

APLICABILIDADE DA LÓGICA FUZZY NA GESTÃO DE RISCO DE DESASTRES GEOTÉCNICOS DO ESTADO DE SANTA CATARINA

DOI: 10.19177/rgsa.v7e0201866-85

Barreto Machado, V.¹

Medeiros, I.²

Ruiz Filho, R.³



RESUMO

Ferramentas de análise estatística multicritérios têm, há tempo, sido aplicadas na execução de mapeamentos voltados à gestão de desastres naturais. Todavia, devido à dificuldade em sintetizar dados quantitativos e qualitativos em um único resultado através das metodologias comumente escolhidas em Santa Catarina (e.g. lógica booleana), determinam-se faixas de abrangência, que diminuem a precisão das correlações obtidas. Este trabalho concentrou-se na apresentação/aplicação da inovadora lógica Fuzzy no tratamento dos dados vinculados à problemática apresentada por meio de simulações estatísticas e utilização de SIG, culminando no aprimoramento da espacialização das resultantes, e permitindo maior acurácia na delimitação de áreas de risco.

Palavras-Chave: Análise de Suscetibilidade à Liquefação de Solos; Lógica Fuzzy; Gerenciamento de Risco de Desastres.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional de uma região ou município, quando ocorrido de forma descontrolada e vertiginosa, acaba por causar o desequilíbrio dos sistemas ambientais locais, gerando transtornos para o poder público que outrora não existiam, submetendo a população a riscos que seriam resolvidos com melhor planejamento e organização municipal. Neste contexto, a delimitações de áreas de fragilidade apresenta-se como importante ferramenta de planejamento e com alta potencialidade de uso pelos órgãos públicos na elaboração do planejamento territorial ambiental, como forma de mitigar e prevenir possíveis eventos danosos aos indivíduos que habitam em áreas suscetíveis a desastres deste gênero.

As metodologias tradicionais para o desenvolvimento de mapas temáticos, entretanto por tratarem-se de conjuntos de correlações estatísticas entre variáveis distintas, têm em seus resultados, precisão limitada em função do método matemático escolhido para o tratamento hierárquico dos dados intermitentes na análise proposta, uma vez que estes se baseiam na lógica booleana e suas derivadas, que estabelecem apenas duas condições para as entradas apresentadas: pertencente ou não ao conjunto averiguado.

Como solução prática para o problema encontrado, costuma-se optar por estabelecer faixas de classificação delimitantes para as relações numéricas obtidas. Isso torna o caráter da parametrização de resultados, de certa forma, subjetivo, por não permitir a plena interpretação dos referidos mapeamentos, sem uma extensa tipificação das faixas encontradas nos mesmos. Entretanto, novas modelagens vêm sendo desenvolvidas com o intuito de preencher as lacunas deixadas através das metodologias e modelos tradicionais. Destarte, os procedimentos de construção de modelos de fragilidade deverão ser analisados de forma integrada para viabilizar a geração de um produto-síntese que expresse os diferentes graus de fragilidade que o ambiente possui em função dos parâmetros adotados (KAWAKUBO et al., 2005).

A lógica nebulosa Fuzzy, ou modelagem inovadora Fuzzy, é o aperfeiçoamento da estatística Booleana e/ou lógica clássica, baseado na problemática central das referidas, a determinação de parâmetros de meio-termo. De acordo com Marro (2010), este tipo de lógica estatística é considerado como um conjunto de princípios matemáticos para a representação do conhecimento com embasamento no grau de pertinência dos termos. Ou seja, um elemento que, apesar de pertencer a um

determinado conjunto, possui grau de intensidade na determinação de sua participação (valor), como por exemplo, parcialmente verdadeiro ou parcialmente falso. Logo, a representação gráfica obtida pela solução das lógicas que é dada por uma reta para estatística convencional, onde dois pontos interseccionados definem a amostra, transforma-se em uma parábola para os dados 'fuzzificados', por estes determinarem em cada ponto, um novo resultado.

A aplicação do método Fuzzy consiste na conversão de escalas qualitativas de caracterização em dados quantitativos, para a viabilização do uso das resultantes em simulações matemáticas e análises situacionais. Através de processos estatísticos de hierarquização de variáveis, e da geração de matrizes multicritérios, é possível correlacionar as qualidades analisadas, e integra-las ao panorama proposto. Assim, os resultados alcançados não são tratados de forma independente ou subjetiva, mas com respaldo científico, e significância matemática, possuindo notável precisão na delimitação e mapeamento de áreas de influência em função de variáveis distintas integradas, uma vez que somada com Sistemas de Informação Georreferenciada.

Este trabalho teve como seu objetivo, a demonstração de uma aplicação da lógica Fuzzy em um mapeamento temático de suscetibilidade a desastres geotécnicos, como forma de apresentar as vantagens da utilização, principalmente na delimitação de zonas de risco em modelagens de grandes áreas, desta metodologia ainda pouco empregada. Além de solidificar a aplicabilidade desta em estudos conduzidos em território catarinense, podendo ampliar a acurácia e eficácia na identificação de áreas de risco alarmantes, e contribuir para a redução de fatalidades causadas por catástrofes naturais.

2 MÉTODOS E PROCESSOS

Para conquistar o objetivo proposto, foi necessário delimitar a temática em que as variáveis seriam estabelecidas, bem como o campo de amostragem para a coleta dos dados e informações. Como forma de atender o premente carência em estudos voltados para a mitigação e prevenção de desastres relativos à liquefação dos solos, surgiu o incentivo para a aplicação do método escolhido, para a análise de suscetibilidade a estes fenômenos em caso de eventuais abalos sísmicos. A

região sul litorânea de Santa Catarina, mais especificamente o município de Imbituba/SC, foi escolhida, uma vez que a localidade apresenta registros geologicamente recentes de sismicidade moderada e intensa atividade portuária, que poderia ser bastante avariada na ocorrência de desastres do gênero.

A investigação realizada, identificada como de abordagem quantitativa, de nível descritivo e do tipo prática se deu por duas etapas bem definidas. A primeira, embasou-se na coleta de informações e dados correlatos às variáveis inferentes na suscetibilidade à liquefação do solo da região proposta, através de pesquisas bibliográficas em acervos públicos e publicações científicas, e ensaios de caracterização geotécnica. Já a segunda etapa, referiu-se ao tratamento estatístico multicritérios dos mesmos por meio da aplicação de lógica Fuzzy para a obtenção de matrizes integradas de informações, bem como da espacialização das correlações resultantes, pela superposição dos dados utilizando Sistemas de Informação Geográfica. Considerando-se o nível descritivo do estudo, realizou-se através de geoprocessamento, a manipulação estatística de variáveis elencadas como: Dados Geotécnicos, Geológicos e Pedológicos; Parâmetros Sísmicos; e Estudos de distribuição populacional.

No agrupamento de dados relacionados às características de geotecnia, pedologia e geologia dos solos serão analisados índices físicos (granulometria, grau de saturação, densidade relativa, etc.) seguindo normas competentes (NBR's 6457/86, 6459/84, 7180/84, 7181/84 e 9604/86), informações pedológicas (e.g., tipo e origem do solo analisado), e dados geológicos como idade e formação tectônica dos solos da região. Para obter estas compilações de dados, foram efetuadas buscas em bibliografias acadêmicas e laudos geotécnicos da região disponibilizados pela universidade, assim como ensaios laboratoriais de geotecnia, conforme normas brasileiras respectivas. Da mesma forma, ocorreu a captação de informações relativas aos parâmetros sísmicos necessários para a análise de suscetibilidade (e.g., magnitude, duração, distância de falha), e dos estudos de densidade e distribuição populacional (informações geográficas), de nomenclatura autoexplicativa.

Posterior à coleta de dados, utilizou-se da metodologia estatística Fuzzy, por esta permitir a transformação de caracterizações qualitativas, de caráter subjetivo, em relações quantitativas. Foi viável então, a correlação hierárquica das variáveis independentes, que permitiu o uso das resultantes obtidas em modelos de

simulação estatística e facilitou a análise do panorama proposto. Ferramentas de georreferenciamento baseado em SIG, foram utilizadas na sintetização das saídas da modelagem estatística, por simplificarem o diagnóstico das zonas mais suscetíveis à liquefação em eventual ocorrência sísmica nas proximidades da costa sul-catarinense.

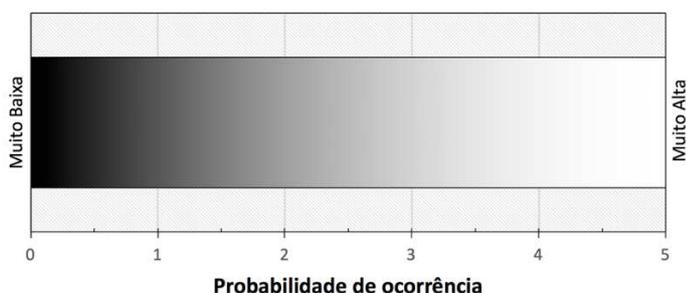
2.1. PROCESSAMENTO DE VARIÁVEIS

A análise de suscetibilidade à liquefação dos solos da região imbitubense foi conduzida através da aplicação integrada de modelagens estatísticas baseadas em hierarquização de variáveis distintas por meio da utilização da Lógica *Fuzzy*, e sistemas geográficos de informação (geoprocessamento) conduzidos por meio da plataforma digital (*Quantum GIS® v2.18*). Este tipo de desenvolvimento tem sido amplamente praticado em ambientes acadêmico e profissional voltados para a Gestão de Risco de Desastres por conciliarem as informações pertinentes aos cálculos de suscetibilidade e vulnerabilidade a fenômenos desastrosos de forma prática e de simples divulgação.

Para que fosse viabilizada a execução do método escolhido, a seguir modelo de aplicação similar ao proposto por Servi (2004), foi necessária a identificação e estabelecimento de critérios avaliativos para cada variável, bem como a classificação destes em agrupamentos por gênero. Isto para que as posteriores hierarquias pudessem ser correlacionadas de maneira sintetizada e houvessem menores desvios característicos no sistema de pesos adotado, permitindo a representação mapeada das características analisadas.

Os agrupamentos de variáveis foram definidos como: critérios pedológicos; critérios geotécnicos; critérios geológicos; critérios geográficos; e critérios sísmicos. Estes se basearam em cinco subdivisões por ventura da adoção de correlação comum, de *Muito Baixa* (0,0) até *Muito Alta* (5,0), para os resultados últimos, como explicitado na Figura 1.

Figura 1. Escala adotada para hierarquização de variáveis nos *Rasters*.



Fonte: (Dos autores, 2018).

2.1.1. Critérios pedológicos

A pedologia do território em análise apresenta predominância em Areias Quartzosas Marinhas, sendo esta tipologia de solo responsável por aproximadamente um terço da área total do município. Outras formações pedológicas significantes, como pode-se perceber através da Tabela 1, são: cambissolo; glei; dunas e areias das praias; e podzólico Vermelho-Amarelo. Isto se dá, principalmente, pelo caráter litorâneo da localidade, bem como por esta ser encontrada em complexo de bacias sedimentares.

Tabela 1. Áreas por tipo de solo - Imbituba/SC

Tipo de solo	Soma de Área (km2)	Soma de Área (%)
Areias quartzosas marinhas	58,16	32%
Cambissolo	27,63	15%
Corpos de água e urbanização	27,92	15%
Glei pouco húmico	25,25	14%
Dunas e areias de praia	20,26	11%
Podzólico vermelho-amarelo	19,04	10%
Solos Orgânicos	3,77	2%
Afloramentos rochosos	0,89	0%
Total	182,92	100%

Fonte: (Dos autores, 2018).

De maneira em que se permitisse um diagnóstico específico e significativo da extensão territorial proposta, e seguindo os mapeamentos pedológicos já conduzidos por órgãos estaduais (EPAGRI/CIRAM, 2017), a área pertinente aos

substratos foi submetida ao cálculo de amostragem por população finita, servindo o resultado deste como balizador das localidades e quantidades necessárias de retirada de amostras que satisfizessem a significância (95%) e margem de erro de (20%), adotadas pelos acadêmicos. Destarte, subentende-se que a maior parcela das características de pedologia dos solos da região é abrangida de forma específica e fundamentada pelos critérios de geotecnia abrangidos em seção posterior. Além destes, o critério relacionado à qualidade de drenagem das sub-regiões da carta pedológica do município também foi representativo na elaboração do mapa almejado, devido sua participação em ocasiões de risco.

2.1.1.1. Grau de drenagem

A drenagem do solo pode ser definida como a relação de absorção e dispersão que um solo apresenta quando em contato com recursos hídricos, sendo bastante presente em substratos arenosos como terraços marinhos soerguidos. Logo, pode-se resumir que, quanto pior for a qualidade de drenagem de determinado substrato, mais chances este apresenta de explicitar reações inesperadas por ações concernentes a movimentações de fluidos. Isto pode ser constatado através da afirmação de Fonseca (2013, p.8):

Torna-se imprescindível salientar que a deformação volumétrica para as resistências de pico é fundamental na percepção do fenômeno da liquefação. Tal como é bem conhecido, se a deformação volumétrica for de compressão no carregamento drenado, então no caso de o carregamento ser não drenado esta corresponderá a um aumento da pressão nos poros.

Os critérios utilizados para a hierarquização de informações são explicitados como:

- i. Solo caracterizado como muito mal drenado: 5
- ii. Solo caracterizado como mal drenado: 4
- iii. Solo caracterizado como moderadamente drenado: 3
- iv. Solo caracterizado como bem drenado: 2
- v. Solo caracterizado como muito bem drenado: 1

2.1.2. Critérios geotécnicos

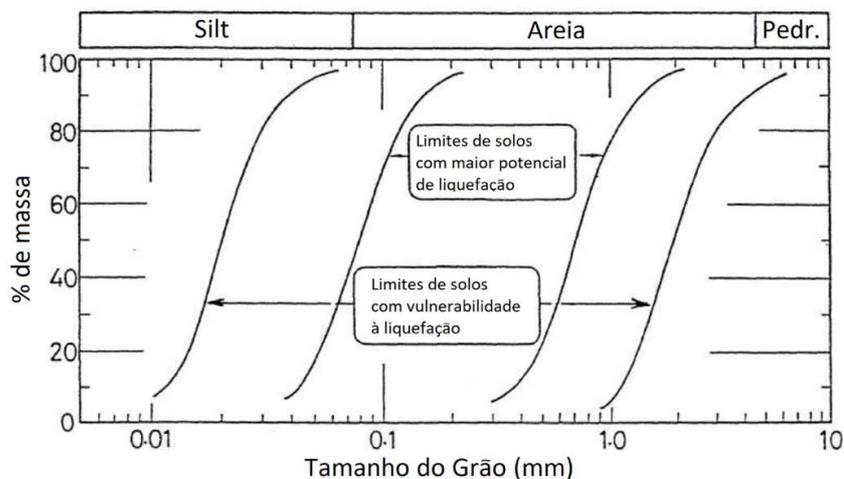
O intuito da caracterização geotécnica neste trabalho foi de estabelecer as pedologias da localidade estudada que possuem maior fragilidade às vibrações sísmicas e altas chances de serem radicalmente afetados pela liquefação dos solos. As amostras foram devidamente manipuladas de acordo com a norma vigente para preparação de ensaios de caracterização a Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6457/86.

Os parâmetros relacionados à geotecnia contidos nesta seção, e utilizados para os cálculos subsequentes foram fixados a partir das bibliografias analisadas, especialmente os valores estabelecidos pelo Departamento de Transporte do Estado de Nova Iorque (NYSDOT, 2015). Estes, foram utilizados na determinação de critérios para os resultados obtidos nos ensaios de caracterização geotécnica conduzidos (granulometria; limites de Atterberg; densidade real). As variáveis aqui apresentadas expressam a fragilidade dos substratos encontrados na região perante eventualidades desastrosas.

2.1.2.1. Curva granulométrica

A primeira característica observada nos solos amostrados foi a distribuição granulométrica dos mesmos. As pedologias com maior vulnerabilidade à liquefação são aquelas cuja resistência à deformação é impactada pela fricção entre as partículas. Logo, por ventura do decréscimo da resistência à fricção aumentar com a diminuição das partículas de solo, pode-se afirmar que substratos arenosos e arenoso-siltosos saturados tendem a ter mais suscetibilidade ao fenômeno. Materiais finos com altos índices de coesão e coesão e/ou de boa graduação tendem a dificultar a ocorrência dos efeitos citados.

Figura 2. Curvas granulométricas limitantes para a ocorrência de liquefação de solos



Fonte: (TSUCHIDA, 1970 apud NYSDOT, 2015, p. 25). Adaptado.

Seguindo os limites de curva granulométrica para a ocorrência do evento estudado (Figura 2), os critérios para este item delimitam-se em:

- i. Curva granulométrica inclusa na área de maior potencial: 5
- ii. Curva granulométrica inclusa na área de vulnerabilidade: 3
- iii. Curva granulométrica fora dos limites propostos: 0
- iv. Valores intermediários: 4, 2, 1

2.1.2.2. Densidade Relativa

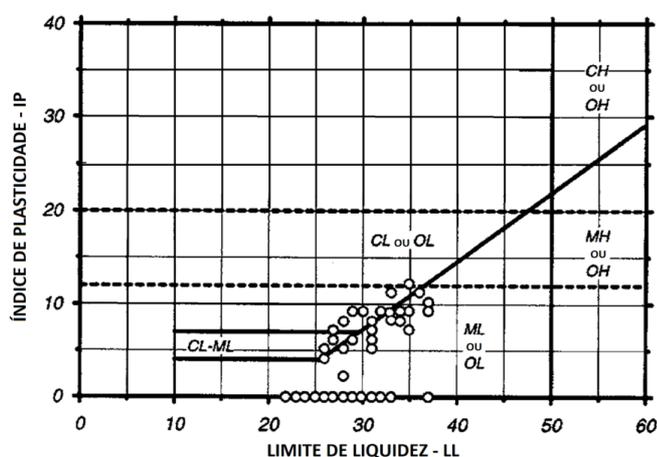
O Índice de Vazios ou Densidade Relativa é um dos maiores fatores limitantes do fenômeno em questão, uma vez que este ocorre principalmente em areias e areias siltosas com a variável em níveis abaixo de 50%, apesar de notar-se também a presença de vulnerabilidade em solos com densidade relativa até 75%. Em materiais de densidade elevada, no entanto, evidencia-se a tendência de dilatação na ocorrência de estresses cíclicos, o que aumenta a resistência a cisalhamento dos mesmos (KWUAMBOKA, 2011). Logo, para as definições de critérios hierárquicos voltados para a classificação de solos por sua densidade relativa, definiu-se que:

- i. Densidade relativa < 50%: 5
- ii. Densidade relativa entre 50% e 75%: 3
- iii. Densidade relativa > 75%: 0

2.1.2.3. Limite de liquidez e índice de plasticidade

As variáveis relacionadas aos Limites de Atterberg também têm caráter de importância na classificação de vulnerabilidade geotécnica. Estas podem ser fatores determinantes na liquefação de solos com percentual elevado de argila ou silte, e tornam-se critérios delimitantes imprescindíveis na caracterização de regiões suscetíveis ao fenômeno. Por meio do gráfico encontrado na Figura 3, Idriss e Boulanger (2006) definem que: A) Solos que possuam IP menor ou igual a 12 e LL menor ou igual a 37 são considerados potencialmente suscetíveis se o grau de saturação for maior que 80% de LL; B) Substratos que possuam IP menor ou igual a 20 e LL menor ou igual a 47 são considerados vulneráveis à liquefação caso o grau de saturação for maior que 85% de LL; e C) Valores de IP maiores que 20 e de LL maiores que 37 classificam os solos como sem potencial para eventos comuns de liquefação, apesar de que devam ser submetidos a mais estudos de suscetibilidade.

Figura 3. Gráfico de Plasticidade com recomendações a partir de fenômeno ocorrido em Adaparazi (1999)



Fonte: (IDRISS; BOULANGER, 2006, p. 1414). Adaptado.

Sendo assim, considerando o recente desenvolvimento científico supracitado, foram estabelecidos para cada tópico listado, valores de criterização da ordem de 5, 3 e 0, respectivamente.

2.1.2.4. Análise hierárquica processual preliminar – Variáveis de Geotecnia

Por virtude da necessidade de compilação dos critérios apresentados em uma só variável, de modo que fosse possibilitada a *rasterização* das informações e

consecutiva simulação estatística, foi executado preliminarmente o método de análise hierárquica de processos (AHP), justificando seu uso por sua capacidade de modelar estatisticamente fatores dantes distintos, no entanto, determinantes para a obtenção dos resultados almejados. (FERREIRA, 2008).

As correlações entre as variáveis foram fixadas a partir das generalidades observadas nos critérios já existentes de suscetibilidade à liquefação, estabelecendo maior valor para a curva granulométrica, uma vez que esta pode ser considerada uma das mais significantes variáveis para as definições desejadas, contudo não esquecendo da importância e imprescindibilidade de critérios que abrangem os solos de menor, porém, presente vulnerabilidade ao fenômeno. Os resultados alcançados podem ser observados na Tabela 2:

Tabela 2. AHP das variáveis geotécnicas analisadas.

	<i>Granulometria</i>	<i>Densidade Relativa</i>	<i>Limites de Atterberg</i>	<i>Peso Resultante</i>
<i>Granulometria</i>	1	3	5	0,648
<i>Densidade Relativa</i>	0,33	1	2	0,230
<i>Limites de Atterberg</i>	0,20	0,5	1	0,122

Fonte: (Dos autores, 2018).

2.1.3. Critérios geológicos

Estudos focados na geologia da região, conduzidos por organizações estaduais, também foram utilizados no estabelecimento de critérios de análise, pelo fato da mesma ter grande relevância e influência no acontecimento de desastres geotécnicos, especialmente no que tange à origem e período de formação dos solos trabalhados.

2.1.3.1. Idade e origem dos solos

Guillén (2004), disserta sobre o fato de que solos de origem recente, do período Holoceno ou mais atual, possuem maior facilidade para colapsar na ocorrência de rápida elevação de poropressões. Principalmente quando estas são submetidas à substratos derivados de depósitos coluviais, fluviais e eólicos por serem originados de processos geológicos que transportam partículas de acentuada uniformidade, culminando em baixos índices de densidade relativa.

O horizonte geológico no qual encontra-se a área de estudo é, de acordo com Carraro (2004), classificado como cobertura sedimentar do quaternário, oriundo de depósitos inconsolidados de areias, siltes, argilas ou aglomerados, de ocorrência comum em planícies costeiras e vales centrais de cursos d'água. Estes, evidenciam dois períodos geológicos bem definidos, sendo estes: Holoceno, na maior parte do território, e Neoproterozóico, em porções ao norte do município. Assim, os critérios de geologia foram definidos como:

- i. Solo originário do período Holoceno ou mais recente: 5
- ii. Solo for originário de períodos anteriores ao Holoceno: 1

2.1.4. Critérios geográficos

Nesta etapa metodológica, foram trabalhadas variáveis geográficas em função da densidade populacional espacializada da localidade em questão, como forma de estimar o acúmulo de poropressões já acometida ao substrato regional através de intervenções humanas e aglomerados urbanos.

2.1.4.1. Densidade Populacional

Diversos estudos objetivados na elaboração de mapas de riscos de desastre geotécnico (e.g. DELAVAR, 2015) analisam minuciosamente a quantidade de pavimentos de construções alocadas na área de estudo, preparo e qualidade estrutural das mesmas, idade e outros, como forma de delimitar as cargas acometidas aos substratos analisados. No entanto, em virtude da inviabilidade de coleta destas informações no município analisado, as variáveis relacionadas a este critério foram sintetizadas na estimativa de cargas por densidade.

Os critérios utilizados adaptaram os estudos de distribuição populacional do litoral de Santa Catarina elaborada por Zambrano (2015), integrados às manchas urbanas do município de Imbituba, incluindo a área de locação do porto regional. Desta forma, foram distribuídos, os valores de criterização (escala de 0~5), pela região, conforme a densidade apresentada em cada área.

2.1.5. Critérios sismológicos

Como meio de definir parâmetros relacionados ao histórico sísmico, visitas a bibliografias foram conduzidas, unindo as mesmas aos boletins sísmicos registrados no país. Apesar da aparente escassez de informações sobre terremotos no Brasil e desastres correlatos, devido ao caráter recente em que pesquisas têm se evidenciado e sido incentivadas nesta área de estudos, um dos principais eventos ocorridos em território nacional teve suas coordenadas, magnitude e data de ocorrências registradas pelo Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (2017), atestando sismo de significativa energia (ML: 5,2) acontecido nas proximidades da região aproximadamente 80 anos atrás. A partir deste evento histórico, as simulações foram modeladas e os critérios estabelecidos, devido a possível recorrência de abalo com características similares em um ainda, indeterminado tempo cíclico.

2.1.5.1. Distância estimada da falha

Situando-se a falha intraplaca nas coordenadas estimadas para o último acontecimento sísmico com proximidade considerável, foi possível a elaboração de critérios baseados na distância do município de Imituba até o epicentro admissível de um novo tremor. Característica relevante para a determinação da suscetibilidade analisada pelo fato de as ondas sísmicas perderem energia conforme se afastam de seu ponto de início (hipocentro). Desta forma, o processo de criterização para os relatos sismológicos da localidade em questão foi dado pela distribuição hierárquica segundo os valores de distância estimados, sendo o menor entre estes (108km) o considerado com maior potencial de risco (5), e o ponto mais distante (126km), como o de vulnerabilidade mais baixa ao fenômeno (1).

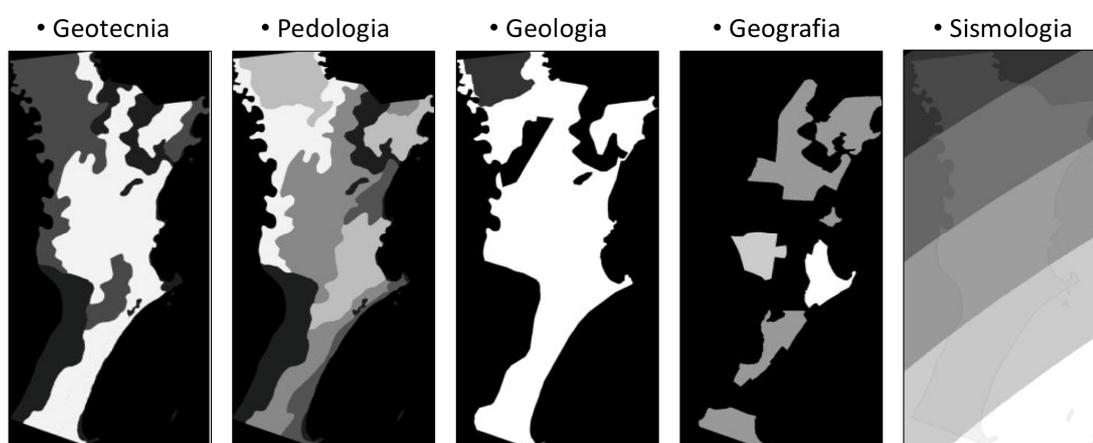
2.1.6. Espacializações resultantes

Modelagens multicritérios georreferenciadas por meio da utilização de *Rasters* são aquelas em que os atributos de determinada região são limitados a células de dimensões e resolução não fixas. Estas são bastante úteis em aplicações como: representações de uma característica contínua de determinada região; correlações analíticas de variáveis independentes encontradas em uma mesma área;

cruzamento de dados espacializados (SAPIC, 2017). Este tipo de abordagem foi adequado para os desenvolvimentos deste trabalho, uma vez que o escopo do mesmo foca no somatório multicritérios de particularidades distintas da mesma área, em prol da geração de um mapa de risco/suscetibilidade.

As espacializações dos atributos analisados de cada substrato podem ser conferidas na Figura 4, trazendo as subdivisões já apresentadas previamente, sendo o valor que apresenta maior risco 5 (em branco), e 0 (preto) a ausência de suscetibilidade para o evento.

Figura 4. Espacialização em *Raster* dos critérios analisados



Fonte: (Dos autores, 2018).

2.1.7. Hierarquia definitiva

Em posse da definição de hierarquia individual de todos os critérios e variáveis contidas na análise de risco à liquefação de solos pela submissão destes a esforços horizontais de ordem sísmica, bem como dos mapas de contraste necessários para a soma espacializada, se fez imprescindível para o diagnóstico visado, o tratamento estatístico de multicriterização de todas as informações colhidas.

Por meio de processo congênere ao já utilizado na formulação de pesos para as variáveis geotécnicas, o compilado de resultados prévios foi submetido ao método AHP, porém de modo a alcançar os valores de hierarquia definitivos para o cálculo de *Fuzzy*, e posterior mapeamento das saídas encontradas em uma só representação cartográfica de zonas mais vulneráveis.

As parametrizações entre os pontos temáticos analisados foram obtidas por meio da correlação proposta por Saaty (2008), onde valores de 1 a 9 são incutidos

em comparações integradas de pares de variáveis que geram um peso hierárquico final para cada uma das partes/tipologias envolvidas.

Os resultados numéricos obtidos nas comparações hierárquicas conduzidas, bem como os pesos resultantes do tratamento estatístico das mesmas, podem ser conferidos na Tabela 3.

Tabela 3. AHP dos agrupamentos de variáveis analisados

	<i>Pedologia</i>	<i>Geografia</i>	<i>Geotecnia</i>	<i>Geologia</i>	<i>Sismologia</i>	<i>Peso Resultante</i>
<i>Pedologia</i>	1	2	0,2	1	4	0,157
<i>Geografia</i>	0,5	1	0,5	0,333	4	0,132
<i>Geotecnia</i>	5	2	1	5	8	0,482
<i>Geologia</i>	1	3	2	1	5	0,190
<i>Sismologia</i>	0,25	0,25	0,125	0,2	1	0,039

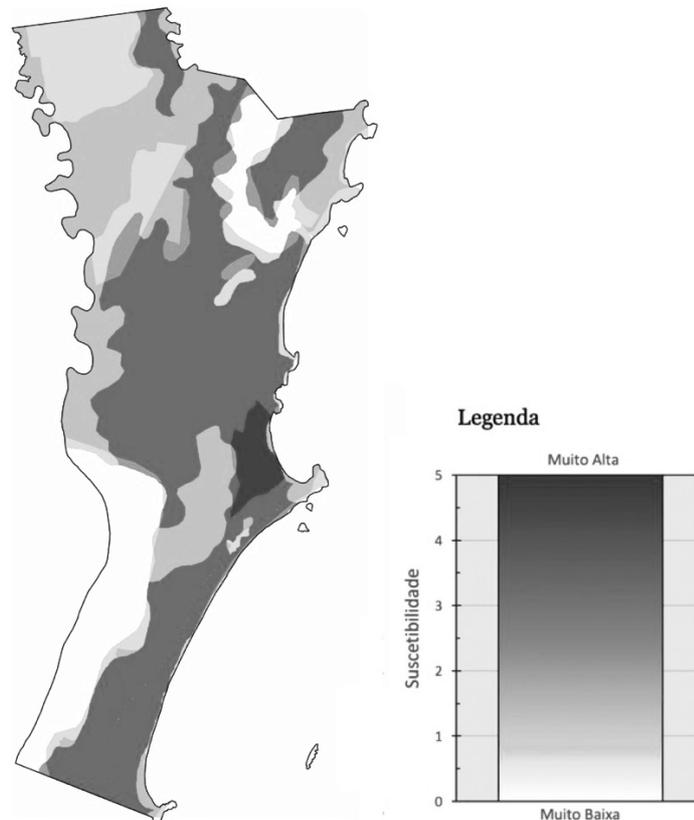
Fonte: (Dos autores, 2018).

3 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Concluídas as análises estatísticas espacializadas baseadas nos critérios adotados, tornou-se viável a integração e superposição dos resultados obtidos através de SIG, de modo a elaborar um gradiente de suscetibilidade da região em estudo.

A zona de maior risco, destacada por seu espectro mais escuro (Figura 5), coincide com a parcela do município de maior densidade populacional e com maior número de estruturas com peso considerável por razão de ser esta, o centro econômico do município. Sua proximidade da costa, e formação arenosa geologicamente jovem de substrato são possíveis fatores que magnificaram a suscetibilidade da região ao evento desastroso em questão. Em eventualidade congênere, os danos tanto à economia, quanto à população ali presente, seriam bastante expressivos pelo fato de nenhuma das edificações da região possuir sistema amenizador de impactos gerados por ocorrências do tipo, uma vez que as normas brasileiras voltadas à mitigação são bastante recentes, e ainda defectivas.

Figura 3 - Representação gráfica das áreas de suscetibilidade à liquefação de solos por sismos de Imbituba/SC



Pode-se perceber também que, por causa da característica rochosa dos embasamentos do porto, que se opõem à facilitação de ocorrência de liquefação dos solos, sua área de localização não se encontra em quadrante de maior risco. No entanto, um eventual desastre geotécnico do gênero na zona de maior risco, situada bastante próxima ao porto, afetaria, sem embargo, consideravelmente a rotina das atividades portuárias da região, já que o fluxo de mercadorias e bens de importação e exportação utiliza-se frequentemente de rotas contidas nesta área, podendo ser facilmente avariado pela inviabilização de uso das mesmas.

As demais áreas do município, embora apresentem valores moderados de suscetibilidade, não expõem (atualmente) a população a riscos expressivos, posto que a distribuição populacional nestas localidades é bastante alta, e a quantidade de construções, bastante defasada. Porém, em razão do latente crescimento municipal devido ao seu caráter portuário, é essencial, o monitoramento destas zonas para evitar futuros infortúnios.

De modo geral, o substrato do município de Imbituba possui latente suscetibilidade para eventuais fenômenos de liquefação. Esta predisposição é equilibrada pela baixa sismicidade natural da região, mas traz à tona a necessidade de monitoramento de vibrações artificiais, especialmente na área de maiores movimentações econômicas, às proximidades do porto, para que possam ser evitadas quaisquer patologias estruturais e adversidades provindas de colapsos análogos.

Realça-se o caráter conceitual dos resultados obtidos que, apesar de possuírem perfeitas relações de confiabilidade estatística e aplicabilidade de metodologia, necessitam de aprofundamentos científicos localizados, principalmente nas áreas de maior vulnerabilidade, como forma de aprimorar a precisão das saídas coletadas na execução deste estudo. Além disso, são necessários mais estudos sismológicos na região para maiores caracterizações das falhas presentes (ciclos de ocorrência sísmica, tempo de retorno, etc.), para aprimorar a acurácia das correlações de liquefação de solos causadas por tremores de terra.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho voltou-se, desde o princípio, à apresentação e demonstração de funcionamento/aplicabilidade da metodologia de lógica difusa (ou Fuzzy) no tratamento estatístico de variáveis inerentes a mapeamentos de risco geotécnico. Para tal, realizou-se uma análise multicritérios de suscetibilidade à liquefação dos solos na região de Imbituba/SC a partir de interações sísmicas, com dados distribuídos nos âmbitos de geografia, geologia, pedologia e geotecnia, com enfoque em comportamentos de solos sob vibrações externas, de acordo com históricos de sismicidade.

Durante a coleta dos dados e execução dos processos, constatou-se a escassez de bibliografias nacionais relacionadas à aplicação deste método matemático na gestão de risco de desastres, apesar do perceptível uso da ferramenta em órgãos de proteção civil e laboratórios de temática congênere, em âmbito internacional. Talvez, esta dificuldade foi encontrada devido ao caráter ainda recente de pesquisas acadêmicas, e incentivos para desenvolvimentos científico, na área de mitigação de catástrofes em solo Tupiniquim.

Por meio de buscas bibliográficas em acervos estaduais e publicações, foi possível a delimitação dados cartográficos inerentes aos tópicos escolhidos para a análise multicritérios objetivada. Estes, citados anteriormente, foram criterizados de acordo com preceitos de suscetibilidade estabelecidos por diversos autores, e averiguados (quando necessário) através de ensaios normatizados por diretrizes brasileiras, de modo que fosse viabilizada sua integração por lógica Fuzzy. Em posse das resultantes de hierarquia provindas dos processos estatísticos utilizados, fez-se a espacialização das correlações por intermédio de SIG.

Os resultados obtidos pelo uso do sistema adotado se diferem do comumente visto, principalmente, por estarem dispostos em gradiente, e não em um sistema policromático, onde cada cor representa uma característica ou situação específica. Isto permite, além da diminuição da subjetividade na interpretação do mapeamento resultante, a determinação de valores intermediários, que independem de classificação prévia, permitindo que a acurácia do estudo seja aumentada, de acordo com o acréscimo na resolução da imagem georreferenciadas e na quantidade de variáveis/amostras vinculadas ao projeto.

A lógica empregada e resultados obtidos através deste trabalho destacam sua expressiva aplicabilidade em estudos voltados ao esclarecimento das áreas de risco e instabilidade geotécnica. As resoluções finais devem ser consideradas não apenas para fins acadêmicos, mas para aplicações na prevenção e mitigação de desastres, que podem ocorrer, eventualmente, nas áreas de maior risco.

Ao término do mapeamento, a percepção sobre a relevância da prevenção e mitigação de catástrofes naturais foi assimilada, juntamente com a concepção dos métodos utilizados para posteriores desenvolvimentos científicos e profissionais no âmbito de gerenciamento de risco de desastres.

4.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, para futuros trabalhos, a análise mais aprofundada das variáveis aqui abrangidas, como por exemplo: caracterização do perfil estratigráfico e demais atributos geotécnicos das pedologias existentes na região utilizando aparatos específicos (sondagens à percussão, ensaios de piezocone e de palheta, etc.); correlações com tipos de fundações das edificações imbitubenses para delimitação de cota de assentamento de fundação (CAF) necessária a fim de evitar patologias

por liquefação de solos; e estudos sismológicos nas falhas geológicas da região para maior precisão de dados congêneres, a citar tempo de retorno e exata localização.

APPLICABILITY OF FUZZY LOGIC IN THE RISK MANAGEMENT OF GEOTECHNICAL DISASTERS IN SANTA CATARINA, BRAZIL

ABSTRACT

Multi-criteria statistical analysis tools have long been applied in the development of disaster risk management maps. However, due to the difficulty in synthesizing quantitative and qualitative data in a single result through the methodologies commonly chosen in Santa Catarina (eg Boolean logic), categories based on value ranges are determined decreasing the accuracy of the correlations obtained. This work was focused on the presentation / application of Fuzzy logic in the treatment of data related to the problem given (soil liquefaction susceptibility) through statistical simulations and the use of GIS, which culminated in the improvement of the results spatialisation and increased precision in the delimitation of risk areas.

Keywords: Soil Liquefaction Susceptibility Analysis. Fuzzy Logic. Disaster Risk Management.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 6459:** Solo – Determinação do Limite de Liquidez: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180:** Solo – Determinação do Limite de Plasticidade: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181:** Solo – Análise Granulométrica: Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 9604:** Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção de Solo, com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas. Rio de Janeiro, 1986.

BOLETIM SÍSMICO BRASILEIRO - **Catálogo do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo**. Disponível em < <http://moho.iag.usp.br/eq/bulletin>>. Acesso em: 27 set. 2017.

BOULANGER, R.; IDRIS, I. Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. p. 1413-1426, 2006.

CARRARO, F. **Geografia de Santa Catarina**. 1ª ed. São Paulo: Editora FTD S.A, 2004.

DELAVAR, M. R.; MORADI, M.; MOSHIRI, M. Earthquake Vulnerability Assessment for Hospital Buildings Using a GIS-based Group Multi Criteria Decision Making Approach: A Case Study of Tehran, Iran. International Conference on Sensors & Models in Remote Sensing & Photogrammetry. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. xl-1/w5. Kish Island, Iran, 2015.

EPAGRI/CIRAM. **Mapas Digitais de Santa Catarina**. Disponível em: <<http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/index.jsp>>. Acesso em: 31/10/2017.

FERREIRA, F. **Análise de Investimentos em AMT (Advanced Manufacturing Technology): Uso de um Modelo Multicriterial – AHP (Analytic Hierarchy Process)**. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

FONSECA, A. Liquefação de Solos à Luz da Mecânica Aplicada. **Geotecnia**. v. 1, n. 128, p. 3-35, 2013.

GUILLÉN, J. L. **Estudo de Modelos Constitutivos para Previsão da Liquefação em Solos sob Carregamento Monotônico**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2004.

KAWAKUBO, F. S. *et al.* **Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto [CD-ROM]: 2005 abr 16-21; Goiânia, Brasil, p.2203-2210.

KWUAMBOKA, B. **Soil Liquefaction**. Tese (Bacharelado em Engenharia Civil) – Programa de Graduação em Engenharia Civil. University of Nairobi. Nairobi, 2011. Adaptado.

MARRO, A. *et al.* **Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações**. Departamento de Informática e Matemática Aplicada (DIMAp). Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2010.

NYSDOT. Liquefaction Potential of Cohesionless Soils: **Geotechnical Design Procedure#9**. New York: Geotechnical Engineering Bureau, 2015.

SAATY, T. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**. v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

SAPIC, T. **Intro to GIS and GIS Vector and Raster Models**. Faculty of Natural Resources Management. Lakehead University, 2015.

SERVI, M. **Assessment of Vulnerability to Earthquake Hazards Using Spatial Multicriteria Analysis: Odunpazari, Eskisehir Case Study**. Tese (Mestrado em Geodetic and Geographic Information Technologies). Middle East Technical University, Turquia, 2004.

ZAMBRANO, G. J. **Modelagem e Representação Espacial Populacional no Litoral de Santa Catarina a partir de Tecidos Urbanos identificados em imagens OLS**. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2015.