

Lógica fuzzy associada ao risco de inundação no município de Nova Lima/MG

Júlio Ramissés Ladeia Ramos
Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais - UFMG
julioramisses@hotmail.com

Marcos Antônio Timbó Elmiro
Departamento de Cartografia – UFMG
mtimbo@ufmg.br

Marcelo Antonio Nero
Departamento de Cartografia – UFMG
marcelo.nero@gmail.com

Plínio da Costa Temba
Departamento de Cartografia – UFMG
temba30@yahoo.com.br

Gilmar Rosa
Centro Universitário Unihorizontes
gilmar.rosa@unihorizontes.br

Resumo

O dados provenientes de Sensoriamento Remoto (SR) quando integrados a Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permitem identificar, reduzir e reestruturar diferentes questões ambientais relacionadas ao planejamento urbano. Tratando-se de fenômenos naturais severos, como é o caso das inundações, essas questões podem envolver vidas humanas, bens materiais e infraestruturas decisivas. Nessa conjuntura, o presente trabalho desenvolveu um modelo de análise multicritério de apoio à decisão do tipo *fuzzy* com pesos de evidências aliado à Análise Hierárquica de Processos (AHP). As análises e aplicações do trabalho utilizaram dados e métodos de sensoriamento remoto e geoprocessamento para determinar riscos à inundação em áreas do município de Nova Lima na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. Na construção dos modelos, foram utilizadas diversas variáveis de entrada, tais como: Modelo Digital de Elevação (MDE), Declividade, Uso e Ocupação do Solo, Área de Preservação Hidrográfica Permanente, Isoietas Climáticas, Geologia e Tipo de Solo. A fuzzificação por pesos de evidência foi realizada para identificar regiões aptas e não aptas em relação à inundação para cada variável, produzindo-se mapas individuais valorados de 0 a 1. Na composição do processo, utilizou-se o método AHP na multiplicação dos mapas fuzzificados por meio de notas de especialistas e de pesquisa bibliográfica produzindo-se um mapa crítico com os níveis de susceptibilidade à inundação. A validação dos resultados do estudo foi feita por meio da comparação com dados de referência preexistentes obtidos da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e de informações locais. O processo de validação apresentou coerência de 86%, indicando a eficácia da metodologia desenvolvida. A execução simples, o baixo custo e a coerência dos resultados obtidos deixa evidente o caráter inovador da metodologia. Portanto, a identificação das áreas susceptíveis ao risco à inundação usando a metodologia *fuzzy* e AHP, mostrou-se importante para identificar áreas que necessitam de maior

atenção do poder público e de investimentos em ações de proteção, prevenção e mitigação. Dessa forma, o estudo é uma contribuição para a gestão de riscos e desastres em áreas atingidas por inundação.

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

Fuzzy logic associated to the flood risk in Nova Lima / MG

Abstract

Data provided by Remote Sensing (SR) integrated with Geographic Information Systems (GIS) can be used in identifying, reducing and restructuring urban planning and environmental issues. In the case of severe natural phenomena such as floods, human lives, material goods and critical infrastructure can be seriously involved. This work develops a fuzzy multicriteria analysis model of decision support associated with Hierarchical Process Analysis (AHP). Along the study remote sensing and geoprocessing data and methods were used for mapping flood risks areas within Nova Lima municipality in the estate of Minas Gerais, Brazil. Several input variables such as Digital Elevation Model (DEM), Slope, Soil Use and Cover, Preservation Area, Climate, Geology and Soil Type were used for building the models. A fuzzified transformation by weight of evidence was performed to identify regions susceptible and not susceptible to flooding for each variable, resulting individual maps with values ranging from 0 to 1. Following the progress process the AHP method was used to multiply fuzzified maps using grades from research experts and bibliographic research producing a critical map with flood susceptibility levels. The study results were validated by comparing them with previous reference data obtained from the State Secretariat of Environment and Sustainable Development (SEMAD), the Mineral Resources Research Company (CPRM) and local information. Applying developed methodology the validation process presented an 86% degree of consistency. The straightforward running of process, the low cost and the results consistency highlighted the innovative content of the methodology. Therefore, identification of susceptible to flood risk areas based on the fuzzy and AHP methodology has proved to be valuable in identifying sensitive areas requiring special government attention and investments for protection, prevention and mitigation actions. Thus, the study is a contribution to disaster and risk management in flood areas.

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

Introdução

A qualidade de vida da população que habita centros urbanos nos países de terceiro mundo possui dinâmica própria peculiar, sendo marcada por influência decisiva nos desajustes estruturais da falta de planejamento urbano. A desorganização é assinalada de vários modos. Seja através da utilização de áreas potencialmente atrativas para empreendimentos de turismo, comerciais e outros, invadidas pela expansão urbana desordenada (inchaço das cidades) ou seja, também, pela construção de moradias em áreas sujeitas a sérios riscos ambientais como as inundações, deslizamentos, entre

outros (SILVA e ZAIDAM, 2004). O caos ambiental urbano tem se tornado uma tendência atual decorrente do escasso planejamento, gerando custos elevados para a sociedade em curto prazo (GUERRA e CUNHA, 2004).

O município de Nova Lima em Minas Gerais (MG), a exemplo de outras cidades brasileiras, apresenta um cenário de significativas alterações do ambiente natural e de rápida evolução no adensamento populacional. O desenvolvimento urbano das últimas décadas em Nova Lima foi deficiente no que diz respeito à drenagem das águas pluviais. Observa-se que as áreas impermeabilizadas são cada vez maiores, reduzindo a capacidade de infiltração do solo, acelerando a velocidade do escoamento superficial e produzindo uma sequência de eventos favoráveis à ampliação das áreas de riscos hidrológicos.

A adaptação a impactos adversos resultantes das enchentes e inundações tem sido reconhecida como um tema prioritário para as políticas nacionais e internacionais. Assim, o futuro de Nova Lima, bem como de outras cidades, dependerá cada vez mais de ações de planejamento e de sistemas de gestão integrada, uma vez que as transformações da realidade econômica, social e política devem ser guiadas por investimentos corretos em planos estruturantes, evitando-se prejuízos materiais e perdas de vidas humanas.

Visando contribuir para um planejamento urbano adequado e para a redução dos graves efeitos dos desastres naturais, diversos trabalhos científicos têm sido realizados utilizando-se de geotecnologias como ferramentas para o mapeamento das áreas de ocorrências de desastres (FRANÇA e RIBEIRO, 2003; MARCELINO et al., 2006; ECKHARDT et al., 2008; HIRATA et al., 2013). Dentre as ferramentas de destaque em geotecnologias, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) oferecem capacidades únicas na automatização, gestão e análise de dados espaciais para avaliação de riscos, apresentando um papel muito importante na análise de problemas de decisão multicritério. A avaliação multicritério oferece um conjunto de técnicas e procedimentos que permite revelar as preferências de decisões e incorporá-las na tomada de decisão baseada no SIG. Dentre elas destacam-se as lógicas Booleana e *Fuzzy* (RODRIGUES et al., 2002). Com respeito à lógica *fuzzy*, bem como aplicações, vale destacar os trabalhos de Campos (2017) e Costa et al (2017), publicados nessa mesma revista.

Assim, diante dos problemas apresentados e tendo ferramentas disponíveis para enfrentá-los, os objetivos do trabalho focaram na identificação das áreas susceptíveis a inundação no município de Nova Lima-MG com base em modelos *fuzzy* aplicados na análise multicritério de apoio à decisão, em conjunto com Análise Hierárquica de Processos (AHP). As aplicações e análises do trabalho utilizaram dados e métodos de sensoriamento remoto e geoprocessamento, consistindo nas seguintes etapas principais: 1) elaboração dos modelos espaciais aplicados na resolução de riscos de inundação em lotes urbanos; 2) avaliação da adequação e eficiência de métodos de análise de decisão; 3) verificação da aplicabilidade e viabilidade das capacidades e ferramentas do SIG para identificação de lotes com risco de inundações; 4) identificação das áreas de vulnerabilidade às inundações no município de Nova Lima.

Os resultados do estudo representam uma contribuição para a implantação de uma gestão de riscos e de desastres mais eficaz em áreas atingidas por inundação no município de Nova Lima. Principalmente na indicação dos locais que requerem maior atenção do poder público para aplicação de investimentos em ações de proteção, prevenção e mitigação.

Geotecnologias e lógica *fuzzy* na tomada de decisão - estudos e aplicações

As análises espaciais são feitas por meio do cruzamento de diferentes informações que resultam em áreas contendo atributos concordantes com os modelos adotados. Do ponto de vista da lógica Booleana, este 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 (BRAGHIN e SILVA, 1997). A lógica *Fuzzy* distingue-se da lógica Booleana por incorporar a utilização de um intervalo de valores contínuos, e não valores discretos como ocorre na lógica Booleana, sendo necessária a representação por conjuntos descritos através de funções matemáticas (SUI, 1992). Vários trabalhos têm sido realizados utilizando-se de geotecnologias e conceitos *Fuzzy* em análises espaciais relacionadas às ocorrências de desastres, bem como, outras aplicações. De forma que se trata de uma área de pesquisa ativa, cujos conceitos vêm sendo cada vez mais utilizados para subsidiar o planejamento, as análises e as ações em diferentes áreas de aplicação do conhecimento (SILVA, 2006).

De acordo com Forman (1995), um dos maiores desafios do planejamento do uso do solo é a utilização sustentável do ambiente, que deve ser embasada em uma dinâmica de transformação que aplica igual ênfase nas dimensões ambientais e humanas da paisagem, bem como na consideração de um intervalo temporal que possa contemplar diferentes gerações humanas. Assim, a utilização de recursos de sensoriamento remoto associados a plataformas de SIG são fundamentais na análise da dinâmica temporal da transformação de áreas como as bacias hidrográficas e as zonas urbanizadas. O monitoramento contínuo e a aquisição sistemática de dados proporcionam um controle efetivo sobre o comportamento dessas áreas. Entretanto, o conjunto de dados adquiridos requer processamentos e ajustes constantes, onde os ambientes SIG tornam-se muito relevantes nas análises, no armazenamento, na utilização e na atualização de dados espaciais.

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

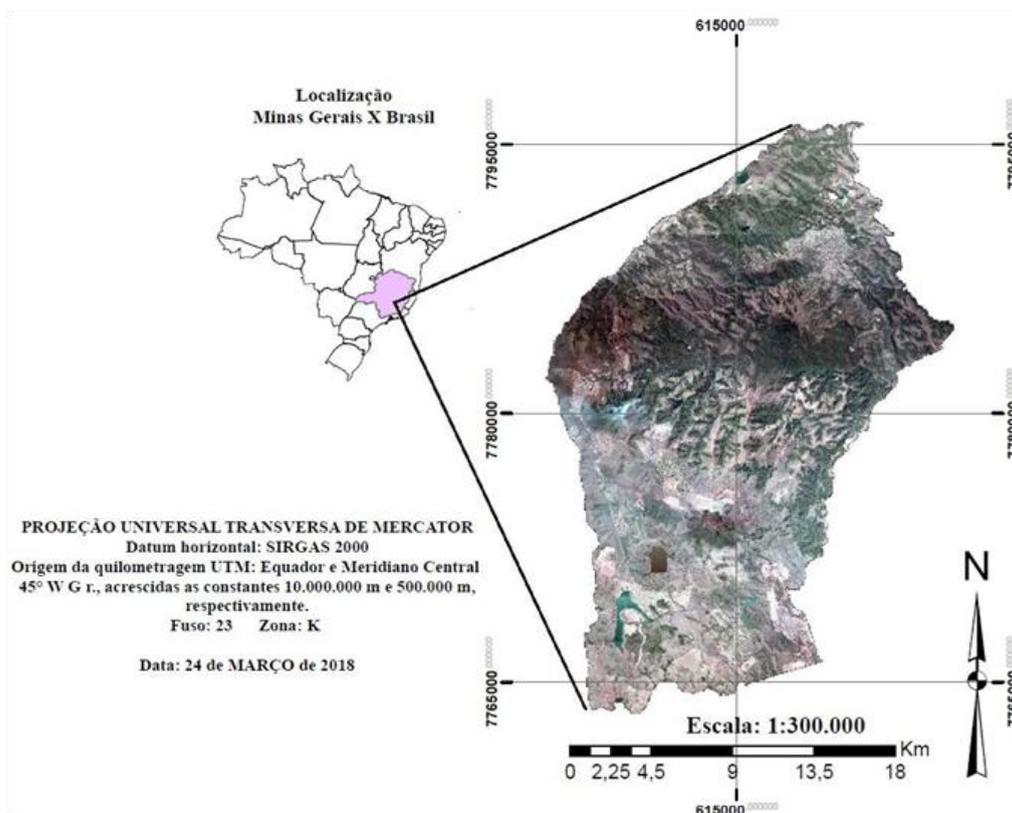
Trabalhos de Souza (2006) exploram instrumentos e métodos da AMD através da utilização de lógica *Fuzzy* com o intuito de agregar valor nas tomadas de decisões complexas, tendo em vista as muitas dificuldades características do mundo real. Para tal, escolheu uma abordagem comparativa, onde os desempenhos das metodologias clássicas (AHP e teoria da utilidade multiatributo) e do sistema *Fuzzy*, são observados com relação a um problema simples, como a compra de um veículo.

Estudos de Santana (2014) caracterizam áreas com maiores riscos de inundação no município de João Monlevade-MG utilizando mapas de declividade, de uso e ocupação do solo, de tipos de solo e de altimetria. O processamento da análise multicritério foi realizado nesse estudo por meio do cruzamento das informações e da ponderação de cada item pelo seu grau de influência no processo de inundação. Foram gerados mapas-sínteses da situação, identificando as áreas de baixa, média e alta

susceptibilidade à inundação. Silva Junior (2015) apresenta uma abordagem do uso da lógica *Fuzzy* e do método AHP para o zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos. Nesse estudo foram descritas ferramentas, que se mostraram eficientes e úteis do ponto de vista metodológico, como os operadores *Fuzzy*, média ponderada, AHP e Gamma, além da comprovação da eficiência do método AHP no tratamento das incertezas inerentes ao uso do conhecimento empírico de especialistas.

Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Nova Lima, na porção central do Estado de Minas Gerais inserida na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), conforme ilustração apresentada na Figura 1. A área do município abrange aproximadamente 429 km² com as altitudes variando entre 722 m, às margens do Rio das Velhas e 1583 m, na Serra do Cachimbo, resultando em uma altitude média de 745 metros acima do nível do mar. A cidade apresenta uma população aproximada de 81 mil habitantes (IBGE, 2010), incrustada em região montanhosa caracterizada predominantemente por formações geológicas dos supergrupos Minas e Rio das Velhas, apresentando solos, na sua maioria, do tipo Cambissolos e Neossolos (CPRM, 2015; UFV et al. 2017).



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 1: Mapa de Localização do Município de Nova Lima

Materiais e métodos

No desenvolvimento do presente estudo foram utilizados os dados e materiais de suporte a seguir: Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido por meio de interpolação de curvas de nível com equidistância vertical de 5 metros (PMSB, 2016); mapa de declividade com as classes determinadas de acordo com o plano diretor do município Lei n° 2007/2007 (PDM-NL, 2015); mapa de uso e cobertura do solo (CPRM, 2005); mapa de solos do estado de Minas Gerais, Folha 04 (UFV et al, 2017); mapa geológico de Minas Gerais contendo a variável litologia (UFMG/CODEMIG, 2005); mapa de isoietas climáticas obtidas do atlas pluviométrico do Brasil (CPRM, 2015); mapa de hidrografia (PMSB-NL, 2016); mapa de áreas sob risco e suscetibilidade de inundação (CPRM, 2015; SEMAD, 2015); mapa de delimitação de loteamentos de Nova Lima/MG (PMNL, 2017); e plataforma de software SIG ArcGIS versão 10.5 (ESRI, 2016).

A metodologia aplicada no estudo, conforme esquema apresentado no fluxograma da Figura 2, foi desenvolvida em seis etapas principais, a saber: i) compilação e pré-processamento dos dados de entrada (recorte para a área de interesse, padronização de datum geodésico e sistema de projeção cartográfica 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 determinação das variáveis de maior 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 a inundação, compiladas na SEMAD em 2015, no Atlas de Vulnerabilidade à Inundação de Minas Gerais de 2015 e nos relatos de moradores, notícias na mídia local e estadual em 2012, 2017 e 2018.

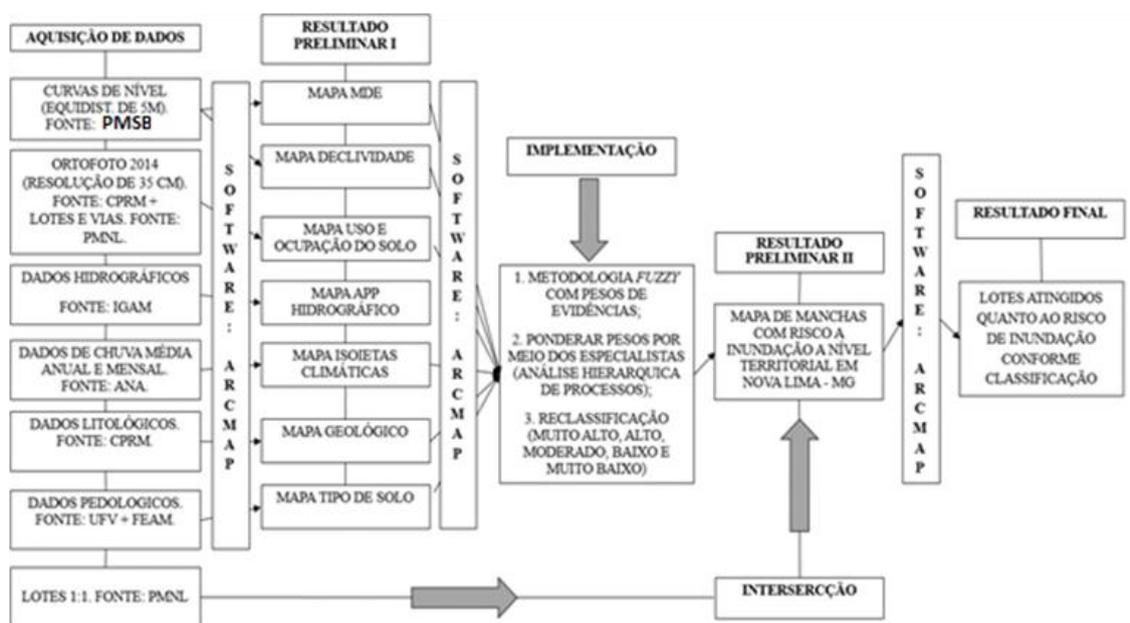


Figura 2: Fluxograma do método de trabalho.

Na primeira etapa, correspondente à aquisição dos dados, foram elaborados os mapas de entrada, tais como, Modelo Digital de Elevação, Declividade, Uso e

Ocupação do Solo, Área de Preservação Permanente Hidrográfica, Isoietas Climáticas, Geológico e Tipo de solo.

A segunda etapa, consistiu na aplicação do questionário, tratando-se de uma consulta envolvendo pesquisadores especialistas das áreas de hidrologia, climatologia, solos e geologia atuantes em programas de pós-graduação de Universidades Federais. Aos pesquisadores especialistas em cada área de interesse foi exposto o contexto do trabalho, o problema que se pretendia avaliar e solicitadas sugestões para atribuição dos pesos às classes presentes em cada variável ambiental adotada no estudo (WRIGHT e GIOVINAZZO, 2000).

Na terceira etapa, realizou-se a organização das variáveis adotadas em uma matriz de comparação par-a-par, seguindo-se da aplicação de julgamentos de níveis de importância de uma variável em relação à outra, conforme resultado apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Matriz de comparação pareada entre as variáveis utilizadas no estudo do risco à inundação no município de Nova Lima/MG.

Variáveis	MDE	Declividade	Uso e cobertura	Pedologia	Geologia	Isoietas	Hidrografia
MDE	1,00	3,002,00	6,00	7,00	0,50	0,33	
Declividade	0,33	1,002,00	2,00	4,00	2,00	0,33	
Uso e cobertura	0,50	0,501,00	3,00	5,00	0,50	0,33	
Pedologia	0,16	0,500,33	1,00	3,00	0,33	0,25	
Geologia	0,16	0,250,20	0,33	1,00	0,25	0,14	
Isoietas	2,00	0,502,00	3,00	4,00	1,00	0,50	
Hidrografia	3,00	3,003,00	4,00	6,00	2,00	1,00	
Total	7,15	8,7510,53	19,33	30,00	6,58	2,88	

Fonte: Elaborado pelos autores

Seguindo-se aos julgamentos, a matriz foi normalizada e extraídos os autovalores correspondentes aos pesos de ponderações utilizados na álgebra de mapas. Após a normalização, foram extraídos os autos vetores da matriz para o cálculo do índice de consistência (SAATY, 1980).

Na quarta etapa, de posse dos pesos sugeridos pelos especialistas, foi

realizado um processamento *Fuzzy* de modo a padronizar a escala, de 1 a 9, da análise dos especialistas para a escala de risco, variando de 0 a 1. Em seguida foi aplicada a álgebra de mapas com base nos resultados dos mapas padronizados e das ponderações resultantes da AHP.

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

As Fuzzificações de todos os mapas de entrada foram realizadas gerando-se mapas individuais para cada variável. A matriz de comparação pareada das variáveis ambientais adotadas no estudo atingiu Índice de Consistência (IC) de 0,075 e as ponderações sobre suas respectivas contribuições para o risco à inundação no município de Nova Lima/MG resultaram nos autovalores apresentados na Tabela 2.

A partir da Tabela 2 pode ser inferido que a hidrografia foi responsável por maior contribuição, cerca de 30%, para a ocorrência de inundações quando comparada com as demais variáveis ambientais, seguida da variável altitudes (MDE), com contribuição de aproximadamente 20%. Assim, foi definido o seguinte modelo algébrico para o cálculo do risco à inundação no município de Nova Lima/MG

$$R = ((M \times 0,20) + (D \times 0,14) + (U \times 0,10) + (P \times 0,06) + (G \times 0,03) + (I \times 0,16) + (H \times 0,30))$$

onde R é o risco à inundação, D é a declividade, U é o uso e cobertura do solo, P é a pedologia, G é a geologia, I são as isoietas climáticas e H é a hidrografia.

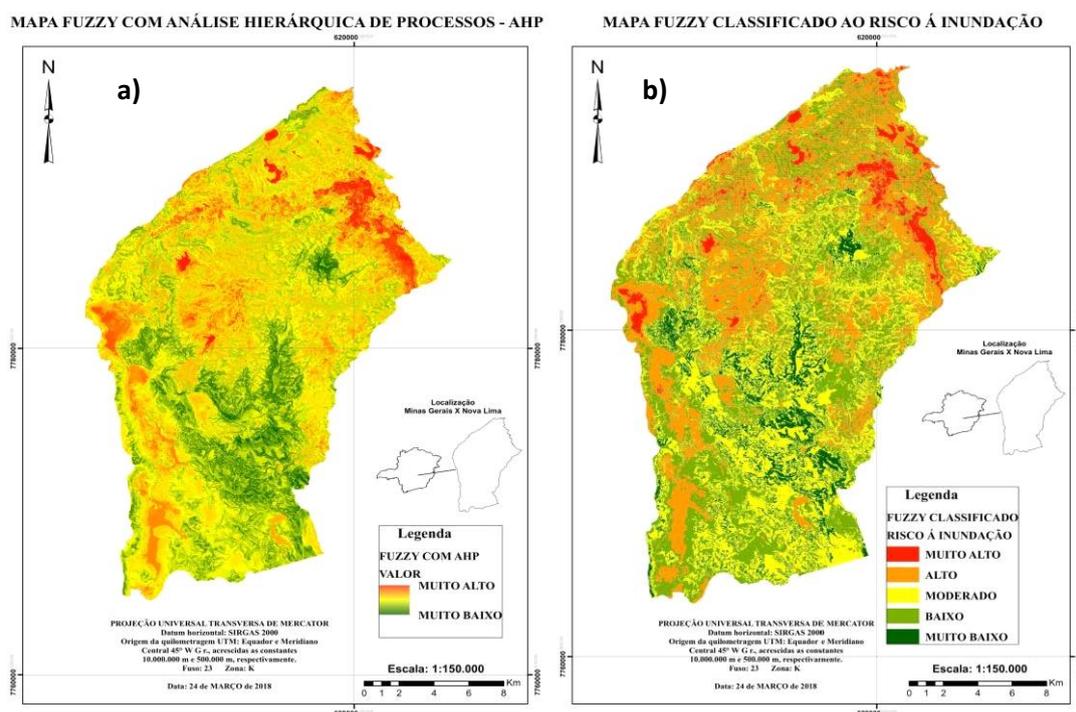
Tabela 2. Pesos (autovalores) quanto ao risco à inundação obtidos para cada variável ambiental no município de Nova Lima/MG.

Variável ambiental	Autovalor
MDE	0,20
Declividade	0,14
Uso e cobertura	0,10
Pedologia	0,06
Geologia	0,03
Isoietas	0,16
Hidrografia	0,30

IC = 0,0747

Fonte: Elaborado pelos autores

A aplicação do modelo algébrico de risco à inundação forneceu resultados *Fuzzy* variando de 0,23 a 0,69. Quanto maior o valor obtido maior é o risco à inundação, conforme apresentado na Figura 3.



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 3. a) Mapa *Fuzzy* de risco à inundação no município de Nova Lima/MG, b) Classes de risco à inundação no Município de Nova Lima/MG.

Análise dos resultados e discussões

Observam-se maiores associações de risco à inundação nas margens do Rio das Velhas, em regiões de bairros como Honório Bicalho, região central de Nova Lima/MG e bairro Bonfim. Os resultados também apresentaram o bairro Jardim Canadá em estado de susceptibilidade à inundação. A partir da classificação dos resultados é possível atribuir cinco níveis de risco à inundação: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto, conforme Figura 3b.

A partir da Figura 3b pode-se descrever as principais características ambientais de cada classe de risco. 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. 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 do tipo Neossolos.

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

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

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 classificados de alto a muito alto na bacia estão associados tanto às enchentes ribeirinhas, atingindo as populações próximas aos leitos dos rios, quanto às inundações devidas à urbanização, provocadas pela

impermeabilização do solo e pelas obstruções das redes de drenagem e escoamentos naturais.

Tabela 3. Intervalo *Fuzzy* associado à 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 a 0,35	Muito Baixo	3.798,133	8,9
0,35 - 0,42	Baixo	11.764,715	27,7
0,42 - 0,48	Moderado	14.202,02	33,4
0,48 - 0,58	Alto	11.269,624	26,5
0,58 - 0,69	Muito Alto	1.449,858	3,4
Total		42.484,35	100

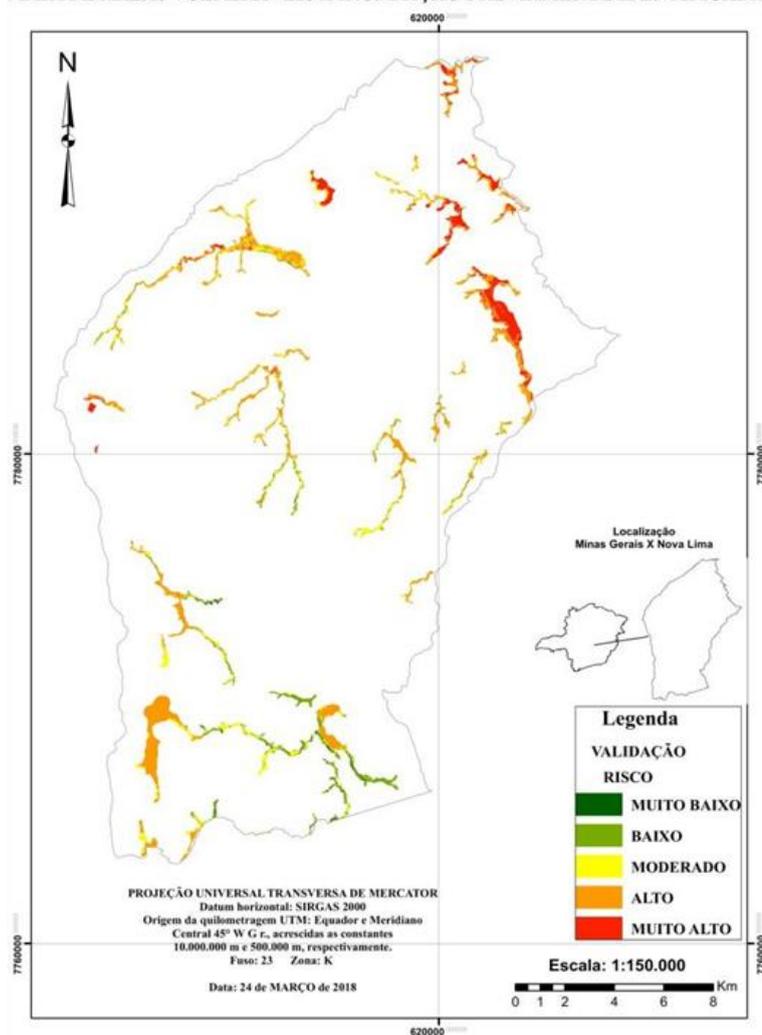
Fonte: Elaborado pelos autores

De acordo com os dados do PMSB (2016), da SEMAD (2015) e da CPRM (2015), no município de Nova Lima/MG existem mais de 2.300,00 ha correspondentes às manchas de alagamentos e áreas suscetíveis à inundação. A sobreposição com os resultados obtidos permite verificar o nível de concordância espacial entre os estudos já realizados e o presente trabalho (Figura 4).

Nos estudos previamente realizados, as regiões vulneráveis às inundações correspondem às áreas de planícies aluviais, solos hidromórficos situados ao longo de cursos d'água, áreas mal drenadas e com lençol freático aflorante ou 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 (Tabela 4).

Excluindo as áreas de risco muito baixo (2,4%) e baixo (11,9%), a análise espacial apresentou correspondência de, aproximadamente, 86% das áreas vulneráveis previamente mapeadas. Ou seja, um total de 334,4 ha das áreas propostas pela CPRM (2015), PMSB (2016) e SEMAD (2015) não foram contempladas no presente estudo.

MAPA DE ÁREAS VULNERÁVEIS À INUNDAÇÃO PREVIAMENTE IDENTIFICADAS



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 4. Mapa da união das áreas vulneráveis à inundação a partir de dados do PMSB (2016), da SEMAD (2015) e da CPRM (2015).

Tabela 4. 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

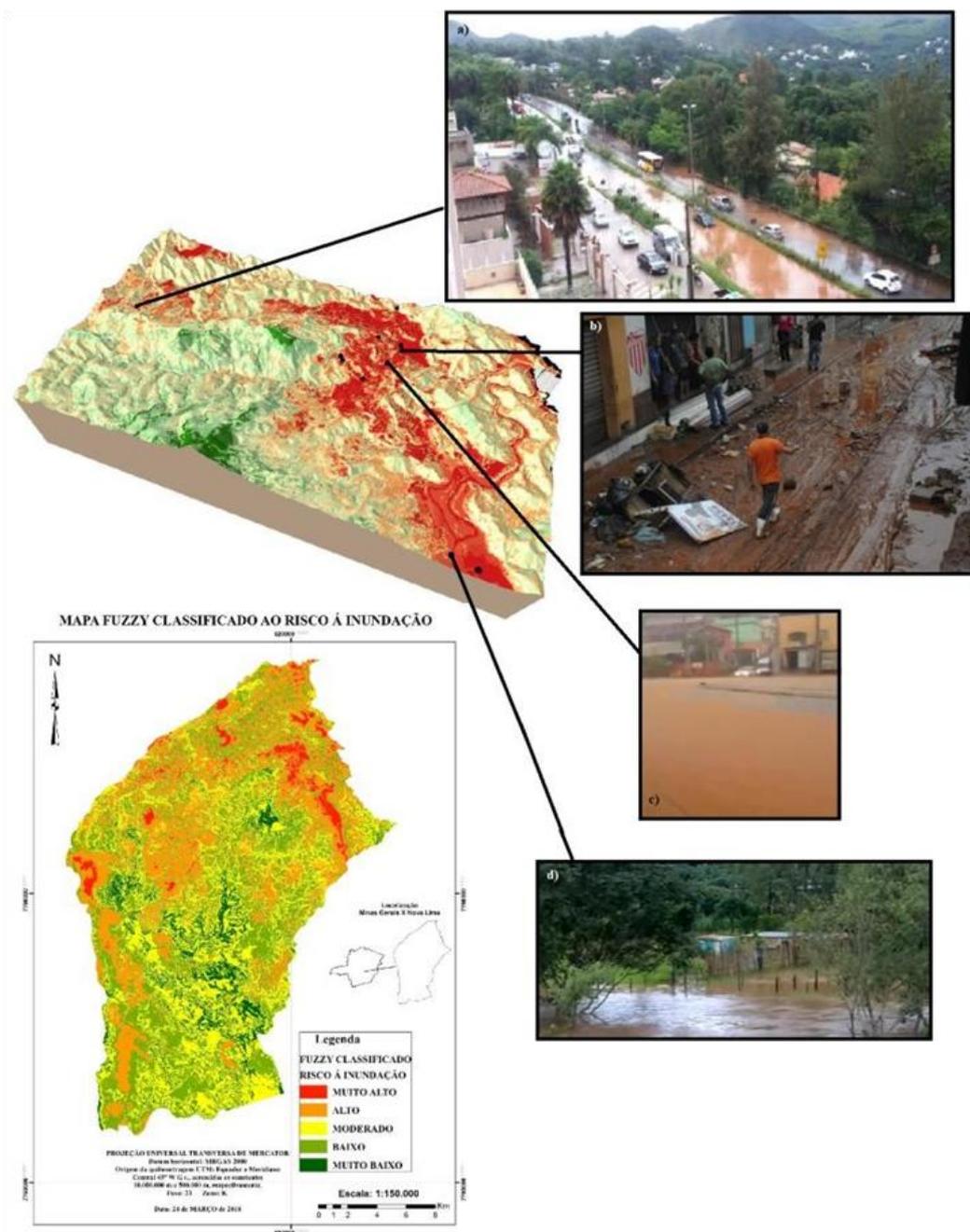
Fonte: Elaborado pelos autores

A Tabela 5 ilustra onze eventos de inundações ocorridos entre 2012 e 2017 e em 2018, indicando bairros e regiões onde a inundação foi recorrente. O bairro Honório Bicalho, teve maior quantidade de eventos registrados, sendo quatro entre os anos de 2012 e 2017. Na Figura 5 é possível observar alguns eventos de inundações ocorridas recentemente no município de Nova Lima: em 21 de fevereiro de 2018, na MG 030 (Figura 5a); na avenida José Bernardo de Barros, em 15 de novembro de 2012 e 21 de fevereiro de 2018 (Figuras 5b e 5c); e a enchente do Rio das Velhas, na altura do bairro Honório Bicalho em 2012 (Figura 5d).

Tabela 5. Exemplos de pontos de inundações em regiões vulneráveis à inundação no município de Nova Lima/MG, posições UTM no Fuso 23, SGR WGS84.

Ponto	UTM E	UTM N	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 Curitiba	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: Elaborado pelos autores



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 5. Exemplos de eventos de inundações em áreas classificadas com risco à inundação muito alto no Município de NovaLima/MG

Considerações finais

O ponto de partida para o estudo foi o trabalho apresentado na Carta de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações do Município de Nova Lima realizado pela CPRM (2015) e LEAO (2016). A partir deste marco de referência inicial buscou-se a construção de uma metodologia relacionada ao risco de

inundação capaz de traduzir com mais adequação e melhor precisão a realidade atual do município.

Buscou-se no estudo demonstrar o estado real em que se encontra a população local, constatando de fato que está sujeita aos riscos eminentes de inundação e de perdas potenciais de bens materiais e de vidas humanas. Frente a essa realidade o trabalho buscou fornecer incentivos e subsídios para atuação dos planejadores urbanos em uma perspectiva de médio e longo prazos, abrangendo o crescimento ordenado em áreas de expansão urbana.

A eficácia da lógica *Fuzzy* com pesos de evidências associada à Análise Hierárquica de Processos ficou claramente demonstrada com base na consistência dos resultados do trabalho. Os resultados deixaram clara a possibilidade de mapear a suscetibilidade à inundação de forma eficiente com emprego de recursos modestos e aplicação de programas de geoprocessamento que possibilitam sobrepor grande quantidade de dados matriciais e vetoriais de forma bastante simples. Ficou portanto demonstrado que o emprego da análise multicritério (lógica *Fuzzy* e AHP) e da mudança de cenários em modelos que podem simular com melhor precisão a realidade do ambiente através da atribuição de pesos ou notas aos temas e reclassificações, constituem um avanço importante no processo de apoio à decisão.

A análise quanto ao risco de inundação, com base na metodologia *Fuzzy* e AHP, apresentou-se como importante ferramenta de fácil execução e de baixo custo de implementação para a identificação de áreas que necessitam de maior atenção do poder público e de investimentos em ações de proteção, prevenção e mitigação..

A relevância do trabalho também pode ser traduzida na forma de contribuição para uma gestão de riscos e desastres mais eficiente. Neste aspecto é oportuno sugerir novos estudos de prevenção de riscos de inundação no desenvolvimento, não apenas do município de Nova Lima-MG, mas também de outros municípios, sempre em consonância com seus planos diretores para evitar a expansão urbana nas áreas de risco.

Entretanto, é necessário ressaltar que a avaliação das áreas suscetíveis à inundação não constitui ciência exata, mas trata-se de tecnologia baseada na interpretação de dados, na qual, a qualidade desses dados é de suma importância. Neste contexto, mapeamentos de campo baseados em análises hidrológicas conferem melhor

precisão aos dados de entrada dos modelos e contribuem na redução de quaisquer erros e incertezas que possam ter ocorrido no contexto desta pesquisa.

Outra etapa importante realizada após a aplicação da metodologia *Fuzzy* e AHP foi a validação das machas de inundação em relação ao grau de risco categorizado como muito alto por meio de fotografias de pontos de inundação distribuídos no território de Nova Lima – MG. Essa etapa possibilitou a espacialização do risco à inundação, contribuindo para uma melhor compreensão do meio físico.

Referências bibliográficas

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

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. *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.

CAMPOS, A. R. Análise espaço-temporal da expansão dos plantios florestais comerciais no Brasil sob a condição de minimização de impactos negativos e potenciais conflitos. *Revista GEOgrafias*, Edição Especial - II Simpósio Modelagem de Sistemas Ambientais e Gestão da Paisagem: Desafios e aplicações, p. 8-22, 2017.

COSTA, E. L, SOUZA, I. N. P., OLIVEIRA, K. K. R., HERCULANO, R. N., SOARES FILHO, B. Modelagem espacial da expansão da mancha urbana de Mateus Leme/MG. *Revista GEOgrafias*, Edição Especial - II Simpósio Modelagem de Sistemas Ambientais e Gestão da Paisagem: Desafios e aplicações, p. 99-106, 2017.

ECKHARDT, R. R., SALDANHA, D. L., ROCHA, R. S., 2008. Modelo Cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas urbanas sujeitas às inundações na cidade de Iajé/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.

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.

FORMAN, RICHARD T.T. *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*.

Cambridge, 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*.

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 de 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. *Censo Demográfico 2010*. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=11&uf=00> Acesso: 04 de Abril de 2017.

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

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.

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

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

PDM-NL – *Plano Diretor do Município de Nova Lima*, Lei Municipal 2007/2007. PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico de Nova Lima – MG. Produto I/V Diagnostico Setorial. Caracterização socioeconômica e geoambiental, maio de 2016.

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.

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

SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980.

SILVA, A. P. M. *Elaboração de Manchas de Inundação para o Município de Itajubá, utilizando SIG*. Itajubá, MG. UNIFEI. Engenharia da Energia. 2006.

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

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

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

UFMG/CODEMIG. Baltazar, O.F.; Baars F.J.; Lobato, L.M.; Reis, L.B.; Achtschin, A.B.; Berni, G.V.; Silveira, V.D. 2005. Mapa Geológico na Escala 1: 50.000 com

Nota Explicativa. In: *Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa*. Lobato et al. (2005). Belo Horizonte.

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.

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.