

## **ZONEAMENTO DA SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS INDUZIDOS COM BASE NA LÓGICA FUZZY E NO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO (AHP): O CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ANIL, SÃO LUÍS - MA**

*Zoning of Susceptibility to Induced Landslides based on Fuzzy Logic and  
Analytical Hierarchy Process (AHP): The Case of Hydrographic  
Basin of Anil River, São Luís - MA*

**Celso Henrique Leite Silva Junior<sup>1</sup>, Denilson da Silva Bezerra<sup>2</sup>,  
Liana Oighenstein Anderson<sup>3,1</sup>, Marcio Roberto Magalhães de Andrade<sup>3</sup>,  
Dagolberto Calazans Araujo Pereira<sup>2</sup>, Vera Lucia Araújo Rodrigues Bezerra<sup>4</sup>,  
Fabricio Brito Silva<sup>2</sup> & Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**  
**Tropical Ecosystems and Environmental Science Laboratory - TREES**  
Av. dos Astronautas, 1758 - Jardim da Granja, CEP: 12227-010, São José dos Campos, SP, Brasil  
celso.junior@inpe.br; laragao@dsr.inpe.br

**<sup>2</sup>Universidade CEUMA - UniCEUMA**  
**Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente**  
Rua Josué Montello, 1, Renascença, CEP: 65075-120, São Luís, MA, Brasil  
denilson\_ca@yahoo.com.br; {dagolberto, fabricioagro}@gmail.com

**<sup>3</sup>Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN**  
Est. Dr. Altino Bondensan, 500 - Parque Tecnológico, CEP: 12247-016, São José dos Campos, SP, Brasil  
{liana.anderson, marcio.andrade}@cemaden.gov.br

**<sup>4</sup>Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento  
Científico e Tecnológico do Maranhão - FAPEMA**  
Rua dos Perdizes, 5 - Jardim Renascença - CEP: 65075-340, São Luís - MA, Brasil  
vera.bezerra@fapema.br

*Recebido em 13 de Novembro, 2015/ Aceito em 19 de Maio, 2016*  
*Received on November 13, 2015/ Accepted on May 19, 2016*

### **RESUMO**

Os deslizamentos são uma realidade presente nas aglomerações urbanas, especialmente na América Latina e Ásia. O zoneamento de áreas suscetíveis a processos geodinâmicos surge como instrumento de planejamento necessário as políticas públicas de gestão territorial. Neste contexto, a Bacia Hidrográfica do Rio Anil (BHRA) na capital maranhense é adotada para a aplicação de uma metodologia de zoneamento de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos baseada na Lógica Fuzzy e no Processo Analítico Hierárquico (AHP). A utilização do operador Fuzzy Média Ponderada AHP demonstrou resultado satisfatório cuja validação se deu com acurácia (Índice Kappa) igual a 75,1% e exatidão

total igual a 88%. As características físicas da BHRA acordam com os resultados do zoneamento que revelam a predominância de áreas com baixa e média suscetibilidade a deslizamentos, sendo as áreas de alta suscetibilidade restritas a determinados setores do relevo com declividade ente 12 e 20%. A definição dos valores atribuídos aos Membros Fuzzy e a resposta expressa nos resultados obtidos confirmam a relevância do conhecimento prévio dos fatores naturais e antrópicos condicionantes e dos dados de ocorrência de deslizamentos cadastrados pela Defesa Civil. A metodologia apresentada é facilmente replicável em outras bacias hidrográficas, podendo alcançar melhor qualidade e aplicação a depender da resolução espacial dos dados cartográficos.

**Palavras chave:** Desastres Naturais, Bacia do Rio Anil, Defesa Civil, Mudanças Climáticas, Uso e Cobertura do Solo.

## ABSTRACT

Landslides in hillsides are a reality in metropolitan areas, especially in Asia and Latin America, where part of the population lives in vulnerable conditions. The treat faced by these areas is something important to understand due to the increase in extreme weather events, such as storms; and population growth without planning. In this context, zoning becomes an important tool for public management. We studied the Rio Anil watershed (RAW) in São Luis, capital of Maranhão, applying a zoning methodology to map areas vulnerable to landslides. We used Fuzzy Logic and Analytic Hierarchy Process (AHP). We found a Kappa index of 75,1% and an accuracy of 88%. Areas highly susceptible to landslides were the ones with slopes of 12% to 20%, whereas most part of the watershed was least susceptible to landslides. We concluded that the combination of this approach (Fuzzy Logic and HAP) with previous knowledge of the climate and anthropogenic variables are relevant to Civil Defense. The methodology should be used in other watersheds and may reach better outcomes depending on the quality of the spatial resolution of the cartographic data.

**Keywords:** Natural Disasters, Rio Anil watershed, Civil Defense, Climate Change, Use and Land Cover.

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas no Brasil observa-se um intenso processo de urbanização da população, onde o último censo populacional mostrou que 84% da população brasileira (160.925.804 de habitantes) vive em áreas urbanas (IBGE, 2010). No município de São Luís, seguindo o mesmo padrão de crescimento, no ano de 2010 apresentou uma população total de 1.014.837 de habitantes, com cerca de 94,5% vivendo em áreas urbanas (IBGE, 2010).

Como a concentração da população nos grandes centros urbanos não tem sido acompanhada de ações governamentais eficientes para o ordenamento territorial e do uso e ocupação do solo, isso tem levado principalmente a população mais carente a ocupar áreas naturalmente inadequadas ou, suscetíveis a desastres naturais (PFALTZGRAFF, 2007). Cita-se o desastre ocorrido em janeiro de 2011 em Nova Friburgo - RJ que resultou em 426 mortes e grandes perdas materiais (NETTO *et al.*, 2013).

Entende-se como desastres naturais o resultado do impacto de fenômenos naturais extremos ou intensos sobre um sistema social, que causa sérios danos e prejuízos que excede a capacidade da comunidade ou da

sociedade atingida em conviver com o impacto (MARCELINO, 2008).

Com base nesta definição, no ano de 2012 os desastres naturais tiveram um impacto significativo na sociedade brasileira, oficialmente foi relatada a ocorrência de 376 desastres naturais, os quais causaram 93 óbitos e afetaram cerca de 16.977.614 pessoas (BRASIL, 2013). Desse total, cerca de 26 óbitos foram causados por deslizamentos de terra, onde cerca de 123.555 pessoas foram afetadas (BRASIL, 2013). Dos desastres que causaram mortes à população brasileira, os deslizamentos de terra ocorridos em 2012, corresponderam por cerca de 27.96% dos óbitos (BRASIL, 2013).

Em relação a esse contexto, a Bacia Hidrográfica do Rio Anil (BHRA) concentra atualmente a maior área urbanizada relativa ao município de São Luís, além de ser a bacia mais urbanizada da Ilha do Maranhão. A sua urbanização é resultado de seu processo histórico de ocupação e caracterizado pela ausência de planejamento ambiental e urbano adequado. Bezerra (2008) estimou que no ano de 2000 a bacia apresentava uma população de 300.000 habitantes, já em 2010 a bacia apresentava uma população de 394.140 pessoas, com um

crescimento aproximado de 31,38% em 10 anos (IBGE, 2010). A BHRA, sendo constituída por um ambiente extremamente urbanizado que foi estabelecido de forma desordenada, é passível da ocorrência de desastres naturais, principalmente da ocorrência de deslizamentos induzidos em cortes e aterros. Esses deslizamentos, são assim definidos, por serem decorrentes da ocupação humana em áreas irregulares.

Os deslizamentos induzidos são os mais comuns encontrados no Brasil, especialmente em assentamentos precários e zonas adensadas nas áreas urbanas. Geralmente são rasos e desencadeados pela associação de agentes predisponentes e efetivos, este último principalmente pela ocorrência de chuvas intensas em períodos chuvosos que atuam de forma imediata.

Dentre os agentes efetivos preparatórios mais comuns e problemáticos destacam-se a execução de cortes e aterros lançados nas encostas, instalação de fossas negras, ocorrência de vazamentos de tubulações e lançamento indevido de águas servidas (CARVALHO, MACEDO & OGURA, 2007).

O mecanismo mais comum de desestabilização de taludes nestes casos deve-se a redução da resistência ao cisalhamento causada pela infiltração da água e aumento do efeito da poropressão, agravados por cortes nas porções inferiores destes taludes (HIGHLAND, BOBROWSKY & 2008).

No município de São Luís a precipitação tem demonstrado tendência de diminuição em relação à série climatológica, no entanto são observados dias intensos e consecutivos de chuva forte no município, muitas das vezes eventos desse tipo ocasionam uma maior ocorrência de deslizamentos (SILVA *et al.*, 2014).

Atualmente, devido a acessibilidade a dados ambientais georreferenciados, é possível a sua integração em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) através da aplicação de técnicas de Inferência Espacial. Segundo Meirelles *et al.* (2007b), de maneira geral os modelos de inferência mais utilizados são: operadores booleanos, sobreposição por índice ou média ponderada com pesos e Lógica Fuzzy. Meirelles *et al.* (2007a) constatou que dos métodos de inferência geográfica realizados em

SIG os baseados na Lógica Fuzzy obtiveram os melhores resultados na realização de diversos estudos ambientais.

Nos últimos anos a utilização dos produtos de sensoriamento remoto integrados a SIGs para análises ambientais tem se demonstrado uma importante ferramenta. Diversos estudos podem ser realizados através da análise espacial integrada em ambientes SIG. Dentre esses estudos destacam-se as análises e mapeamento, ou zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos.

Kayastha (2012), por exemplo, mapeou a suscetibilidade a deslizamento na sub-bacia do rio Garuwa no leste do Nepal utilizando os operadores Produto Algébrico (acurácia em torno de 77.73%) e Gamma (valor gamma de 0,1 a 0,9, com acurácia variando entre 72.46% a 79.29%). Kayastha *et al.* (2013a) mapearam a suscetibilidade a deslizamento na área de Ghurmi-Dhad em Khola na parte oriental do Nepal e obtiveram resultados adequados com o operador Produto Algébrico, sendo o operador Gamma com o valor 0,6 utilizado para o mapeamento final da suscetibilidade por ter apresentado a melhor acurácia (77.54%). Marjanovi e Caha (2011) em testes com o uso de operadores Fuzzy, obtiveram melhor resultado de acurácia com o uso do operador Gamma com valor de 0,5 (acurácia de 72%). Ercanoglu e Temiz (2011) em seus estudos de suscetibilidade na Turquia obtiveram bons resultados com o uso dos operadores Produto Algébrico e Gamma, sendo que o valor gamma 0,975 obteve o melhor resultado de acurácia (acurácia 85%).

O Zoneamento pode ser definido como “a divisão do solo em áreas ou domínios homogêneos e sua classificação de acordo com graus de suscetibilidade, perigo ou risco de deslizamentos reais ou potenciais, ou ainda de acordo com a aplicabilidade de regulamentações ligadas ao perigo” (FELL *et al.*, 2008, p. 86). Ou seja, o zoneamento é o ato de dividir uma área em setores (zonas), a partir de critérios pré-determinados, onde cada zona deve estar sujeita a normas específicas que podem focar uma linha de ação onde cada zona tem um grau de similaridade e relação entre os elementos componentes, e uma diferença claramente identificada entre as zonas vizinhas (SILVA & SANTOS, 2011).

Dessa maneira, tendo em vista a alta urbanização da BHRA, as consequências causadas por deslizamentos, além da carência de estudos abordando a suscetibilidade de áreas a deslizamentos nessa bacia, o presente artigo tem como principal objetivo propor uma metodologia para o zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos induzidos utilizando Lógica Fuzzy e o Processo Analítico Hierárquico (AHP).

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio Anil (BHRA) localiza-se no quadrante noroeste da Ilha do Maranhão, no Município de São Luís - MA (Figura 1), tendo o rio Anil nascentes localizadas no bairro Aurora. A BHRA concentra a maior área urbanizada relativa da Ilha do Maranhão com uma área total de 41 km<sup>2</sup> (ALCÂNTARA, 2004 & COELHO, 2008).

Alcântara *et al.* (2004) descreve que essa bacia possui uma densidade demográfica em torno de 8.575,35 habitantes/km<sup>2</sup>, (9.613,17 habitantes/km<sup>2</sup> em 2010 (IBGE, 2010)), caracterizando-se então como uma bacia extremamente urbana, densamente povoada, com problemas sócio-ambientais, tais como: assoreamento do seu rio principal e seus afluentes; poluição por efluentes industriais, domésticos e hospitalares; falta de saneamento básico; construção de moradias irregulares (palafitas) e problemas de drenagem. A bacia do Rio Anil vem sofrendo com o grande adensamento populacional, com a consequente ocupação das áreas mais baixas, onde estão localizados os manguezais e as áreas de várzeas (ALCÂNTARA *et al.*, 2004).

O clima da bacia segundo a classificação de Köppen-Geiger é do tipo Aw', possuindo portanto, dois períodos distintos: um chuvoso (janeiro a junho) e outro de estiagem (julho a dezembro) (IMESC, 2011). O índice pluviométrico médio fica em 2.000 mm/ano (Normal Climatológica), sendo a média dos últimos 30 anos (1984-2013) 2236,77 mm/ano, e as temperaturas ao longo do ano variam entre 25,5°C e 28,6°C apresentando máxima de 34°C e mínima de 20°C, com amplitudes diárias em torno de 7 e 8°C (INMET, 2014).

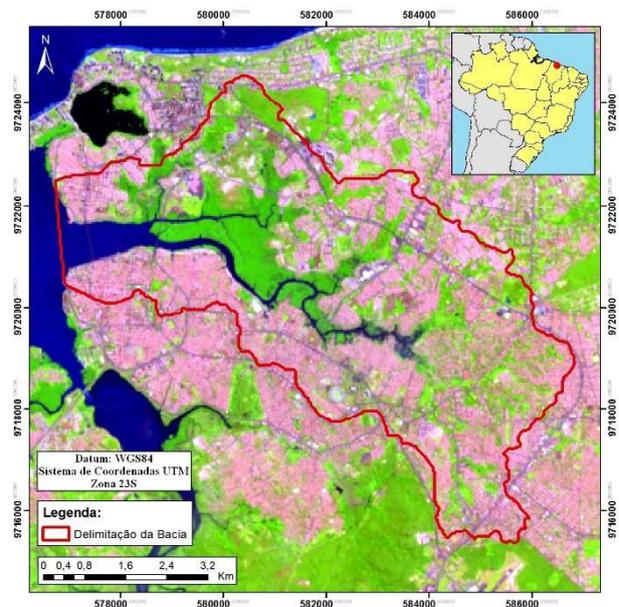


Fig. 1 - Mapa de Localização da BHRA em Relação à Ilha do Maranhão.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Quanto ao objetivo do mapeamento, esse foi definido como informativo e consultivo. Quanto ao nível de zoneamento, é classificado como preliminar, devido a sua escala ajustada para 1:250.000 (escala resultante dos dados base) (FELL *et al.*, 2008).

Para a integralização dos dados utilizou-se da teoria Fuzzy (Lógica Fuzzy) e do Método do Processo Analítico Hierárquico (AHP).

### 3.1 Lógica Fuzzy

Abaixo é feita uma breve descrição a respeito dos conjuntos e teoria Fuzzy que servem de base para a metodologia utilizada no presente artigo.

#### 3.1.1 Conjuntos Fuzzy

O conjunto Fuzzy foi introduzido no contexto científico por Zadeh (1965), através da publicação do artigo intitulado "Fuzzy Sets" no Journal Information and Control (JANÉ, 2004).

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.*, 2007b; 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.*, 2007b; WANG *et al.*, 2009; ZADEH, 1965):  $\mu_A(x) : XA : [0, 1]$ .

As seguintes notações são utilizadas para representar os conjuntos fuzzy:  $\cdot$ , quando  $A$  é contínuo ou  $\cdot$ , ou seja,  $\cdot$ , quando  $A$  é finito por um conjunto contável de  $n$  elementos (MEIRELLES *et al.*, 2007b; WANG *et al.*, 2009; ZADEH, 1965).

“O símbolo ‘/’ deve ser interpretado como com respeito a e ‘x’ como união” (MEIRELLES *et al.*, 2007b, p. 126).

### 3.1.2 Teoria Fuzzy

“Também conhecida como lógica nebulosa ou difusa” (AGUADO & CANTANHEDE, 2010, p. 1), essa teoria tem como principal objetivo lidar com dados que contém 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 & CAHA, 2011).

A ideia da Teoria Fuzzy, não apenas fica restrita entre verdadeiro e falso, mas sim existem vários níveis entre o verdadeiro e falso. De modo figurativo enquanto a lógica clássica enxerga apenas o preto e o branco, a lógica fuzzy é capaz de além do preto e do branco, enxergar vários tons de cinza (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 & CANTANHEDE, 2010).

### 3.2 Processo Analítico Hierárquico - AHP

O Processo Analítico Hierárquico, do inglês Analytic Hierarchy Process – AHP, foi desenvolvido por Saaty (1980). “O AHP é uma metodologia matemática destinada a ponderar quantitativamente variáveis mediante a interação do pesquisador com o modelo matemático e fazer isso em forma de considerações qualitativas” (RAFFO, 2012, p. 26).

O processo 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.*, 2013). Os pesos são atribuídos aos critérios, de acordo com sua importância relativa. As alternativas são avaliadas com base nesta importância relativa, por meio de comparações de pares, usando a escala de Saaty de números absolutos onde se atribui valores numéricos tanto quantitativos, como qualitativos aos julgamentos (SOUZA *et al.*, 2013).

Uma vez construída a hierarquia, avalia-se sistematicamente seus elementos, comparando-os um ao outro, em pares. 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). O 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 incomensuráveis 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 si mesmos (PINESE JÚNIOR & RODRIGUES, 2012).

### 3.3 Materiais, dados e softwares

Foram utilizados os seguintes dados e softwares organizados e descritos nas tabelas 1 e 2.

Priorizou-se o uso de softwares livres e gratuitos, além do uso de dados de fácil acesso e processamento para eliminar a necessidade por custos e questões de disponibilidade dos dados, uma vez que muitos órgãos no país ligados ao gerenciamento de desastres carecem desses recursos.

Tabela 1: Dados utilizados

<b>Material</b>	<b>Data</b>	<b>Fonte</b>	<b>Escala</b>	<b>Formato</b>
<b>Geologia</b>	2012	IBGE (2012a)	1:250.000	Shape File
<b>Solos</b>	2012	IBGE (2012b)	1:250.000	Shape File
<b>Geomorfologia</b>	2013	IBGE (2013)	1:250.000	Shape File
<b>Declividade</b>	2008	Valeriano (2008)	1:250.000	Imagem Tiff
<b>População</b>	2010	IBGE (2010)	---	Tabela de dados
<b>Hipsometria</b>	2008	Valeriano (2008)	1:250.000	Imagem Tiff
<b>Formas do Terreno</b>	2008	Valeriano (2008)	1:250.000	Imagem Tiff
<b>Imagem Landsat 8</b>	Imagem do sensor OLI com resolução espacial de 30m do ponto 221 e orbita 62, do dia 13/07/2013	USGS (USGS, 2013)	1:250.000	Imagem Tiff
<b>Pontos de Ocorrência de Deslizamentos na BHRA</b>	---	SDCSL (2013)	---	Shape File
<b>Delimitação dos bairros de São Luís</b>	2013	INCID (2013)	---	Shape File

Tabela 2: Softwares utilizados

<b>Software</b>	<b>Versão</b>	<b>Referência</b>
<b>Quantum GIS</b>	2.10	Quantum GIS Development Team (2015)
<b>PriEsT (Priority Estimation Tool)</b>	2.0	Siraj <i>et al.</i> (2015)

### 3.4 Procedimentos metodológicos

Para a delimitação da bacia foi considerada a proposta por Araújo *et al.* (2009), tendo sido realizadas algumas poucas modificações. Foi realizada a conversão de projeções para o sistema geodésico de referência WGS84, com sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator), Zona 23S.

Os componentes ambientais utilizados para o zoneamento da suscetibilidade foram

a hipsometria, declividade, geologia, solos, geomorfologia, formas do terreno e uso e cobertura do solo. Na classe relativa à área construída no componente ambiental uso e cobertura do solo, foi adicionado o dado relativo ao adensamento populacional dos bairros.

Nas figuras de 2 a 8 é apresentada a distribuição espacial dos dados ambientais utilizados.

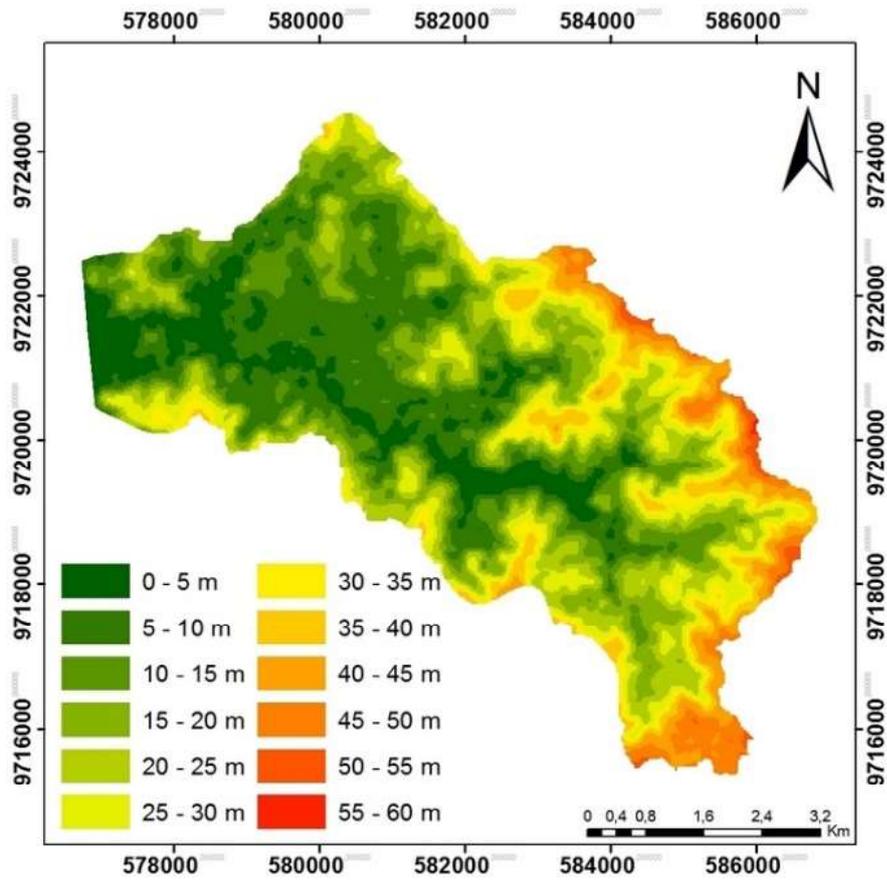


Fig. 2 - Hipsometria. Fonte: TOPODATA.

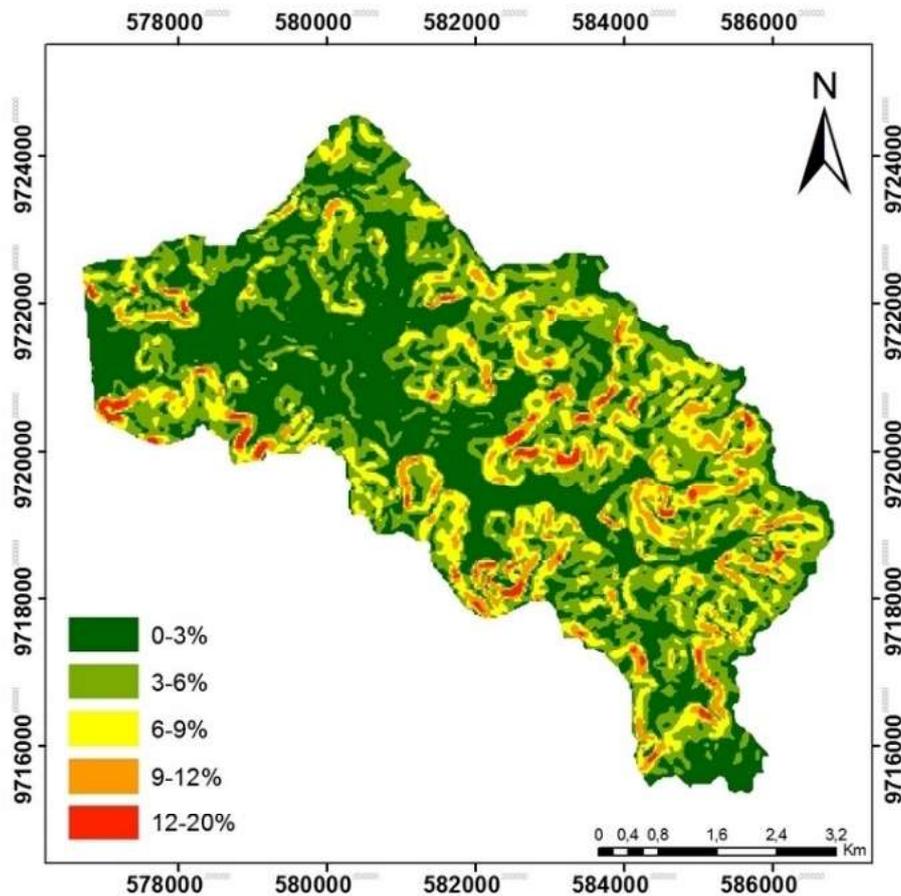


Fig. 3 - Declividade da bacia. Fonte: TOPODATA.

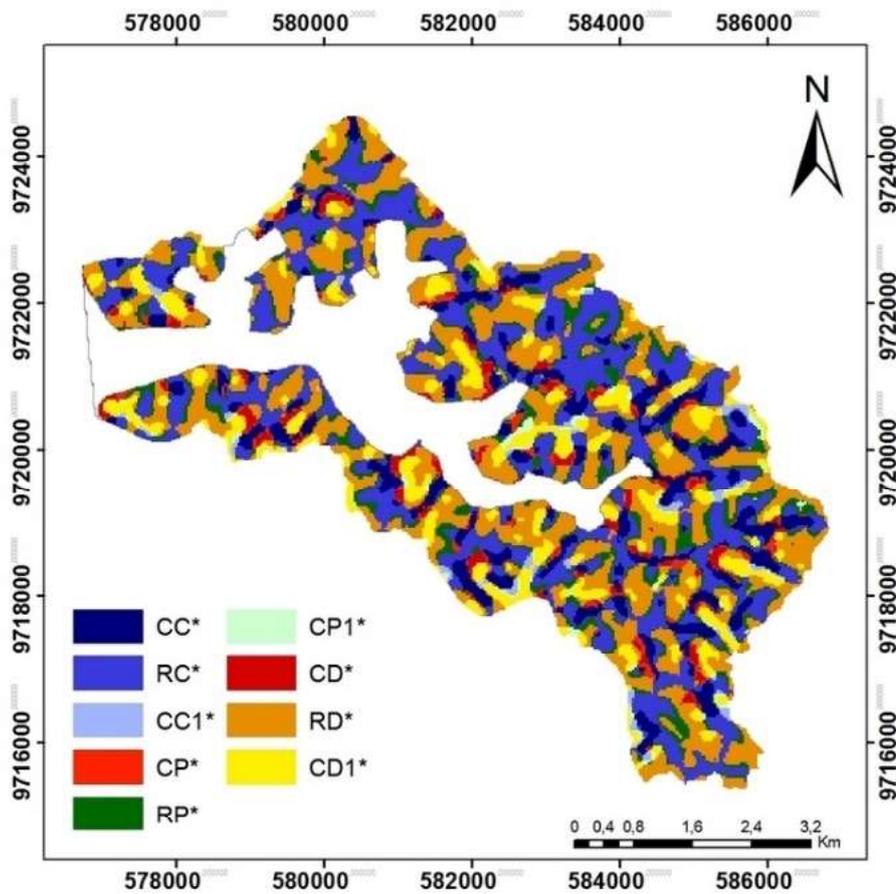


Fig. 4 - Formas do Terreno (\*CC é Côncava Convergente, RC é Retilínea Convergente, CC1 é Convexa Convergente, CP é Côncava Planar, RP é Retilínea Planar, CP1 é Convexa Planar, CD é Côncava Divergente, RD é Retilínea Divergente e CD1 é Convexa Divergente). Fonte: TOPODATA.

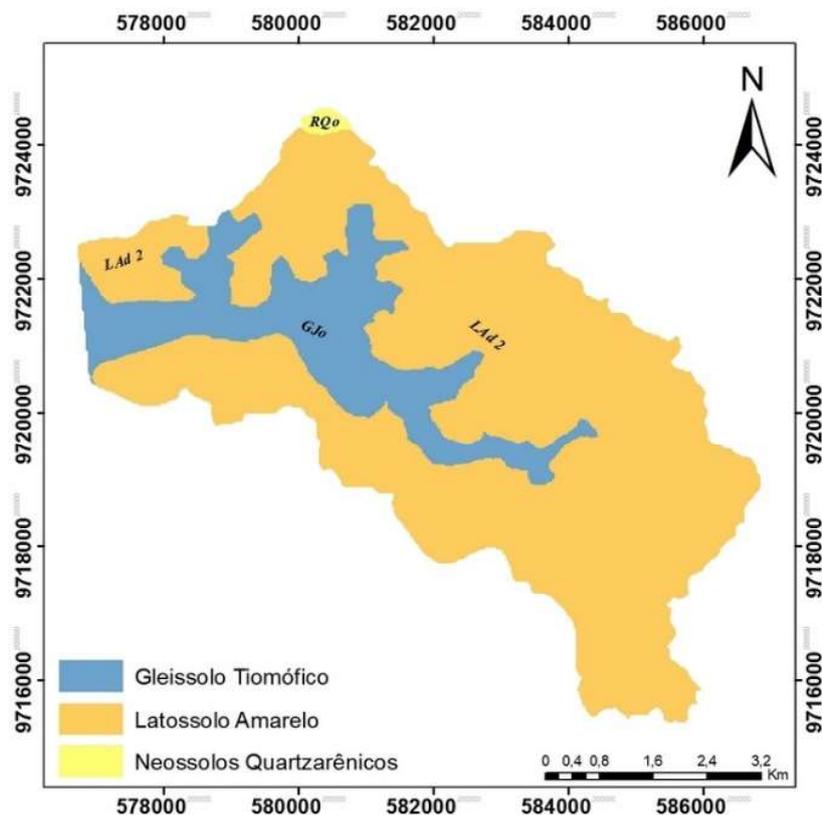


Fig. 5 - Tipos de Solos. Fonte: IBGE.

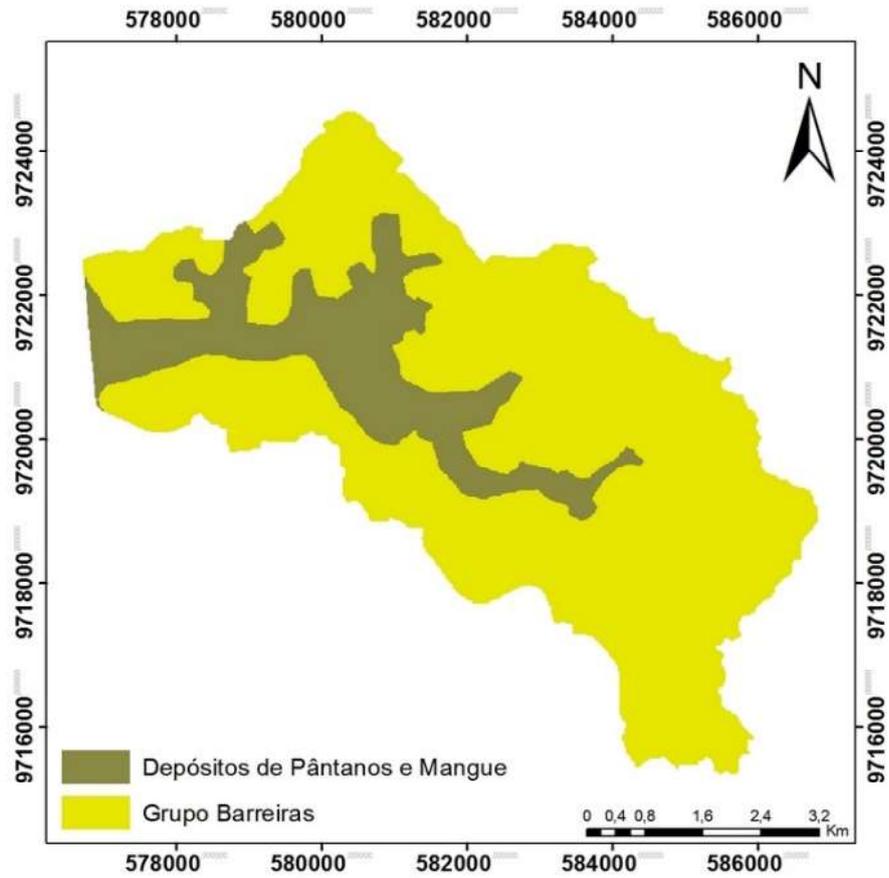


Fig. 6 - Geologia. Fonte: IBGE.

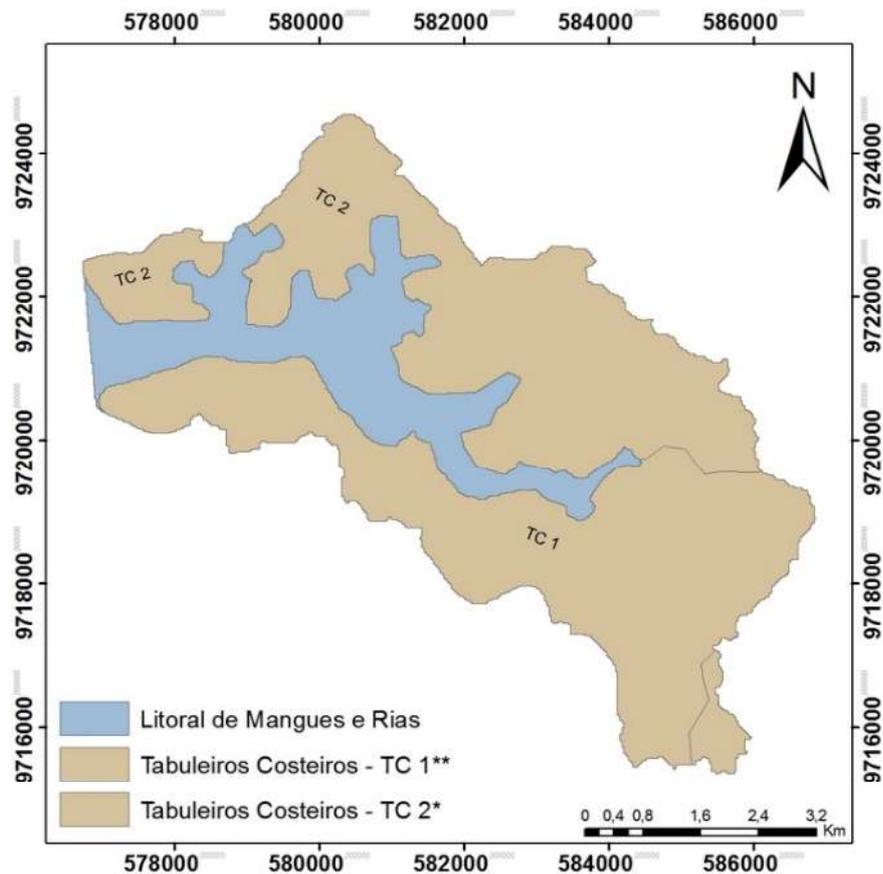


Fig. 7 - Geomorfologia (\*Forma de Dissecação; \*\* Forma de aplanamento). Fonte: IBGE.

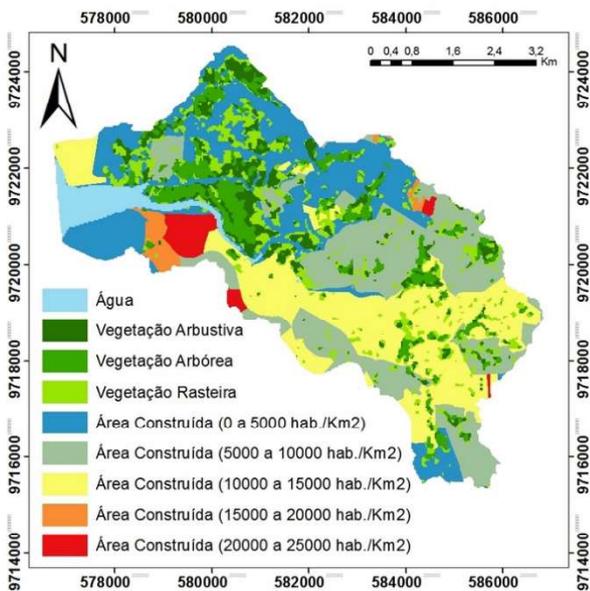


Fig. 8 - Uso e Cobertura do Solo. Os dados de adensamento foram calculados com base nos dados do Censo do IBGE do ano de 2010. Fonte: IBGE.

Para cada componente em formato de arquivo de vetor foi inserido uma coluna em suas tabelas de atributo com o objetivo de inserir e vincular cada valor dos membros Fuzzy atribuídos, de maneira a se aproveitar esses valores para a conversão dos dados em arquivos matriciais posteriormente.

Para a elaboração do mapeamento de uso e cobertura do solo, utilizou-se do fatiamento do Índice de Vegetação Melhorado (Enhanced Vegetation Index – EVI) obtido a partir da imagem Landsat 8: Água de 0 a 0,234; Área Antrópica de 0,234 a 0,320; Vegetação Rasteira de 0,320 a 0,420; Vegetação Arbustiva de 0,420 a 0,630; e Vegetação Arbórea de 0,630 a 1 (JUSTICE *et al.*, 1998).

Os membros Fuzzy foram definidos empiricamente com o auxílio do conhecimento disponível na literatura (Tabela 3).

Os pesos AHP foram definidos utilizando o Software PriEsT 2.0 (SIRAJ *et al.*, 2015). O valor de Razão de Consistência (RC) obtido foi de 0,09 (9%), que é considerado um valor aceitável de inconsistência que deve ser menor que 0,10 (10%) (SAATY, 1980).

Para a implementação do operador Fuzzy foi utilizada a técnica de matemática de bandas (Band Math, em inglês). Foi utilizado o operador fuzzy Média Ponderada AHP (Equação 1).

Tabela 3: Referências utilizadas para as ponderações

Componente Ambiental	Referência
Declividade	Ross (2012); Bispo <i>et al.</i> (2011); Ramos <i>et al.</i> (2012)
Geologia	Bispo <i>et al.</i> (2011); Crepani <i>et al.</i> (2001); Ramos <i>et al.</i> (2012)
Solos	Massa e Ross (2012); Ross (2012); Bispo <i>et al.</i> (2011); Crepani <i>et al.</i> (2001); Ross (1994)
Geomorfologia	Bispo <i>et al.</i> (2011); Crepani <i>et al.</i> (2001)
Formas do Terreno	Bispo <i>et al.</i> (2011); Ramos <i>et al.</i> (2012)
Uso e Cobertura do Solo	Massa e Ross (2012); Ross (2012); Bispo <i>et al.</i> (2011); Crepani <i>et al.</i> (2001); Ross (1994); Komac (2006); Santha e Sreedharan (2010); Ramos <i>et al.</i> (2012)
Hipsometria	Ahmed (2015); Othman e Gloaguen (2013); Ghosh (2015)

$$SUS_D = \sum_{i=1}^n CA_i P_{AHP_i} \quad (1)$$

onde SUS<sub>D</sub> é a Suscetibilidade a Deslizamento, CA são os Componentes Ambientais, PAHP é o peso AHP.

Esse operador foi escolhido devido a sua eficiência conhecida na literatura nesse tipo de análise. Essa técnica é a mais utilizada em projetos que envolvem análise espacial (CÂMARA *et al.*, 2004; FEIZIZADEH & BLASCHKE, 2013).

No operador Média Ponderada AHP, cada plano de informação é utilizado como uma evidência, recebendo um peso que depende de sua importância para a hipótese que está sendo considerada. Cada plano de informação receberá um peso diferente, esses pesos são definidos pela técnica AHP (Tabela 4) (CUNHA, OLIVEIRA & SILVA, 2001).

Após os processamentos realizados foram geradas as imagens monocromáticas com tons de cinza que variam de 0 a 1. Cada imagem foi fatiada de maneira equidistante com o objetivo de se obter as classes (zonas) (Tabela 5). Posteriormente as imagens fatiadas geradas foram convertidas em vetores.

Tabela 4: Temas ambientais com suas respectivas classes e membros Fuzzy

Componentes Ambientais (CA)	Pesos AHP ( $P_{AHP}$ )	Classes	Membros Fuzzy
<b>Declividade</b>	0,273	0 - 3 %	0,005
		3 - 6 %	0,010
		6 - 9 %	0,250
		9 - 12 %	0,484
		12 - 20 %	1,000
<b>Uso e Cobertura do Solo</b>	0,215	Água	0,005
		Vegetação Arbórea	0,170
		Vegetação Arbustiva	0,218
		Vegetação Rasteira	0,324
		Área Construída (0 - 5000 hab./km <sup>2</sup> )	0,173
		Área Construída (5000 - 10000 hab./km <sup>2</sup> )	0,287
		Área Construída (10000 - 15000 hab./km <sup>2</sup> )	0,398
		Área Construída (15000 - 20000 hab./km <sup>2</sup> )	0,604
Área Construída (20000 - 25000 hab./km <sup>2</sup> )	1,000		
<b>Formas do Terreno</b>	0,169	Convexa Divergente	0,181
		Convexa Planar	0,230
		Convexa Convergente	0,289
		Retilínea Divergente	0,395
		Retilínea Planar	0,486
		Retilínea Convergente	0,567
		Côncava Divergente	0,697
		Côncava Planar	0,813
Côncava Convergente	1,000		
<b>Solos</b>	0,128	Gleissolo Tiomófico Órtico	0,005
		Latossolo Amarelo	0,604
		Neossolo Quartzarênico	1,000
<b>Geologia</b>	0,097	Depósitos de Pântanos e Mangue	0,005
		Formação Barreiras	0,714
<b>Geomorfologia</b>	0,066	Litoral de Mangues e Rias	0,005
		Tabuleiros Costeiros Maranhenses*	0,584
		Tabuleiros Costeiros Maranhenses**	1,000
<b>Hipsometria</b>	0,052	0 - 5 m	0,112
		5 - 10 m	0,140
		10 - 15 m	0,156
		15 - 20 m	0,189
		20 - 25 m	0,246
		25 - 30 m	0,282
		30 - 35 m	0,336
		35 - 40 m	0,383
		40 - 45 m	0,470
		45 - 50 m	0,653
		50 - 55 m	0,822
		55 - 60 m	1,000

\*Forma de aplanamento; \*\*Forma de dissecação.

Tabela 6: Coordenadas, bairros e risco de cada ponto de ocorrência

Ponto	Latitude	Longitude	Bairro	Risco
1	-2,542720	-44,225030	Vila Isabel Cafeteira	3
2	-2,562610	-44,242470	Vila Lobão	3
3	-2,563280	-44,242390	Vila Lobão	3
4	-2,562610	-44,241220	Vila Lobão	4
5	-2,561810	-44,241030	Vila Lobão	3
6	-2,538940	-44,240560	Pão de Açúcar	3
7	-2,538890	-44,240810	Pão de Açúcar	4
8	-2,539500	-44,240250	Pão de Açúcar	2
9	-2,539560	-44,240330	Pão de Açúcar	3
10	-2,555420	-44,251390	Sacavém	3
11	-2,552700	-44,260680	Barreto	4
12	-2,542720	-44,225250	Vila Isabel Cafeteira	3
13	-2,543780	-44,227400	Vila Isabel Cafeteira	3
14	-2,540580	-44,226200	Cruzeiro do Anil	3
15	-2,557580	-44,242370	Vila Lobão	4
16	-2,561820	-44,242130	Vila Lobão	3
17	-2,561320	-44,242130	Vila Lobão	3
18	-2,540630	-44,241720	Pão de Açúcar	3
19	-2,519970	-44,244170	Cohama	3
20	-2,540580	-44,226200	Cruzeiro do Anil	4
21	-2,543780	-44,227400	Vila Isabel Cafeteira	3
22	-2,548238	-44,264340	Barreto	4
23	-2,530961	-44,232449	Angelim	2
24	-2,546333	-44,225871	Vila Isabel Cafeteira	4
25	-2,542396	-44,226447	Vila Isabel Cafeteira	5

Tabela 5: Fatiamento das classes (zonas) de suscetibilidade

Intervalo Fuzzy	Suscetibilidade
0,000 - 0,200	Inexistente
0,200 - 0,400	Baixa
0,400 - 0,600	Moderada
0,600 - 0,800	Alta
0,800 - 1,000	Muito Alta

### 3.5 Validação do mapeamento

Para a validação dos zoneamentos, foram utilizados 25 pontos de ocorrência de deslizamento disponibilizados pela Superintendência de Defesa Civil de São Luís (SDCSL, 2013) (Tabela 6), onde cada ponto apresenta uma escala associada ao risco verificado em campo (escala de risco de 1 a 5).

Para a classificação do risco dos pontos de ocorrência, a Superintendência de Defesa Civil de São Luís utiliza uma metodologia, onde são avaliadas empiricamente as condições em campo como, a declividade, tipo de solo e presença de residências que possam estar vulneráveis a ocorrência dos deslizamentos, a partir desses dados são atribuídas as escalas de risco de acordo com a avaliação dos técnicos. Ainda que essa metodologia não leve em consideração outros fatores mais refinados para se atribuir as escalas de riscos, esses dados são importantes e úteis para o gerenciamento desses fenômenos, tendo em vista as limitações da própria superintendência. Para a verificação da acurácia foi utilizado o cálculo do Índice Kappa com base nos pontos de ocorrência e sua respectiva escala de risco, onde cada escala de risco foi associada às zonas de suscetibilidade (Inexistente, risco 1; Baixa,

risco 2; moderada, risco 3; Alta, risco 4; e Muito Alta, risco 5). Os procedimentos adotados para o cálculo do índice em questão seguiram as etapas e procedimentos definidos por Hudson e Ramm (1987) e Congalton e Green (2008). Foi utilizada a planilha de cálculos proposta por Rennó e Silva (2015).

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 9 e na Tabela 7 são apresentados os resultados do zoneamento na BHRA através do operador Fuzzy Média Ponderada AHP.

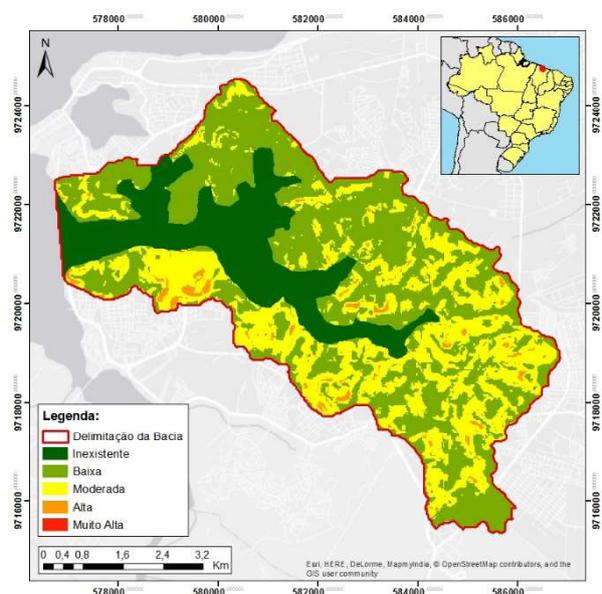


Fig. 9 - Zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos induzidos na BHRA.

Tabela 7: Distribuição das áreas das zonas mapeadas

Suscetibilidade	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Inexistente	8,3	20,2
Baixa	19,0	46,3
Moderada	12,5	30,5
Alta	1,2	2,9
Muito Alta	0,0	0,0
Total	41,0	100,0

Esses resultados podem servir de base para indicar áreas que precisam ser detalhadas em maiores escalas (no mínimo em 1:25.000 para estudos mais detalhados de suscetibilidade e 1:5.000 para mapeamento de áreas de risco), que são de interesse para a Defesa Civil.

As áreas de Suscetibilidade Inexistente (Figura 10), coincidem com as áreas de solo do tipo Gleissolo com geologia de Depósito de Pântanos e Mangue e Geomorfologia de Litoral de Mangues e Rias. Essas são áreas que apresentam características que inibem a ocorrência de deslizamentos, além de que são áreas que geralmente não são ocupadas e apresentam baixa declividade. A maioria das áreas classificadas nessa classe são compostas por classes que apresentam valores Fuzzy, próximo de zero.



Fig. 10 - Área de Suscetibilidade Inexistente, Centro de São Luís.

As áreas de Suscetibilidade Baixa ocupam cerca de 46,293% da área total da bacia. Essas áreas são caracterizadas pela presença de vegetação composta principalmente por arbustos e algumas áreas por árvores de maior porte. Essa vegetação é em sua grande parte secundária, por já terem sido degradadas. Essa zona apresenta em algumas áreas os remanescentes de vegetação em meio a áreas antropizada. O solo tem ocorrência principal de Latossolo. A altimetria é bem variada com declividade variando entre 0 a 9%. Essas áreas apresentam uma reduzida densidade populacional. As áreas ocupadas correspondem a bairros de alto padrão, o que confere um melhor ordenamento urbano nessas áreas.

Boa parte dessas áreas ainda não foram ocupadas. Dentre essas áreas destacam-se as existentes nos bairros Tirirical, Jardim São Cristóvão, Aurora, Anil, Cruzeiro do Anil, Santa Cruz, Vinhais IV, Loteamento Vinhais, Conjunto Habitacional Vinhais, Renascença e Jaracaty. Existem ainda áreas que correspondem a Estação Ecológica do Rangedor (Figura 11).



Fig. 11 - Área de Suscetibilidade Baixa, bairro Calhau na Estação Ecológica do Sitio Rangedor.

As áreas de Suscetibilidade Moderada, apresentam cerca de 30,493% da área total da bacia, composta por áreas antropizadas de alta densidade populacional, onde são encontrados a maioria dos bairros de baixo padrão, que em sua grande maioria foram estabelecidos de maneira desordenada. Possuem declividade entre 6 a 12%, o que colabora para essa suscetibilidade nessas áreas.

Quanto a contribuição do tipo de solo, as áreas de Neossolo tem uma maior contribuição devido a uma maior fragilidade estrutural.

Na Figura 12 é possível observar que mesmo com uma declividade acentuada ainda há uma boa parcela de cobertura vegetal. Segundo Tabalipa e Fiori (2008) nessas áreas a presença de vegetação diminui a instabilidade estrutural do solo o que diminui a probabilidade de ocorrência de deslizamentos.



Fig. 12 - Área com Suscetibilidade Moderada, bairro Cruzeiro do Anil.

Totalizando cerca de 2,995% da área total da bacia, as áreas com Suscetibilidade Alta possuem declividade entre 9 a 15%, onde prevalecem principalmente os solos do tipo Latossolo e formas do terreno Côncava Divergente, Côncava Planar e Côncava Convergente. São áreas com

alta densidade demográfica e sem cobertura vegetal, ocorrendo em maiores altimetrias.

Devido aos fatores ambientais combinados a uma alta densidade populacional, que resultam nessas áreas uma maior probabilidade de ocorrência de deslizamento, essas devem ser prioritárias nas políticas de conscientização e prevenção por parte da prefeitura municipal, principalmente em eventos extremos de precipitação.

Na Figura 13 é apresentada uma área com suscetibilidade alta. É possível observar que a área tem um prédio comercial acima e casas abaixo do barranco que podem ser atingidas em uma potencial ocorrência de deslizamento.



Fig. 13 - Área com suscetibilidade alta, bairro Novo Angelim.

Áreas com suscetibilidade Muito Alta não foram mapeadas. Isso ocorreu devido a não ocorrência de fatores ambientais com maior probabilidade de ocorrência de deslizamento em uma mesma região.

É possível observar que o mapeamento apresentou um bom equilíbrio entre as áreas de suscetibilidade. O uso de valores de ponderação propiciou um método útil para atribuir a cada fator ambiental considerando seu nível de contribuição no resultado final, que atribui a suscetibilidade a cada classe.

Na avaliação do mapeamento, foi obtido valor do índice Kappa 0,751 e exatidão total de 0,880 (88,0%), sendo considerada muito boa conforme a classificação de Landis e Koch (1977). Esse resultado é compatível com estudos realizados na Ásia que constataram a eficiência no uso da abordagem Fuzzy. Segundo Kayastha *et al.* (2013b) os fatores ambientais considerados e a escala de análise são os principais determinantes para a qualidade e

acurácia dos mapas gerados segundo os diferentes para diferentes metodologias empregadas na análise da suscetibilidade a deslizamentos.

Kayastha *et al.* (2013b) constatou em seu trabalho utilizando a abordagem AHP, que essa ferramenta foi eficiente para ajudar a lidar com os erros e discrepâncias no uso de conhecimento empírico. Assim a metodologia AHP é totalmente aplicável e útil para a identificação de áreas suscetíveis a deslizamento por diminuir as inconsistências no processo de decisão.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os principais fatores condicionantes aos deslizamentos identificados foram, a declividade, uso e ocupação do solo e o uso e cobertura do solo, sendo esse último, ligado diretamente a intervenções antrópicas no ambiente.

O uso do operador Fuzzy Média Ponderada AHP e da abordagem AHP demonstraram-se essenciais para a resolução de problemas relacionados ao uso de conhecimento empírico de especialistas nesses tipos de estudos. No entanto, esse operador é pouco utilizado para esse fim, impossibilitando assim a sua comparação com outras áreas, uma vez que, em muitos trabalhos o uso do operador Gamma é predominante.

O zoneamento aqui proposto pode ser útil para o gerenciamento das áreas suscetíveis na BHRA por parte da Superintendência Municipal de Defesa Civil. Recomenda-se dessa maneira que as áreas de suscetibilidade Alta, sejam tomadas como prioritárias para o monitoramento e também para ações de prevenção e conscientização da população. Nas áreas de suscetibilidade Moderada recomenda-se atenção em períodos com ocorrência de acima da média.

Um limitante que pode ser encontrado para a elaboração de trabalhos semelhantes é a disponibilidade de forma livre de dados ambientais com maior detalhamento. Onde muitas das vezes esses dados existem mais são de propriedades de instituições privadas.

É importante comentar que o uso do AHP ainda não é consenso entre os especialistas. Sendo que alguns criticam seu reducionismo. Em trabalhos futuros pretende-se realizar testes com outros métodos de integração de dados, para avaliação e comparação de resultados. Entre eles,

o método Delphi. Cabendo também a análise do grau de incerteza contido no resultado, através de modelos de análise de sensibilidade.

Com a metodologia aqui sugerida é possível a utilização das mesmas técnicas e procedimentos para o zoneamento de outras áreas, como a extensão total do município de São Luís ou até mesmo para a Ilha do Maranhão.

O mapeamento aqui proposto é uma leitura territorial preliminar que indica regiões (suscetibilidade alta e moderada) que devem ser trabalhadas em escalas mais detalhadas utilizando métodos específicos, obtendo assim um nível de detalhamento mais avançado. Finalmente, cabe comentar as possíveis generalizações de resultados em função da escala de trabalho adotada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUADO, A. G.; CANTANHEDE, M. A. **Lógica Fuzzy**. 2010. Disponível em: < [http://www.sysrad.com.br/redmine/attachments/1843/Artigo\\_logicaFuzzi.pdf](http://www.sysrad.com.br/redmine/attachments/1843/Artigo_logicaFuzzi.pdf) >. Acesso em: 4 maio. 2014. 12 p.

AHMED, B. Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. **Landslides**, v. 12, n. 6, p. 1077-1095, dec. 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10346-014-0521-x>>.

ALCÂNTARA, E. H. Mudanças climáticas, incertezas hidrológicas e vazão fluvial: o caso do estuário do Rio Anil. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 12, p. 158-173, 2004.

ALCÂNTARA, E. H.; MOCHEL, F. R.; AMORIM, A. de J. E.; THEVAND, A. Modelagem da profundidade Secchi e da concentração de Clorofila A no estuário do Rio Anil, São Luís-MA. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 5, n. 13, p. 19-40, 2004.

ARAÚJO, E. P. de; TELES, M. G. L.; LAGO, W. J. S.; OUTROS. Delimitação das bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão a partir de dados SRTM. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 4631-4638.

BEZERRA, D. da S. **O ecossistema manguezal em meio urbano no contexto de políticas públicas de uso e ocupação do solo na bacia do**

- rio anil, são luis, maranhão.** 2008. Dissertação (Mestrado em Saúde e Ambiente), Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2008. 221 p.
- BISPO, P. da C.; ALMEIDA, C. M. de; VALERIANO, M. de M.; MEDEIROS, J. S. de; CREPANI, E. Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial. **Geociências**, v. 30, n. 3, p. 467–478, 2011.
- BRASIL. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2012.** 2. ed. Brasília: CENAD, 2013. 84 p.
- CÂMARA, G.; BARBOSA, F. R. M.; BARBOSA, C.; FILHO, R. A.; BÖNISCH, S. Técnicas de Inferência Geográfica. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed.). **Análise Espacial de Dados Geográficos.** Brasília: EMBRAPA, 2004. p. 250.
- CARVALHO, S. C.; MACEDO, S. E.; OGURA, T. A. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios.** Brasília: Ministério das Cidades, 2007. 176 p.
- COELHO, C. J. D. C. **Lógica fuzzy e geoprocessamento na determinação da vulnerabilidade à ocupação direta dos mangues na bacia hidrográfica do Anil, na ilha de São Luís - MA.** 2008. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade de Ecossistemas), Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2008. 211 p.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices.** 2. ed. New York: CRC Press, 2008. 200p.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; FILHO, P. H.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; CLÁUDIO CLEMENTE FARIA BARBOSA. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. **INPE-8454-RPQ/722**, 2001. Disponível em: < <http://www.dsr.inpe.br/laf/sap/artigos/CrepaneEtAl.pdf> >. 124 p.
- CUNHA, E. R. S. P. da; OLIVEIRA, M. V. de; SILVA, F. R. M. da. Utilização da técnica de processo analítico hierárquico (AHP) na avaliação da “favorabilidade” para a prospecção mineral de cromo na região de Pinheiros Altos, município de Piranga, MG, Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 54, n. 2, p. 127–132, jun. 2001. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672001000200009&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672001000200009&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>.
- ERCANOGLU, M.; TEMIZ, F. A. Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey). **Environmental Earth Sciences**, v. 64, n. 4, p. 949–964, 26 jan. 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12665-011-0912-4>>. Acesso em: 4 maio. 2014.
- FEIZIZADEH, B.; BLASCHKE, T. GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran. **Natural Hazards**, v. 65, n. 3, p. 2105–2128, fev. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11069-012-0463-3>>.
- FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3-4, p. 85–98, dez. 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>>. Acesso em: 4 maio. 2014.
- GHOSH, D. LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY ANALYSIS FROM MORPHOMETRIC PARAMETER ANALYSIS OF RIYONG KHOLA BASIN, WEST SIKKIM, INDIA: A GEOSPATIAL APPROACH. **International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences**, v. 5, n. 1, p. 54–65, 2015.
- HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook: a guide to understanding landslides.** Reston: U.S. Geological Survey Circular 1325, 2008.
- HUDSON, W. D.; RAMM, C. W. Correct Formulation of the Kappa Coefficient of Agreement. **PE&RS**, v. 53, n. 4, p. 421–422, 1987.

- IBGE. **Censo Demográfico 2010**. 2010. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- IBGE. **Geologia (Folha SA.23, São Luís)**. 2012a. Disponível em: <<http://www.visualizador.inde.gov.br>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- IBGE. **Solos (Folha SA.23, São Luís)**. 2012b. Disponível em: <<http://www.visualizador.inde.gov.br>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- IBGE. **Geomorfologia (Folha SA.23, São Luís)**. 2013. Disponível em: <<http://www.visualizador.inde.gov.br>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- IMESC. **Situação ambiental da ilha do maranhão**. São Luís: IMESC, 2011. Disponível em: <<http://imesc.ma.gov.br/portal/Post/view/1/2>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- INCID. **Delimitação dos bairros do município de são luís**. São Luís: Prefeitura de São Luís, 2013.
- INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- JANÉ, D. de A. Uma introdução ao estudo da lógica fuzzy. **Revista de Humanidades e Ciências Sociais Aplicadas**, n. 2, p. 1–16, 2004.
- JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; HUETE, A. R.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228–1249, jul. 1998. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=701075>>. Acesso em: 27 jan. 2014.
- KAYASTHA, P. Application of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping in Garuwa sub-basin, East Nepal. **Frontiers of Earth Science**, v. 6, n. 4, p. 420–432, 19 set. 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11707-012-0337-8>>. Acesso em: 4 maio. 2014.
- KAYASTHA, P.; BIJUKCHHEN, S. M.; DHITAL, M. R.; SMEDT, F. 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. 2013a. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12594-013-0147-y>>. Acesso em: 4 maio. 2014.
- KAYASTHA, P.; DHITAL, M. R.; DE SMEDT, F.; A. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. **Computers & Geosciences**, v. 52, p. 398–408, mar. 2013b. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300412003731>>. Acesso em: 22 jan. 2014.
- KOHAGURA, T. **Lógica fuzzy e suas aplicações**. 2007. Monografia (Graduação em Ciência da Computação), Departamento de Computação da Universidade Estadual de Londrina, Londrina - PR, 2007. 100 p.
- KOMAC, M. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. **Geomorphology**, v. 74, n. 1-4, p. 17–28, mar. 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X05002072>>.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159, mar. 1977. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2529310?origin=crossref>>. Acesso em: 20 mar. 2014.
- MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos**. Santa Maria: CRS/INPE, 2008. 38 p.
- MARJANOVIC, M.; CAHA, J. Fuzzy approach to to landslide susceptibility zonation Fuzzy Approach Landslide Susceptibility Zonation. In: Dateso 2011: Annual International Workshop on Databases, Texts, Specifications and Objects, Pisek. **Anais...** Pisek: 2011. Disponível em: <<http://ceur-ws.org/Vol-706/papersg01.pdf>>.
- MASSA, E. M.; ROSS, J. L. S. Aplicação de um

- modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, v. 24, n. 2012, p. 57–79, 2012. Disponível em: <<http://citrus.uspnet.usp.br/rdg/ojs/index.php/rdg/article/view/355/405>>. Acesso em: 12 fev. 2014.
- MEIRELLES, M. S. P.; MOREIRA, F. R.; CÂMARA, G.; NETTO, A. L. C.; CARNEIRO, T. A. de Á. Métodos de Inferência Geográfica: Aplicação no planejamento regional, na avaliação ambiental e na pesquisa mineral. In: MEIRELLES, M. S. P.; CÂMARA, G.; ALMEIDA, C. M. DE; OUTROS (Ed.). **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007a. 593 p.
- MEIRELLES, M. S. P.; MOREIRA, F. R.; CÂMARA, G.; OUTROS. Técnicas de inferência espacial. In: MEIRELLES, M. S. P.; CÂMARA, G.; ALMEIDA, C. M. DE; OUTROS (Ed.). **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007b. 593 p.
- NETTO, A. L. C.; SATO, A. M.; DE SOUZA AVELAR, A.; VIANNA, L. G. G.; ARAÚJO, I. S.; FERREIRA, D. L. C.; LIMA, P. H.; SILVA, A. P. A.; SILVA, R. P. January 2011: The Extreme Landslide Disaster in Brazil. In: **Landslide Science and Practice**. Berlin, Heidelberg, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 377–384.
- OTHMAN, A.; GLOAGUEN, R. River Courses Affected by Landslides and Implications for Hazard Assessment: A High Resolution Remote Sensing Case Study in NE Iraq–W Iran. **Remote Sensing**, v. 5, n. 3, p. 1024–1044, 1 mar. 2013. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/5/3/1024/>>.
- PFALTZGRAFF, P. A. D. S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife**. 2007. Tese (Doutorado em Geologia), Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PB, 2007. 120 p.
- 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**, v. 23, n. 2012, p. 4–26, 2012. Disponível em: <<http://citrus.uspnet.usp.br/rdg/ojs/index.php/rdg/article/view/117/364>>. Acesso em: 21 dez. 2013.
- QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. **Guia do utilizador do QGIS**. Disponível em: <[http://www.qgis.org/pt\\_BR/docs/index.html](http://www.qgis.org/pt_BR/docs/index.html)>. Acesso em: 1 mar. 2015.
- 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.
- RAMOS, A.; CUNHA, L.; CUNHA, P. P.; FREITAS, M. I. C. Cartografia de suscetibilidade a deslizamentos e unidades territoriais de risco à escala regional: o caso da região Figueira da Foz – Nazaré. **Cadernos de Geografia**, n. 30/31, p. 269–281, 2012. Disponível em: <[http://www.uc.pt/fluc/depgeo/Cadernos\\_Geografia/Numeros\\_publicados/CadGeo30\\_31/Eixo3\\_3](http://www.uc.pt/fluc/depgeo/Cadernos_Geografia/Numeros_publicados/CadGeo30_31/Eixo3_3)>.
- RENNÓ, C. D.; SILVA, T. S. F. **Planilha: Índice Kappa**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/~camilo/estatistica/xls/kappa10cond.xls>>. Acesso em: 5 maio. 2015.
- ROSS, J. L. S. ANÁLISE EMPÍRICA DA FRAGILIDADE DOS AMBIENTES NATURAIS ANTROPIZADOS. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, v. 8, p. 63–74, 1994. Disponível em: <<http://citrus.uspnet.usp.br/rdg/ojs/index.php/rdg/article/view/225/204>>. Acesso em: 12 fev. 2014.
- ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. especial, p. 38–51, 2012. Disponível em: <<http://citrus.uspnet.usp.br/rdg/ojs/index.php/rdg/article/view/367/444>>. Acesso em: 29 mar. 2014.
- SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.
- SANTHA, S. D.; SREEDHARAN, R. K. Population vulnerability and disaster risk

- reduction: A situation analysis among the landslide affected communities in Kerala, India. **Journal of Disaster Risk Studies**, v. 3, n. 1, p. 367–380, 2010.
- SDCSL. **Mapeamento das áreas de riscos no município de são luís**. São Luís: SDCSL, 2013.
- SHAHABI, H.; KHEZRI, S.; AHMAD, B. Bin; HASHIM, M. 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, J. dos S. V. da; SANTOS, R. F. dos. **Estratégia metodológica para zoneamento ambiental: a experiência aplicada na bacia hidrográfica do alto rio taquari**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2011. 329 p.
- SILVA, F. B.; SANTOS, J. R. N.; ARAÚJO, M. L. S. de; SILVA JUNIOR, C. H. L. Análise espaço-temporal da precipitação no estado do Maranhão no período de 2003 a 2012. In: Proceedings of Safety, Health and Environment World Congress, Cubatão. **Anais...** Cubatão: COPEC, 2014. Disponível em: <<http://proceedings.copec.org.br/index.php/shewc/article/view/2375>>.
- SIRAJ, S.; MIKHAILOV, L.; KEANE, J. A.; A. PriEsT: an interactive decision support tool to estimate priorities from pairwise comparison judgments. **International Transactions in Operational Research**, v. 22, n. 2, p. 217–235, mar. 2015. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/itor.12054>>.
- SOUZA, D. F. de; VIEIRA, T.; LOPES, M. R. C. M.; FRANCISCO, R. **APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP-FUZZY**. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/edipucrs/erematsul/comunicacoes/10DEBORAFERRODESOUZA.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2015. p. 104-115.
- TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. Influência da Vegetação na Estabilidade de Taludes na Bacia do Rio Ligeiro (PR). **Geociências**, v. 27, n. 3, p. 387–399, 2008.
- USGS. **Earth Explorer**. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>.
- VALERIANO, M. de M. TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. **INPE-15318-RPQ/818**, p. 0–72, 2008. Disponível em: <<http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>>.
- WANG, W.; XIE, C.; DU, X.; OUTROS. 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.
- 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.