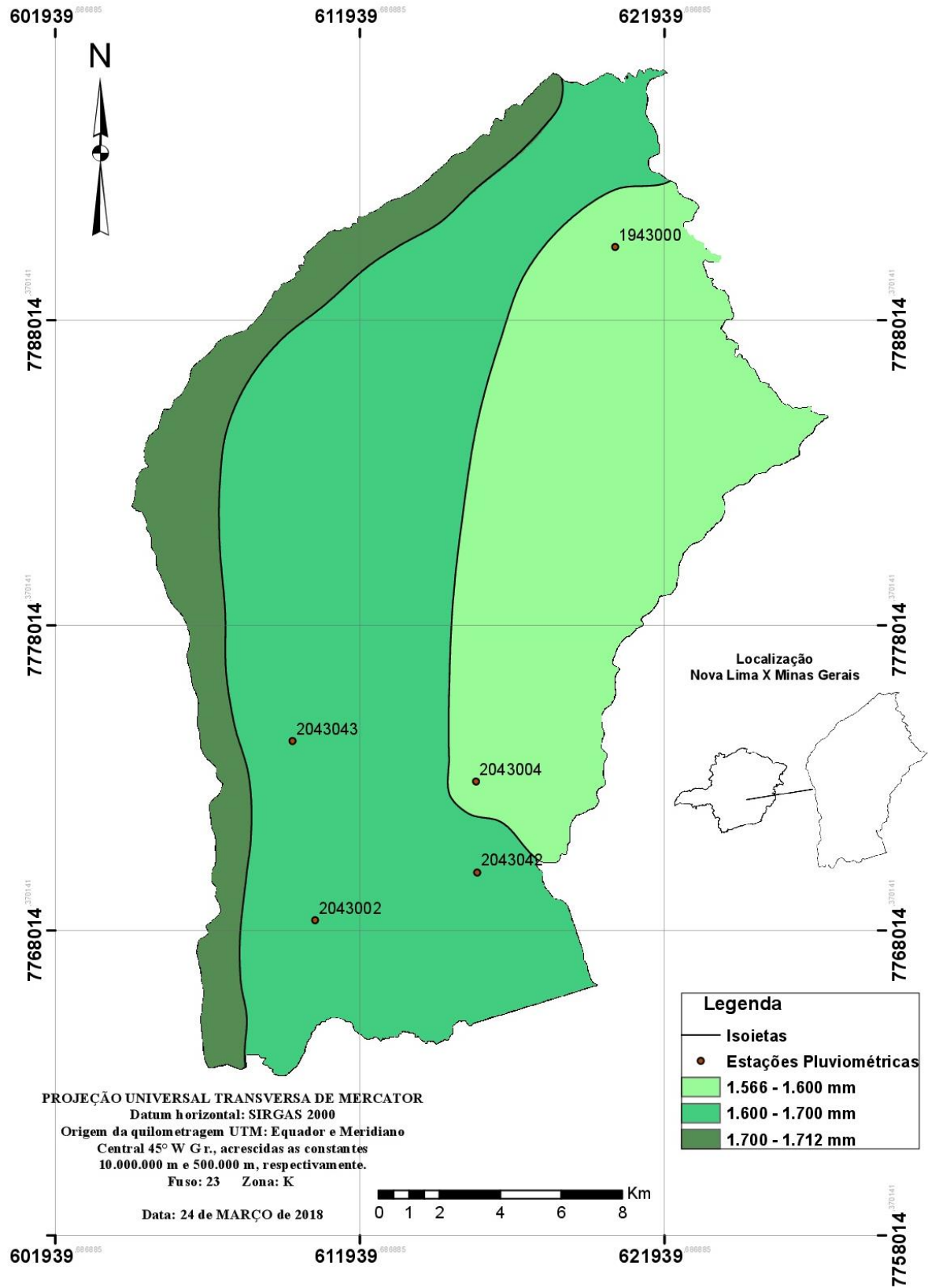


Fonte Atlas Pluviométrico do Brasil, (CPRM, 2011) adaptado.

Para a elaboração dos mapas de isoietas utilizou o programa *ARCMAP* escolhendo o método de interpolação por krigagem, utilizada para se estimar a variável de interesse em um ponto não amostrado, o qual permite estimar o valor desconhecido associado a um ponto, área ou volume, a partir de um conjunto de n dados $\{Z(x_i), i=1, n\}$ disponíveis (MELLO, 2003).

A aplicação prática da krigagem pontual é voltada para a representação gráfica de dados geográficos, seja por mapas de isovalores (isotermas, isoietas) bem como por meio de superfícies tridimensionais, obtidas pela projeção perspectiva da malha regular (BARBOSA, 2006), ver Figura 16.

Figura 16. Mapa de Isoietas, das chuvas médias anuais de 1977 a 2006, do Município de Nova Lima/MG.

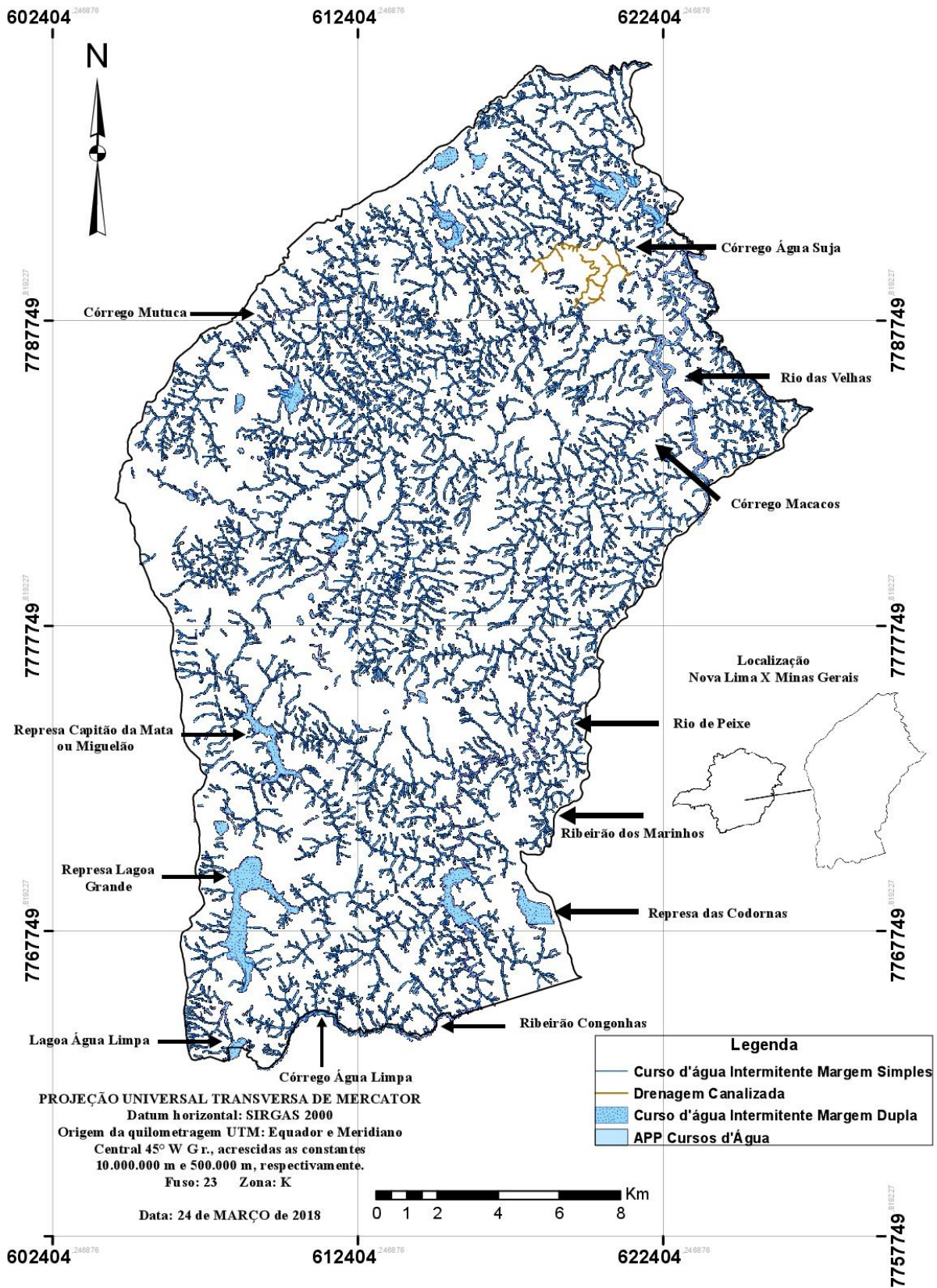


Fonte: adaptado do PMSB (2015).

4.3.1.7 MAPA APP HIDROGRÁFICO

O mapa de APP de drenagem do município de Nova Lima/MG (Figura 17) foi obtido a partir dos dados geoprocessados da CPRM (2005) em formato compatível com o software *ARCMAP* 10.5 e ajustado em acordo com novo código florestal segundo BRASIL (2012). Onde as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, ocorrem desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura e 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura.

Figura 17. Mapa de APP Drenagem do Município de Nova Lima/MG.



Fonte: adaptado do PMSB (2015).

4.3.2 APLICAÇÃO DE QUESTIONÁRIO AOS ESPECIALISTAS

Na segunda etapa, de aplicação do questionário, foi realizado uma pesquisa entre professores das áreas de hidrologia, climatologia, solos e geologia dos programas de pós-graduação de Universidades Federais. Após a pesquisa, foram enviados e-mails para os professores especialistas em cada área de interesse, explicando o contexto, o problema que se pretendia avaliar e pedindo suas sugestões para atribuir pesos às classes presentes em cada variável ambiental adotada baseadas nos estudos realizados por Wright e Giovinazzo, (2000).

4.3.3 ANÁLISE HIERARQUICA DE PROCESSOS (AHP)

Na terceira etapa, realizou-se uma organização das variáveis adotadas no estudo em uma matriz de comparação par-a-par e em seguida realizados julgamentos de níveis de importância de uma variável em relação à outra, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Matriz de comparação pareada entre as variáveis utilizadas no estudo do risco à inundação no Município de Nova Lima/MG.

Variáveis	MDE	Declividade	Uso do solo	Pedologia	Geologia	Isoietas	Hidrografia
MDE	1,00	3,00	2,00	6,00	7,00	0,50	0,33
Declividade	0,33	1,00	2,00	2,00	4,00	2,00	0,33
Uso e cobertura	0,50	0,50	1,00	3,00	5,00	0,50	0,33
Pedologia	0,16	0,50	0,33	1,00	3,00	0,33	0,25
Geologia	0,16	0,25	0,20	0,33	1,00	0,25	0,14
Isoietas	2,00	0,50	2,00	3,00	4,00	1,00	0,50
Hidrografia	3,00	3,00	3,00	4,00	6,00	2,00	1,00
Total	7,15	8,75	10,53	19,33	30,00	6,58	2,88

Fonte: Adaptado com dados do trabalho, com base metodologia de Saaty (1980).

Após os julgamentos, a matriz foi normalizada e em seguida extraídos os seus autovalores, que são os pesos de ponderações ao realizar a álgebra de mapas. Depois de normalizada, extraíram-se os autovetores da matriz para realização do cálculo do índice de consistência com base na metodologia desenvolvida em Saaty (1980).

4.3.4 PROCESSAMENTO FUZZY

Na quarta etapa, de posse dos pesos dos especialistas, foi realizado um processamento *Fuzzy* de modo a padronizar a escala de análise dos especialistas (1 a 9) para a escala de risco variando de 0 a 1 e em seguida realizou a álgebra de mapas com base nos

resultados nos mapas padronizados e as ponderações resultantes da AHP.

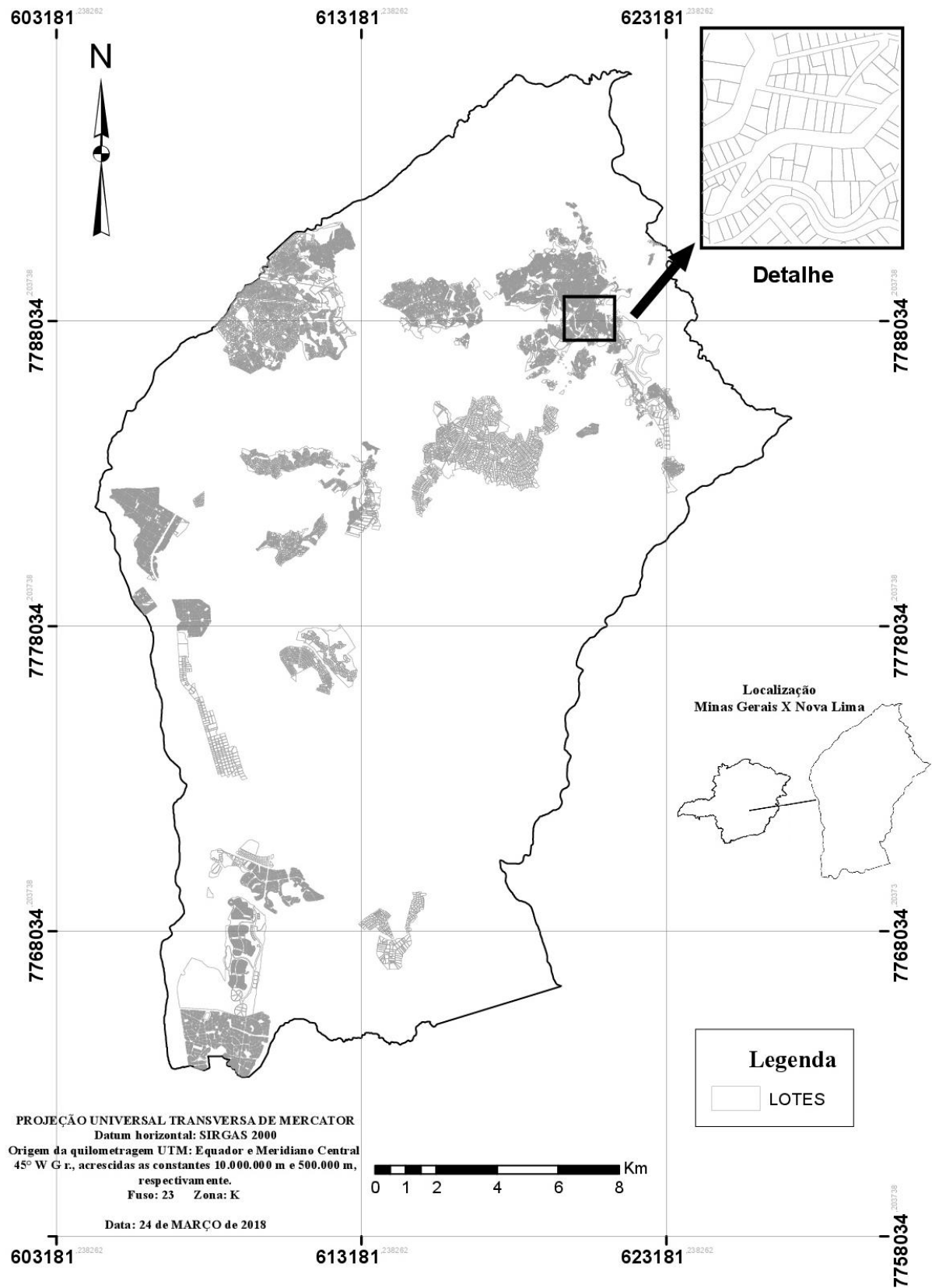
4.3.5 COMPARAÇÃO COM ÁREAS VULNERÁVEIS E PONTOS DE INUNDAÇÃO PREVIAMENTE MAPEADOS

Na quinta etapa, primeiramente foi realizada a união espacial de áreas previamente mapeadas sob vulnerabilidade à inundação, com o seguinte enfoque: a) manchas estimadas de inundação obtidas do PMSB (2016) e; b) trechos sob susceptibilidade   inundação obtidas junto à CPRM (2015). Em seguida essas áreas foram cruzadas com os resultados obtidos para verificar qual o percentual de sobreposição com classes de riscos mais elevadas estimadas no presente estudo. Além disso, foram realizadas análises sobre pontos de alagamentos severos que aconteceram entre os anos de 2012, 2017 e 2018 no município de Nova Lima/MG.

4.3.6 ANÁLISE DOS LOTEAMENTOS CADASTRADOS QUANTO AO RISCO   INUNDAÇÃO

Os dados apresentados na Figura 18 foram obtidos do DGEO de Nova Lima/MG (PMNL, 2017) são dados geoprocessados de todos os loteamentos municipais existentes e de todos os lotes cadastrados em sua base de dados em escala 1:1.000. Assim, para essa última etapa de análise verificou-se em relação às classes de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto)   inundação os lotes atingidos em razão da condição crescente para a susceptibilidade ao fenômeno natural.

Figura 18. Mapa de lotes cadastrados em um total de 41.521.



Fonte: adaptado de PMNL (2017) conforme DGEO de Nova Lima/MG.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO *FUZZY* NOS MAPAS DE ENTRADA

5.1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)

A avaliação dos especialistas para o MDE em relação ao risco de inundação, apresentou valores médios, por intervalo de classe de altitudes, variando de 1 a 9, indicando que quanto menor o valor médio da altitude, maior é o risco à inundação. Nesse sentido, em relação especificamente à altimetria, as classes de altitude variando de 705 a 801 m, podem ser caracterizadas como as regiões de maiores riscos à inundação do município. Isso se deve ao fato de que o peso atribuído pelos dois especialistas foi o peso máximo e, conseqüentemente, valor médio igual a 9, conforme apresentado na Tabela 4.

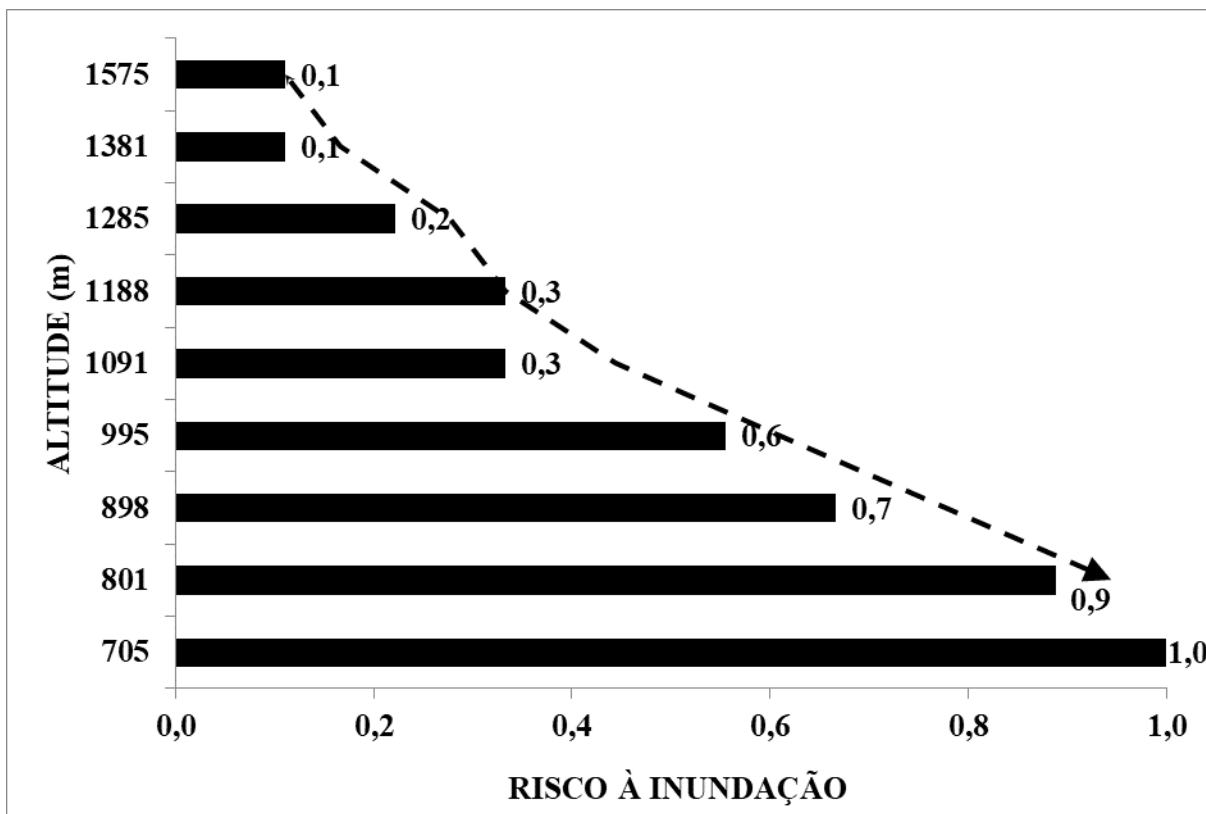
Tabela 4. Pesos atribuídos pelos especialistas para as classes de altitude mapeadas para o município de Nova Lima/MG.

Classes	Especialista 1	Especialista 2	Média	Fuzzy
705 - 800	9	9	9	1.0
801 - 898	7	9	8	0.9
899 - 995	5	7	6	0.7
996 - 1.091	3	7	5	0.6
1.092 - 1.188	1	5	3	0.3
1.189 - 1.285	1	5	3	0.3
1.286 - 1.381	1	3	2	0.2
1.382 - 1.478	1	1	1	0.1
1.479 - 1.575	1	1	1	0.1

Fonte: Elaboração do autor.

Os dois especialistas demonstraram concordância para uma tendência decrescente de pesos à média que as altitudes do terreno aumentam, no entanto divergiram em maior grau na interpretação dos pesos das classes altitudinais intermediárias distribuídas entre os intervalos de 898 a 1381 m. A partir dos valores médios obtidos, padronizaram-se os resultados conforme o intervalo utilizado na lógica Fuzzy (0 a 1), os quais podem ser visualizados na Tabela 4 e no Gráfico 3.

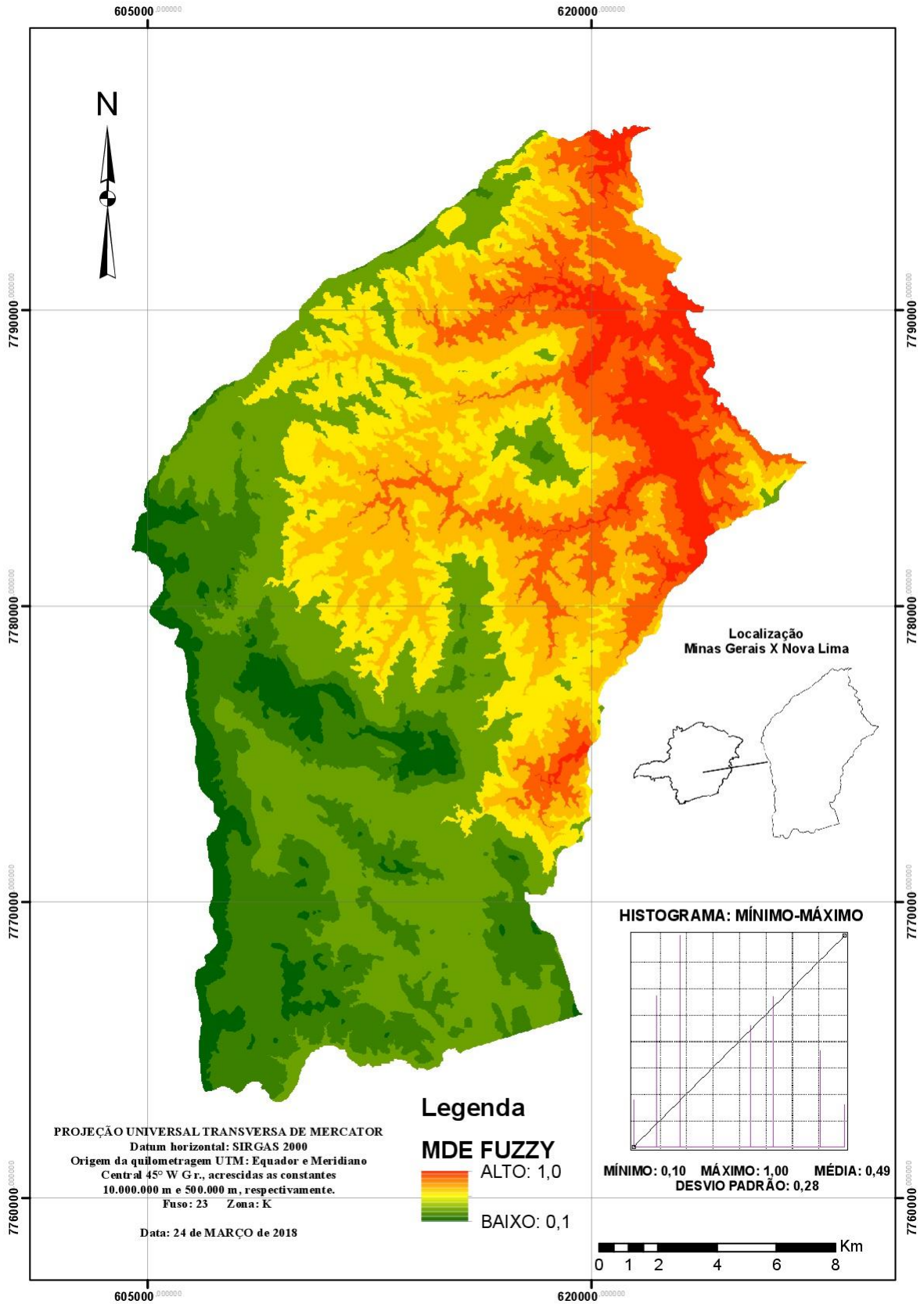
Gráfico 3. Escala de risco de inundação de acordo com o gradiente de altitude presente no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Eleaboração do autor.

De acordo com a Figura 19, a escala de risco de inundação varia de 0 a 1, à medida que os valores se aproximam de 1, o risco à inundação aumenta pelo fato de estar nas partes mais baixas do terreno e, conseqüentemente, mais próximos dos cursos d'água de maior porte, que podem apresentar inundações mais severas quando comparadas com cursos d'água de portes menores, devido ao escoamento de um maior volume de água em seus leitos.

Figura 19. Mapa Fuzzy correspondente às classes de altitude em relação ao risco à inundação no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

As áreas com maior risco à inundação em relação à altitude estão localizadas na porção norte e nordeste do município, entre 705 a 898 metros de altitude, já na porção sul, devido às maiores altitudes, o risco à inundação é reduzido.

5.1.2 DECLIVIDADE

Para a variável declividade, os especialistas atribuíram valores médios variando de 1 a 9, indicando que as classes de declividade dos intervalos de 0 a 30% são as regiões do município com maior risco à inundação e as classes de declividade acima de 100% são as de menores riscos. A primeira por apresentar média igual a 9 e a segunda por apresentar média igual a 1, conforme apresentado na Tabela 5.

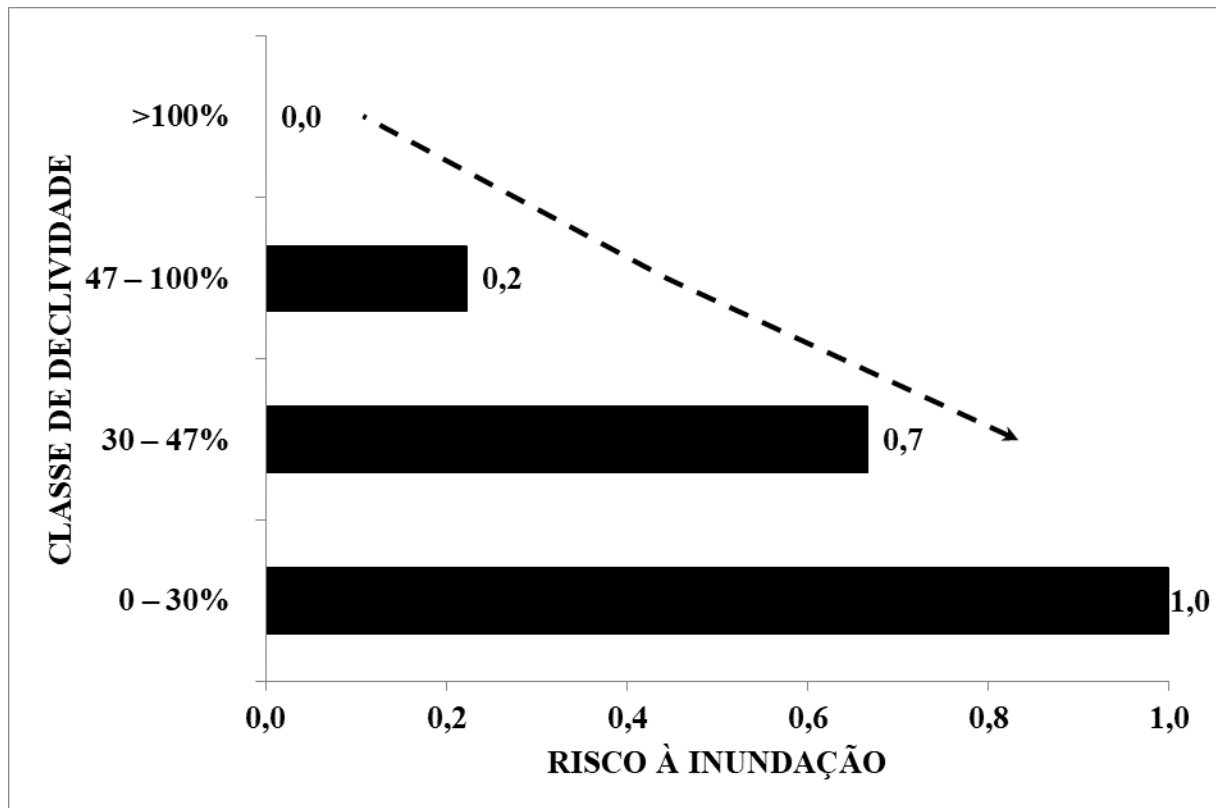
Tabela 5. Pesos atribuídos pelos especialistas para as classes de declividade mapeadas no município de Nova Lima/MG.

Classe	Especialista 1	Especialista 2	Média	Fuzzy
0 – 30%	9	9	9	1,0
30 – 47%	5	7	6	0,7
47 – 100%	1	3	2	0,2
>100%	1	1	1	0,0

Fonte: Elaboração do Autor.

A Tabela 5 demonstra que os especialistas concordaram em atribuir o valor máximo de risco à inundação para a classe de declividade variando de 0 a 30% e em atribuir o valor mínimo de risco para a classe de declividade acima de 100%. Além disso, é possível verificar pelas avaliações, que à medida que o relevo tende a ficar mais plano, maior é o risco de inundação, apesar de pesos diferentes quando as classes de intervalos variam de 30 a 100%. Os valores médios foram padronizados em intervalos de variações correspondentes à escala de 0 a 1, conforme apresentado no Gráfico 4.

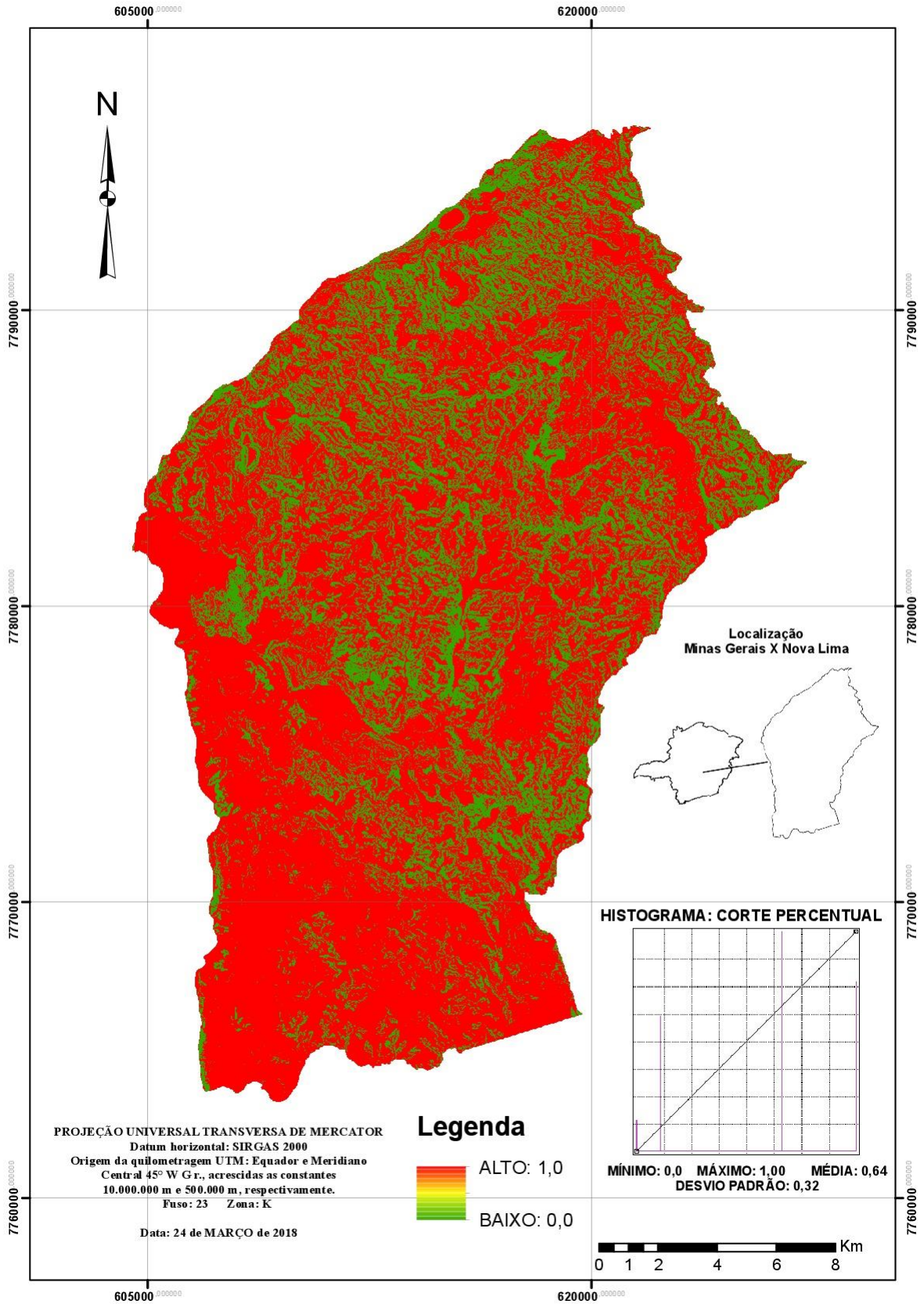
Gráfico 4. Escala de risco de inundação de acordo com as classes de declividade presente no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

O Gráfico 4 ilustra que quanto mais próximo de 1, maior é a contribuição do intervalo de classe de declividade para a ocorrência de inundações no município de Nova Lima/MG. À medida que os valores se aproximam de 0, o risco diminui pelo fato do relevo favorecer a um escoamento de água com maior velocidade e impedir seu acúmulo para formar inundação. Nesse sentido a Figura 20 mostra que as regiões montanhosas tendem a contribuir mais para a formação de enxurradas do que para a formação de inundações, as quais ocorrerão nas partes planas do terreno.

Figura 20. Mapa Fuzzy correspondente às classes de declividade em relação ao risco à inundação no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

A Figura 20 ilustra uma distribuição variável das classes de declividade no município, de modo que as regiões planas, representadas de vermelho e de maior risco à inundação, estão localizadas em maior concentração na porção sudoeste e sul. Já os locais representados pela cor verde, de menor risco à inundação, estão em regiões de serras e morros, concentrados na região central e porção norte do terreno.

5.1.3 USO E COBERTURA DO SOLO

Em relação ao uso e cobertura do solo, as médias dos pesos atribuídos pelos especialistas variaram de 2 a 8. Sendo as classes referentes às edificações-sistema viário e espelho d'água as consideradas de maior contribuição à ocorrência à inundação, com média de pesos igual a 8. A classe referente à floresta nativa foi classificada como a de menor contribuição, com média de pesos igual a 2 (Tabela 6).

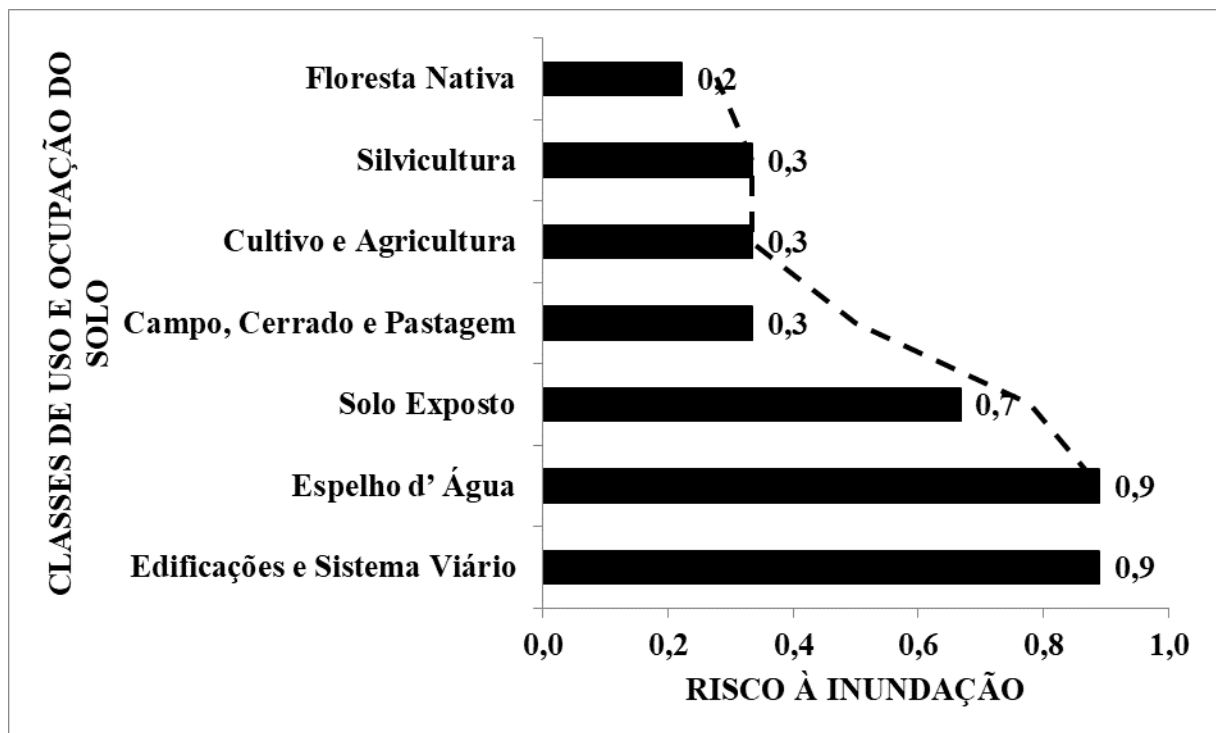
Tabela 6. Pesos atribuídos pelos especialistas para as classes de uso e cobertura do solo mapeadas no município de Nova Lima/MG.

Classe	Especialista 1	Especialista 2	Média	Fuzzy
Edificações e Sistema Viário	9	7	8	0,9
Espelho d' Água	9	7	8	0,9
Solo Exposto	9	3	6	0,7
Campo, Cerrado e Pastagem	3	3	3	0,3
Cultivo e Agricultura	3	3	3	0,3
Silvicultura	3	3	3	0,3
Floresta Nativa	1	3	2	0,2

Fonte: Elaboração do Autor.

A quantidade de especialistas pesquisados concordaram em atribuir maiores valores de pesos à medida que a área ocupada aumenta o grau de antropização e impermeabilização. No entanto, as escalas de pesos adotadas divergiram, de modo que o primeiro atingiu peso máximo (9) para as classes de edificações, sistema viário e espelho d'água, enquanto o segundo obteve peso 7, o que refletiu na escala de risco de inundação conforme a classe de uso e cobertura do solo no município, conforme Gráfico 5.

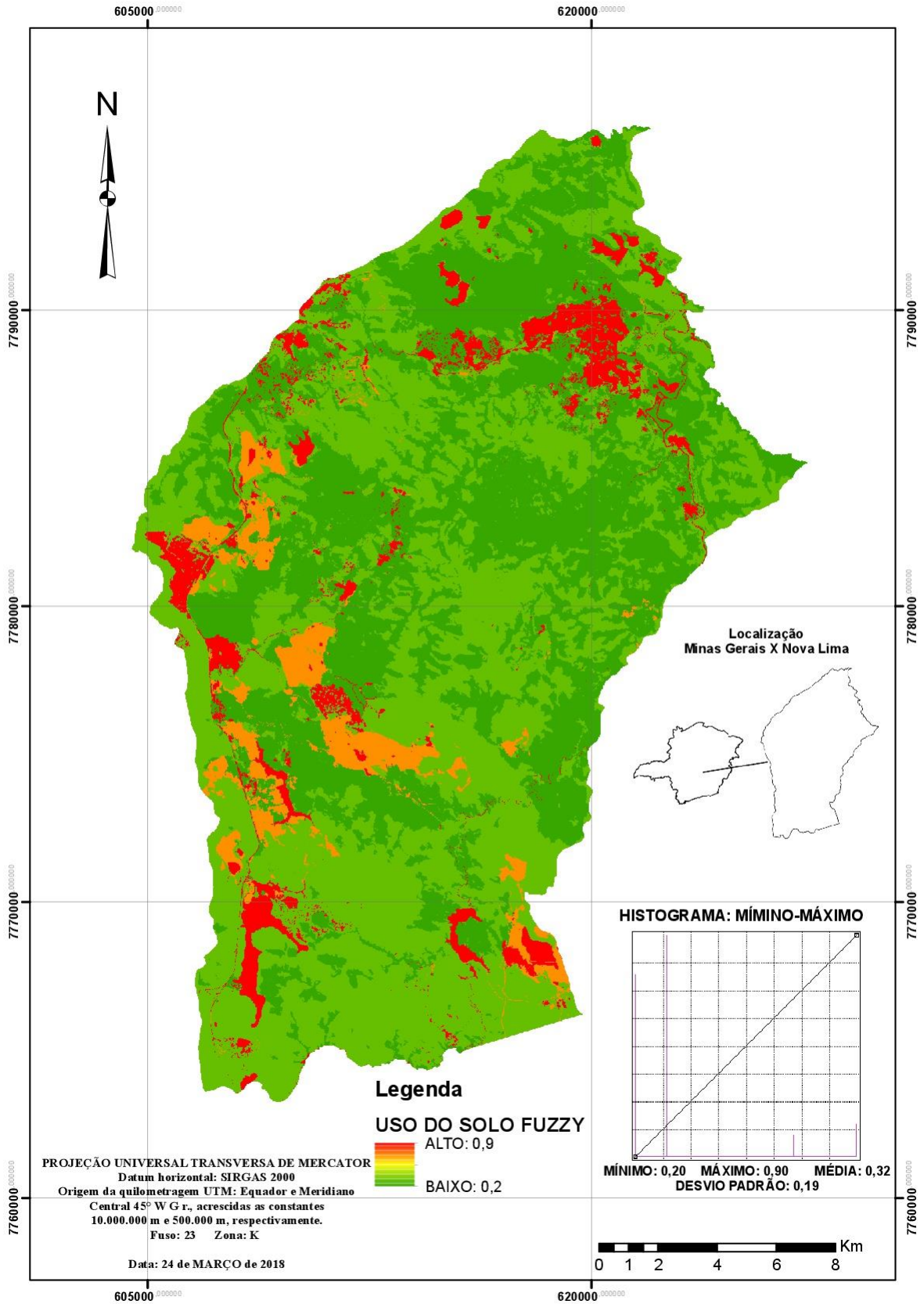
Gráfico 5. Escala de risco de inundação de acordo com as classes de uso e cobertura do solo presente no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

A Figura 21 ilustra que quanto mais próximo de 1, maior é a contribuição da classe de uso e cobertura do solo para a ocorrência de inundação, revelando que as áreas preservadas e com vegetação são as de menor contribuição pelo fato da cobertura vegetal atenuar a quantidade de água que entra em contato direto com o solo e favorecer sua infiltração. Nesse sentido, as regiões de floresta nativa, silvicultura, cultivos e pastagens são as menos susceptíveis à inundação, conforme ilustra a Figura 21.

Figura 21. Mapa Fuzzy correspondente às classes uso e cobertura do solo relação ao risco à inundação no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

A Figura 21 ilustra que, nas regiões oeste, sudoeste e noroeste, bem como na porção norte do município, concentram-se as áreas com maior risco à inundação, pelo fato de apresentarem menor permeabilidade do solo. As construções e o calçamento das vias impedem a percolação da água e ocasionam inundações em eventos de precipitação.

Além disso, os espelhos d'água também apresentaram contribuições elevadas ao risco à inundação pelo fato de suas adjacências estarem vulneráveis ao transbordamento em eventos de precipitação severa e, também, por estarem localizados em porções planas do terreno, recebendo massas d'águas vindas das regiões declivosas.

5.1.4 TIPOS DE SOLOS

Quanto à pedologia, das 13 classes de solos (considerando o primeiro grau categórico) presentes no sistema brasileiro de classificação, no município de Nova Lima/MG o mapeamento permitiu separar em apenas duas classes: Neossolos e Cambissolos. O primeiro recebeu do especialista consultado nota 5 quanto ao risco à inundação e o segundo recebeu nota 2, conforme apresentado na Tabela 7.

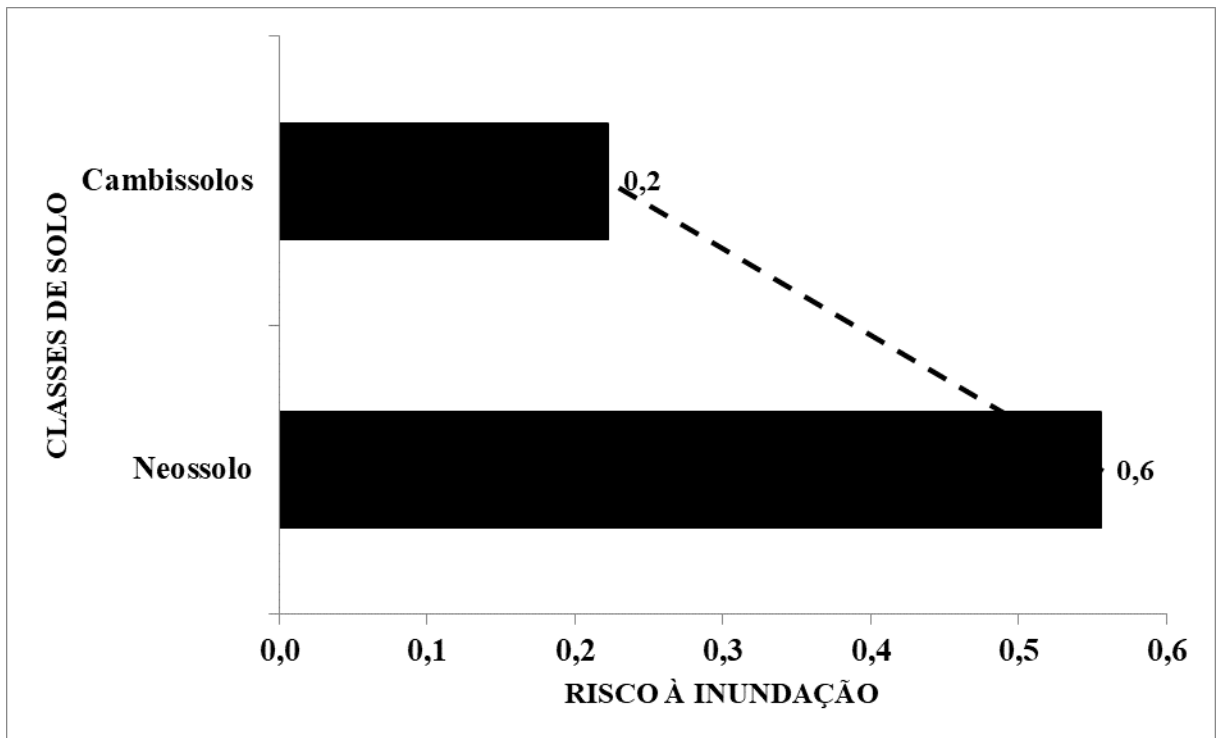
Tabela 7. Pesos atribuídos pelos especialistas para as classes de tipo de solo mapeadas no município de Nova Lima/MG.

Classe	Especialista	Fuzzy
Neossolos	5	0,6
Cambissolos	2	0,2

Fonte: Elaboração do Autor.

O especialista atribuiu nota 5 para os Neossolos devido ao fato de seu pouco desenvolvimento pedogenético. Além de serem rasos e pedregrosos eles apresentam pequena capacidade de retenção de água, elevando assim, sua capacidade para o encharcamento. Já os Cambissolos, por serem mais profundos e mais bem desenvolvidos, receberam nota 2, indicando que suas características favorecem à percolação e infiltração da água. As notas atribuídas foram padronizadas em escalas *fuzzy*, conforme apresentado no Gráfico 6.

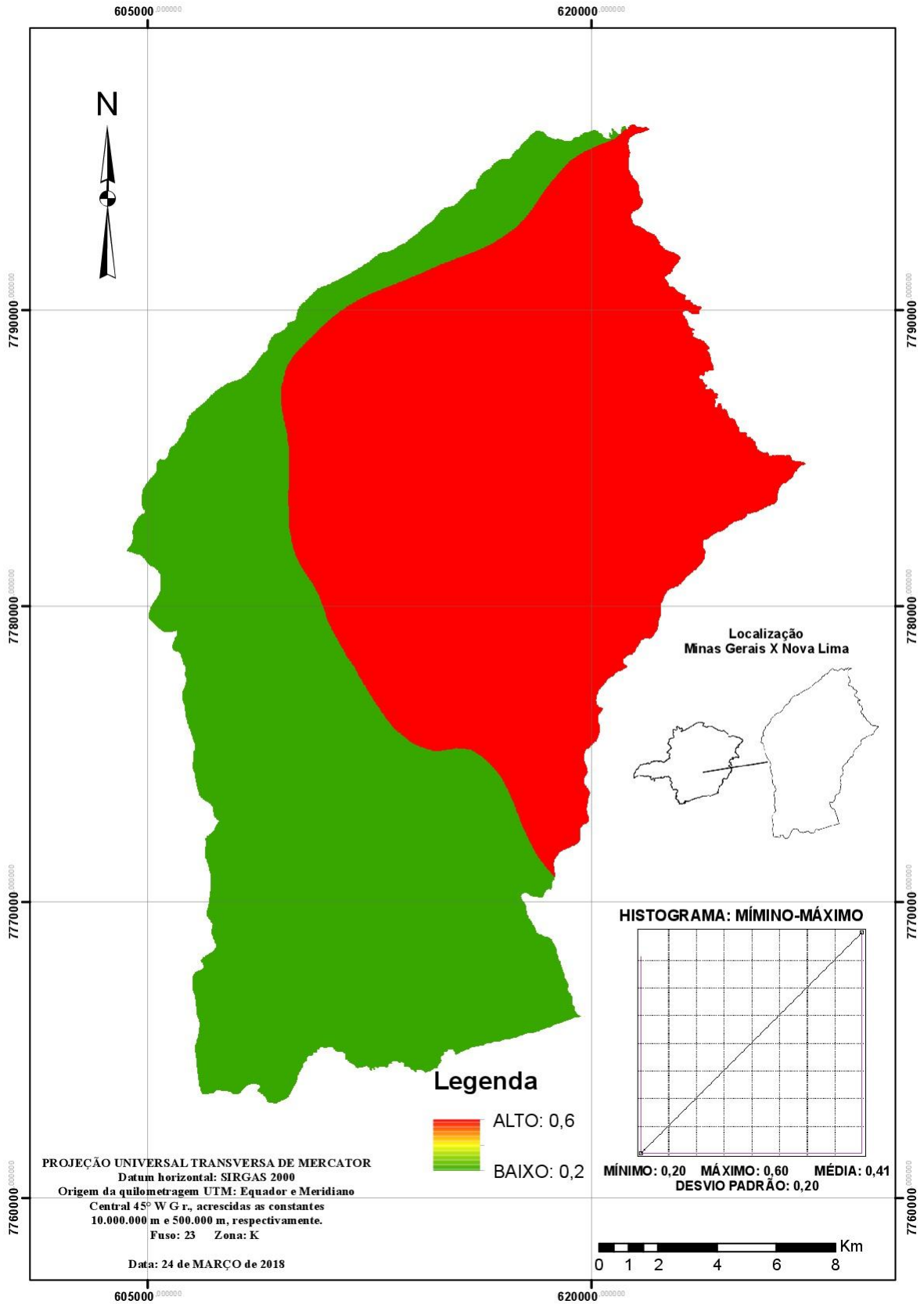
Gráfico 6. Escala de risco de inundação de acordo com as classes de tipos de solos presentes no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

A Figura 22 revela que a escala de avaliação Fuzzy para os solos encontrados no município de Nova Lima/MG apresentou intervalos correspondentes a 0,2 e 0,6, aproximadamente. Esse fato indica que das treze classes de solos existentes, os solos encontrados no local possuem tendências de risco médias e baixas para a ocorrência de inundações (Figura 22). No entanto, deve-se considerar além da classe de solo sua localização na paisagem e sua associação com outras variáveis, como por exemplo a declividade.

Figura 22. Mapa Fuzzy correspondente às classes de tipo de solo em relação ao risco à inundação no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

A Figura 22 ilustra que o município está dividido entre um moderado risco à inundação, que abrange sua parte central em direção à porção norte e nordeste, e um risco baixo localizado na sua parte central em direção à porção sul, além de uma faixa estreita na porção norte e noroeste. Nas regiões que apresentam maior risco de inundação, as práticas que contribuem para a retirada da cobertura do solo devem receber especial atenção.

Pelo fato de serem solos rasos e facilmente encharcados, o contato direto da água pode saturar o ambiente o que ocasiona alagamentos. Assim, a proteção natural deve ser mantida sempre quando possível, pois ela atenua a quantidade de água que entra no sistema do solo, além de impedir seu contato direto.

5.1.5 MAPA GEOLÓGICO

A atribuição de pesos para a geologia do município resultou em valores *fuzzy* em escala variando de de 0,1 a 1 (Quadro 2). De modo que, quanto mais próximo de 1 maior é a associação da unidade ou grupo geológico com a ação fluvial causadora de inundação. Nesse sentido os aluviões receberam os maiores pesos para a contribuição à inundaçã pelo fato serem materiais muito retrabalhados e mutáveis devido à ação dos rios, conforme estudos apresentados por Reis (2012), Toledo, Fairchild e Teixeira (2009) e Winge *et al.* (2014).

Quadro 2. Pesos atribuídos conforme pesquisa bibliográfica para as classes de geologia mapeadas no município de Nova Lima- MG.

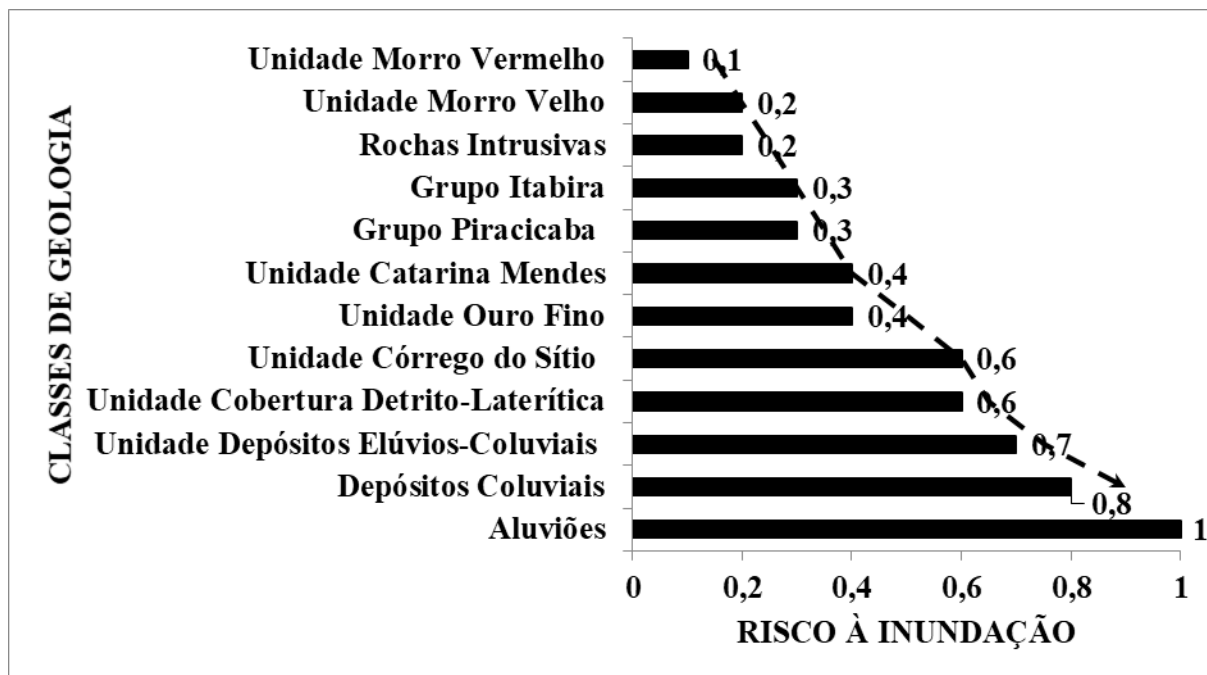
Geologia	<i>Fuzzy</i>
Aluviões	1
Depósitos Coluviais	0,8
Unidade Depósitos Elúvios-Coluviais	0,7
Unidade Cobertura Detrito-Laterítica	0,6
Unidade Córrego do Sítio	0,6
Unidade Ouro Fino	0,4
Unidade Catarina Mendes	0,4
Grupo Piracicaba	0,3
Grupo Itabira	0,3
Rochas Intrusivas	0,2
Unidade Morro Velho	0,2
Unidade Morro Vermelho	0,1

Fonte: Adaptado pelo autor conforme Reis (2012), Toledo, Fairchild e Teixeira (2009) e Winge *et al.* (2014).

Assim como os Aluviões, os depósitos coluviais e as unidades elúvio-coluviais também receberam pesos que demonstram sua forte associação com ações da água e, também, da gravidade, resultante de processos onde enxurradas trazem materiais de partes mais altas

do terreno para as partes mais baixas, que por sua vez misturam com os solos do local para formação do material característico de planícies de inundação. Por estarem em relevo montanhoso e apresentar material pouco metamorfoisado pela ação da água, as unidades geológicas morro velho e morro vermelho estão no outro extremo da escala de risco de inundação, conforme ilustrado na Gráfico 7.

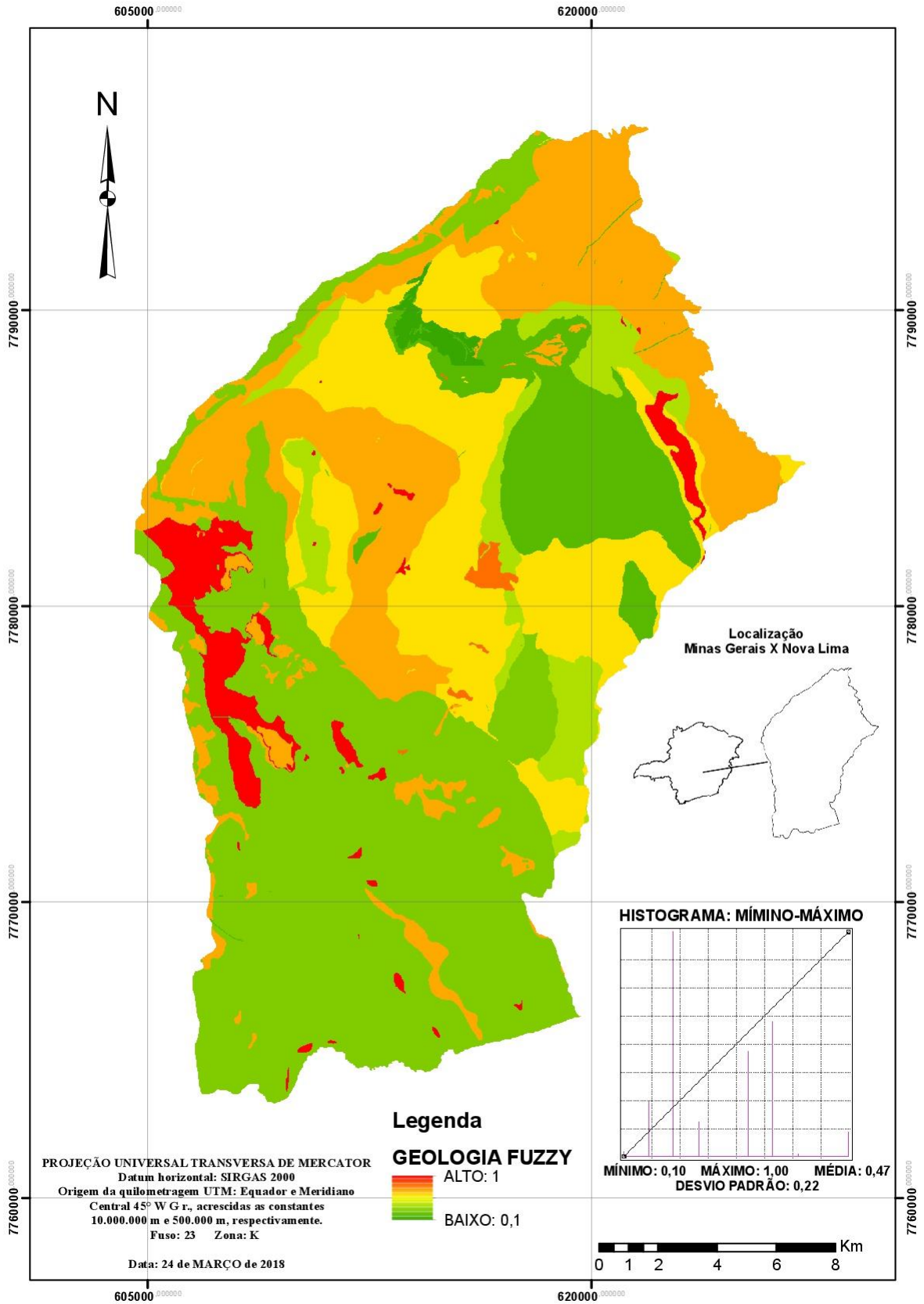
Gráfico 7. Escala de risco de inundação de acordo com as classes de geologia presente no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

Da escala de risco apresentada, as unidades geológicas que apresentaram pesos intermediários como a unidade Ouro Fino, unidade Catarina Mendes e Grupo Piracicaba, apesar de estarem em locais no terreno que favorecem a ação da água para formação de inundações, como em áreas planas e próximas de vertentes, suas composições gerais de rochas e minerais apresentam pouco indicativo de metamorfismo por ação fluvial. A distribuição espacial da escala de risco adotada pode ser visualizada na Figura 23.

Figura 23. Mapa Fuzzy correspondente às classes de geologia em relação ao risco à inundação no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

As unidades geológicas que mais contribuem para o aumento do risco à inundação estão localizadas em porções de áreas a nordeste do município, próximo ao curso d'água do rio das Velhas e na porção oeste do município, região dos bairros Jardim Canadá e Vale do Sol. No contexto espacial geral, observa-se que as formações geológicas do município de Nova Lima/MG apresentam uma contribuição com tendências de baixa a moderada para a ocorrência de inundações.

5.1.6 MAPA DE ISOIETAS

Após reclassificar o intervalo de precipitação, as notas médias do especialistas para as classes obtidas assumiram valores de 7 (entre 1.700 e 1712 mm), 4 (entre 1.600 e 1.699 mm) e 2 (entre 1.599 e 1.566 mm). Quanto maior o valor de água precipitado, maior foi seu peso para ocorrência de inundações no município, conforme apresentado na Tabela 8.

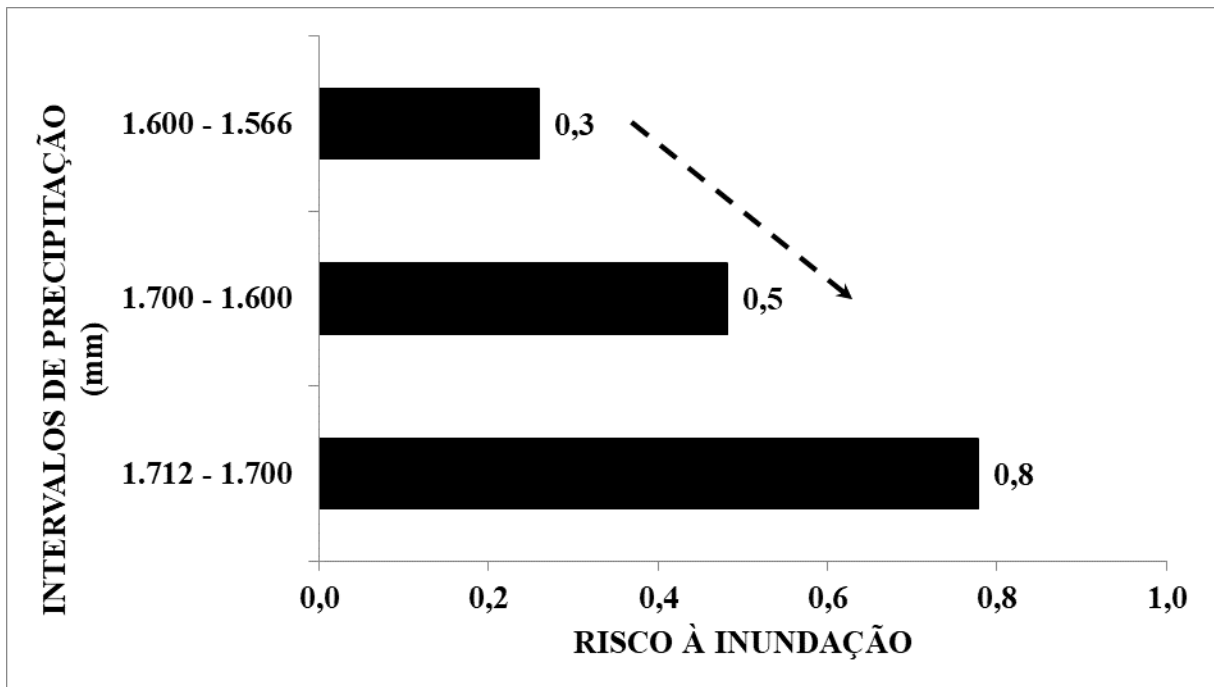
Tabela 8. Pesos atribuídos pelo especialista para as isoietas climáticas mapeadas no município de Nova Lima-MG.

Classe	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Média	<i>Fuzzy</i>
1.700 – 1.712	7	6	8	7	0,8
1.600 – 1.699	3	4	6	4	0,5
1.566 – 1.599	1	2	4	2	0,3

Fonte: Elaboração do Autor.

Verifica-se que os especialistas concordaram que há uma relação direta entre o volume de água precipitado e a ocorrência de inundações. Além disso, todos consideraram que o padrão de chuvas no município fornece uma escala de precipitação que não é suficiente para receber nota máxima, igual a 9. O primeiro especialista atribuiu nota 7, o segundo atribuiu nota 6 e o terceiro nota 8 para o intervalo de precipitação entre 1.700 e 1.712 mm indicando que, comparando-se com o padrão de chuvas de outros locais, Nova Lima/MG apresenta escala de intervalo *Fuzzy* com tendências de moderada a alta para a ocorrência de inundações, segundo avaliação dos especialistas consultados (Gráfico 8).

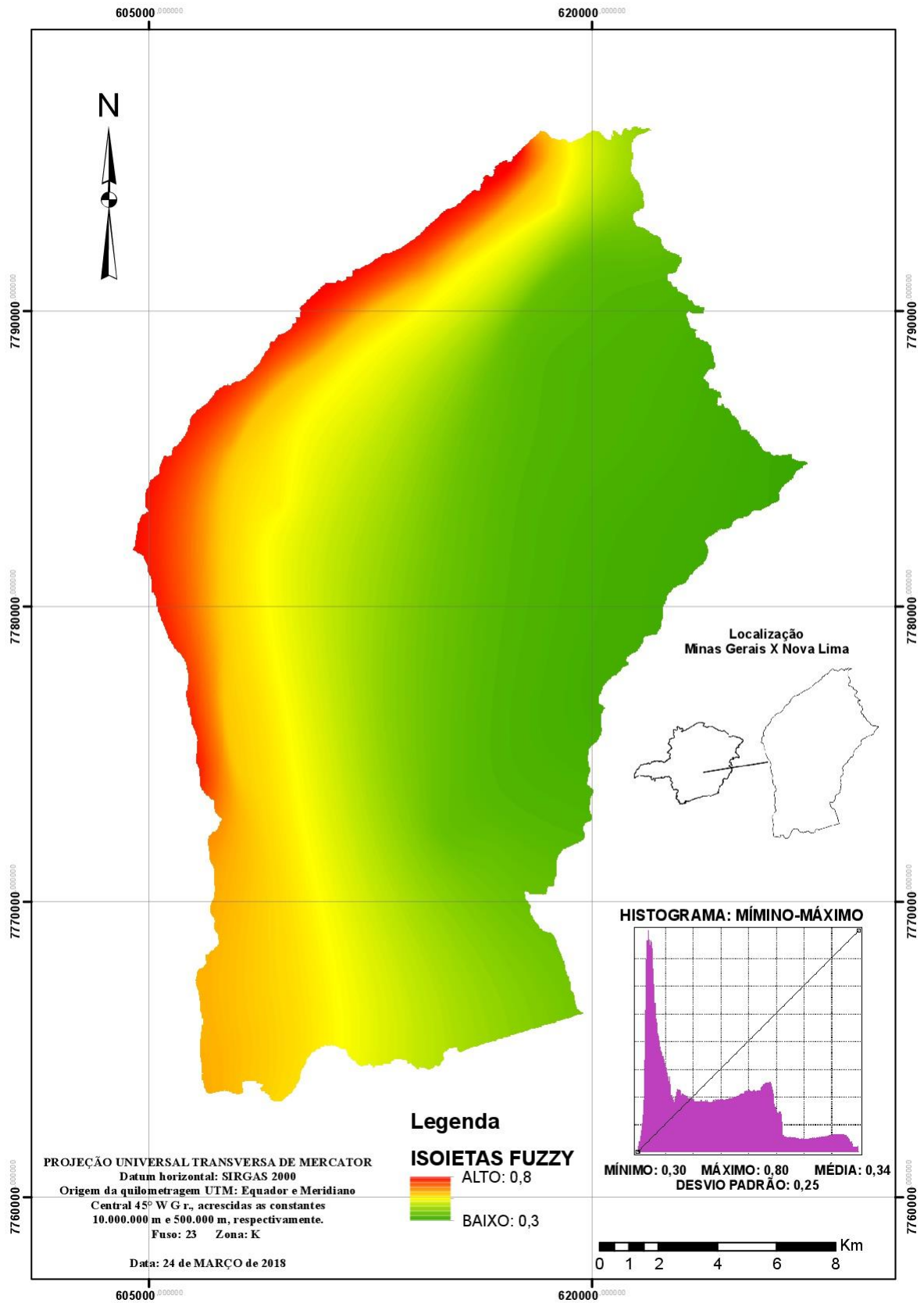
Gráfico 8. Escala de risco de inundação de acordo com os intervalos de precipitação (mm) presentes no município de Nova Lima/MG



Fonte: Elaboração do Autor.

É possível verificar que a padronização dos resultados médios dos pesos atribuídos pelos especialistas apresenta intervalo variando de 0,3 a 0,8. Quanto maior o valor obtido, maior é o risco à ocorrência de inundação espacializado, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24. Mapa Fuzzy correspondente à precipitação em relação ao risco de inundação no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

Baseado no mapa de isoietas, que além de considerar a precipitação estimada em cada posto pluviométrico presente no município, considera o relevo do local, é possível verificar que as regiões referentes à Crista Homoclinal da Serra do Curral são as que apresentaram maiores valores para o risco à inundação, à medida que se avança na direção nordeste, para o Vale Anticlinal do Rio das Velhas, o risco à inundação em relação a variável precipitação diminui.

5.1.7 HIDROGRAFIA

Após serem avaliadas por três especialistas, as variáveis ambientais consideradas no presente estudo apresentaram escala de valores médias variando de 3 a 5. A proximidade de drenagens canalizadas e APPs de cursos d'água foram as classes hidrológicas que apresentaram maiores riscos a inundações, conforme avaliação dos especialistas apresentada na Tabela 9.

Tabela 9. Pesos atribuídos por especialistas para a proximidade a cada classe hidrológica presente no município de Nova Lima/MG.

Classe	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Média	Fuzzy
Drenagem canalizada	7	5	2	5	0,5
App de Cursos e Espelhos d'água	5	1	8	5	0,5
Drenagem Natural	5	4	3	4	0,4
Espelhos d'água	5	3	1	3	0,3

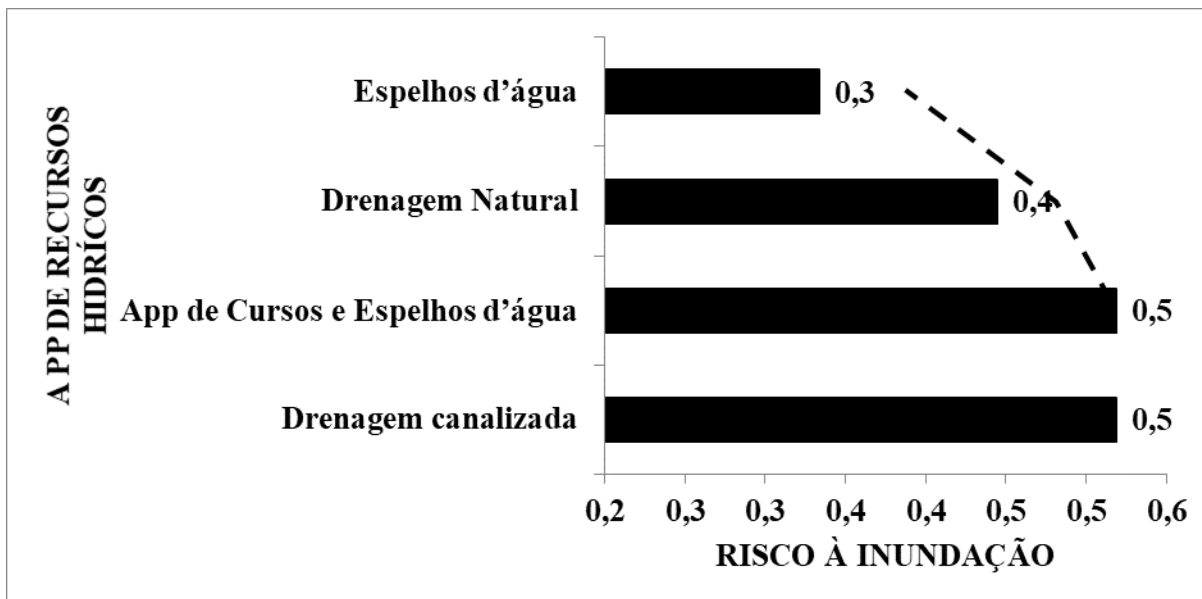
Fonte: Elaboração do Autor.

É possível verificar a ausência de padrão de avaliação dessa variável por parte dos três especialistas consultados. Em relação à drenagem canalizada dois especialistas (1 e 2) consideraram que essa classe deveria receber maior peso quanto ao risco à inundação, no entanto um especialista (3) considerou essa classe como de baixo risco à inundação (atribuindo peso 2) por entender que a obra de canalização do curso d'água foi realizada de modo a prever o volume de água que circula no local e o tempo de retorno das vazões no rio.

Já em relação às APPs de cursos d'água dois especialistas (1 e 3) atribuíram maiores pesos a essa classe por entenderem que se tratam de locais em planícies de inundações e serem as primeiras afetadas pelas enchentes dos rios, enquanto o especialista 2, considerou essas regiões como de baixo risco pelo fato das matas ciliares possuírem a função ambiental de impedir enchentes. O peso médio dos pesos atribuídos pelos especialistas foram padronizados

em valores de escala *Fuzzy* e avaliados conforme apresentado na Gráfico 9.

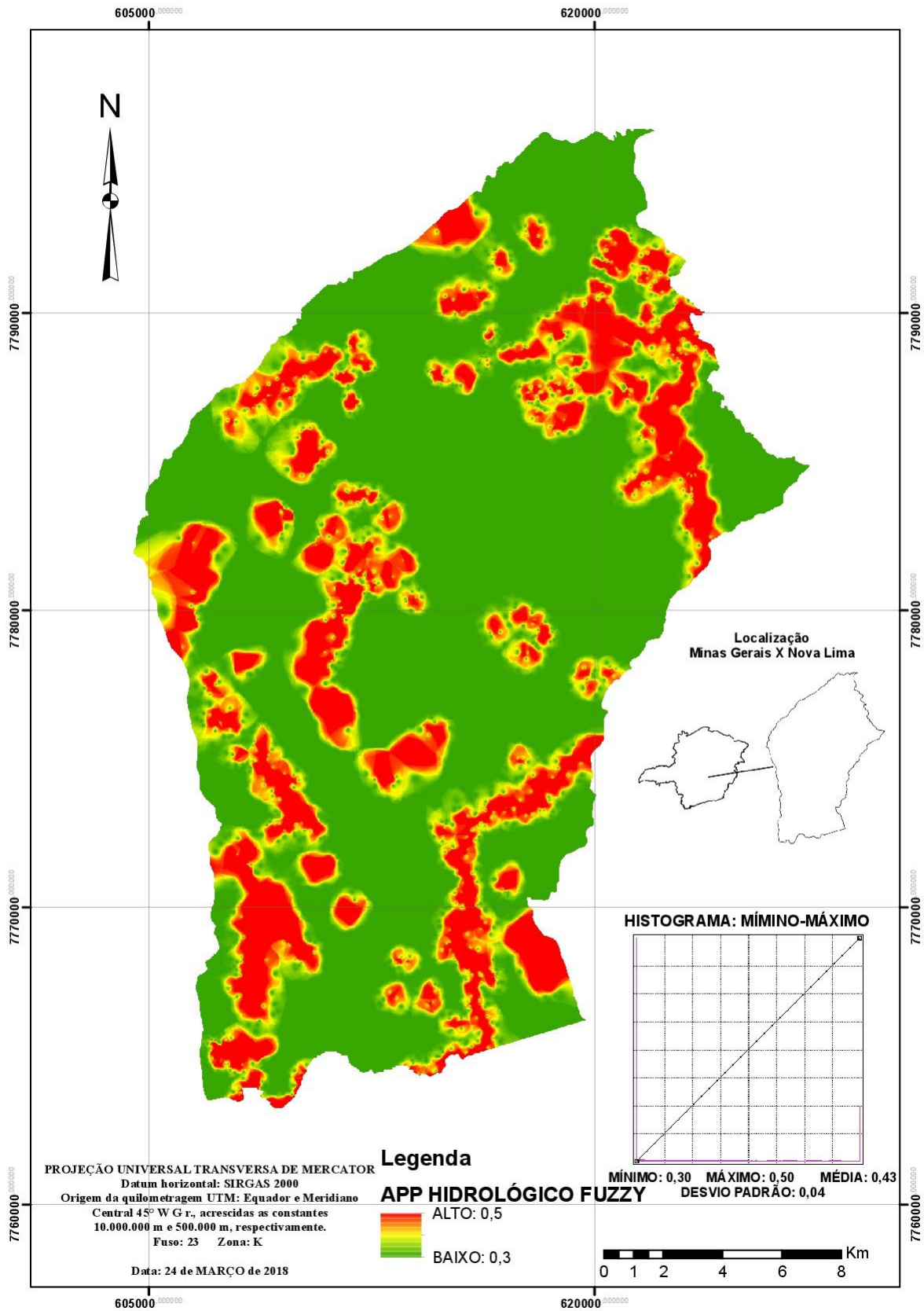
Gráfico 9. Escala de risco de inundação de acordo com a proximidade a cada classe hidrológica presentes no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

A escala de risco obtida apresenta valores entre 0,3 e 0,5, onde quanto maior o valor, maior e a contribuição para o risco à inundação da classe avaliada. A classe de espelho d'água foi considerada a de menor risco à inundação pelo fato de que nessas áreas, sejam naturais ou não, a função é de amortecer o impacto das cheias, de modo que a distribuição espacial dos pesos atribuídos pode ser visualizada na Figura 25.

Figura 25. Mapa Fuzzy correspondente à classe hidrológica em relação ao risco de inundação no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

O Mapa *Fuzzy* Hidrológico ilustra, em vermelho, que quanto mais próximos de cursos d'água maior é o risco à inundação. À medida que o terreno se afasta das classes hidrológicas avaliadas, o peso diminui, chegando a 0 (zero), representado em verde na Figura 25. Nesse sentido, verifica-se a distribuição de áreas com risco à inundação espalhados por todo o município e mais próximas de locais como, por exemplo, a represa Capitão da Mata, Ribeirão dos Marinheiros e Rio das Velhas.

Em estudo realizado na cidade de Kelatan, Malásia, aplicando mapas fuzzificados com o objetivo de avaliar o risco à inundação, JIANG *et al.*, 2009 constaram que o método foi viável e eficaz para determinar as áreas mais propensas a serem afetadas pelo fenômeno citado.

5.2 VALORES DE PONDERAÇÃO DOS MAPAS DE ENTRADA

Após elaborar a matriz de comparação pareada das variáveis ambientais adotadas no estudo e atingir um Índice de Consistência (IC) de setenta e cinco milésimos (0,075), as ponderações sobre suas respectivas contribuições para o risco à inundação no município de Nova Lima- MG podem ser visualizadas com base nos autovalores obtidos, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10. Peso (autovalor) obtido para cada variável ambiental utilizada quanto ao risco à inundação no município de Nova Lima- MG.

Variável Ambiental	Autovalor
Modelo Digital de Elevação (MDE)	0,20
Declividade	0,14
Uso e cobertura	0,11
Pedologia	0,06
Geologia	0,03
Isoietas	0,16
APP Hidrográfica	0,30
IC = 0,0747	

Fonte: Elaboração do Autor.

A Tabela 10 ilustra que a APP Hidrográfica foi responsável por maior contribuição, cerca de 30%, para a ocorrência de inundações quando comparada com as demais variáveis ambientais. Em seguida, as altitudes (MDE), com contribuição de cerca de 20%, foi a segunda, em importância, a contribuir para a ocorrência de inundações. Assim, pode-se definir uma equação representativa para o risco à inundação no município de Nova Lima/MG da seguinte maneira:

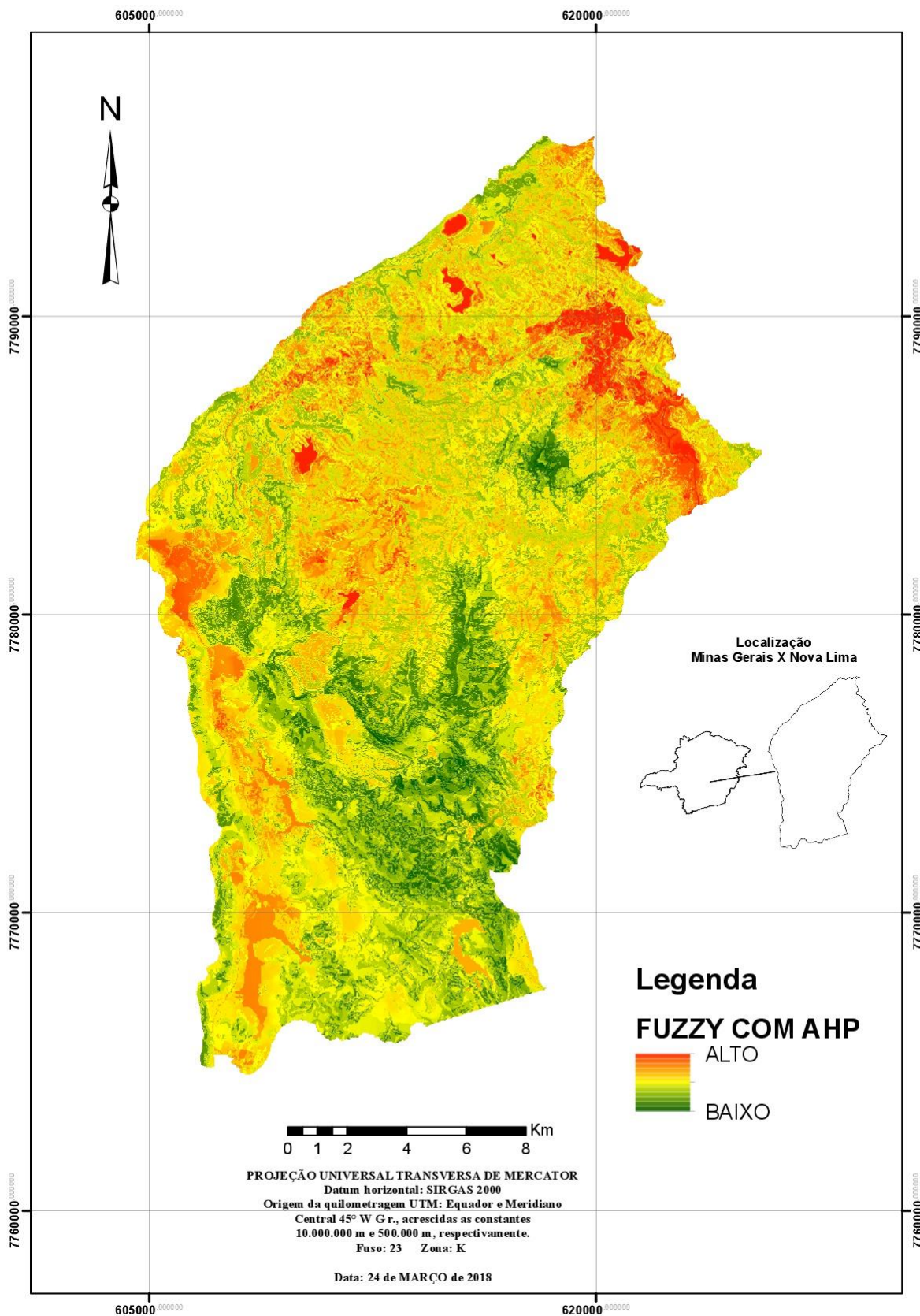
$$\text{Risco à inundação} = (MDE \times 0,20) + (Declividade \times 0,14) + (Uso e cobertura \times 0,11) + (Pedologia \times 0,06) + (Geologia \times 0,03) + (Isoietas \times 0,16) + (Hidrografia \times 0,30)$$

Em relação às variáveis adotadas, em estudo realizado na bacia hidrográfica da Estrada Nova, Belém – PA, com o objetivo de avaliar os fatores de risco à inundação no local, foram consideradas variáveis hipsométricas, climato-hidrológicas e variáveis sociais. O trabalho permitiu constatar que o local de estudo teve sua dinâmica alterada pelas atividades antrópicas por meio da intensificação de fenômenos como as inundações. Dentre os motivos atribuídos para essa intensificação, o estudo cita a retificação de canais, a construção de aterros e a ocupação urbana (ARAÚJO JÚNIOR, 2014).

5.3 MAPA DE RISCO À INUNDAÇÃO

Após aplicar a equação de risco à inundação obtida, os resultados da lógica *Fuzzy* variaram de 0,23 a 0,69 de modo que quanto maior o valor obtido maior é o risco à inundação em determinada área do município, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26. Mapa Fuzzy de risco à inunda o no município de Nova Lima/MG.

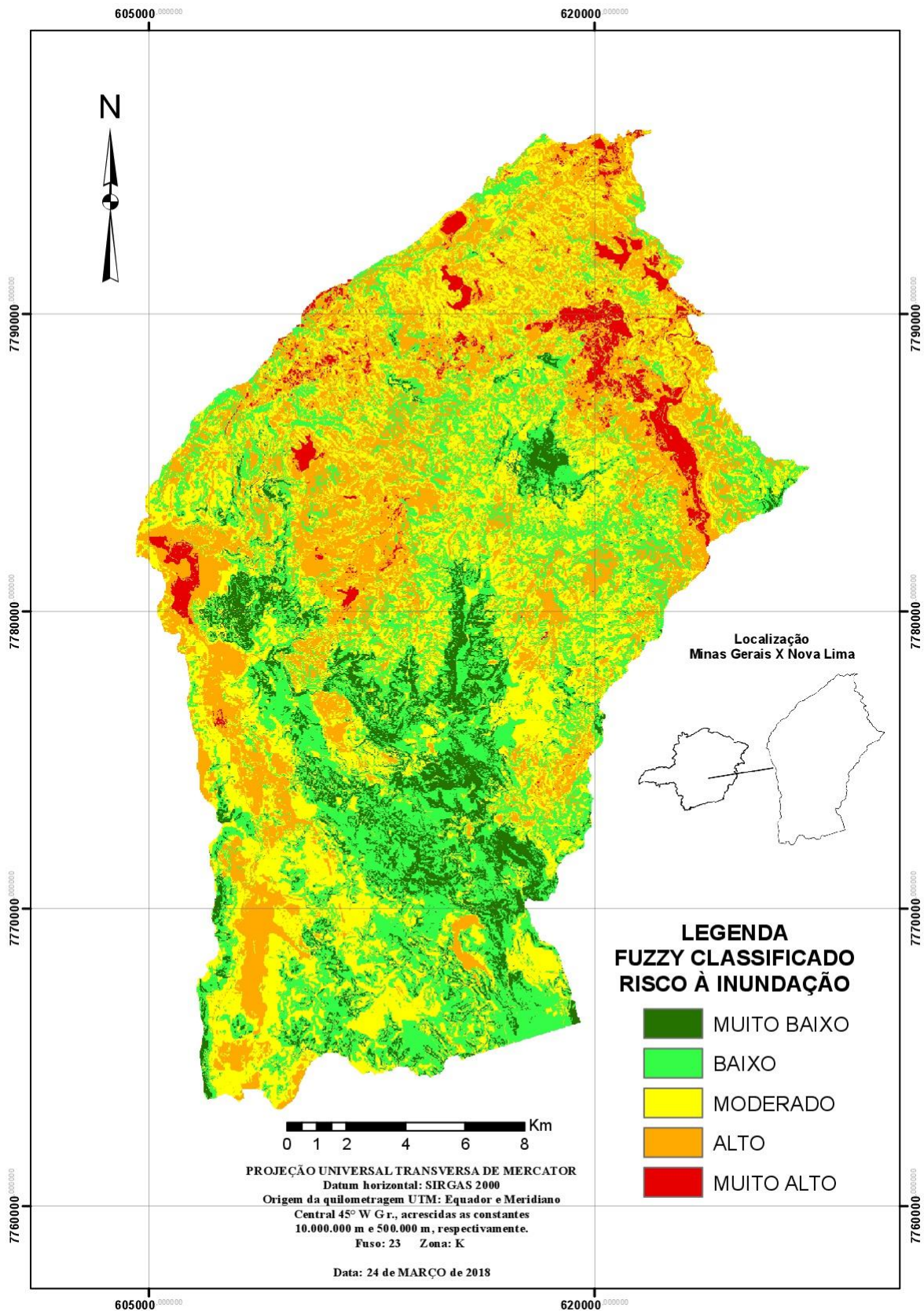


Fonte: Elabora o do Autor.

  possível observar maiores associa es de risco   inunda o nas margens do rio das

velhas, em regiões de bairros como Honório Bicalho, região central de Nova Lima e bairro Bonfim. Os resultados também apresentaram o bairro Jardim Canadá em estado de susceptibilidade à inundação. Categorizando os resultados obtidos é possível atribuir 5 níveis de risco à inundação: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto, conforme Figura 27.

Figura 27. Classes de risco à inundação no Município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

A Figura 27 permite avaliar as principais características ambientais de cada classe de

risco e revela que as regiões de risco muito baixo, representadas na cor verde escuro, estão localizadas principalmente em regiões montanhosas, com declividades acima de 47% e cobertas com vegetação. Além do relevo declivoso, as regiões de baixo risco à inundação, representadas pela cor verde claro, estão, também, em altitudes acima de 1000 m, relevo com declividade acima de 30% e solos categorizados como Neossolos.

Já as regiões de potencial moderado, representadas pela cor amarela, apresentaram associações de características ambientais distribuídas por todo o terreno, cujo intervalo *Fuzzy* varia de 0,42 a 0,48. Nessa classe as regiões com maiores áreas contíguas estão na porção central e sul, com precipitação média anual variando de 1600 a 1700 mm.

As áreas de risco alto, representadas pela cor laranja e cujo intervalo *Fuzzy* vai de 0,48 a 0,58, estão em locais de relevo com declividades entre 0 a 30%, sem cobertura vegetal, unidades geológicas da classe de depósitos colúviais ou depósitos elúvio-colúviais. Além do relevo plano, as regiões de muito alto risco à inundação (representadas pela cor vermelha), estão próximas de cursos d'água e de formações geológicas como os aluviões, dentre as 5 classes mapeadas, a de potencial muito baixo é a que apresenta menor abrangência espacial, correspondendo a 3,4% do território do município de Nova Lima/MG (Tabela 11).

Tabela 11. Intervalo Fuzzy associado a abrangência espacial de cada classe de risco à inundação presente no município de Nova Lima/MG.

Intervalo <i>Fuzzy</i>	Risco	Área (ha)	%
0,23 - 0,35	Muito Baixo	3.798,133	8,9
0,36 - 0,42	Baixo	11.764,715	27,7
0,43 - 0,48	Moderado	14.202,02	33,4
0,49 - 0,58	Alto	11.269,624	26,5
0,59 - 0,69	Muito Alto	1.449,858	3,4
Total		42.484,35	100

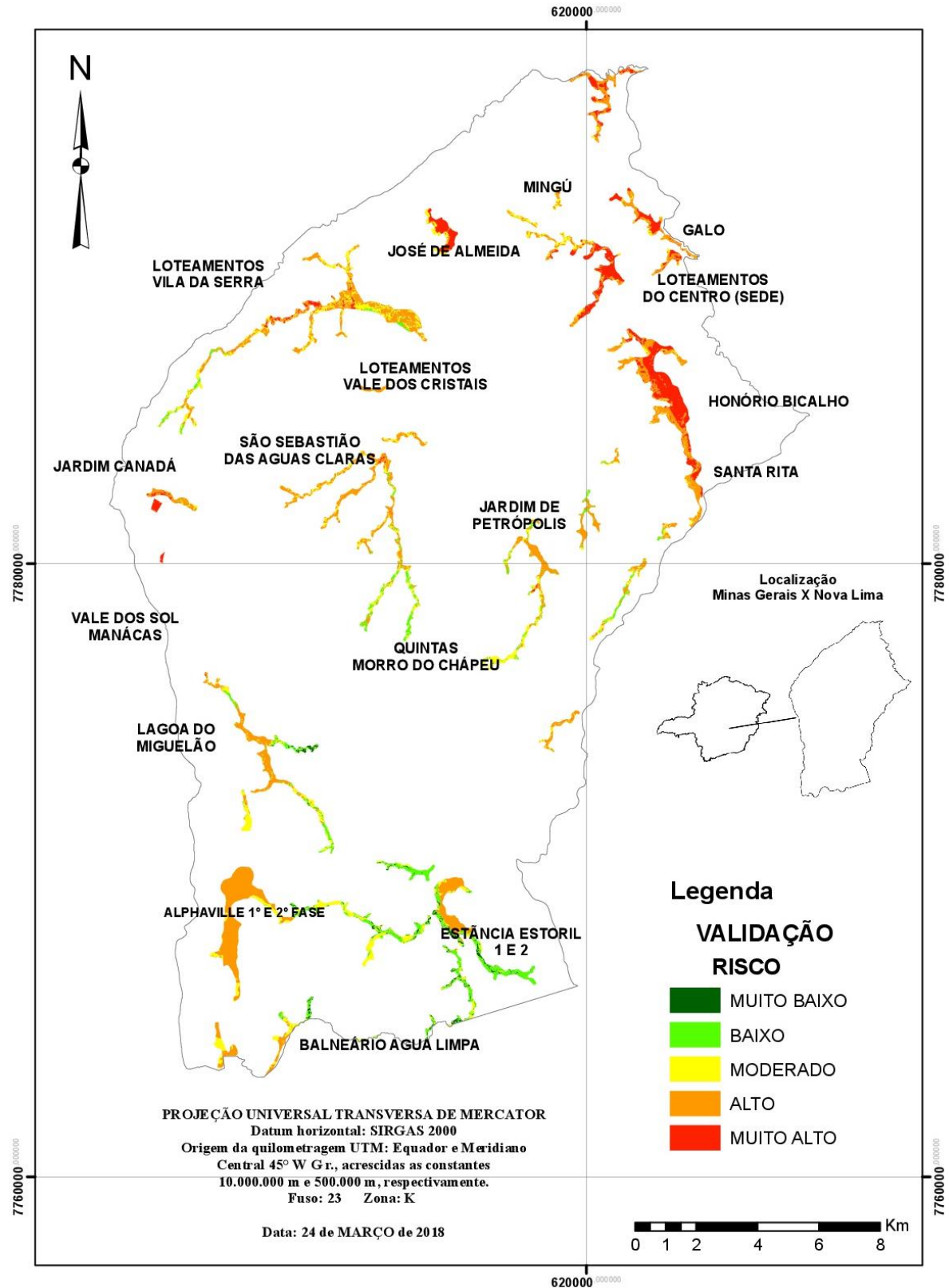
Fonte: Elaboração do Autor.

É possível observar maior abrangência espacial das classes de risco centrais, sendo a classe moderada (33,4%) a de maior representatividade espacial, seguida da classe de potencial baixo (27,7%) e alto (26,5%). As classes de risco muito baixo e muito alto são as de menor abrangência e somadas correspondem a menos de 14% da área do município. Ressalta-se que os riscos alto a muito alto na bacia estão associados tanto às enchentes ribeirinhas, atingindo a população próxima aos leitos maiores dos rios, quanto a inundações devidas à urbanização, a qual promove a impermeabilização do solo e obstruções das redes de drenagem e escoamentos naturais.

5.4 COMPARAÇÃO COM ÁREAS VULNERÁVEIS À INUNDAÇÃO PREVIAMENTE MAPEADAS

Segundo dados do PMSB (2016), da SEMAD (2015) e da CPRM (2015), no município de Nova Lima existem mais de 2.300,00 ha correspondentes a manchas de alagamentos e áreas suscetíveis à inundação, cuja sobreposição com os resultados obtidos permite verificar a condição de concordância espacial entre os estudos já realizados e o presente trabalho, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28. Classes de risco à inundação em regiões vulneráveis previamente mapeadas, no Município de Nova Lima/MG.



Fonte: Adaptado de SEMAD (2015).

Nos estudos previamente realizados, as regiões vulneráveis à inundação

correspondem às áreas de planícies aluviais, solos hidromórficos situados ao longo de cursos d'água, mal drenados e com lençol freático aflorante a raso. Além disso, a altura de inundação corresponde a 2 metros em relação à borda da calha do rio (CPRM 2015; PMSB, 2016; SEMAD, 2015). Nessas áreas, o potencial de risco muito alto (395,6 ha) e alto (1.122,6 ha), somados, correspondem a aproximadamente 65% das áreas vulneráveis, citadas (Tabela 12).

Tabela 12. Abrangência espacial das classes de riscos nas regiões vulneráveis previamente mapeadas no município de Nova Lima/MG.

Risco	Áreas (ha)	%
Muito baixo	55,6	2,4
Baixo	278,8	11,9
Moderado	495,0	21,1
Alto	1122,6	47,8
Muito alto	395,6	16,9
Total	2.347,61	100

Fonte: Elaboração do Autor.

Excluindo as áreas de risco muito baixo (2,4 %) e baixo (11,9%), o cruzamento espacial teve correspondência de, aproximadamente, 86 % das áreas vulneráveis previamente mapeadas. Ou seja, um total de 334,4 ha das áreas propostas pelo CPRM (2015), PMSB (2016) e SEMAD (2015) não foram contempladas no presente estudo. Outra questão importante é que, segundo a estimativa (em conjunto) dos dois órgãos citados, 5,5 % da área total do município, ou seja 2.347,61 ha, apresenta certa vulnerabilidade à inundação e no presente estudo, as áreas com riscos mais severos, correspondem a 3,4% (1.449,86 ha) (conforme já apresentado na Tabela 12).

Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que a reclassificação do mapa *Fuzzy* inicial (Figura 27) foi mais restritiva para as áreas com altíssimo risco. Em contrapartida, a classe de risco alto à inundação teve um percentual de área mais abrangente, quase 5 vezes maior do que a estimativa dos dois órgãos. Com uso desse método é possível subsidiar a realização de planejamentos e destinação de recursos para soluções de curto prazo (nas áreas de potencial muito alto) e soluções de médio prazo (nas áreas de risco alto). Tais estratégias de soluções ambientais podem ser norteadas com base nas ocupações humanas nas áreas de maior atenção e conforme histórico de inundações, que podem ser exemplificadas conforme Quadro 3.

Quadro 3. Exemplos de pontos de inundações em regiões vulneráveis à inundação no município de Nova Lima/MG.

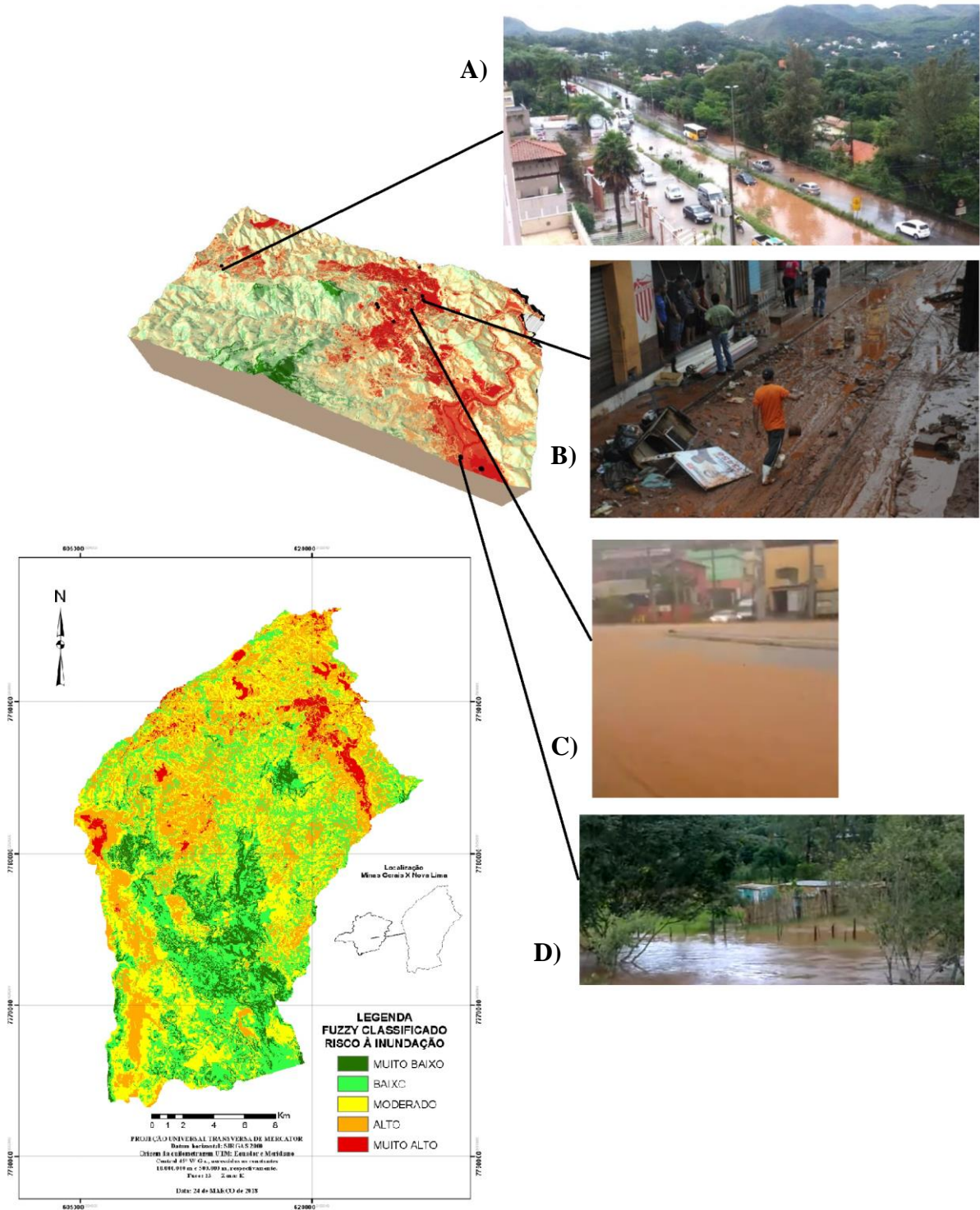
PONTO	UTM: E (m)	UTM: N (m)	DATA	LOCAL	FONTE DE INFORMAÇÃO
1	620689	7789455	15/11/2012	Avenida José Bernardo de Barros	Jornal O tempo
2	620161	7789501	11/12/2017	Banqueta do Rego Grande	Site Sempre Nova Lima
3	615377	7788227	21/02/2018	MG 030	Morador local
4	620498	7788988	21/02/2018	Avenida José Bernardo de Barros	TV Banqueta
5	619615	7788702	21/02/2018	Rua Lauro Magalhães Santeiro	TV Banqueta
6	619682	7788636	21/02/2018	Rua Coritiba	TV Banqueta
7	622836	7785537	20/12/012	Rua Edém, Bairro Honório Bicalho	Morador local
8	620624	7789571	11/02/017	Rua Benedito Valadares	Clima tempo
9	622408	7785615	03/01/2017	Bairro Honório Bicalho	Morador local
10	620289	7790588	02/01/2012	Bairro Honório Bicalho	Morador local
11	620170	7788440	15/11/2012	Bairro Honório Bicalho	Morador local

Fonte: Elaboração do Autor.

O Quadro 3 ilustra onze eventos de inundações ocorridos entre 2012, 2017 e 2018, suas coordenadas foram obtidas diretamente no mapa com datum horizontal SIRGAS 2000, por meio da experiência espacial do autor, indicando bairros e regiões onde as inundações foram recorrentes, como o caso do bairro Honório Bicalho, em quatro eventos entre os anos de 2012 e 2017, e avenida José Bernardo de Barros, em episódios no período chuvoso entre os

anos de 2012 e 2018, conforme ilustra a Figura 29.

Figura 29. Eventos em áreas classificadas com muito alto risco à inundação no Município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor e imagens obtidas da TV Banqueta e de Morador Local.

A Figura 29 ilustra os eventos de inundações ocorridas recentemente no município de Nova Lima, em 21 de fevereiro de 2018, na MG 030 (Figura 29A); além das inundações na

avenida José Bernardo de Barros, em 15 de novembro de 2012 e 21 de fevereiro de 2018 (Figura 29B e 29C); bem como a enchente do rio das Velhas, na altura do bairro Honório Bicalho em 2012 (Figura 29D). Além desses registros alguns pontos apresentados na Quadro 3, podem ser visualizados na Figura 30.

Figura 30. Inundações em regiões classificadas de alto risco à inundação ocorridas no município de Nova Lima/MG.



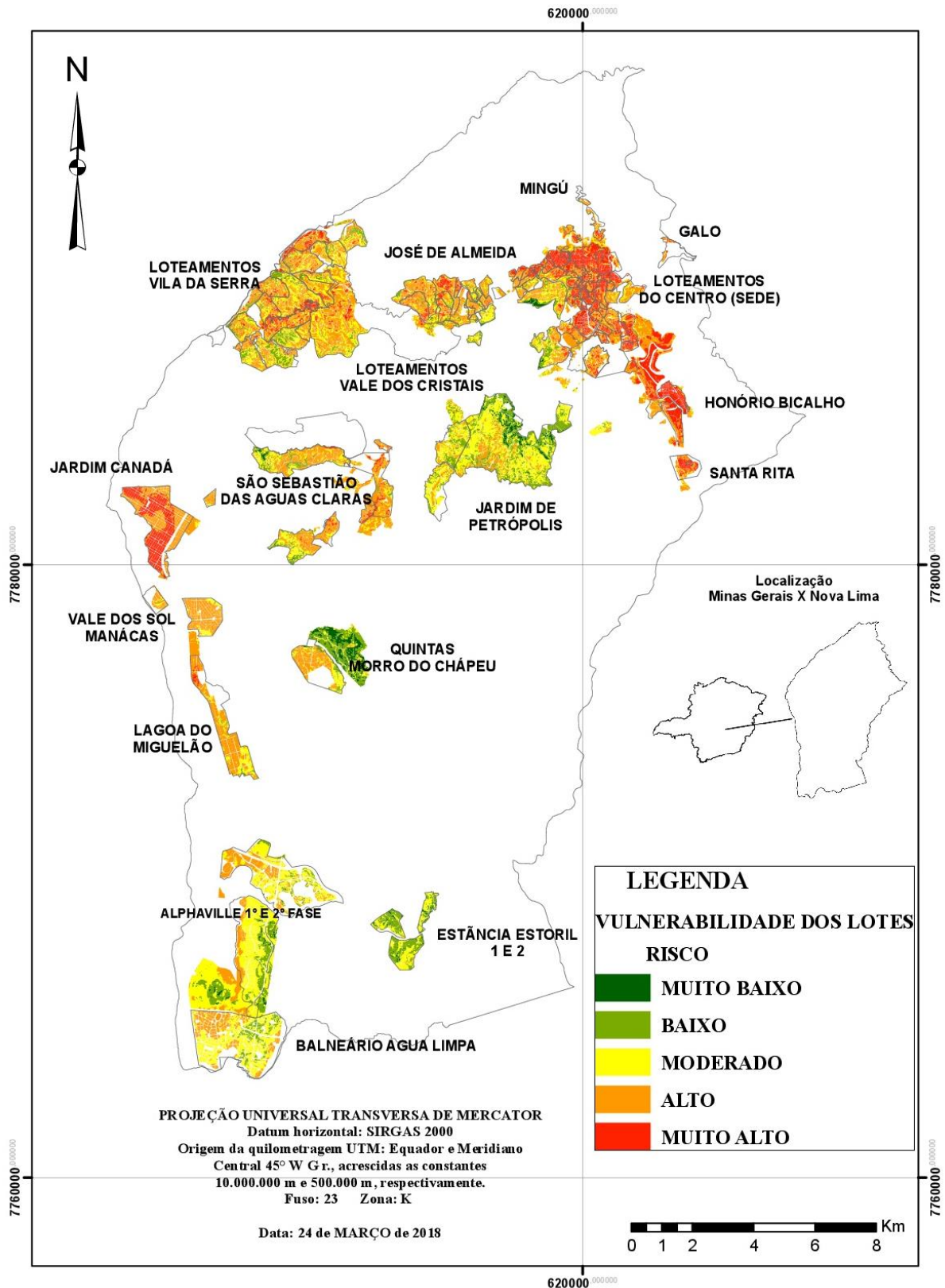
Fonte: Imagens obtidas da TV Banqueta e de Morador Local.

Assim como na cidade de Nova Lima, em estudo abrangendo os municípios de Porto Alegre, Alvorada e Viamão, no estado do Rio Grande do Sul, foi possível identificar 36 registros de inundação, em um período 19 anos (1980 a 2015). O levantamento permitiu apontar os setores mais vulneráveis da área estudada e qual população estava mais exposta aos eventos adversos (SCHNEIDER, 2017).

5.5 CARACTERIZAÇÃO DOS LOTES EM RELAÇÃO AO RISCO À INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA/MG

A Figura 31 revela que loteamentos como, por exemplo, Balneário Água Limpa, Quintas Morro do Chapéu e Jardim de Petrópolis, apesar de apresentarem lotes com risco à inundação classificados como moderado e alto, têm, de fato, maior quantidade lotes associados às classes de risco baixo e muito baixo, caracteriza estes loteamentos como os menos vulneráveis à inundação na cidade. No entanto, os loteamentos concentrados na porção central da zona urbana do município e os que margeiam o Rio das Velhas são os que precisam de maior atenção quanto ao risco à inundação.

Figura 31. Classes de risco à inundações nos lotes cadastrados no município de Nova Lima/MG.



Fonte: Elaboração do Autor.

Essas regiões de proximidade aos cursos d'água historicamente e tradicionalmente são os locais preferidos de ocupação do ser humano devido ao acesso a água para manutenção

de suas necessidades básicas de sobrevivência, mesmo estando suscetíveis a enchentes e inundações severas. Apesar de haver regiões no município com muito baixo risco, o número de lotes que ocupam essa classe equivale a apenas 1% do número total de lotes em Nova Lima, não mostrando nenhuma correlação com novos empreendimentos, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13. Número e percentual de lotes cadastrados ocupando cada classe de risco à inundação no município de Nova Lima/MG.

Risco	Nº de lotes	%
Muito baixo	576	1
Baixo	4.527	11
Moderado	10.856	26
Alto	16.308	39
Muito alto	9.254	22
Total	41.521	100

Fonte: Elaboração do Autor.

Segundo a Tabela 13, é possível destacar uma maior quantidade de lotes enquadradas como em alto risco à inundação, o equivalente a 39% do total, seguido da classe de risco moderado (26%) e muito alto (22%).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ponto de partida desse trabalho foi o estudo realizado na Carta de Suscetabilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações do Município de Nova Lima realizado pela CPRM (2015) e por LEÃO (2016). Na tentativa de traduzir com maior precisão a realidade do município ao risco de inundação em uma escala de detalhe de lotes, buscou-se na metodologia aplicada demonstrar a eficácia da lógica *Fuzzy* com pesos de evidências aliada à Análise Hierárquica de Processos como ferramenta importante nos resultados encontrados.

A escolha do nível de detalhe foi possível pela quantidade de informação bem detalhada que o município tem disponível, o que proporcionou uma compreensão da dinâmica subjacente a processos de inundação, em particular sobre sua incidência em áreas urbanas. Dessa maneira, o objetivo contemplado por este trabalho foi atuar em uma perspectiva de médio e longo prazo, abrangendo o crescimento ordenado em áreas de expansão urbana e, principalmente, demonstrar a realidade em que a população local se encontra, sujeita a riscos eminentes de inundação com perdas reais de bens materiais e até de vidas humanas.

Em relação ao propósito do método utilizado, enfoca-se como um conjunto de processos que visa otimizar os instrumentos legais para tomada de decisão e planejamento

urbano. Processos para estimar a vulnerabilidade ao risco à inundação em detalhe de lote podem ser de grande utilidade no planejamento municipal na busca por manter a paridade entre os interesses econômicos e ambientais.

Os resultados obtidos nesta dissertação evidenciam a possibilidade de mapear de forma eficaz e com emprego de baixos recursos a suscetibilidade à inundação em termos de lotes utilizando apoio de geoprocessamento. A vantagem do suporte de geoprocessamento está na sua capacidade de juntar grande quantidade de dados de forma simples. A junção e manipulação de dados vetoriais e matriciais possibilitam diversos diagnósticos espaciais, com emprego de análise multicritério (lógica *Fuzzy* e AHP). A mudança de cenários em modelos é também uma realidade do ambiente de geoprocessamento, onde podem ser atribuídos pesos ou notas aos temas com possibilidade de serem reclassificados, constituindo uma ferramenta de grande valor no apoio a decisão.

A análise de lotes quanto ao risco à inundação, com base na metodologia *Fuzzy* e AHP, mostra ser importante ferramenta para identificar áreas que necessitem maior atenção do poder público para investimentos em ações de proteção, prevenção e mitigação. A metodologia se mostrou eficaz, de fácil execução, de implementação simples e de baixo custo, tornando o estudo de grande contribuição para gestão eficiente de riscos e desastres.

Entretanto, é necessário ressaltar que a avaliação das áreas suscetíveis à inundação não é uma ciência exata, mas uma tecnologia baseada na interpretação de dados, na qual, a qualidade desses dados é fator preponderante. Neste contexto, o mapeamento de campo baseado em análises hidrológicas é a melhor forma de conferir precisão aos dados e de mitigar algum erro apresentado neste trabalho.

Outra análise importante focada em dar precisão à interpretação, realizada após a metodologia *Fuzzy* e AHP, foi a validação das machas de inundação em seu grau de risco categorizado como muito alto por meio de fotografias de pontos de inundação ao longo do território de Nova Lima/MG. Essa evidência possibilitou a espacialização do risco à inundação em áreas, contribuindo assim, para uma maior compreensão do meio físico e por meio da divisão de cinco classes de suscetibilidade ao risco de inundação.

Houve limitações quanto a obtenção de dados pedológicos (UFV et al., 2010), pois os disponíveis para o município de Nova Lima apresetavam uma escala pequena, resultando em caracterização superficial sem o detalhamento necessário desta variável. Entre outros fatores restritivos, vale ressaltar o mapa geológico disponível (CPRM, 2005), que possuía uma unidade em sua classificação como não catalogada. Isso exigindo um maior empenho em pesquisas bibliográficas para diminuir a possibilidade de atribuir uma valoração que não seria

plausível nessa variável.

Outros dois fatores relevantes incluem os dados pluviométricos (CPRM, 2015) em razão de sua espacialização e falta de dados atuais. E por fim, a rede de drenagem municipal, que evidência as linhas naturais de escoamento superficiais, podendo ser intermitentes ou não e alguns dos principais cursos e espelhos d'água gerando em determinadas situações faixas inexistentes de preservação permanentes.

Outro limitante nesse trabalho são as escalas dos mapas utilizados como base, pois o mapa de tipo de solo e o mapa de isoietas apresentavam escala 1:650.000 e 1:5.000.000 respectivamente. O emprego de multi-mapas com escalas diferentes proporciona a geração de dados com pouca confiança em determinadas regiões de estudo, faz-se necessário empreender uma busca de mapas em escala melhor para obter resultados em tese condizentes com a realidade.

A obtenção de dados espaciais pedológicos e geológicos com maior nível de detalhe e precisão, integrados com outros estudos realizados no município, como a atualização de dados pluviométricos e hidrológicos, proporcionaria uma melhor comparação entre métodos estatísticos e determinísticos empregados neste trabalho. Essa associação merece ser abordada em trabalhos futuros a partir do embasamento metodológico utilizados nesta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUADO, A. G; CANTANHEDE, M. A. Lógica Fuzzy. Monografia Faculdade de Tecnologia – Univerdade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas – SP, 2010.

ARAÚJO JÚNIOR, A. C. R. Fatores de risco à inundação na bacia hidrográfica da estrada Nova Belém–PA. Geografia (Londrina), v. 22, n. 2, p. 57-78, 2014.

ARONOFF, S. Geographic Information Systems: A Managemen Publications, Ottawa, Canadá, 1989.

BARBOSA, J., P., M. Utilização de método de interpolação para análise e espacialização de dados climáticos: O Sig como ferramenta. Revista Caminhos De Geografia - revista on line <<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>> ISSN 1678-6343. 9 (17) 85 - 96, fev/2006

BARBOSA, P. E. Atlas de Vulnerabilidade às Inundações de Minas Gerais 2015. Disponível: < <http://www.meioambiente.mg.gov.br/component/content/article/13-informativo/2284-atlas-de-vulnerabilidade-a-inundacoes>>. Acesso: 04 de abril de 2017.

BONHAM-CARTER, G. F. Geographic information systems for geoscientists, modeling with GIS. Ontario: Pergamon, 1994. 398p.

BRAGHIN M.A.; SILVA, A.B. Proposta de Novo Método de Análise Booleana em Pesquisa Metalogenética. Caderno de Informação Georeferenciadas,1:2, 1997.

BRASIL. Decreto Nº 5.334 DE 6 DE JANEIRO DE 2005. Dá nova redação ao art. 21 e revoga o art. 22 do Decreto no 89.817, de 20 de junho de 1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/legislacao/ndecreto_5334_06jan2005.pdf Acesso: 04 de Abril de 2017.

BRASIL, Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios. CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S; OGURA, A. T. (orgs.), Brasília, 2007.

BRASIL, Código Florestal - Lei Federal nº 12.651 de 25 de Maio de 2012 em seu capitulo 2 Secção I – Da delimitação das Áreas de Preservação Permanente com as modificações da Lei nº 12.727 de 17 de Outubro de 2012.

BRASIL. Anuário Brasileiro de Desastres Naturais: 2013. 2. ed. Brasília: CENAD, 2014. Disponível: <<http://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/386/1/Anuario-Brasileiro-de-Desastres-Naturais-2013.pdf>>. Acesso: 04 de abril de 2017.

CÂMARA, G e A.P. AGUIAR (eds.), SPRING Programming Manual. São José dos Campos, INPE (1996).

CÂMARA, G., et al., Análise Espacial e Geoprocessamento. 2a edição, 2002. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/analise/cap1.pdf>. Acesso em: 03 de março de 2017.

CÂMARA, G. et al. Técnicas de Inferência Geográfica. In: DRUCK, S. et al. (Org.). Análise Espacial de Dados Geográficos. Brasília: EMBRAPA, 2004. p. 250 Disponível: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

CARVALHO, G. S.; MINGOTI, S. A. Manual do Usuário: programas para realização da análise hierárquica. UFMG. Instituto de Ciências Exatas. 2005.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. 2005. Projeto APA Sul RMBH: Estudos do Meio Físico. Belo Horizonte, CPRM. 1 CD-ROM.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. Projeto APA Sul RMBH: uso e cobertura da terra, mapas cobertura e uso da terra, escala 1:50.000, Graziela da S. Rocha Oliveira, Patrícia D. Jacques, Edgar Shinzato - Belo Horizonte: SEMAD/CPRM, 2005.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. LEVANTAMENTO DA GEODIVERSIDADE PROJETO ATLAS PLUVIOMÉTRICO DO BRASIL ISOIETAS ANUAIS MÉDIAS PERÍODO 1977 A 2006. Set/2011. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/atlas_pluviometrico_brasil/isoietas_totais_anuais_1977_2006.pdf>. Acesso: 24 de Março de 2018.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. Carta de Suscetabilidade a Movimento Gravitacionais de Massa e Inundações – Município de Nova Lima. Março de 2015. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/14945/CS-NovaLima.pdf?sequence=1>>Acesso: 24 de Março de 2018.

COX, E. *Fuzzy logic for business and industry*. Massachusetts: Charles River Media Inc, 1995.

CRISTO, S. S. V., HERMANN, M. L. P., 2004. Estudos de risco naturais no setor leste da bacia hidrográfica do rio Itacorubi, direcionado aos deslizamentos e as enchentes, Florianópolis, Brasil. Disponível: <http://revista.uft.edu.br/index.php/interface/article/view/315/214>. Acesso: 07 mai. 2015.

CUNHA, S. B. da & GUERRA, A. J. T. (org.). Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

ECKHARDT, R. R., SALDANHA, D. L., ROCHA, R. S., 2008. Modelo Cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas urbanas sujeitas às inundações na cidade de Lajeado/ RS. Revista Brasileira de Cartografia [online] 60. Disponível: <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/335>. Acesso: 03 de abril 2017.

ESCADA, M. I. S. Aplicação de Técnica *Fuzzy* em SIG como alternativa para o Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE). 1998. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser301/trabalhos/isabel_zeefuzzy.pdf%E2%80%8E>. Acesso em: 20 fev. 2014.

ESRI, Environmental Systems Research Institute. Html Help Control Version 10, disponível:<http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_Edit_TIN_3D

[_Analyst_works/00q90000007w000000/ >](#), acessado em 28 de março de 2017.

EASTMAN, J. R. Application of *fuzzy* measures in multi-criteria evaluation in GIS. International Journal of Geographical Information Science.pg.: 173-184 Ed.: Taylor & Francis Group. 2000.

FORMAN, R. T.T. L Cambridge University Press, 1995.

FRANÇA, B. T., RIBEIRO, C. B de M., 2003. Modelagem hidrológica e hidráulica para mapeamento de áreas de risco de inundações urbanas na bacia hidrográfica do rio Pomba. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

FRANCO, M. A. R. Desenho Ambiental: uma introdução à arquitetura da paisagem com o paradigma ecológico. São Paulo: Annablume, 1997.

GOMES, L. F. A.M. et al.. Tomada de Decisões em Cenários Complexos. São Paulo: Pioneira, 2004.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. (org) Impactos Ambientais Urbanos no Brasil. 2 ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 416p.

HIRATA, E., GIANNOTTI, M. A., LAROCCA, A. P. C; QUINTANILHA, J. A., 2013. Mapeamento Dinâmico e Colaborativo de Alagamentos na Cidade de São Paulo. Boletim Ciência Geodésicas [online] 19, 602-623. Disponível: <http://www.scielo.br/pdf/bcg/v19n4/a06v19n4.pdf>. Acesso: 03 de abril 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução do Presidente do IBGE Nº 1/2005 DE 25 DE FEVEREIRO DE 2005. Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_25fev2005.pdf Acesso: 04 de Abril de 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=11&uf=00> Acesso: 04 de Abril de 2017.

IDE-SISEMA - Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Disponível em:<<http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br>>. Acesso: 24 de Março de 2018.

IGAM. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <<http://cbhvelhas.org.br/plano-diretor-cbh-velhas/>> . Acesso: 25 de Março de 2018.

JANÉ, D. DE A. Uma introdução ao estudo da lógica *fuzzy*. Revista de Humanidades e Ciências Sociais Aplicadas, n. 2, p. 1–16, 2004.

JIANG, W., DENG, L., CHEN, L., WU, J., e LI, J. Risk assessment and validation of flood disaster based on fuzzy mathematics. Progress in Natural Science, v. 19, n. 10, p. 1419-1425, 2009.

LEÃO, R. P - Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa de Nova Lima/MG. Dissertação de Mestrado – UFOP, 2016.

KAYASTHA, P. et al. GIS based landslide susceptibility mapping using a *fuzzy* logic approach: A case study from Ghurmi-Dhad Khola area, Eastern Nepal. Journal of the Geological Society of India, v. 82, n. 3, p. 249–261, 15 set. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12594-013-0147-y>>. Acesso em: 4 maio 2014.

KOHAGURA, T. Lógica *Fuzzy* e suas aplicações. 2007. 49 f. Monografia (Graduação em Ciência da Computação), Departamento de Computação da Universidade Estadual de Londrina, Londrina - PR, 2007.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Piracicaba, 2002, 166f. Tese (Tese de Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luis Queiros”, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

MARCELINO, E. V., NUNES, L. H., KOBIYAMA, M. 2006. Mapeamento de risco de desastres naturais do Estado de Santa Catarina. Caminhos de Geografia 8, 72 - 84.

MARCELINO, E. V. Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos. Santa Maria: CRS/INPE, 2008. Disponível: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.02.16.22/doc/publicacao.pdf>>. Acesso: 04 de abril de 2017.

MARJANOVIC, M.; CAHA, J. *Fuzzy* approach to to landslide susceptibility zonation *Fuzzy Approach Landslide Susceptibility Zonation*. 2011, Pisek: [s.n.], 2011. p. 181–195. Disponível em: <<http://ceur-ws.org/Vol-706/papersg01.pdf>>.

MCHARG, Ian L. Design with nature. New York: Natural History Press, 1992.

MEIRELLES, M. S. P.; MOREIRA, F. R.; CÂMARA, G.; NETTO, A. L. C.; et al. Métodos de Inferência Geográfica: Aplicação no planejamento regional, na avaliação ambiental e na pesquisa mineral. In: MEIRELLES, M. S. P. et al. (Org.). Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. p. 593.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 925-933, 2003.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. 536p. (Coleção Geoprocessamento; v. 1).

MONTEIRO, C. A. F. Clima e Excepcionalismo. Conjecturas sobre o Desempenho da Atmosfera como Fenômeno Geográfico. Florianópolis: UFSC, 1991. 233p.

NONATO, E. A.; VIOLA, Z. G. G.; ALMEIDA, K. C. B.; SCHOR, H. H. R.. Tratamento estatístico dos parâmetros da qualidade das águas da bacia do alto curso do Rio das Velhas. Quím. Nova. v.30, n.4, p. 797-804. 2007.

PDM-NL – Plano Diretor do Município de Nova Lima, Lei Municipal 2007/2007. <http://www.novalima.mg.gov.br/media/files/Lei_2.007_2007_-_Plano_Diretor_de_Nova_Lima.pdf> Acesso em 17 de Abril de 2018.

PEREIRA E SILVA, L. .Modelagem e Geoprocessamento na Identificação de Áreas com Risco de Inundação e Erosão Na Bacia do Rio Cuiá. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa - Paraíba, Fevereiro – 2007.

PFALTZGRAFF, P. A. D. S. Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Geologia), Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PB, 2007.

PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C. O Método De Análise Hierárquica – Ahp – Como Auxílio Na Determinação Da Vulnerabilidade Ambiental Da Bacia Hidrográfica Do Rio Piedade (MG). Revista do Departamento de Geografia – USP, Volume 23 (2012), p. 4-26.

PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima/MG. Produto I/V Diagnostico Setorial. Caracterização socio-econômica e geoambiental, Maio de 2016.

PORTO, R. L. L. Hidrologia Ambiental. São Paulo: Ed. USP. ABRH, 1991.

QUINHONEIRO, F. H. F., Desenvolvimento de Metodologia de Análise de indicadores de sustentabilidade como ferramenta para tomada de decisão utilizando lógica *fuzzy*. Dissertação de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Reatores. Instituto De Pesquisas Energéticas E Nucleares. USP. São Paulo. 2015.

RAFAELI NETO, S. L. Um modelo conceitual de sistema de apoio à decisão espacial para gestão de desastres por inundações. 2000, 231p (Tese de Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

RAFFO, J. G. DA G. O Processo Analítico Hierárquico e seu uso na modelagem do espaço geográfico. Revista do Departamento de Geografia – USP, v. Volume Esp, p. 26–37, 2012. Disponível em: <<http://citrus.uspnet.usp.br/rdg/ojs/index.php/rdg/article/view/364/438>>. Acesso em: 5 abr. 2014.

REIS, P. E., PARIZZI, M. G., de MAGALHÃES, D. M., & MOURA, A. C. M. O escoamento superficial como condicionante de inundações em Belo Horizonte, MG: Estudo de caso da sub-bacia Córrego do Leitão, bacia do Ribeirão Arrudas. Geosciences= Geociências, v. 31, n. 1, p. 31-46, 2012.

RENNÓ, C. D. & SOARES, J. V. Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Ministério da Ciência e Tecnologia: INPE, Relatório Técnico Parcial. Dezembro, 2000.

RODRIGUES, D.S.; SILVA, A.N.R.; RAMOS, R.A.R.; MENDES, J.F.G. Avaliação multicritério da acessibilidade em ambiente SIG. In: VII Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica, Lisboa, 2002. 13p.

SAATY, T. L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource

Allocation. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T.L. “How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process”, European journal of Operational Research, 48, pp 9-26,1990

SAATY, T. Método de análise hierárquica, S. Paulo: Makron Books do Brasil, 1991.

SANTANA, C. F. Mapeamento Das Áreas De Risco De Inundação No Município De João Monlevade - Mg, Com A Utilização De SIG. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Belo Horizonte/MG – 24 a 27/11/2014

SANTOS, R. F. (ORG.). Vulnerabilidade Ambiental - Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos? Brasília: MMA, 2007. 192p.

SCHNEIDER, M. de O. Índice de vulnerabilidade como método de análise de risco à inundação da bacia hidrográfica do Arroio Feijó, RS. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, 2017.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTAVEL – SEMAD. Pedro Engler Barbosa. Atlas de Vulnerabilidade a Inundações do Estado de Minas Gerais, 29 de Setembro de 2015

SHAHABI, H. et al. Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: A comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio and logistic regression models. CATENA, v. 115, p. 55–70, abr. 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816213002841>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

SILVA, A. B. Sistemas de Informações Geo-referenciadas: conceitos e fundamentos. Campinas: Unicamp, 1999. 236p. (Coleção Livro-Texto).

SILVA, J. X. DA; Z Aidam, R. T. (org) Geoprocessamento & Análise Ambiental: Aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 368p.

SILVA, L. P. e; SANTOS, C. A. G; & ALMEIDA, N. V. Identificação de áreas susceptíveis à inundação na bacia do rio Cuiá-PB. In: VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2006, Gravatá, Anais. Gravatá, Brasil, 17-20 outubro ABRH, 2006.

SILVA JUNIOR, C. H. L. Lógica *Fuzzy* e Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicados ao Zoneamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos: Uma Revisão. Revista Monografias Ambientais - REMOA v. 14, n.3, Set-Dez. 2015, p.42-58 Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria e-ISSN 2236 1308 - DOI: 10.5902/2236130818976 2015.

SOUZA, D. F. DE et al. Aplicação do método AHP-*Fuzzy*. Encontro Nacional dos Estudantes de matemática da região Sul, 2010 Porto Alegre/RS. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/edipucrs/erematsul/comunicacoes/10DEBORAFERRODESOUZA.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2013.

SOUZA, M., P., Utilização de Lógica *Fuzzy* no Apoio à Decisão Multicritério. Dissertação de Mestrado 2006. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SPIRN, Anne Whiston. O jardim de granito: a natureza no desenho da cidade. Tradução: Paulo Mesquita Pellegrino. São Paulo: Edusp, 1995.

STASSUM, C. C. E. S, FILHO, K. P. Geoprocessamento como prática biopolítica no governo municipal. Revista de Administração Pública. 2012. Acesso < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0034-76122012000600011&lng=pt&tlng=en> Acesso: 04 de abril de 2017.

SUI, D.Z.A. *Fuzzy* GIS modeling approach for Urban land evaluation, Computers, Environment and Urban Systems, 16(2): 101-115, 1992.

TAVARES, P. R. L.. Modelagem Hidrológica E Hidráulica Associada A Sistemas De Informações Geográficas Para Identificação De Planícies De Inundação E Simulação Do Perfil D'água Em Um Trecho Do Rio Maranguapinho. Dissertação de Pós-graduação em Engenharia Civil/Recursos Hídricos, na Universidade Federal do Ceará 2005.

TOENSMANN, F.. About the History of Flood Defence: The Northern Hesse Example. Symposium on River Flood Defence. v1. Kassel: Herkules Verlag, 2000.

TOLEDO, M. Cr. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TEIXEIRA, W. Decifrando a terra. São Paulo: IBEP, v. 98, 2009.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul-ABRH. 1998, 669 p.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e aplicação. 3ª ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004.

UFV - CETEC - UFLA - FEAM. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>> Acesso em: 04 de abr. de 2017.

VARGAS, L.G. “An overview of the Analytic Hierarchy Process and its applications” European journal of Operational Research, 48, pp 2-8,1990.

VIANNA, A. P. P.. Utilização de modelagens Hidrológica e Hidráulica Associadas a um sistema de informações geográficas para mapeamento de áreas inundáveis – Estudo de caso: município de Itajubá, MG. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte/MG, 2000.

VON-ALTROCK, C. *Fuzzy* logic and neuro*Fuzzy* applications in busines and finance. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1996.

WANG, W. et al. Landslides susceptibility mapping in Guizhou province based on *fuzzy* theory. Mining Science and Technology (China), v. 19, n. 3, p. 399–404, maio 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1674526409600752>>. Acesso em: 27 abr. 2014.

WINGE, M. et al. Glossário Geológico Ilustrado – CPRM. 2014 Disponível em: < <http://sigep.cprm.gov.br/glossario>>. Acesso em 03 Dez 2017

WRIGHT, J. T. C.; GIOVINAZZO, R. A. Delphi: uma ferramenta de apoio ao planejamento prospectivo. *Cadernos de Pesquisa em Administração*, São Paulo, v. 1, n. 12, p. 54-65, 2000.

ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. *Information and Control*, v. 8, n. 3, p. 338–353, jun. 1965. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001999586590241X>>. Acesso em: 22 jan. 2014.

ANEXO A – QUESTIONÁRIO AOS ESPECIALISTAS – ÁREA DE GEOMÁTICA

Encaminhou-se por meio de correio eletrônico um resumo do trabalho, e o mapa referente a especialidade a qual seria necessário atribuir nota quanto ao risco à inundação. Assim para a área de Geomática encaminhou-se os seguintes questionários:

AVALIAÇÃO: MAPA DE MDE associado a Figura 10.

CLASSES	PESO - 1 ATÉ 9 - (1 menor afinidade e 9 maior afinidade frente à inundação)
705 – 801	
801 - 898	
898 - 995	
995 – 1.091	
1.091 – 1.188	
1.188 – 1.285	
1.285 – 1.381	
1.381 – 1.478	
1.478 – 1.575	

Observações:

AVALIAÇÃO: MAPA DE DECLIVIDADE associado a Figura 11.

CLASSES	PESO - 1 ATÉ 9 - (1 menor afinidade e 9 maior afinidade frente à inundação)
0 – 30%	
30 – 47%	
47 – 100%	
>100%	

Observações:

AVALIAÇÃO: MAPA DE USO DO SOLO associado a Figura 13

CLASSES	PESO - 1 ATÉ 9 - (1 menor afinidade e 9 maior afinidade frente à inundação)
Campo, Cerrado e Pastagem	
Cultivo – Agricultura	
Edificações e Sistema Viário	
Espelho d' Água	
Floresta Nativa	
Silvicultura	
Solo Exposto	

Observações:

ANEXO B – QUESTIONÁRIO AOS ESPECIALISTAS – ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE

Encaminhou-se por meio de correio eletrônico um resumo do trabalho, e o mapa referente a especialidade a qual seria necessário atribuir nota quanto ao risco à inundação. Assim para a área de Recursos Hídricos e Meio Ambiente encaminhou-se os seguintes questionários:

AVALIAÇÃO: ISOIETAS associado a Figura 16.

Intesidade de Chuva	PESO - 1 ATÉ 9 - (1 menor afinidade e 9 maior afinidade frente à inundação)
Menor que 1.600 mm anuais	
Entre 1.600 a 1.700 mm anuais	
Maiores que 1.700 mm anuais	

Observações:

AVALIAÇÃO: MAPA APP DE RECURSOS HIDRÍCOS associado a Figura 17.

Intesidade de Chuva	PESO - 1 ATÉ 9 - (1 menor afinidade e 9 maior afinidade frente à inundação)
Drenagem canalizada	
Drebagem Natural	
Espelhos d'Água	
App de Cursos e Espelhos d'água	

Observações:

ANEXO C – QUESTIONÁRIO AOS ESPECIALISTAS – ÁREA DE SOLOS

Encaminhou-se por meio de correio eletrônico um resumo do trabalho, e o mapa referente a especialidade a qual seria necessário atribuir nota quanto ao risco à inundação. Assim para a área de Solos encaminhou-se os seguintes questionários:

AVALIAÇÃO: MAPA DE SOLO associado a Figura 14.

CLASSES	PESO - 1 ATÉ 9 - (1 menor afinidade e 9 maior afinidade frente à inundação)
Cambissolo Vermelho+Amarelo Distrófico	
Neossolo Litólico Típico + Afloramento Rochoso	

Observações:

ANEXO D – TABELA DE RESULTADOS DOS ESPECIALISTAS

A tabela abaixo mostra os resultados dos questionários enviados aos especialistas de áreas afins sobre a propabilidade de cada classe mapeada favorecer ou não ao evento de inundação.

ESPECIALISTAS	CONTRIBUIÇÃO	CLASSES	NOTAS
ESPECIALISTA 1 - ÁREA DE GEOMÁTICA	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	705 – 801	9
		801 - 898	7
		898 - 995	5
		995 – 1.091	3
		1.091 – 1.188	1
		1.188 – 1.285	1
		1.285 – 1.381	1
		1.381 – 1.478	1
		1.478 – 1.575	1
	DECLIVIDADE	0 – 30%	9
		30 – 47%	5
		47 – 100%	1
		>100%	1
	USO DO SOLO	Campo + Cerrado + Pastagem	3
		Cultivo + Agricultura	3
		Edificações + Sist. Viário	7
		Espelho d' Água	7
		Floresta Nativa	3
		Silvicultura	3
		Solo Exposto	3

ESPECIALISTAS	CONTRIBUIÇÃO	CLASSES	NOTAS
ESPECIALISTA 2 - ÁREA DE GEOMÁTICA	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	705 – 801	9
		801 - 898	9
		898 - 995	7
		995 – 1.091	7
		1.091 – 1.188	5
		1.188 – 1.285	5
		1.285 – 1.381	3
		1.381 – 1.478	1
		1.478 – 1.575	1
	DECLIVIDADE	0 – 30%	9
		30 – 47%	7
		47 – 100%	3
		>100%	1
	USO DO SOLO	Campo + Cerrado + Pastagem	3
		Cultivo + Agricultura	3
		Edificações + Sist. Viário	9
		Espelho d' Água	9
		Floresta Nativa	1
		Silvicultura	3
Solo Exposto		9	
ESPECIALISTA 3 - ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE	ISOIETAS	menor que 1600	4
		1600 - 1700	6
		maior que 1700	8
	APP DE RECURSOS HÍDRICOS	Drenagem canalizada	2
		Drenagem Natural	3
		Espelhos d'água	1
		App de Cursos e Espelhos d'água	8
ESPECIALISTA 4 - ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE	ISOIETAS	menor que 1600	2
		1600 - 1700	4
		maior que 1700	6
	APP DE RECURSOS HÍDRICOS	Drenagem canalizada	5
		Drenagem Natural	4
		Espelhos d'água	3
		App de Cursos e Espelhos d'água	1

ESPECIALISTAS	CONTRIBUIÇÃO	CLASSES	NOTAS
ESPECIALISTA 5 - ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE	ISOIETAS	menor que 1600	1
		1600 - 1700	3
		maior que 1700	7
	APP DE RECURSOS HÍDRICOS	Drenagem canalizada	7
		Drenagem Natural	5
		Espelhos d'água	5
		App de Cursos e Espelhos d'água	5
ESPECIALISTA 6 - ÁREA DE SOLOS	SOLOS	Latossolo Vermelho + Amarelo Distrófico	2
		Neossolo Litólico Típico + Afloramento Rochoso	5