

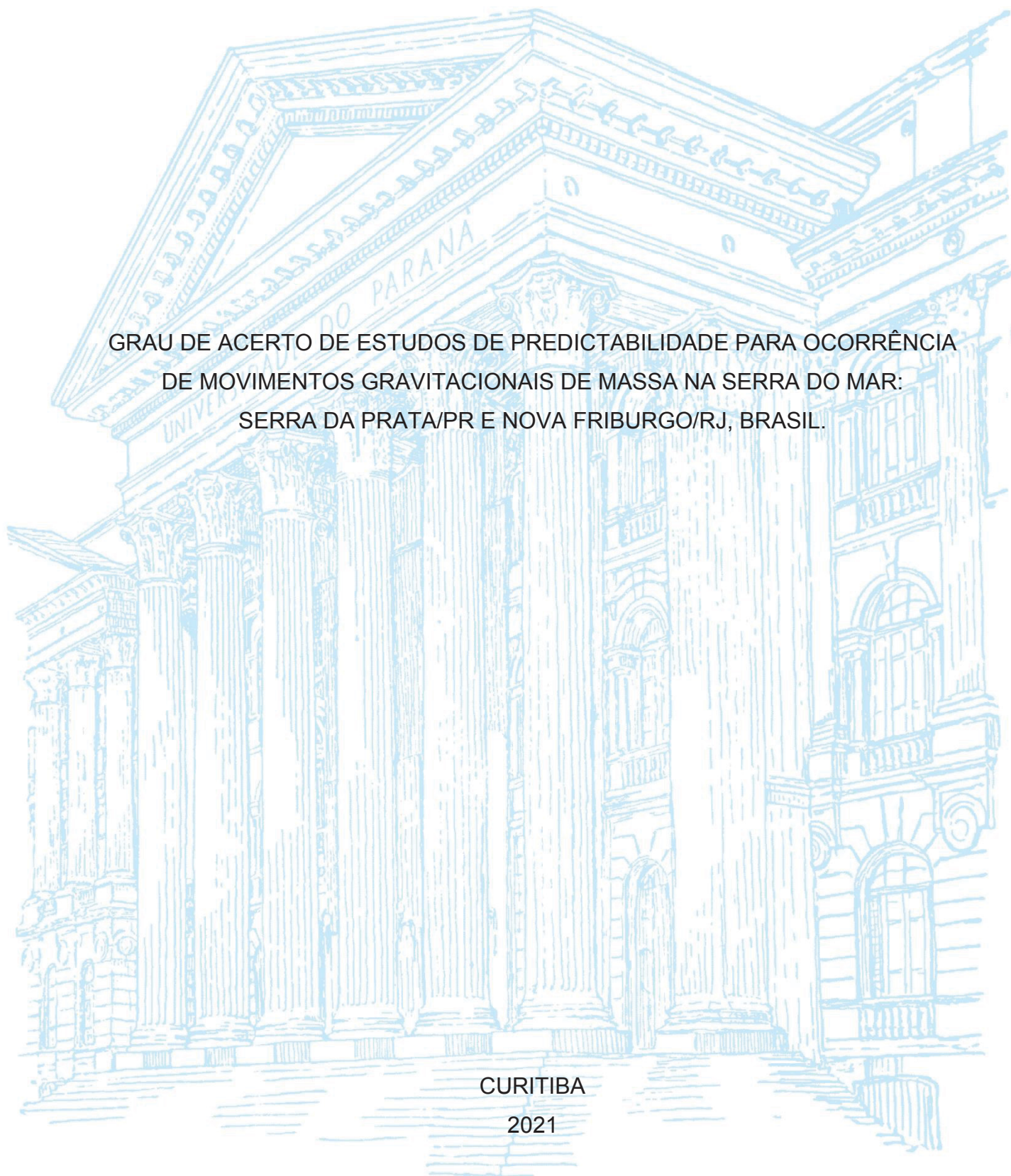
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SAMUEL SALDANHA SARMENTO

GRAU DE ACERTO DE ESTUDOS DE PREDICTABILIDADE PARA OCORRÊNCIA
DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NA SERRA DO MAR:
SERRA DA PRATA/PR E NOVA FRIBURGO/RJ, BRASIL.

CURITIBA

2021



SAMUEL SALDANHA SARMENTO

GRAU DE ACERTO DE ESTUDOS DE PREDICTABILIDADE PARA OCORRÊNCIA
DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NA SERRA DO MAR:
SERRA DA PRATA/PR E NOVA FRIBURGO/RJ, BRASIL.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia Ambiental.

Orientadora: Prof. Dra. Maria Cristina de Souza

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S246g Sarmiento, Samuel Saldanha
Grau de acerto de estudos de predictabilidade para ocorrência de
movimentos gravitacionais de massa na serra do mar: Serra da
Prata/PR e Nova Friburgo/RJ, Brasil [recurso eletrônico] / Samuel
Saldanha Sarmiento – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
da Terra, Programa de Pós-graduação em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina de Souza

1. Planejamento territorial. I. Universidade Federal do Paraná. II.
Souza, Maria Cristina de. III. Título.

CDD: 551.488

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **SAMUEL SALDANHA SARMENTO** intitulada: **ANÁLISE DE ESTUDOS DE PREDICTABILIDADE PARA OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NA SERRA DO MAR: SERRA DA PRATA/PR E NOVA FRIBURGO/RJ, BRASIL**, sob orientação do Prof. Dr. MARIA CRISTINA DE SOUZA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Junho de 2021.

Assinatura Eletrônica

29/06/2021 10:32:32.0

MARIA CRISTINA DE SOUZA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

29/06/2021 11:23:17.0

ADRIANA AHRENDT TALAMINI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

28/06/2021 17:13:35.0

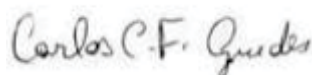
CLAUDIA MARISSE DOS SANTOS ROTTA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS)

DECLARAÇÃO

Declaramos para os devidos fins que **SAMUEL SALDANHA SARMENTO** realizou sua defesa de dissertação intitulada “**ANÁLISE DE ESTUDOS DE PREDICTABILIDADE PARA OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NA SERRA DO MAR: SERRA DA PRATA/PR E NOVA FRIBURGO/RJ, BRASIL**” em 28 de junho de 2021, no Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná, área Geologia Ambiental, nível Mestrado, e que por sugestão da banca examinadora, o título foi alterado para “**GRAU DE ACERTO DE ESTUDOS DE PREDICTABILIDADE PARA OCORRÊNCIA DE MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA NA SERRA DO MAR: SERRA DA PRATA/PR E NOVA FRIBURGO/RJ, BRASIL**”.

Curitiba, 28 de junho de 2021



Carlos Conforti Ferreira Guedes
Coordenador do Programa
Pós-Graduação em Geologia

Dedico este trabalho a minha mãe, Vânia Saldanha Sarmento, por todo carinho, amor, e proteção oferecida aos seus filhos desde sua gestação até os dias de hoje e de amanhã, sendo ela exemplo de mulher íntegra na terra e no céu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Universidade Federal do Paraná (UFPR), em especial, a Dra. Maria Cristina de Souza e demais professores e colaboradores das diversas áreas que auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa.

Registro, igualmente, o agradecimento aos colegas do Laboratório de Estudos Costeiros (Lecost) da UFPR, e aos meus familiares que possibilitaram toda estrutura e suporte para realização deste objetivo pessoal.

Por fim, demonstrarei eternamente minha gratidão buscando aplicar todos os conhecimentos adquiridos em benefício da sociedade brasileira, enaltecendo sempre a ciência e os profissionais técnicos que buscam o melhor equilíbrio entre o meio físico e o desenvolvimento econômico.

RESUMO

Ao longo das últimas décadas os desastres ambientais estão sendo mais frequentes no Brasil. No entanto, as razões para a geração destes eventos são amplas e distintas, diversos fatores interferem direta e indiretamente no meio físico, além de suas características intrínsecas e comportamento dinâmico. Neste cenário, os estudos de predictabilidade para eventos perigosos se tornam fundamentais, principalmente os associados aos movimentos gravitacionais de massa em encostas urbanizadas ou próximas de áreas ocupadas pelo homem. Estes estudos de caráter acadêmico ou técnico se utilizam de três tipos diferentes de modelos preditivos: determinístico, estatístico ou heurístico, todos direcionados para o mapeamento prévio de áreas susceptíveis a escorregamentos de vertentes. Contudo, para a evolução e aperfeiçoamento desta linha de pesquisa é necessário igualmente promover avaliações de desempenho, possibilitando que os resultados obtidos através da predição dos eventos perigosos sejam cada vez mais efetivos. Deste modo, a partir de equações propostas anteriormente foi elaborada uma nova equação para cálculo do grau de acerto de estudos de predictabilidade, aplicável independentemente do modelo preditivo adotado. A equação tem como base uma relação de proporcionalidade de área, confrontando as zonas mapeadas de uma determinada região e suas respectivas classes de susceptibilidade ou risco para escorregamentos, com as cicatrizes dos movimentos gravitacionais de massa geradas em decorrência de um evento. Para a aplicação da equação foram efetuados dois estudos de caso, o primeiro referente ao mapeamento da susceptibilidade para movimentos de massa na área do Parque Nacional Saint Hilaire Lange, localizado no Estado do Paraná, e o segundo correspondente ao plano municipal de redução de riscos do município de Nova Friburgo, Rio de Janeiro, promovendo uma análise de desempenho para cada um deles. Destaca-se que a nova equação foi facilmente aplicada para ambos estudos, permitindo identificar que os trabalhos técnicos apresentaram resultados satisfatórios, constatando um grau de acerto mínimo de 70% ao somar as classes de susceptibilidade ou risco com maior probabilidade para ocorrência de escorregamentos. Entretanto, mesmo com o emprego de modelos preditivos de qualidade, os estudos técnicos não foram capazes de impedir que os eventos perigosos resultassem em desastres de grandes proporções. Expondo, em decorrência disso, uma carência de políticas públicas direcionadas ao planejamento territorial dos centros urbanos e gestão das áreas de risco, e que englobem ações mitigatórias através da análise de trabalhos técnicos.

Palavras-chave: Cicatrizes. Escorregamentos. Modelos preditivos. Risco. Planejamento territorial.

ABSTRACT

Throughout the last decades, environmental disasters are being more frequent in Brazil. However, the reasons to generation these events are broad and distinct, several factors interfere directly and indirectly in the physical environment, besides their intrinsic characteristics and dynamic behavior. In this scenario, hazard predictability studies have become crucial, especially those associated with landside or near to occupied areas by man. These technical or academic studies use three predictive models different: deterministic, statistical or heuristic, all directed to the previous mapping of areas susceptible to landslides. However, for the evolution and improvement of this line of research, it is also necessary to promote performance evaluations, enabling the results obtained through the prediction of dangerous events to be increasingly effective. In this way, based on previously developed equations, a new equation was create to calculate the degree of success of predictability studies, applicable regardless of the adopted predictive model. The equation is based on an area proportionality relationship, confronting the mapped areas of a given region and their respective classes of susceptibility or risk for landslides, with the scars of gravitational mass movements generated as a result of an event. For the application of the equation, two case studies were carried out, one regarding the mapping of landslide susceptibility in the area of the Saint Hilarie Lange national park, located in the State of Paraná, and another corresponding of the risk reduction plan in the Nova Friburgo city, State of Rio de Janeiro, promoting a performance analysis for each one. It is noteworthy that the new equation was apply easily to both studies, allowing to identify that the technical works presented satisfactory results, noting a minimum degree of 70% when adding the susceptibility or risk classes with the highest probability of occurrence of landslides. Meanwhile, even with the use of quality predictive models, technical studies were not able to prevent dangerous events from resulting in major disasters. This exposes a lack of public policies aimed at territorial planning of urban centers and management of risk areas, which include mitigating actions through the analysis of technical works.

Keywords: Scars. Landslide. Predictive models. Risk. Urban planning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	–	RELAÇÕES ENTRE AS CONDIÇÕES PARA A PREDICTABILIDADE E OS ASPECTOS TEMPORAIS	19
FIGURA 2	–	MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE PARA MOVIMENTOS DE MASSA DA REGIÃO NORTE DO PNSHL	26
FIGURA 3	–	MAPAS DE SETORIZAÇÃO DE RISCO PARA ESCORREGAMENTOS DE ENCOSTAS NOS ASSENTAMENTOS URBANOS PRECÁRIOS DE NOVA FRIBURGO/RJ	30
FIGURA 4	–	FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA EMPREGADA PARA CADA ÁREA DE ESTUDO	32
FIGURA 5	–	IMAGEM AÉREA EM 3D DO ASSENTAMENTO URBANO PRECÁRIO VILAGE - NOVA FRIBURGO/RJ, APÓS OCORRÊNCIA DO EVENTO DE JANEIRO DE 2011	36
FIGURA 6	–	MAPA DAS CICATRIZES DOS ESCORREGAMENTOS VETORIZADAS AO LONGO DO ASSENTAMENTO URBANO PRECÁRIO VILAGE – NOVA FRIBURGO/RJ	37
FIGURA 7	–	MAPA DAS CICATRIZES DOS ESCORREGAMENTOS SEGMENTADAS CONFORME O MAPA DE SETORIZAÇÃO DE RISCO VETORIZADO, ASSENTAMENTO VILAGE	38
FIGURA 8	–	FOTOGRAFIA AÉREA DO PNSHL, REGIÃO DA SERRA DA PRATA/PR, APÓS O EVENTO DE MARÇO DE 2011	40
FIGURA 9	–	LOCALIZAÇÃO DO PNSHL	42
FIGURA 10	–	CICATRIZES DOS ESCORREGAMENTOS SEGMENTADAS ATRAVÉS DO QGIS	49
FIGURA 11	–	FOTOGRAFIA AÉREA DE UM ASSENTAMENTO URBANO PRECÁRIO DE NOVA FRIBURGO/RJ, APÓS OCORRÊNCIA DO EVENTO DE JANEIRO DE 2011	60
FIGURA 12	–	LOCALIZAÇÃO DOS ASSENTAMENTOS URBANOS PRECÁRIOS SELECIONADOS DE NOVA FRIBURGO, RIO DE JANEIRO	63
FIGURA 13	–	MAPA PARA OBSERVAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA REATIVADOS: SOBREPOSIÇÃO DAS CICATRIZES DOS ESCORREGAMENTOS DE 2011 COM O MAPA DE SETORIZAÇÃO DE RISCO, ASSENT. VILAGE	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	RESULTADOS PRELIMINARES: ÁREA TOTAL DOS SEGMENTOS DAS CICATRIZES PARA CADA CLASSE DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE.....	50
TABELA 2	–	GRAU DE ACERTO PARA CADA CLASSE DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE.....	50
TABELA 3	–	ÁREA TOTAL DAS CICATRIZES EM CADA ASSENTAMENTO URBANO PRECÁRIO.....	73
TABELA 4	–	ÁREA TOTAL DOS SEGMENTOS DAS CICATRIZES EM CADA SETOR DE RISCO	74
TABELA 5	–	GRAU DE ACERTO DE CADA SETOR DE RISCO POR ASSENTAMENTO	74
TABELA 6	–	PERCENTUAL DOS ESCORREGAMENTOS REATIVADOS NO EVENTO DE 2011	75

LISTA DE ABREVIATURAS

CEPERJ	-	Centro Estadual de Estatística, Pesquisa e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro
CPRM	-	Serviço Geológico do Brasil
COMDEC	-	Coordenadoria Municipal de Defesa Civil de Nova Friburgo
EPSG	-	<i>European Petroleum Survey Group</i>
GIS	-	<i>Geographic Information System</i>
IAP	-	Instituto Água e Terra
IBAMA	-	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
ICMBio	-	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INEA	-	Instituto Estadual do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro
INMET	-	Instituto Nacional de Meteorologia
ITCG	-	Instituto de Terras, Cartográfica e Geologia do Paraná
LECOST	-	Laboratório de Estudos Costeiros
MINEROPAR	-	Serviço Geológico do Paraná
ONU	-	Organizações das Nações Unidas
UNDRO	-	<i>United Nations Disaster Relief Office</i>
PMNF	-	Prefeitura Municipal de Nova Friburgo
PMRR	-	Plano Municipal de Redução de Riscos
PNSHL	-	Parque Nacional Saint Hilaire Lange
SHALSTAB	-	<i>Shallow Landslide Stability</i>
SIG	-	Sistemas de Informações Geográficas
SINMAP	-	<i>Stability Index Mapping</i>
TRIGRS	-	<i>Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional</i>
UC	-	Unidade de Conservação
UFPR	-	Universidade Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivo específico	13
1.3	APRESENTAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	14
2.1.1	Evento	14
2.1.2	Perigo	15
2.1.3	Desastre	16
2.1.4	Vulnerabilidade	16
2.1.5	Susceptibilidade.....	17
2.1.6	Risco.....	17
2.2	ESTUDOS DE PREDICTABILIDADE PARA ESCORREGAMENTOS E SUA APLICAÇÃO NO PLANEJAMENTO TERRITORIAL	18
2.3	MODELOS PREDITIVOS PARA ESCORREGAMENTO DE ENCOSTAS ...	20
2.4	MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE MODELOS PREDITIVOS	22
2.5	ESTUDOS ANALISADOS PARA O CÁLCULO DO GRAU DE ACERTO.....	25
3	METODOLOGIA EMPREGADA PARA O CÁLCULO DO GRAU DE ACERTO	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	ARTIGO 1: RESULTADO DA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ESTUDO DE SUSCEPTIBILIDADE PARA MOVIMENTOS DE MASSA NO PARQUE NACIONAL SAINT HILAIRE LANGE, PARANÁ.	39
4.1.1	Resumo	39
4.1.2	Introdução.....	40
4.1.3	O Parque Nacional Saint Hilaire Lange (PNSHL)	42
4.1.4	Estudo de susceptibilidade para movimentos de massa no PNSHL	44
4.1.5	Materiais e métodos	46
4.1.6	Resultados.....	50

4.1.7	Discussão	50
4.1.8	Conclusões	53
4.1.9	Agradecimentos.....	54
4.1.10	Referências	54
4.2	ARTIGO 2: RESULTADO DA ANÁLISE DO PLANO DE REDUÇÃO DE RISCOS DO MUNICÍPIO DE NOVA FRIBURGO, RIO DE JANEIRO.	59
4.2.1	Resumo	59
4.2.2	Introdução.....	60
4.2.3	Área de estudo	62
4.2.4	O Plano Municipal de Redução de Riscos de Nova Friburgo/RJ.....	65
4.2.5	Materiais e métodos	67
4.2.6	Resultados.....	73
4.2.7	Discussões	75
4.2.8	Conclusões	79
4.2.9	Agradecimentos.....	81
4.2.10	Referências	81
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

O início do ano de 2011 ficou marcado por movimentos gravitacionais de massa generalizados ao longo das encostas da Serra da Prata, litoral paranaense, e na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Em 11 de março de 2011 diversos municípios da região costeira do Estado do Paraná sofreram com inúmeros escorregamentos de encostas e inundações, ocasionado uma série de danos significativos (AMORIM et al., 2020). Dois meses antes, entre os dias 11 de janeiro e 12 de janeiro de 2011, a Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro foi atingida por um dos maiores eventos perigosos do Brasil, causando a morte de 947 pessoas e desabrigando mais de cinquenta mil moradores locais, sendo o reflexo do colapso simultâneo de diversas vertentes (DOURADO; ARRAES; SILVA, 2012).

Este cenário não é exclusivo do Brasil, nos últimos 50 anos diversos países estão sendo atingidos por eventos perigosos que geram desastres e catástrofes, independente do grau de desenvolvimento econômico destas nações. Estes eventos são o reflexo das interações entre as condições naturais e antropogênicas, bem como dos deflagradores envolvidos, correspondendo a diferentes magnitudes e frequências temporais (ZUQUETTE, 2018).

Desta forma, a execução de estudos técnicos e científicos de predictabilidade para eventos perigosos passam a exercer um importante papel no meio acadêmico e profissional, refletindo na sociedade. Segundo Tominaga (2007), a elaboração de um prognóstico de escorregamentos e riscos irá fornecer subsídios técnicos para a elaboração de um planejamento territorial adequado, zoneamentos, planos diretores, manejo, dentre outros aspectos relevantes na gestão ambiental e urbana.

Contudo, a produção de trabalhos científicos e técnicos nesta temática deve acompanhar posteriormente avaliações de desempenho para os modelos preditivos empregados, assegurando e elevando a performance dos estudos de predictabilidade. Segundo Huang e Kao (2006), além da comparação dos mapas de susceptibilidade para escorregamentos com o mapeamento dos deslizamentos reais, a criação de um indicador ou fórmula para cálculo da eficiência de um modelo preditivo é essencial.

Neste contexto, a partir de equações desenvolvidas por Guimarães et al. (2003) e Huang e Kao (2006), foi elaborada uma nova equação para definição do grau de acerto de estudos de predictabilidade, possibilitando, inclusive, a aplicação desta fórmula para qualquer tipo de modelo preditivo adotado.

Deste modo, procurando avaliar e demonstrar a aplicabilidade desta nova equação, a presente pesquisa irá analisar o desempenho de dois relatórios técnicos distintos de predictabilidade para movimentos gravitacionais de massa, ambos elaborados previamente aos eventos de 2011. A finalidade é calcular o grau de acerto de cada um destes estudos e posteriormente discutir a temática, buscando uma contribuição científica para a evolução de novos trabalhos.

O primeiro estudo técnico avaliado foi o de mapeamento e caracterização dos atributos do meio físico no Parque Nacional Saint Hilaire Lange, desenvolvido pela MINEROPAR e IBAMA (2005). O principal produto gerado neste relatório foi um mapa de susceptibilidade para movimentos de massa, contemplando toda a extensão do parque atingida no evento de 11 de março de 2011 na Serra da Prata.

O segundo estudo técnico analisado, em um contexto diferente, corresponde ao Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) de Nova Friburgo, Rio de Janeiro, realizado pela CPRM e PMNF (2007). Esta cooperação entre as duas instituições teve como objetivo mapear e classificar as áreas de dez assentamentos urbanos precários do município, proporcionando ao poder público informações e dados técnicos para o gerenciamento e mitigação dos riscos relacionados aos escorregamentos de encostas, e solapamentos de margens de córregos nestes locais vulneráveis.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os movimentos gravitacionais de massa são eventos naturais que atingem vertentes em todo o mundo, gerando riscos para as populações que habitam encostas e seu entorno. Em razão de diversos problemas socioeconômicos, principalmente em países emergentes, a ocupação destas áreas de risco constitui um cenário recorrente. Neste contexto, a geração de modelos preditivos para escorregamentos se tornou comum, utilizando distintas técnicas e métodos de aplicação. Por consequência, a avaliação do desempenho ou performance destes modelos preditivos é essencial para a evolução de estudos de predictabilidade para escorregamentos, contribuindo para o aumento de sua efetividade. Desta forma, o desenvolvimento de uma nova equação de fácil aplicabilidade para o cálculo do grau de acerto de trabalhos acadêmicos ou técnicos, independente do modelo preditivo adotado e utilizando para isso de um *software* livre, constitui-se como algo vantajoso para pesquisadores, profissionais e sociedade em geral.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é calcular o grau de acerto de estudos de predictabilidade, tais como relatórios técnicos de susceptibilidade para a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, e estudos de classificação de riscos associados a escorregamentos de encostas.

1.2.2 Objetivo específico

- a) Discutir a temática com base nas avaliações efetuadas durante a elaboração da pesquisa.

1.3 APRESENTAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em cinco seções: introdutória com apresentação do problema, justificativa e objetivos; revisão bibliográfica; metodologia utilizada para o cálculo do grau de acerto; apresentação dos resultados através de dois artigos distintos; e a última referente as considerações finais.

Ressalta-se que cada artigo corresponde a uma área distinta. O artigo 1 irá analisar um estudo de susceptibilidade para movimentos de massa efetuado no ano de 2005 no Estado do Paraná. O artigo 2 se refere a avaliação do plano municipal de redução de riscos de Nova Friburgo/RJ, elaborado no ano de 2007. Ambos são estudos de predictabilidade para ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, porém em contextos diferentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Segundo Zuquette (2018), uma fração considerável dos trabalhos técnicos ou científicos sobre predictabilidade de eventos perigosos, ou ainda no segmento de riscos, utilizam inadequadamente alguns termos da área. Resultando em diversas distorções e interpretações errôneas dentro da temática.

Varnes (1984) foi um dos primeiros autores a identificar e relatar estas divergências conceituais. Ele citava a existência de muitas publicações de distintos autores com diferentes significados para termos como perigo, risco e vulnerabilidade.

Ainda que ao longo dos anos uma significativa produção de trabalhos acerca de riscos geológicos esteja sendo realizada, a existência de controvérsias conceituais persiste (TOMINAGA, 2007).

Portanto, pretendendo situar o leitor e corroborar para o melhor entendimento desta pesquisa, serão descritos a seguir os principais termos técnicos utilizados nos dois relatórios avaliados, MINEROPAR e IBAMA (2005) e CPRM e PMNF (2007), bem como aplicados no desenvolvimento dos dois artigos científicos subsequentes.

2.1.1 Evento

Atualmente, de acordo com Zuquette (2018), evento pode ser conceituado como o acontecimento de uma ação, fenômeno ou fato em um local e período específico. Existindo ainda uma divisão quanto a sua origem, podendo ser natural, quasi-natural, natural-tecnológico ou antrópica.

O evento de origem natural corresponde a um período de duração curto ou longo, decorrente de aspectos geológicos, biológicos, atmosféricos, dentre outros. Refletindo em impactos pontuais até regionais. Ao contrário, o evento provocado exclusivamente pelas ações antrópicas é classificado como antropogênico. E ainda, o de origem quasi-natural, está associado aos fatores ambientais, porém amplificado ou desencadeado em razão da ação do homem. Por fim, o evento originado por intermédio de passivos ambientais, ocasionando diversos prejuízos e danos econômicos na sociedade e no meio ambiente, pode ser nomeado e classificado como natural-tecnológico (ZUQUETTE, 2018).

2.1.1.1 Evento perigoso (*hazard*)

Conforme Zuquette (2018), a partir do momento que existe a probabilidade de ocorrência de um evento, fenômeno ou atividade humana de intensidade representativa em um espaço e período determinado, podendo acarretar danos aos elementos do meio físico, constitui-se um evento perigoso, chamado na língua inglesa de *hazard*. Todo o evento perigoso está associado a um ou mais agentes deflagradores, existindo uma característica intrínseca, intensidade e incertezas. Ele ainda se relaciona com as alterações ambientais, modificações de natureza antrópica, natural ou temporal.

Nota-se que a definição utilizada por Zuquette (2018), está baseada na conceituação de eventos perigosos da ONU (2004), uma das definições mais difundidas no meio. Logo, pode-se definir *hazard* como um evento físico, fenômeno ou atividade antrópica potencialmente danoso, dimensionado em razão de sua localização, intensidade, frequência e probabilidade. Um evento perigoso é capaz de provocar muitos impactos negativos no elemento atingido, podendo refletir uma ameaça futura em decorrência de um cenário crítico atual. Ele ainda pode ter diferentes origens, como natural ou antropogênica, e inclusive combiná-las (Organização das Nações Unidas (ONU), 2004).

Desta forma, corroborando com Zuquette (2018) e ONU (2004), segundo Marandola Jr. e Hogan (2004), o termo *hazard* não pode ser associado exclusivamente aos aspectos e fenômenos naturais, ele essencialmente deve ser aplicado na interface sociedade-natureza. Para o emprego correto do termo algumas subdivisões foram criadas de acordo com a respectiva origem do evento, por exemplo: *natural hazards*, *social hazards* e *technological hazards*.

2.1.2 Perigo

De acordo com Marandola Jr. e Hogan (2004), os problemas de interpretação e aplicação dos termos risco, perigo e *hazard* estão associados, em muitos casos, as diferentes línguas e traduções destas palavras quando aplicadas. A situação é complexa, e segundo os autores o entendimento irá variar conforme a perspectiva geográfica e a forma de ocupação de cada sociedade no seu espaço territorial.

Em razão disso, a definição de perigo mais adequada para a realidade desta pesquisa, refere-se ao entendimento atual e moderno de Zuquette (2018). No qual, o autor define perigo como um evento ocorrido ou potencial, de atribuição natural, descrito em termos de geometria e mecanismo, não existindo o conhecimento prévio do momento de seu acontecimento.

2.1.3 Desastre

ONU (2004) define desastre como uma grave ruptura no funcionamento de uma sociedade ou comunidade, envolvendo grandes perdas e impactos aos aspectos humanos, materiais, econômicos ou ambientais, excedendo a capacidade da comunidade afetada em lidar com a situação utilizando apenas seus próprios recursos. O desastre está associado com risco, sendo o resultado da combinação do perigo e vulnerabilidade do elemento atingido.

Um ponto chave para o entendimento do termo desastre e da sua magnitude correspondente, passa pela explicação dos autores Romero e Markrey (1993), em que eles desassociam a ocorrência de um fenômeno natural com a posterior geração de um desastre. Conforme Romero e Markrey (1993), não são todos os eventos naturais que irão causar danos ou afetar a integridade do homem. Um desastre deve estar interligado ao elemento e modo com que ele será afetado.

2.1.4 Vulnerabilidade

De acordo com Varnes (1984), um dos primeiros autores a conceituar vulnerabilidade, ela pode ser estabelecida ao medir o grau de perda para um determinado elemento em razão da ocorrência de um fenômeno natural e de sua magnitude, sendo expressa por intermédio de uma escada de 0 a 1, em que retrata desde a ausência de danos até a perda total.

No entanto, com o passar dos anos o termo passou a compreender uma definição mais elaborada e ampla. ONU (2004), conceitua vulnerabilidade como uma soma de processos físicos, sociais, econômicos e ambientais que irá resultar na capacidade de um elemento sofrer, resistir e reagir frente à ação ou efeito de um evento perigoso.

2.1.5 Susceptibilidade

Girão, Rabelo e Zanella (2018) interpretam susceptibilidade como a probabilidade de um fenômeno específico ocorrer, em que as características intrínsecas do meio podem tornar o ambiente mais ou menos vulnerável. Os autores também desvinculam a relação direta entre a susceptibilidade e as ações antrópicas, mas alertam que a sociedade pode modificar as condições naturais de determinado local, acelerando ou retardando a dinâmica própria do meio físico.

O termo susceptibilidade para Zuquette (2018), reflete a combinação de ao menos três aspectos: resistência, exposição e resiliência. Podendo condicionar a execução de um zoneamento devido à possível ocorrência de eventos naturais, quasi-naturais e natural-tecnológicos. Da mesma forma, o autor segue a interpretação de Girão, Rabelo e Zanella (2018), em que acreditam que a susceptibilidade é uma parte da análise de vulnerabilidade.

Tominaga (2007) associa as análises de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa, no contexto geológico, geomorfológico e geotécnico, aos estudos de previsibilidade de escorregamentos em áreas instáveis.

Segundo Corominas e Mavrouli (2011), uma avaliação de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa pode ser considerada uma etapa inicial de um estudo de risco, ou ainda, um produto a ser respeitado na definição do uso e ocupação do solo, bem como nas análises de impacto ambiental. Contudo, trazendo e aplicando a compreensão do termo para o cenário da presente pesquisa. Os autores também descrevem que um mapa de susceptibilidade a escorregamentos deve conter uma subdivisão da área em zonas, retratando as diferentes probabilidades de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa. Além de incorporarem informações a respeito do tipo de movimento gravitacional de massa que pode ocorrer, volume esperado e frequência.

2.1.6 Risco

Segundo De Castro, Peixoto e De Rio (2005), em uma definição genérica e ampla, risco está associado à probabilidade de ocorrência de processos variados e indeterminados ao longo de um período e espaço, e condiz também com a forma que os seres humanos reagem a estes processos.

Jones e Boer (2004) relatam a dificuldade em definir na prática o termo risco, justamente em decorrência das complexas relações com todos os seus componentes. Porém, os autores acabam por estabelecer um conceito simples e objetivo, em que definem risco como a combinação entre a possibilidade de ocorrer e consequência de um evento adverso.

ONU (2004), especifica que risco é a probabilidade de consequências adversas decorrentes das interações entre eventos naturais, ações antrópicas e as condições de vulnerabilidade. Risco também pode ser traduzido pela multiplicação entre perigos e vulnerabilidade.

Por fim, em uma análise de risco deve ser contemplado as estimativas de custos e danos resultantes da probabilidade de ocorrência de possíveis eventos perigosos, sendo avaliado a magnitude do prejuízo em razão da área e tempo. Deste modo, a avaliação de risco se configura como o mais sofisticado nível de prognóstico de *hazard* (DEYLE et al., 1998).

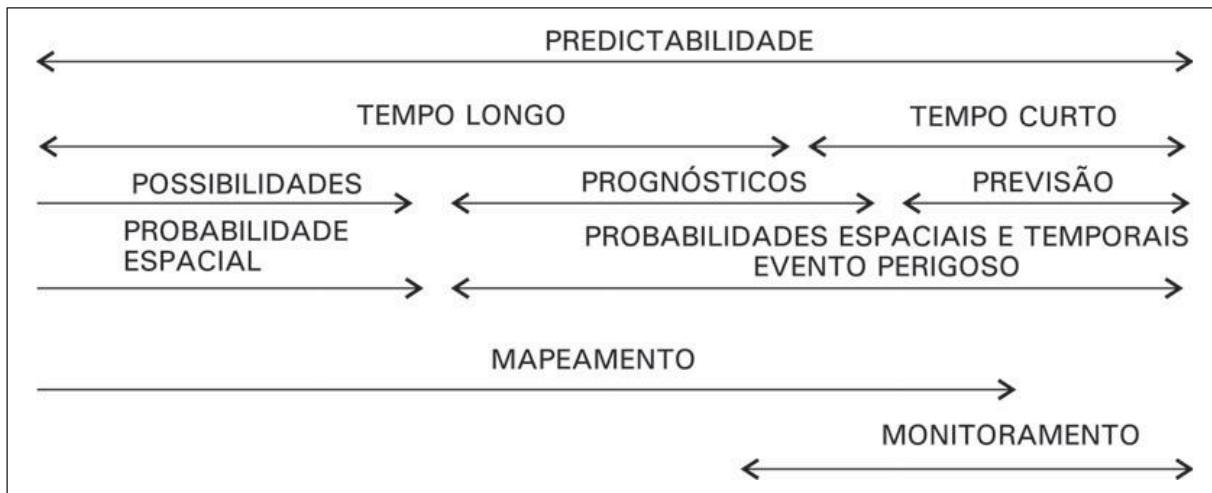
2.2 ESTUDOS DE PREDICTABILIDADE PARA ESCORREGAMENTOS E SUA APLICAÇÃO NO PLANEJAMENTO TERRITORIAL

Segundo Zuquette (2018), a predictabilidade de eventos perigosos de fontes naturais ou quasi-naturais, esta última decorrente da interferência antrópica no meio físico, envolve uma série de aspectos complexos que variam desde a qualidade do dado utilizado, emprego de um modelo teórico-conceitual, além da qualificação e conhecimento dos profissionais envolvidos.

Conforme pode ser observado na figura 1 de Zuquette (2018), o estudo de predictabilidade pode ser direcionado para um tempo longo ou curto, contemplando proporções e abordagens distintas dos aspectos envolvidos, como: possibilidades, prognósticos, previsão, probabilidade especial e temporal, evento perigoso, mapeamento e monitoramento.

Desta forma, o tema impõe um grande desafio para os governos e instituições em todo o mundo, que buscam através de inúmeros estudos métodos para avaliar o risco e potenciais danos de um evento perigoso. Configurando-se, desta forma, em diversos problemas de planejamento territorial e formulação de políticas públicas para países em desenvolvimento e sociedades industrializadas (GUZZETTI et al., 1999).

FIGURA 1 – RELAÇÕES ENTRE AS CONDIÇÕES PARA A PREDICTABILIDADE E OS ASPECTOS TEMPORAIS



FONTE: ZUQUETTE (2018).

Em decorrência disso, as avaliações de risco para eventos perigosos se apresentam como soluções capazes de contemplar um cenário multidimensional composto por áreas como: geomorfologia, geologia, engenharia, estatística, física, ciência da computação, tecnologia da informação e economia (GUZZETTI et al., 1999).

Da mesma forma, a implementação de uma política pública eficiente para minimização de riscos e prevenção de escorregamentos em encostas deve ser viabilizada, principalmente, em assentamentos urbanos precários. Ela deve contemplar, igualmente, ações municipais de habitação e saneamento por intermédio da gestão e planejamento urbano (CARVALHO; GALVÃO, 2006).

Destaca-se que a obrigatoriedade do poder público federal, estadual e municipal em gerenciar e mitigar os riscos associados aos escorregamentos em encostas se tornou dever após a instituição da política nacional de proteção e defesa civil por intermédio da Lei Federal nº 12608 (Brasil, 2012).

Por fim, a identificação e mapeamento das áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa por intermédio de estudos de predictabilidade, concretiza-se como um instrumento fundamental para o planejamento urbano e prevenção de eventos desastrosos em órgãos de defesa civil. Estes instrumentos permitem elaborar mapas de risco, criar zoneamentos e gerenciar medidas mitigatórias (NUNES et al., 2016).

2.3 MODELOS PREDITIVOS PARA ESCORREGAMENTO DE ENCOSTAS

A definição de medidas mitigatórias para os riscos associados aos escorregamentos de encostas é uma necessidade das sociedades atuais e futuras. Deste modo, os modelos preditivos para movimentos gravitacionais de massa são um importante recurso para definição de áreas predispostas a deslizamentos rasos, facilitando o emprego de ações preventivas (MORESI et al., 2020).

Os modelos preditivos são diversificados e apresentam suas próprias vantagens e desvantagens, gerando como seus produtos mapas de profundidade do lençol freático e mapas de susceptibilidade a escorregamentos. Eles são encontrados na forma de *softwares* comerciais ou como módulos de extensão (complementos) de *softwares* CAD (projeto/desenho assistido por computador) ou SIG (MORESI et al. 2020).

Segundo Bonetti e Woodroffe (2017), ao longo dos anos com o avanço tecnológico diversos modelos preditivos para movimentos gravitacionais de massa estão sendo discutidos e desenvolvidos. No entanto, existe um ponto em comum em grande parte deles, a utilização de sistemas de informações geográficas (SIG) como ferramentas base para aquisição de informações, processamento e análises de dados com qualidade.

Para os autores Othman, Mohd e Noraini (2012), a utilização de SIG na predição e mapeamento de zonas de risco para escorregamentos se torna uma poderosa ferramenta na tomada de decisões para ações mitigatórias de risco.

A utilização de modelos preditivos para deslizamentos rasos de encostas baseados em ferramentas de SIG ultrapassa os limites acadêmicos, contemplando o mercado profissional e se expandido para o emprego de análise espacial em áreas maiores (AN et al., 2018).

Neste contexto, o QGIS é um *software* SIG de código aberto amplamente difundido e muito eficiente, possibilitando a geração de diversos mapas e projeções de camadas variadas. O QGIS permite a incorporação de arquivos raster em combinação com os tradicionais arquivos vetoriais (ponto, linha e polígono), abrindo uma ampla gama de análises (AN et al., 2018).

Segundo Barredo et al., (2000) existem três abordagens principais utilizadas em modelos preditivos para avaliação de eventos perigosos que podem desencadear escorregamentos: determinística, estatística ou heurística.

A abordagem determinística, aplicável para escalas de 1:2000 a 1:10000, utiliza como referência modelos de estabilidade. Ela possibilita resultados mais detalhados e traduz o risco em valores absolutos através do cálculo dos fatores de segurança, bem como analisando com relevância as condições hidrológicas. Os modelos determinísticos trabalham interligando a hidrologia, geomorfologia e geotécnica em distintos graus de complexidade, objetivando a compreensão e antecipação dos eventos de ruptura das encostas com indicação da localização e tempo de ocorrência. Entretanto, neste tipo de abordagem a qualidade e o detalhamento dos dados geotécnicos e hidrogeológicos são fundamentais, caso contrário, podem ocasionar uma atenuação do cenário (BARREDO et al., 2000; FORMETTA et al., 2014; VAN WESTEN, 2000).

Segundo Listo (2016) os principais modelos determinísticos ou também chamados de matemáticos são: SHALSTAB (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994), SINMAP (PACK; TARBOTON; GOODWIN, 1998), e TRIGRS (IVERSON, 2000; BAUM; SAVAGE; GODT, 2002). Estes modelos aplicam essencialmente equações de estabilidade para vertentes, considerando dados detalhadas do meio físico com base nos princípios da mecânica dos solos.

Igualmente definidos como de base física em decorrência de utilizarem como princípio as leis de conservação de massa, energia ou *momentum*, os modelos determinísticos têm como característica a determinação dos seus parâmetros de entrada com base em atividades de campo ou por intermédio de análises de laboratório (DE ROO, 1993).

Em relação a análise fundamentada a partir de um modelo estatístico de instabilidade de encostas, deve-se inicialmente tomar conhecimento que ela passa pelo princípio de que os fatores que geraram a ruptura de taludes de uma determinada região serão os mesmos que irão gerar novos escorregamentos (GUZZETTI et al., 1999).

Deste modo, na avaliação estatística o histórico de movimentos gravitacionais de massa é relevante, cada deslizamento é analisado separadamente para a construção de previsões em locais ainda sem registros de escorregamentos. Contudo, uma grande quantidade de dados deve ser empregada para uma maior confiabilidade dos resultados. Assim, o uso desta técnica é pouco indicado em razão de possíveis casos de generalização do contexto, sendo mais adequada para escalas médias de 1:25000 a 1:50000 (BARREDO et al., 2000; VAN WESTEN, 2000).

Diferentemente do exposto até o momento, a análise heurística é embasada na opinião e avaliação de especialistas, geralmente se utilizando de métodos de mapeamento diretos ou indiretos para a avaliação dos fatores geradores de instabilidades, e definição da susceptibilidade para ocorrência de escorregamentos ao longo das encostas. Ela é adequada para pesquisas regionais com escalas na ordem de 1:100000 a 1:250000, e requer grande conhecimento técnico dos profissionais envolvidos (BARREDO et al., 2000; NUNES et al., 2016; VAN WESTEN, 2000).

No mapeamento direto a caracterização da área é realizada por intermédio de atividades de campo e fotointerpretação com base em um mapa geomorfológico de detalhe, possibilitando como vantagem a avaliação individual de cada polígono delineado no mapa. Entretanto, uma avaliação direta exige um maior período para elaboração e avançada experiência do profissional (BARREDO et al., 2000).

A abordagem heurística indireta é definida pelo agrupamento de dados, combinando diversos parâmetros qualitativos. O profissional executor atribui valores de ponderação para cada parâmetro analisado, reunindo todas as camadas em um SIG para geração dos valores de risco (BARREDO et al., 2000).

2.4 MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DE MODELOS PREDITIVOS

Para Huang e Kao (2006), independente da abordagem determinística ou não determinística (estatística e heurística) dos modelos preditivos, eles se desenvolvem utilizando distintos métodos com o propósito de gerar mapas de susceptibilidade a escorregamentos no contexto de avaliação do grau de risco de determinado local ou região (por exemplo: GUIMARÃES et al., 2009; AN et al., 2018; NAM; WANG, 2019; MORESI et al., 2020; MITRA; GHOSH, 2021).

Contudo, previamente a apresentação dos métodos utilizados para medição dos resultados de modelos preditivos, deve-se ter ciência que o termo empregado nestes estudos avaliativos aceita diversas nomenclaturas de acordo com a preferência dos respectivos autores.

Huang e Kao (2006) se referem a este processo de avaliação como *degree of performance*, *performance* ou *efficiency*. Guimarães et al. (2009) utilizaram a expressão análise de desempenho, que pode ser medida através do cálculo do grau de acerto para o respectivo modelo de predição utilizado. Outros autores, como Othman, Mohd e Noraini (2014) adotaram a palavra *accuracy* em suas análises.

Independentemente da nomenclatura utilizada, avaliar ou medir a performance destes modelos preditivos é essencial para a validação e/ou calibração do modelo aplicado. Dentre os métodos utilizados para avaliação do desempenho de um modelo preditivo, o processo de comparação entre os mapas gerados a partir de um modelo com o cenário real após a ocorrência dos deslizamentos é parte comum e fundamental neste meio para a garantia da eficiência do modelo adotado (HUANG; KAO, 2006).

Da mesma forma, conforme pode ser observado nos trabalhos de Guimarães et al. (2003) e Lee (2005), o processo de avaliação de um modelo preditivo passa pela comparação entre as áreas definidas como mais ou menos estáveis, com as cicatrizes dos escorregamentos geradas em consequência de eventos posteriores.

Embora o ponto central do estudo de Guimarães et al. (2003) seja o desafio da parametrização das propriedades do solo nos modelos preditivos em razão das limitações de medições de campo ou de representatividade das amostras, os autores promoveram igualmente a comparação das cicatrizes dos escorregamentos com os resultados dos modelos de predição gerados previamente aos eventos, buscando assim facilitar e melhorar a avaliação da *performance* dos modelos aplicados.

Guimarães et al., (2003) definiram um índice de ajuste de modelo (FI) para a análise do desempenho dos modelos avaliados no estudo, utilizando-se da proporcionalidade de área. Este índice foi obtido através da razão entre o número de *pixels* que ocorrem tanto em uma cicatriz de escorregamento quanto nas áreas definidas pelo modelo como potencialmente instáveis (PMS), pelo número total de *pixels* que ocorrem dentro da área das cicatrizes dos deslizamentos (PS). Logo, pode-se escrever a equação (1) da seguinte maneira:

$$FI = \frac{PMS}{PS} \quad (1)$$

Outro método denominado *sucess rate* (ST), no qual se utiliza do princípio da comparação das predições de um modelo com o cenário após ocorrência de um evento foi aplicado por Huang e Kao (2006). Este método teve como origem os estudos de Montgomery e Dietrich (1994), e desde então está sendo utilizado e adaptado de acordo com a perspectiva de cada autor (por exemplo: LEE, 2005).

Huang e Kao (2006) efetuaram inicialmente o cálculo desta taxa de sucesso pela razão do número de locais com escorregamentos previstos com sucesso, pelo número total dos deslizamentos reais, podendo ser expressa pela equação (2):

$$SR = \frac{\text{number of sucessfully predicted landslides}}{\text{total number of actual landslides}} \quad (2)$$

No entanto, segundo Huang e Kao (2006), este método não contempla a análise de sucesso dos locais definidos pelos modelos preditivos como estáveis, considerando apenas a análise das regiões instáveis. Deste modo, objetivando corrigir este erro através da aplicação do *coefficient kappa* (Cohen, 1960), um método de análise estatística, os autores realizaram algumas modificações na fórmula para cálculo da *success rate* (SR), acrescentando alguns índices de correções e passando a utilizar células (uma grade de divisão dos mapas resultantes dos modelos preditivos de 20 x 20 metros) em suas análises de desempenho. Com base nisso, a SR foi modificada e definida como *modified success rate* (MSR), conforme pode ser observada na equação (3) a seguir:

$$MSR = 0.5 \times SR + 0.5 \times \frac{\text{sucessfully predicted stable cells}}{\text{total number of actual stable cells}} \quad (3)$$

Existem ainda diversos outros métodos de avaliação do desempenho de um modelo preditivo que são elaborados por distintos autores ou grupo de pesquisadores (por exemplo: OTHMAN, NAIM; NORAINI, 2012; METEN; PRAKASHBHANDARY; YATABE, 2015; NAM; WANG, 2019; ASHOURNEJAD et al., 2019; ZHAO, S.; ZHAO, Z., 2021), cada um apresentando suas próprias características, fórmulas e parâmetros.

Entretanto, os métodos desenvolvidos por Guimarães et al. (2003) e Huang e Kao (2006) se apresentaram mais adequados e com maior aplicabilidade para reprodução nos estudos analisados nesta presente dissertação (MINEROPAR e IBAMA, 2005; CPRM e PMNF, 2007). Isto, em razão, principalmente, de que estes trabalhos técnicos sob avaliação não possuem muitas especificações dos dados, parâmetros e detalhes a respeito dos modelos preditivos utilizados, inviabilizando a análise de desempenho por intermédio de métodos compostos por equações com elevados números de índices ou variáveis.

2.5 ESTUDOS ANALISADOS PARA O CÁLCULO DO GRAU DE ACERTO

O desenvolvimento desta pesquisa compreendeu a análise de dois estudos técnicos de predictabilidade para movimentos gravitacionais de massa distintos, foram eles: mapeamento dos atributos do meio físico do PNSHL, elaborado pela MINEROPAR e IBAMA (2005), e o plano municipal de redução de riscos de Nova Friburgo, Rio de Janeiro, executado pela CPRM e PMNF (2007).

O principal produto gerado pela MINEROPAR e IBAMA (2005) foi o mapa de susceptibilidade para movimentos gravitacionais de massa do PNSHL (figura 2). O desenvolvimento deste mapa foi realizado por intermédio de uma série de atividades de campo para mapeamento e caracterização dos elementos do meio físico do parque, além da análise de cartas geológicas e topográficas da região, bem como fotografias aéreas em escala 1:25.000 (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

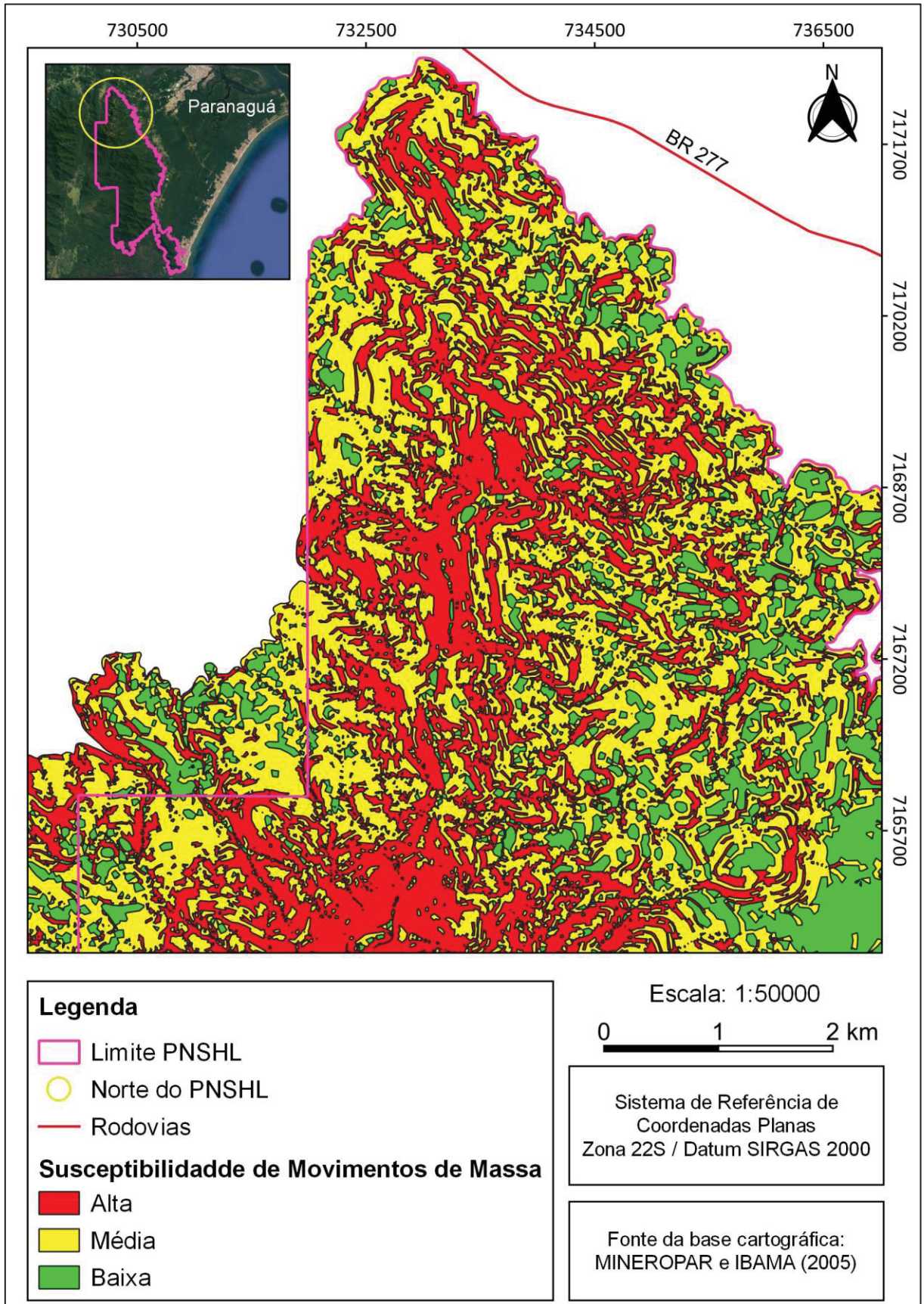
Posteriormente, os dados obtidos foram processados nos *softwares* Arcview 3.2, Surfer 8 e Autocad Map 2000, viabilizando a geração de diversos mapas temáticos referentes aos seguintes atributos do meio físico do PNSHL: geologia, geotecnia, geomorfologia, coberturas inconsolidadas (solos) e declividade (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

Dentre os atributos do meio físico mapeados e avaliados, os autores definiram as unidades e feições geomorfológicas, os tipos de solo, e a declividade da encosta como os mais relevantes para o estabelecimento da respectiva classe de susceptibilidade de cada local mapeado do parque (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

Deste modo, analisando e sobrepondo os diferentes mapas temáticos da área, os autores elaboraram o mapa de susceptibilidade para movimentos de massa, alvo da análise de desempenho nesta pesquisa através do cálculo do grau de acerto. Segundo MINEROPAR e IBAMA (2005), o mapa retrata a probabilidade da ocorrência de escorregamentos e queda de blocos ao longo dos limites do parque, sendo dividido em três classes distintas de susceptibilidade: alta, média e baixa.

Em CPRM e PMNF (2007) o contexto encontrado para a elaboração do plano municipal de redução de riscos de Nova Friburgo/RJ foi diferente. Neste cenário, o estudo efetuado consistiu em uma avaliação de risco para escorregamentos em encostas, e solapamentos de margens de córregos nos assentamentos urbanos precários do município.

FIGURA 2 – MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE PARA MOVIMENTOS DE MASSA DA REGIÃO NORTE DO PARQUE NACIONAL SAINT HILAIRE LANGE



FONTE: Adaptada de MINEROPAR e IBAMA (2005).

O plano municipal de redução de riscos de Nova Friburgo/RJ foi desenvolvido a partir de dados levantados, inicialmente, pela Coordenadoria Municipal de Defesa Civil de Nova Friburgo/RJ (COMDEC) em 2003. Deste modo, CPRM e PMNF (2007) avançaram no prognóstico de riscos associados a escorregamentos de encostas nestas comunidades fortemente urbanizadas do município, gerando um mapa final de setorização de riscos para cada assentamento urbano precário mapeado e analisado.

Os principais aspectos avaliados pela CPRM e PMNF (2007) para a elaboração do estudo partiram das premissas estabelecidas pela *United Nations Disaster Relief Office* (UNDRO, 1991), em que se deve inicialmente conhecer os problemas existentes, identificar e analisar os possíveis riscos, planejar e promover ações mitigatórias, monitor frequentemente as áreas sob avaliação, e compartilhar as informações obtidas através de capacitações para os habitantes locais.

Para isso, CPRM e PMNF (2007) utilizaram como conceito base para a definição de risco a terminologia adotada por Carvalho e Galvão (2006), em que os autores conceituaram risco através da equação (4):

$$R = P \left(\int A \right) \times C \left(\int V \right) \times g^{-1} \quad (4)$$

onde:

R = risco

P = probabilidade

A = perigo ou ameaça

C = consequências

V = vulnerabilidade

g = grau de gerenciamento

Partindo deste conceito, os assentamentos urbanos precários foram reavaliados através do levantamento de dados sobre o meio físico de cada local. Neste novo levantamento realizado foram utilizadas fotografias aéreas, imagens de satélite, bem como inventariados os movimentos gravitacionais de massa ocorridos até o ano de 2007. Todos estes dados interpretados foram agrupados em um SIG, possibilitando a definição dos locais de cada assentamento para uma abordagem mais precisa em campo (CPRM; PMNF, 2007).

Posteriormente, os autores aplicaram alguns modelos de instabilidade para as encostas, finalizando a análise e geoprocessamento dos dados. Deste modo, os assentamentos urbanos precários foram divididos e classificados em quatro setores de risco distintos (figura 3): risco baixo (R1), risco médio (R2), risco alto (R3) e risco muito alto (R4), (CPRM; PMNF, 2007). Contudo, ressalta-se que os autores não citaram com maior detalhe a origem e escala das fotografias aéreas ou imagens de satélite utilizadas, assim como não existem informações sobre os modelos de instabilidade aplicados no decorrer do desenvolvimento do estudo.

Isto posto, a atribuição e classificação dos setores de risco considerou principalmente as condicionantes geológicas, geotécnicas, pedológicas, e o nível de intervenção antrópica no setor. Da mesma forma, em uma fase final do plano municipal de redução de riscos de Nova Friburgo/RJ, os autores elaboraram e sugeriram uma série de intervenções estruturais para cada assentamento urbano precário, valorando cada obra (CPRM; PMNF, 2007).

Subsequentemente, após análise de cada estudo de predictabilidade, identificou-se que MINEROPAR e IBAMA (2005) empregaram uma análise heurística para formulação de seus respectivos modelos preditivos para escorregamentos ao longo das encostas do PNSHL. Enquanto CPRM e PMNF (2007) efetuaram uma abordagem determinística através da aplicação de modelos de instabilidade para os assentamentos urbanos precários.

Nota-se que esta distinção de métodos atende as premissas estabelecidas por Van Westen (2000), em que o autor atribui uma relação de escala para cada tipo de abordagem. O PNSHL compreende uma área superior a 24 mil hectares, direcionando o estudo da MINEROPAR e IBAMA (2005) para a aplicação de modelos preditivos heurísticos que devem ser preferencialmente empregados em grandes escalas. No caso do PMRR de Nova Friburgo/RJ, os assentamentos urbanos precários são áreas pequenas, com confecção dos mapas de setorização dos riscos em escalas de 1:1500, adequando-se corretamente para modelos preditivos determinísticos.

Entretanto, foi observado igualmente a influência da opinião de especialistas no processo final de setorização das áreas de risco nos assentamentos urbanos precários. Os profissionais envolvidos elaboraram fichas de campo para levantamento de diversos aspectos como: presença de resíduos sólidos nas encostas, distanciamento das residências, trincas nas moradias, inclinação de árvores, postes ou muros, vazamentos de canos, existência de tanques sépticos, dentre outros itens.

Este procedimento adotado indica que os autores do PMRR de Nova Friburgo/RJ (CPRM e PMNF, 2007), realizaram um trabalho minucioso de caracterização do local, promovendo ponderações e incluindo outras variáveis de identificação *in situ*, para posterior análise e definição dos setores de risco em seus mapeamentos.

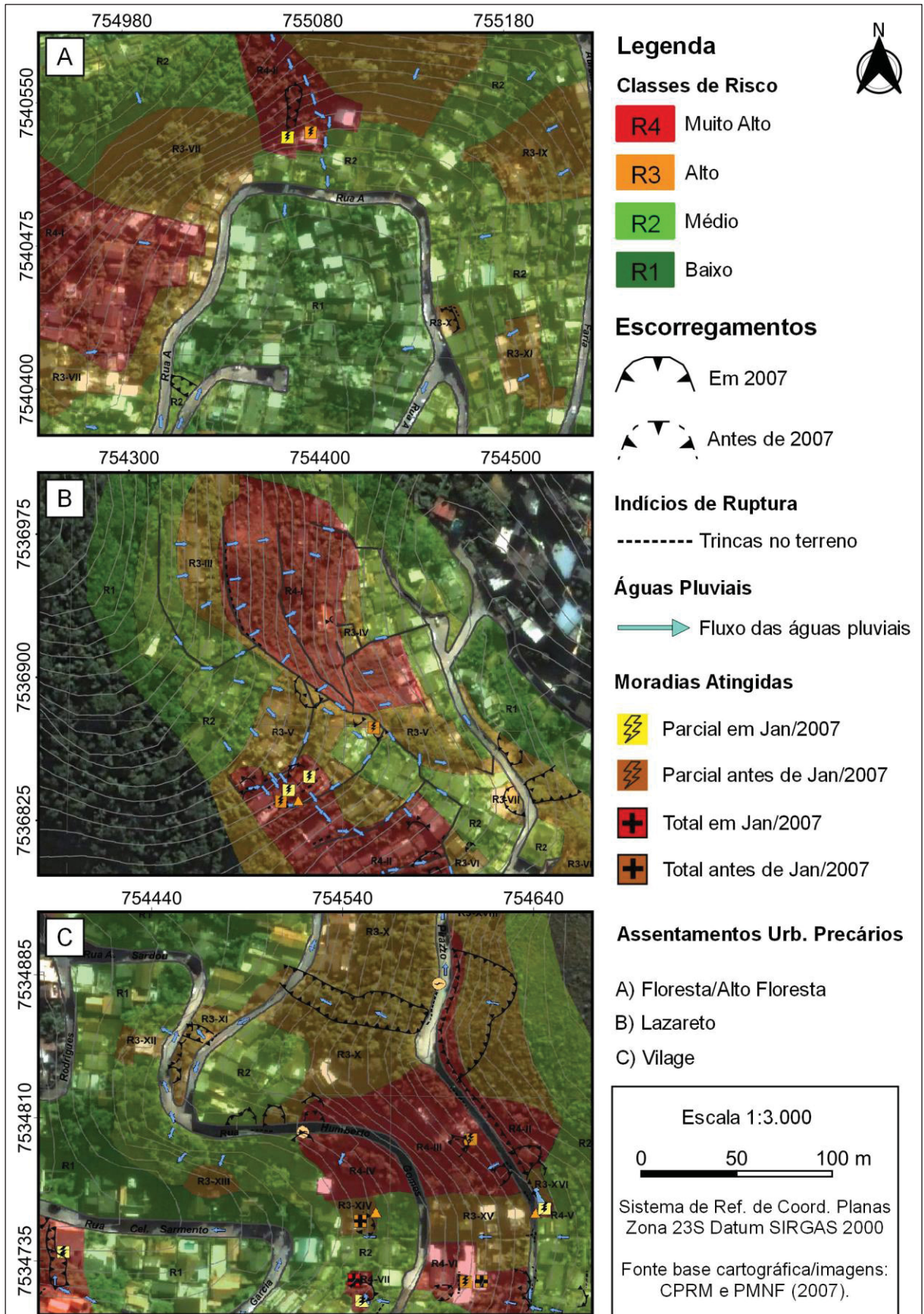
Em razão disso, segundo Barredo et al. (2000) e Nunes et al. (2016) que definem uma análise heurística como uma avaliação centrada pela opinião de profissionais especialistas a partir de dados técnicos obtidos de forma direta ou indireta, pode-se estabelecer que estas ações detalhadas de campo efetuadas pela CPRM e PMNF (2007) se configuraram como elementos de abordagem heurística.

Em resumo, ambos autores (MINEROPAR e IBAMA, 2005; CPRM e PMNF, 2007) utilizaram essencialmente técnicas diretas de obtenção de dados através de diversas atividades de campo, interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélite, além da análise de mapas temáticos de cada região para caracterização do ambiente físico sob estudo. Agrupando e processando posteriormente todas essas informações em sistemas de informações geográficas para cruzamento e classificação de cada local.

Contudo, MINEROPAR e IBAMA (2005) se basearam essencialmente na opinião de profissionais para estabelecer a respectiva classe de susceptibilidade de cada local do PNSHL, sem mencionar algum sistema de pontuações ou critérios claros para definição das respectivas zonas de maior ou menor susceptibilidade. Revelando, contudo, os atributos do meio físico mais relevantes em suas ponderações.

No caso do estudo promovido pela CPMR e PMNF (2007), os autores utilizaram em conjunto dois tipos diferentes de modelos preditivos: determinístico e heurístico. Eles partiram, inicialmente, da conceituação de risco de Carvalho e Galvão (2006) expressa pela equação 3, aplicando em seguida modelos de instabilidade não detalhados para as encostas. Por fim, sob influência do julgamento de especialistas para diversos aspectos levantados por intermédio do preenchimento de fichas de campo *in situ*, estabeleceram os setores de risco para cada região de cada assentamento urbano precário.

FIGURA 3 – MAPAS DE SETORIZAÇÃO DE RISCO PARA ESCORREGAMENTOS DE ENCOSTAS NOS ASSENTAMENTOS URBANOS PRECÁRIOS DE NOVA FRIBURGO/RJ



FONTE: Adaptada de CPRM e PMNF (2007).

3 METODOLOGIA EMPREGADA PARA O CÁLCULO DO GRAU DE ACERTO

Primeiramente, em uma etapa prévia a execução da metodologia utilizada para o cálculo do grau de acerto, foi realizada uma atividade de campo em 10/04/2019 na porção noroeste da Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí, situada a cerca de 7 (sete) quilômetros do limite do PNSHL no município de Morretes, Estado do Paraná.

Embora a área contemplada na atividade de campo não esteja inserida nas regiões dos estudos em análise nesta pesquisa (MINEROPAR e IBAMA, 2005; PMNF e CMPR, 2007), a Bacia Hidrográfica do Rio Jacareí está igualmente localizada na Serra do Mar, apresentando contextos geomorfológicos similares e maior facilidade para acesso e observação de cicatrizes de escorregamentos recentes.

A atividade de campo objetivou proporcionar o reconhecimento das feições típicas da Serra do Mar e principalmente das características intrínsecas das cicatrizes dos escorregamentos, além da interface de ruptura na encosta entre o solo e a rocha. Resultando em um treinamento prático para as etapas posteriores de identificação das cicatrizes dos escorregamentos em imagens de satélite, com posterior vetorização destas feições no *software* QGIS para o cálculo do grau de acerto das áreas de interesse.

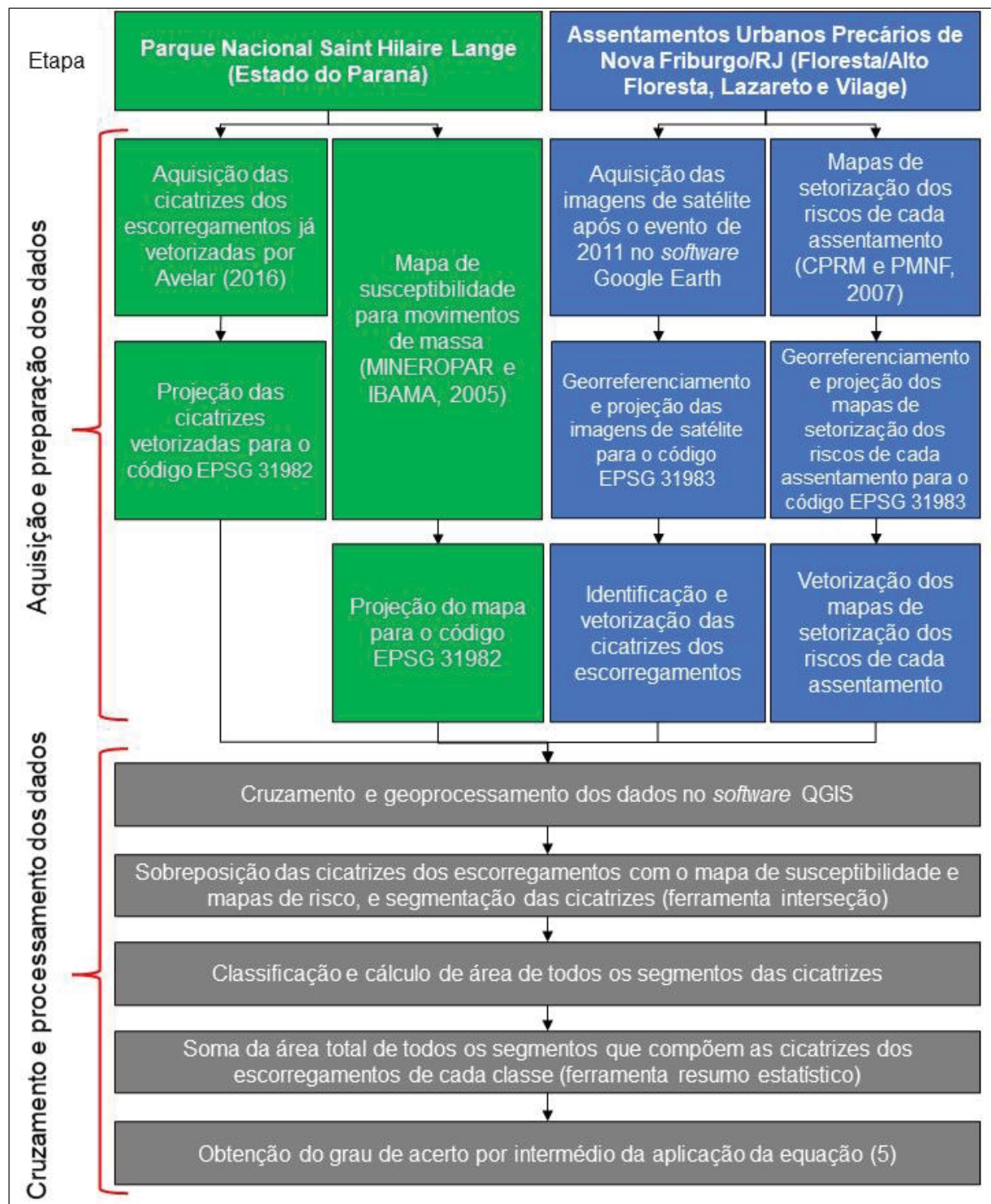
Deste modo, após o treinamento prático em campo, foram selecionados dois estudos técnicos distintos de predictabilidade para ocorrência de movimentos gravitacionais de massa: MINEROPAR e IBAMA (2005), referente a área do PNSHL, situado da região litorânea do Estado do Paraná, e CPRM e PMNF (2007), equivalente ao PMRR para os assentamentos urbanos precários de Nova Friburgo, Rio de Janeiro.

Em seguida, através de uma análise prévia de diversas imagens de satélite por intermédio do *software* Google Earth, correspondente aos registros de fotografias aéreas após os eventos de 2011 disponibilizadas gratuitamente pela empresa privada americana Maxar Technologies, foram delimitadas conforme figuras 5 e 6 as áreas de interesse para análise do desempenho e respectivo cálculo do grau de acerto de cada local.

Ao analisar as imagens de satélite ficou constatado que as regiões mais atingidas e com maior concentração das cicatrizes dos escorregamentos foram o norte do PNSHL, e os três assentamentos urbanos precários: Floresta/Alto Floresta, Lazareto e Vilage de Nova Friburgo, Rio de Janeiro.

As duas áreas avaliadas seguiram fundamentalmente a mesma metodologia para o cálculo do grau de acerto no respectivo estudo. No entanto, o processo de aquisição e processamento inicial dos dados foram distintos. Pretendendo facilitar o entendimento das etapas empregadas, apresenta-se na figura 4 um fluxograma.

FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA EMPREGADA PARA CADA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: O autor (2021).

Contextualiza-se inicialmente que independentemente do modelo preditivo para movimentos gravitacionais de massa aplicado, o método de avaliação do desempenho destes modelos utiliza as cicatrizes de escorregamentos em comparação com os mapas de susceptibilidade e/ou risco gerados previamente aos eventos, conforme pode ser observado em Guimarães et al. (2003), Huang e Kao (2006), Guimarães et al. (2009) e Othman, Mohd e Noraini (2014).

Em razão disso, a metodologia empregada para o cálculo do grau de acerto teve como base a utilização de cicatrizes de escorregamentos, definidas pela zona de ruptura na interface solo-rocha da vertente, e posterior comparação com o mapa de susceptibilidade para escorregamentos da MINEROPAR e IBAMA (2005), e com os mapas de setorização de risco dos assentamentos urbanos precários selecionados no estudo da CPRM e PMNF (2007).

Fundamentado neste princípio, e a partir dos métodos de cálculo para avaliação da performance de modelos preditos para escorregamentos rasos de Guimarães et al. (2003), bem como as equações 2 e 3 para obtenção da taxa de sucesso (ST) de Huang e Kao (2006), elaborou-se uma equação própria (equação 5) para o cálculo em percentual do grau de acerto de cada estudo analisado.

Nesta nova fórmula os princípios da proporcionalidade de área de Guimarães et al. (2003) e Huang e Kao (2006) foram mantidos, porém sendo substituído o sistema de análise de *pixels* e células pela área total real das cicatrizes. Acredita-se que a avaliação exclusiva das áreas com cicatrizes de escorregamentos em associação com a respectiva classe de susceptibilidade ou risco, seja a forma ideal de apurar a precisão de um modelo preditivo de qualquer abordagem, determinística, heurística ou estatística.

Da mesma forma, outro fator que influenciou o desenvolvimento de uma nova equação foi a simplificação do geoprocessamento de dados, que ao utilizar os polígonos das cicatrizes expressando a sua área real, estabelecida pela interface de ruptura solo-rocha, proporciona operar unicamente arquivos vetoriais. Possibilitando o processamento em computadores comuns e *softwares* menos robustos.

Ao contrário, o método de Guimarães et al. (2003) utilizada arquivos matriciais (raster), processando *pixels*. Da mesma forma, o método de Huang e Kao (2006) necessita da definição e emprego de células de 20 x 20 metros, resultando em uma demanda e capacidade de processamento de dados maior.

Esta premissa permite uma visualização prática e simples do respectivo grau de acerto para cada classe do estudo alvo, não considerando necessária a incorporação e avaliação das áreas sem rupturas na equação. Afinal, todo mapa de susceptibilidade ou risco desta temática trabalha com previsibilidade, e o seu sucesso só pode ser atestado ou medido por intermédio da consumação de um evento.

Logo, a adoção da relação de proporcionalidade entre as áreas de ruptura nas encostas com as respectivas classes de susceptibilidade e risco, estabelecidas pela MINEROPAR e IBAMA (2005) e CPRM e PMNF (2007), demonstrou-se mais correta e aplicável para distintos modelos preditivos com presença de subjetividade. Necessitando de poucos dados e informações para o cálculo do grau de acerto.

$$\text{Grau de acerto (\%)} = \frac{\text{área total dos segmentos para uma classe (km}^2\text{)}}{\text{área total das cicatrizes (km}^2\text{)}} \times 100 \quad (5)$$

Com base na equação 5 e no resumo da metodologia observada na figura 4, inicia-se, de fato, o processo para cálculo do grau de acerto de cada área de interesse a partir de duas etapas principais: aquisição e preparação dos dados, e cruzamento e processamento destas informações.

Nesta etapa inicial foi necessário reunir dois elementos de entrada de cada área de estudo: as cicatrizes dos escorregamentos vetorizadas da região norte do PNSHL e dos três assentamentos urbanos precários de Nova Friburgo/RJ, e os respectivos mapas de susceptibilidade e de riscos para escorregamentos, também vetorizados, elaborados respectivamente pela MINEROPAR e IBAMA (2005) e CPRM e PMNF (2007).

No entanto, devido à existência prévia do trabalho de Avelar (2016), em que o autor efetuou todo o processo de identificação e vetorização das cicatrizes dos escorregamentos geradas pelo evento de 11/03/2011 na região norte do PNSHL, não foi necessário efetuar este processo nesta etapa inicial.

Igualmente, não foi necessário efetuar os processos de georreferenciamento e vetorização do mapa de susceptibilidade para movimentos gravitacionais de massa elaborado pela MINEROPAR e IBAMA (2005). Isto em razão deste mapa ter sido disponibilizado digitalmente pelos respectivos autores com todas suas feições em formato *shapefile*.

Entretanto, foi preciso efetuar a projeção das cicatrizes vetorizadas de Avelar (2016) e dos arquivos *shapefile* que compõem o mapa de susceptibilidade para escorregamentos da MINEROPAR e IBAMA (2005), convertendo as coordenadas geográficas para coordenadas cartesianas.

Assim, todos os dados de entrada para os processos posteriores de geoprocessamento no *software* QGIS, passaram a se encontrar no sistema de referência de coordenadas planas, zona 22S, *datum* SIRGAS2000, representado pelo código EPSG 31982 (nomenclatura adotada pelo *European Petroleum Survey Group* para padronizar os sistemas de referência de coordenadas).

No processo de identificação das cicatrizes dos escorregamentos para os três assentamentos urbanos precários de Nova Friburgo/RJ foram selecionadas diversas imagens de satélite do dia 19/01/2011, sendo elas disponibilizadas gratuitamente através do *software* Google Earth pela empresa privada americana Maxar Technologies (2011). Contudo, não foram encontradas informações sobre o satélite utilizado e escala destas fotografias aéreas que constituem as imagens de satélite.

Reunindo no *software* QGIS as imagens de satélite obtidas e o mapa de setorização dos riscos para ocorrência de escorregamentos em encostas elaborado pela CPRM e PMNF (2007), foi possível dar sequência ao processo de georreferenciamento e projeção de cada um destes dados de entrada no programa para o sistema de referência de coordenadas planas, zona 23S, *datum* SIRGAS2000, expresso pelo código EPSG 31983.

O georreferenciamento das fotografias áreas de cada assentamento urbano precário e dos mapas de setorização de riscos da CPRM e PMNF (2007), utilizaram: o mínimo de 8 (oito) pontos de controle ou de amarração; tipo de transformação do QGIS: polinomial 1; e método de reamostragem: vizinho mais próximo. Neste processo a taxa de erro residual, calculada automaticamente pelo programa para determinar a eficiência do georreferenciamento, ficou abaixo de 1 pixel para ambos os dados de entrada, atendendo aos padrões de qualidade definidos pelos usuários.

Após o georreferenciamento das imagens de satélite e do mapa de setorização dos riscos de cada assentamento urbano precário de Nova Friburgo/RJ, foram efetuados os processos de identificação e vetorização. Durante estes procedimentos efetuados no *software* QGIS, utilizou-se o auxílio do recurso de visualização em 3D para o terreno do *software* Google Earth (figura 5), permitindo uma melhor definição dos limites das cicatrizes dos escorregamentos nas encostas.

FIGURA 5 – IMAGEM AÉREA EM 3D DO ASSENTAMENTO URBANO PRECÁRIO VILAGE - NOVA FRIBURGO/RJ, APÓS OCORRÊNCIA DO EVENTO DE JANEIRO DE 2011



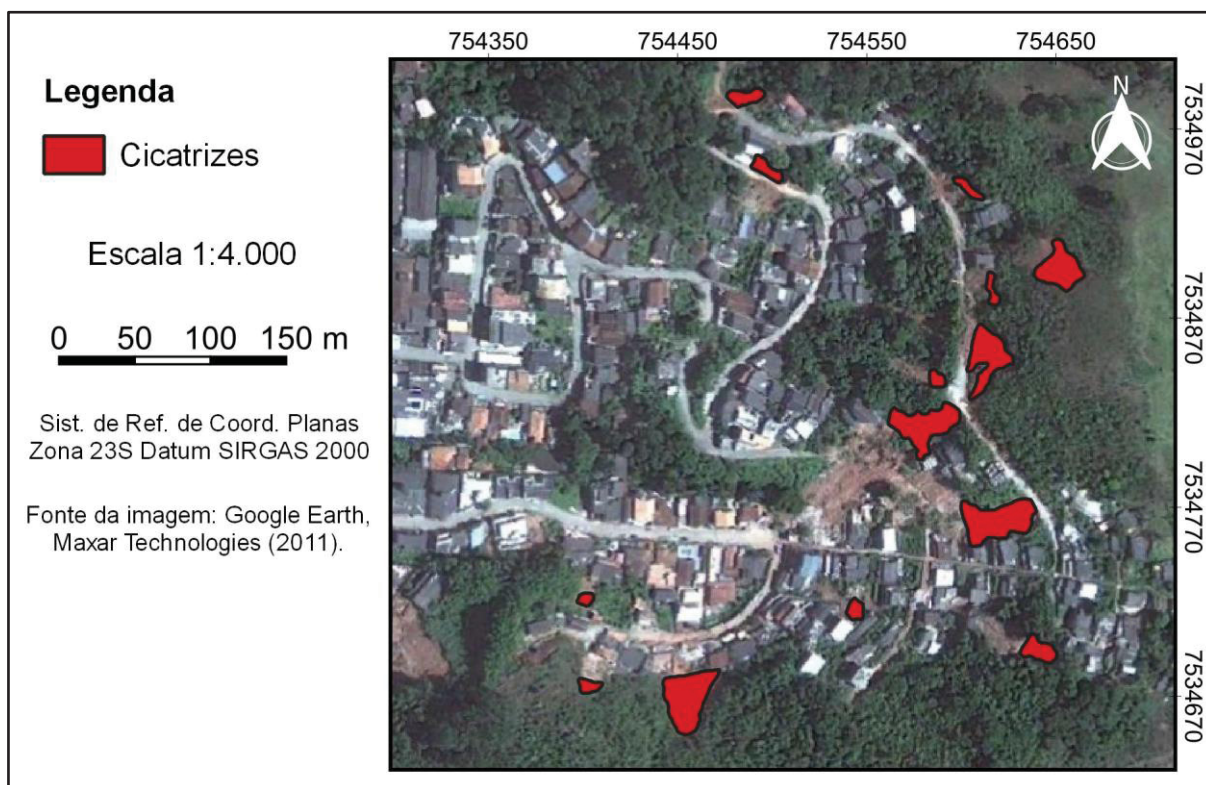
FONTE: SOFTWARE GOOGLE EARTH, MAXAR TECHNOLOGIES (2011).

Ao decorrer da visualização em 3D do terreno foram utilizadas variações do exagero vertical de até 3 vezes. Outro recurso do *software* Google Earth aplicado foi o histórico de imagens de satélite, possibilitando diversas comparações ao longo da linha temporal do programa. Deste modo, imagens de satélite do período anterior ao evento de janeiro de 2011, assim como dos meses posteriores (maio e junho de 2011) foram avaliadas.

Estas técnicas permitem identificar com precisão a interface de ruptura entre o solo e a rocha, proporcionando maior segurança no traçado dos limites das cicatrizes dos escorregamentos ao longo das vertentes. Ressalta-se, conforme figura 6, que as corridas de massa não foram consideradas como partes integrantes destas feições.

Após utilizar estes recursos disponíveis no *software* Google Earth, e considerando as características das cicatrizes de escorregamentos observadas na atividade de campo prévia, foram vetorizadas apenas as zonas de ruptura da encosta expressas pela interface solo e rocha. Além disso, nenhum dos estudos técnicos analisados (MINEROPAR e IBAMA, 2005; CPRM e PMNF, 2007) mencionaram as corridas de massa no desenvolvimento de seus respectivos modelos preditivos.

FIGURA 6 – MAPA DAS CICATRIZES DOS ESCORREGAMENTOS VETORIZADAS AO LONGO DO ASSENTAMENTO URBANO PRECÁRIO VILAGE – NOVA FRIBURGO/RJ



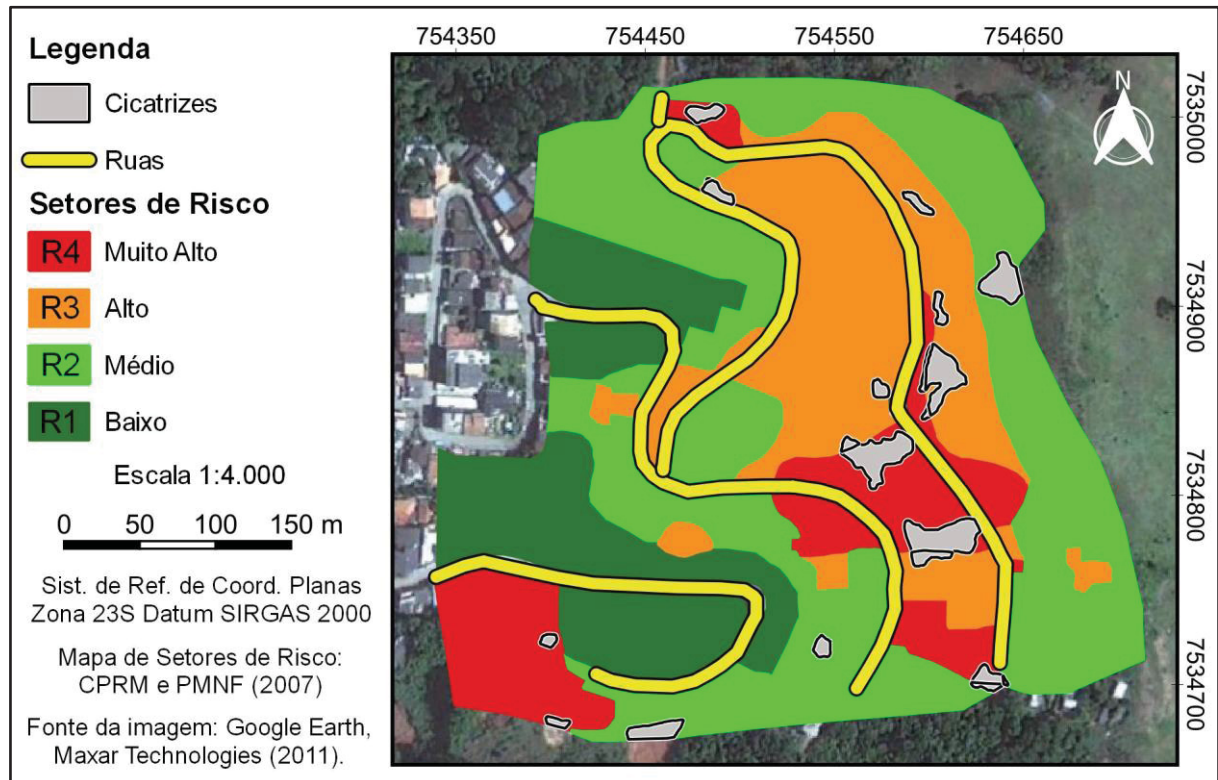
FONTE: O autor (2020).

Finalizada a etapa inicial de aquisição e preparação dos dados foi possível realizar o cruzamento e processamento destas informações para obtenção do grau de acerto em cada área de interesse.

O processo comparativo ocorreu por intermédio da aplicação da ferramenta interseção do *software* QGIS. Neste recurso o programa identificou cada feição vetorial e a sua respectiva posição espacial, confrontando automaticamente as cicatrizes dos escorregamentos e os respectivos mapas de susceptibilidade e de setorização de riscos, produzindo um único arquivo *shapefile* apenas com as áreas que se sobrepõem.

Assim, as cicatrizes dos escorregamentos passaram a se encontrar segmentadas de acordo com a respectiva classe de susceptibilidade ou setor de risco que estavam situadas subjetivamente acima, conforme ilustrado na figura 7 abaixo. Estas cicatrizes de escorregamentos segmentadas foram posteriormente classificadas, o que representa na prática a separação de cada fração do polígono da cicatriz e sua posterior associação à classe de susceptibilidade ou setor de risco correspondente.

FIGURA 7 – MAPA DAS CICATRIZES DOS ESCORREGAMENTOS SEGMENTADAS CONFORME O MAPA DE SETORIZAÇÃO DE RISCO VETORIZADO, ASSENTAMENTO VILAGE



FONTE: O Autor (2020).

Avançando em outro processo, ao utilizar o recurso calculadora de campo, efetuou-se o cálculo da área total de todos os segmentos das cicatrizes dos escorregamentos no *software* QGIS, obtendo o valor da área em quilômetros quadrados conforme tabela 1.

Por fim, ao fazer uso de outra ferramenta do *software* QGIS, denominada resumo estatístico, executou-se a soma da área total de todos os segmentos que compõem as cicatrizes dos escorregamentos já classificadas. Deste modo, viabilizou-se a aplicação da equação 4 anteriormente desenvolvida, possibilitando a obtenção do grau de acerto para o mapa de susceptibilidade e para os mapas de setorização dos riscos de cada assentamento urbano precário selecionado. Os resultados em valores percentuais foram expressos na tabela 2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ARTIGO 1: RESULTADO DA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ESTUDO DE SUSCEPTIBILIDADE PARA MOVIMENTOS DE MASSA NO PARQUE NACIONAL SAINT HILAIRE LANGE, PARANÁ.

4.1.1 Resumo

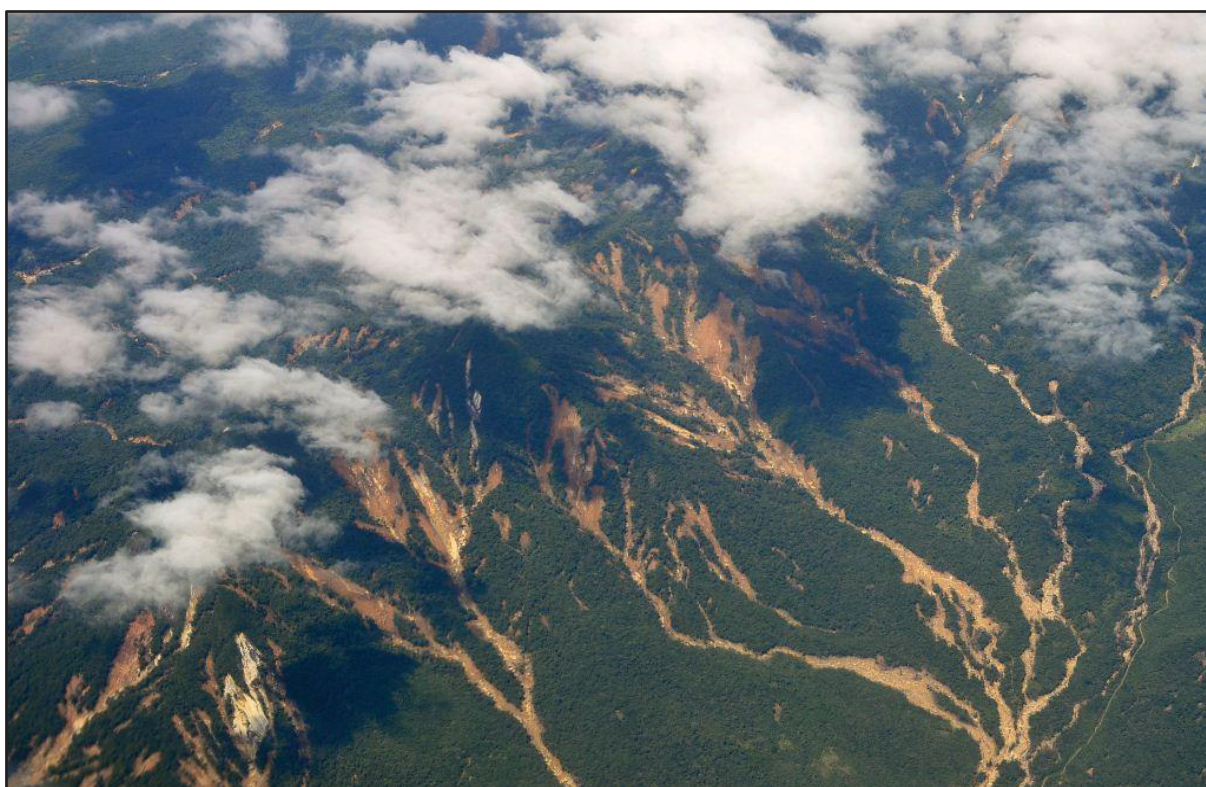
No ano de 2005 o Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais e Renováveis (IBAMA), elaboraram em conjunto um relatório técnico de caracterização e mapeamento dos atributos do meio físico para o Parque Nacional Saint Hilaire Lange, resultando, através do emprego de um modelo preditivo heurístico, em um mapa final de classificação da susceptibilidade para movimentos gravitacionais de massa. Seis anos depois, em março de 2011, um grande evento atingiu a região norte do parque, refletindo em escorregamentos generalizados altamente destrutivos. Em razão disso, observou-se uma oportunidade de realizar a análise de desempenho do mapa de susceptibilidade para escorregamentos produzido pela MINEROPAR e IBAMA no ano de 2005. Para proceder com a avaliação do estudo foi desenvolvida a partir de equações propostas anteriormente, uma nova equação para o cálculo do grau de acerto do mapa de susceptibilidade. Esta nova equação tem como base uma relação direta de proporcionalidade de área, confrontando, por intermédio do *software* livre QGIS, as zonas mapeadas do parque e suas respectivas classes de susceptibilidade para escorregamentos, com as cicatrizes dos movimentos gravitacionais de massa geradas em decorrência do evento de março de 2011. Após o cálculo e avaliação dos dados, foi constatado um resultado satisfatório, ao menos em termos probabilísticos, em que 96,35% dos movimentos gravitacionais de massa ocorreram nos locais classificados previamente como susceptibilidade alta e média no mapa. Porém, também foi identificado a ausência da análise ou projeção de impacto das corridas de massa no relatório técnico, uma consequência iminente dos escorregamentos simultâneos que acabaram atingindo as comunidades próximas ao parque. Embora, os autores do estudo técnico tivessem contemplado no mapa de susceptibilidade a direção dos escorregamentos, além de cogitarem incluir uma avaliação de risco, o objetivo e os resultados do relatório se concentraram apenas na caracterização e mapeamento dos atributos do meio físico da região. Portanto, uma amplificação da análise dos potenciais impactos dos movimentos gravitacionais de massa na localidade, efetuada por iniciativa dos gestores do parque em conjunto com o poder público, poderiam ter mitigado os danos ou proporcionado uma melhor resposta ao desastre em parceria com a Defesa Civil do Estado do Paraná.

Palavras-chave: Escorregamentos. Cicatrizes. Grau de acerto. Corridas de massa. Planejamento territorial.

4.1.2 Introdução

O início do ano de 2011 ficou marcado no litoral paranaense pela ocorrência de uma série de movimentos gravitacionais de massa generalizados em decorrência do colapso de diversas vertentes na Serra do Mar. Segundo a Defesa Civil do Estado do Paraná (2020), foram mais de 18.000 pessoas atingidas no dia 11/03/2011 com inúmeros chamados de ocorrências, resultado de excessivos escorregamentos e enxurradas de lama acompanhadas por detritos (figura 8).

FIGURA 8 – FOTOGRAFIA AÉREA DO PARQUE NACIONAL SAINT HILAIRE LANGE, REGIÃO DA SERRA DA PRATA/PR, APÓS OCORRÊNCIA DO EVENTO DE MARÇO DE 2011



FONTE: ICMBio (2011).

Após este evento que provocou um grande desastre na região, cresceu o número de estudos acadêmicos e profissionais desenvolvidos no local sobre o tema (AMORIM et al., 2020; MINOZZO, 2018; AVELAR, 2016; MARTINS et al., 2017; DA SILVEIRA et al., 2014). Dentre esses, Avelar (2016) identificou e vetorizou as cicatrizes dos escorregamentos geradas pelo evento de 2011 na fração norte do PNSHL, uma das regiões fortemente atingidas em março daquele ano.

Neste sentido, a execução de estudos e prognósticos para a ocorrência de escorregamentos nas vertentes, associado ao mapeamento de risco, pode fornecer importantes subsídios técnicos para a elaboração de um planejamento territorial adequado, zoneamentos, planos diretores, manejo, dentre outros aspectos relevantes na gestão ambiental e urbana (CARVALHO; GALVÃO, 2006; TOMINAGA, 2007; DA SILVEIRA et al., 2014).

Dentre os recursos atualmente empregados nesta temática, os modelos preditivos para movimentos gravitacionais de massa são uma importante ferramenta para definição de áreas predispostas a deslizamentos rasos, facilitando o emprego de ações preventivas e de medidas mitigatórias (MORESI et al., 2020).

Seguindo esta linha, previamente ao evento de março de 2011, MINEROPAR e IBAMA (2005) efetuaram através da aplicação de um modelo preditivo heurístico um estudo técnico de mapeamento e caracterização dos atributos do meio físico do PNSHL, com o propósito de fornecer aos gestores da área subsídios técnicos para o melhor manejo deste relevante patrimônio natural. Os autores produziram diversos mapas temáticos para a região do parque, sendo o mapa de susceptibilidade para ocorrência de movimentos gravitacionais de massa o produto principal.

Contudo, a produção de trabalhos científicos e técnicos deve acompanhar posteriormente análises de desempenho para os modelos preditivos empregados, assegurando e elevando a performance dos estudos desenvolvidos. Segundo Huang e Kao (2006), este processo avaliativo pode ser realizado através da comparação dos mapas de susceptibilidade para escorregamentos com o mapeamento dos deslizamentos reais, além da criação essencial de um indicador ou fórmula para cálculo da eficiência de um modelo preditivo.

Isto posto, o presente trabalho acadêmico teve como objetivo calcular e avaliar o grau de acerto do estudo técnico elaborado pela MINEROPAR e IBAMA (2005) a partir da aplicação de uma nova equação desenvolvida nesta pesquisa, comparando o mapa de susceptibilidade para movimentos de massa com as cicatrizes dos escorregamentos de Avelar (2016).

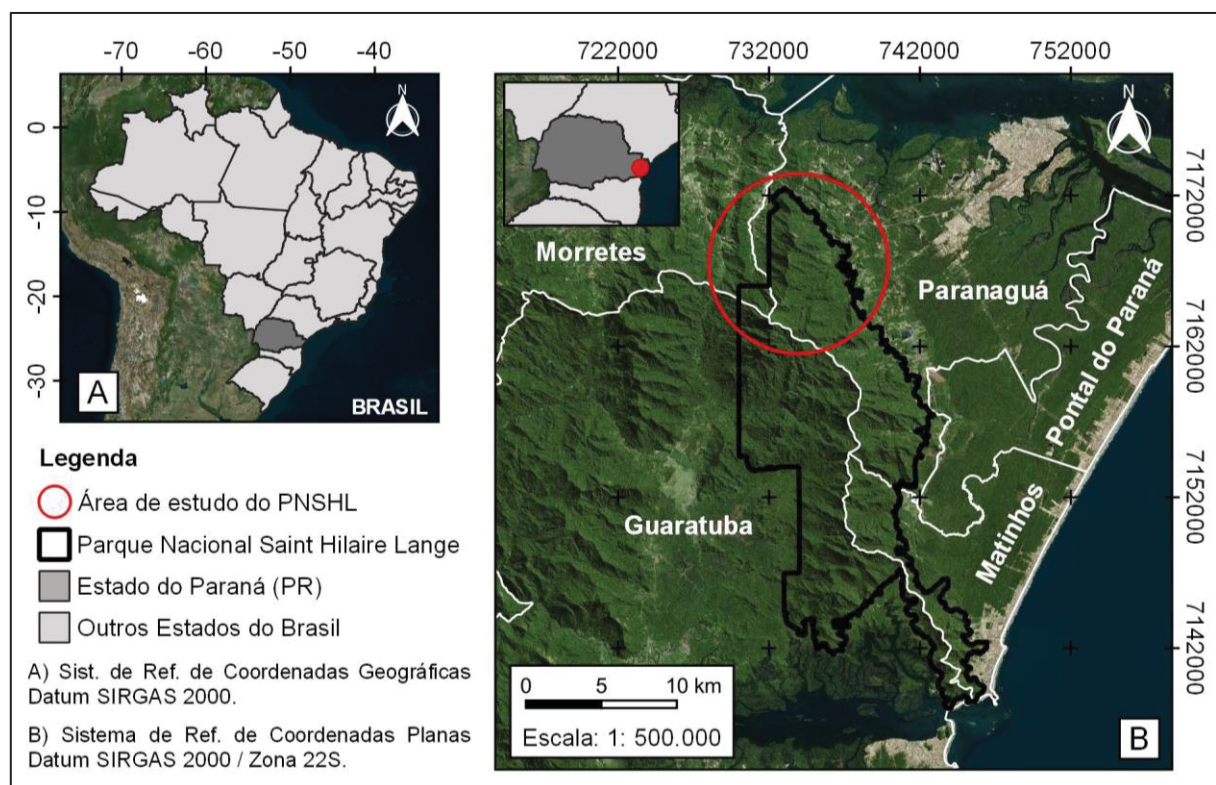
Para este processo foi utilizado integralmente *softwares* gratuitos, sendo eles o QGIS e o Google Earth. Viabilizando, em razão da facilidade de acesso aos programas e ausência da necessidade de grandes recursos ou investimentos, futuras reproduções e aplicações do método para outros estudos de caráter acadêmico ou técnico.

Por fim, destaca-se que a discussão desta temática é importante para a evolução dos estudos de predictabilidade, aperfeiçoamento dos modelos preditivos empregados, bem como melhor prognóstico das áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa, inclusive para a construção de sistemáticas eficientes para resposta imediata aos eventos perigosos.

4.1.3 O Parque Nacional Saint Hilaire Lange (PNSHL)

Criado pela Lei Federal nº 10.227/2001 (Brasil, 2001), o PNSHL constitui um dos patrimônios naturais brasileiros mais significativos quando o assunto é biodiversidade, está localizado a 80 quilômetros da capital do Estado do Paraná, Curitiba, próximo ao litoral paranaense (figura 9). Ele contempla uma área superior a 24 mil hectares entre os municípios de Guaratuba, Matinhos, Morretes e Paranaguá, e tem como propósito proteger e conservar ecossistemas da mata atlântica, assegurar a estabilidade ambiental dos balneários sob sua influência, bem como a qualidade de vida das populações litorâneas (SIEDLECKI; PORTES; CIELO FILHO, 2003).

FIGURA 9 - LOCALIZAÇÃO DO PARQUE NACIONAL SAINT HILAIRE LANGE



FONTE: O autor (2021).

Atualmente os parques nacionais do Brasil são geridos pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Este órgão, criado no ano de 2007, caracteriza-se como uma autarquia em regime especial vinculado ao Ministério do Meio Ambiente (ICMBio, 2021).

O PNSHL está situado em um conjunto de montanhas denominada Serra da Prata, inserida no contexto geomorfológico da Serra do Mar. A região é formada por uma série de feições rochosas íngremes, refletindo no difícil acesso e na grande conservação do ambiente local (GUIMARÃES; CANEPARO, 2007).

Em razão disso, o PNSHL contempla um relevo destacado típico da Serra da Prata paranaense, caracterizando-se por importantes desníveis e declividades acentuadas, naturalmente superiores a 45% com morros de até 1500 metros de altitude acima do nível do mar (SIEDLECKI; PORTES; CIELO FILHO, 2003).

A disposição deste relevo ao longo dos limites do parque é representada por aproximadamente 39% de áreas planas ou suavemente onduladas, 36% de áreas de média a alta declividade (25° a 45°), e 25%, exclusivamente, de áreas de alta declividade (>45°), nas quais registram os maiores desníveis e encostas elevadas (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

A geologia do PNSHL está associada principalmente a complexos de litologias ígneas e metamórficas como: granitoides, gnaisses foliados e bandados, migmatitos e rochas intrusivas básicas. As rochas mais antigas do parque foram datadas do Proterozóico inferior - 1600 a 2500 Ma, existindo também na região alguns depósitos sedimentares recentes do Pleistoceno (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

Na fração norte do PNSHL ocorre uma densa quantidade de estruturas tectônicas de sentido NW-SE, que acabam por condicionar a rede de drenagem local e contemplar as maiores áreas de recarga do parque, favorecendo o fluxo de água subterrânea e a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa nas vertentes (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

Adiciona-se neste contexto as características climáticas bem definidas da região litorânea do Paraná, em que o PNSHL está inserido. Segundo o ITCG (2008), com base no Sistema Meteorológico do Paraná, utilizando-se da classificação climática de Köppen (1918), é possível observar que o parque compreende os tipos climáticos Af, Cfa/Af e Cfb/Cfa, refletindo uma relação complexa de interação entre os modelos, porém existindo pontos em comum como: alto índice pluviométrico - acima de 2000 mm anuais, verão úmido e massas de instabilidade constantes.

Conforme ainda a classificação climática de Köppen (2018), pode-se classificar o clima da região como tropical superúmido, sendo definido pela ausência de estações secas e por precipitações médias anuais elevadas, podendo ultrapassar os 3000 mm. Diante disso, a região possui um dos maiores índices pluviométricos anuais do Estado do Paraná (SIEDLECKI; PORTES; CIELO FILHO, 2003).

Os solos presentes ao longo da extensão territorial do PSHL, assim como as características pedológicas típicas das regiões úmidas, estão associados à degradação da rocha por intermédio de processos intempéricos, tendo a água e as variações de temperatura como os fatores determinantes para a alteração e decomposição das litologias existentes (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

Este contexto climático atrelado às características regionais de relevo acentuado resulta no transporte por gravidade de material rochoso e de fragmentos vegetais, constituindo os solos coluvionares que compõem grande parte do PNSHL. Outra categoria de solo, própria da base de encostas e que potencializa a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, são os depósitos de tálus. Eles contemplam desde seixos até blocos métricos sustentados por uma matriz de solo siltico-argiloso, sendo formados pela deposição de escorregamentos anteriores (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

Neste cenário, e em decorrência do PNSHL ser uma área protegida por lei, a agricultura se torna a principal atividade econômica desenvolvida pelas pequenas comunidades estabelecidas ao longo do parque. Ela consiste na produção de banana e mandioca em pontos elevados da Serra da Prata, enquanto que nas regiões planas são desenvolvidas culturas de arroz e de cana-de-açúcar, além da criação de animais para subsistência como aves, suínos, caprinos e gado. Por fim, algumas atividades turísticas também são exercidas (SIEDLECKI; PORTES; CIELO FILHO, 2003).

4.1.4 Estudo de susceptibilidade para movimentos de massa no PNSHL

No ano de 2005 um convênio entre o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), e o Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR), atualmente Instituto Água e Terra (IAP), promoveram com o incentivo do governo federal e do governo do Estado do Paraná, um estudo técnico para mapeamento dos atributos do meio físico no PNSHL.

Segundo MINEROPAR e IBAMA (2005), o trabalho objetivou fornecer informações através da produção de mapas temáticos e relatórios para a gestão e manejo do parque, justamente em razão da escassez de estudos técnicos que busquem o detalhamento do meio físico nestes locais de grande biodiversidade protegidos por leis, em que o meio biótico acaba sendo privilegiado pelos pesquisadores e profissionais.

Para o desenvolvimento do estudo foram realizados diversos levantamentos bibliográficos, utilizando-se também de cartas geológicas e topográficas, fotografias aéreas em escala 1:25000, além do mapeamento de campo e de outros recursos. Em seguida, ao reunir e cruzar os dados obtidos, aplicando técnicas de sensoriamento remoto por intermédio de um SIG, foi possível gerar diferentes mapas temáticos referentes aos atributos do meio físico como: geologia, geomorfologia, declividade, coberturas inconsolidadas, dentre outros (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

Desta forma, executando uma abordagem heurística direta, definida pelos autores Barredo et al. (2000) e Nunes et al. (2016) como um modelo preditivo baseado exclusivamente na opinião de profissionais especialistas, que buscam avaliar os fatores geradores de instabilidades nas vertentes após caracterização da área de interesse por intermédio de atividades de campo, fotointerpretação, e análise de mapas de detalhe, foi elaborado o produto final do estudo técnico, o mapa de susceptibilidade para movimentos de massa.

Conforme MINEROPAR e IBAMA (2005), o mapa retrata a probabilidade da ocorrência de escorregamentos e queda de blocos ao longo dos limites do PNSHL, sendo dividido em três classes de susceptibilidade: alta, média e baixa.

No entanto, ressalta-se que a aplicação de um modelo preditivo heurístico é indicada preferencialmente para pesquisas regionais com escalas na ordem de 1:100000 a 1:250000, aproximando-se das características observadas no estudo da MINEROPAR e IBAMA (2005). Contudo, este tipo de abordagem requer fundamentalmente um grande conhecimento técnico dos profissionais envolvidos (VAN WESTEN, 2000).

Dentre os atributos do meio físico considerados para a confecção do mapa de susceptibilidade para movimentos de massa do PNSHL, alguns foram mais relevantes e direcionaram o processo de classificação. Os autores destacaram as unidades e feições geomorfológicas, os tipos de solo e, principalmente, as declividades das encostas (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

Portanto, em resumo, as conclusões e resultados do estudo técnico promovido pela MINEROPAR e IBAMA (2005) consistiram na caracterização do meio físico atualizada e detalhada de todo o parque, elencando os pontos positivos de sua preservação, assim como os pontos que naturalmente requerem atenção devido à elevada declividade e soma de condições naturais que proporcionam uma maior susceptibilidade para ocorrência de movimentos gravitacionais de massa.

Traduzindo, todas estas informações levantadas da área após avaliação fundamentada na experiência e conhecimento técnico dos profissionais envolvidos, em diversos mapas temáticos acompanhados de um relatório final. Em que os autores buscaram fornecer dados e contribuir para a melhor gestão e manejo do PNSHL junto aos seus respectivos administradores (MINEROPAR; IBAMA, 2005).

4.1.5 Materiais e métodos

Destaca-se primeiramente que independentemente do modelo preditivo para movimentos gravitacionais de massa aplicado em um estudo, o método de avaliação do desempenho utiliza as cicatrizes de escorregamentos em comparação com os mapas gerados a partir dos respectivos modelos preditivos empregados. Isto pode ser observado em Guimarães et al. (2003), Huang e Kao (2006), Guimarães et al. (2009) e Othman, Mohd e Noraini (2014).

Partindo desta premissa, a partir dos métodos de cálculo para avaliação da performance de modelos preditos para escorregamentos rasos de Guimarães et al. (2003), expresso pela equação 1, e de Huang e Kao (2006) ilustrado pelas equações 2 e 3, foi desenvolvida uma nova fórmula (equação 5) para validação nesta pesquisa, proporcionando o cálculo em percentual do grau de acerto.

A equação 1 abaixo aplicada por Guimarães et al. (2003) definiu um índice de ajuste de modelo (FI) para a análise do desempenho de modelos preditivos, utilizando-se da proporcionalidade de área. Este índice foi obtido através da razão entre o número de *pixels* que ocorrem tanto em uma cicatriz de escorregamento quanto nas áreas definidas pelo modelo como potencialmente instáveis (PMS), pelo número total de *pixels* que ocorrem dentro da área das cicatrizes dos deslizamentos (PS).

$$FI = \frac{PMS}{PS} \quad (1)$$

Quanto as equações 2 e 3 de Huang e Kao (2006), equivalem a outro método similar a Guimarães et al. (2003) para análise da performance de um modelo preditivo, sendo denominado *sucess rate* (ST). Neste caso, os autores utilizaram basicamente a comparação das predições de um modelo com o cenário após ocorrência de um evento. Este método teve como origem os estudos de Montgomery e Dietrich (1994), e desde então está sendo utilizado e adaptado de acordo com a perspectiva de cada autor (por exemplo: LEE, 2005).

$$SR = \frac{\text{number of sucessfully predicted landslides}}{\text{total number of actual landslides}} \quad (2)$$

No entanto, segundo Huang e Kao (2006), a equação 2 não contempla a análise de sucesso dos locais definidos pelos modelos preditivos como estáveis, considerando apenas a análise das regiões instáveis. Deste modo, objetivando corrigir este erro através da aplicação do *coefficient kappa* (Cohen, 1960), um método de análise estatística, os autores realizaram algumas modificações na fórmula para cálculo da *success rate* (SR), acrescentando alguns índices de correções e passando a utilizar células (uma grade de divisão dos mapas resultantes dos modelos preditivos de 20 x 20 metros) em suas análises de desempenho.

Em decorrência disso, a SR foi modificada e definida como *modified success rate* (MSR), podendo ser obtida através da equação (3) a seguir:

$$MSR = 0.5 \times SR + 0.5 \times \frac{\text{sucessfully predicted stable cells}}{\text{total number of actual stable cells}} \quad (3)$$

Isto posto, analisando as equações 1, 2 e 3 e buscando aplicabilidade para o estudo da MINEROPAR e IBAMA (2005), optou-se pela criação de uma nova equação para o cálculo do grau de acerto nesta pesquisa, a equação 5. Nesta nova fórmula os princípios da proporcionalidade de área de Guimarães et al. (2003) e Huang e Kao (2006) foram mantidos, porém sendo substituído o sistema de análise de *pixels* e células pela área total real das cicatrizes.

$$\text{Grau de acerto (\%)} = \frac{\text{área total dos segmentos para uma classe (km}^2\text{)}}{\text{área total das cicatrizes (km}^2\text{)}} \times 100 \quad (5)$$

Acredita-se que a avaliação exclusiva das áreas com cicatrizes de escorregamentos em associação com a respectiva classe de susceptibilidade seja a forma ideal de apurar a precisão de um modelo preditivo determinístico, heurístico ou estatístico. Da mesma forma, outro fator que influenciou o desenvolvimento de uma nova equação foi a simplificação do geoprocessamento de dados, que ao utilizar os polígonos das cicatrizes expressando a sua área real, estabelecida pela interface de ruptura solo-rocha, proporciona operar unicamente arquivos vetoriais. Possibilitando o processamento em computadores comuns e *softwares* menos robustos.

Ao contrário, o método de Guimarães et al. (2003) utilizada arquivos matriciais (raster), processando *pixels*. Da mesma forma, o método de Huang e Kao (2006) necessita da definição e emprego de células de 20 x 20 metros, resultando em uma demanda e capacidade de processamento de dados maior.

Partindo do estabelecimento da fórmula a ser aplicada para a análise de desempenho por intermédio do cálculo do grau de acerto, iniciou-se a etapa inicial de preparação dos dados para geoprocessamento e aplicação final na equação 5.

Inicialmente foram selecionadas as cicatrizes dos escorregamentos da região norte do PNSHL identificadas e vetorizadas por Avelar (2016) logo após a ocorrência do evento de março de 2011. O autor contemplou diversos tipos de movimentos gravitacionais de massa, excluindo conforme observado nas imagens de satélite com registro do período posterior ao evento, disponíveis no *software* Google Earth, as corridas de massa associadas aos escorregamentos.

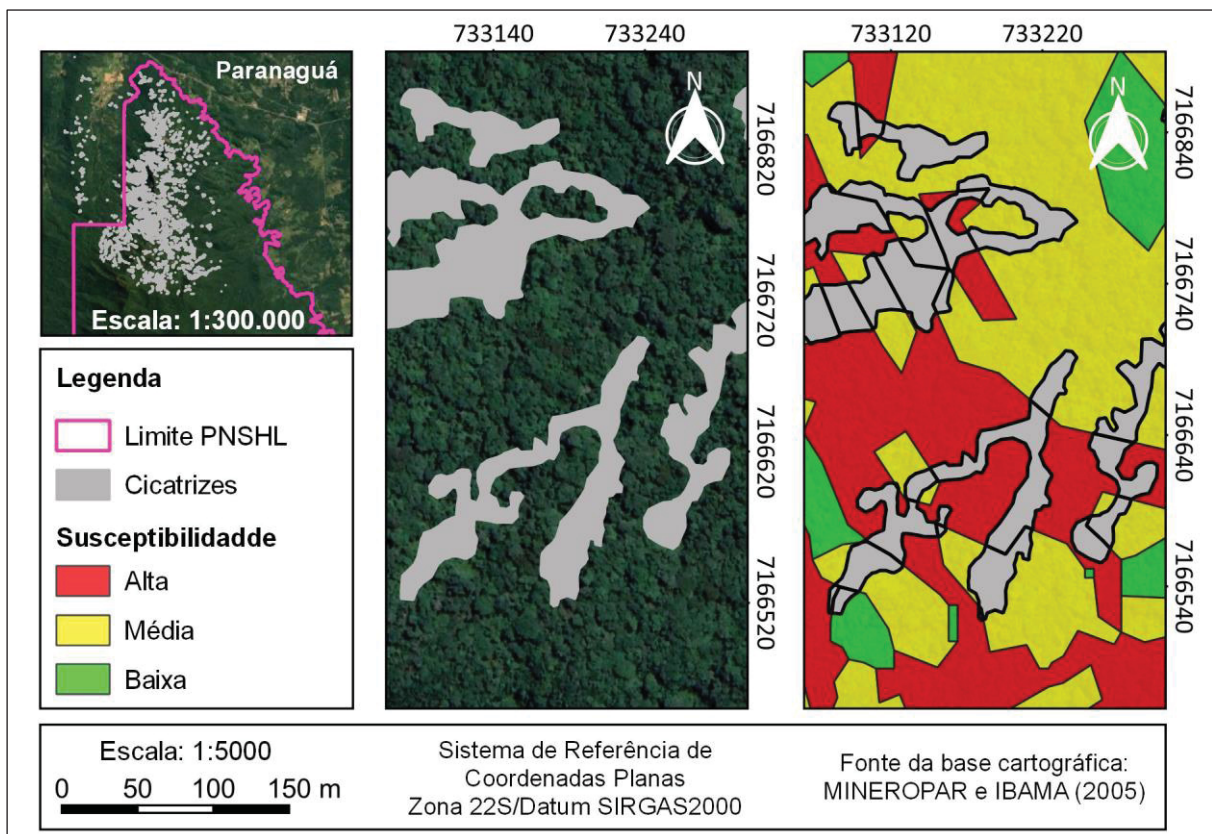
Em um segundo momento foi selecionado o mapa de susceptibilidade para movimentos gravitacionais de massa disponibilizado em formato digital, arquivos de extensão *shapefile*, pela MINEROPAR e IBAMA (2005). Em seguida, efetuou-se por intermédio do *software* livre QGIS a projeção das coordenadas das cicatrizes dos escorregamentos de Avelar (2016), e do mapa de susceptibilidade para o sistema de referência de coordenadas planas, zona 22S, datum SIRGAS2000.

Após conversão e unificação das coordenadas dos arquivos vetoriais, foi realizada a comparação entre as cicatrizes dos escorregamentos de Avelar (2016) com cada classe do mapa de susceptibilidade. O processo comparativo foi efetuado através da aplicação da ferramenta interseção do *software* QGIS, em que o programa identifica cada feição vetorial e a sua respectiva posição espacial, confrontando as camadas escolhidas pelo usuário e produzindo um único arquivo *shapefile* apenas com as áreas que se sobrepõem.

Ao aplicar a ferramenta interseção, as cicatrizes dos escorregamentos expressas pela interface de ruptura solo-rocha passaram a se encontrar segmentadas de acordo com a respectiva classe de susceptibilidade que estão situadas subjetivamente acima, conforme demonstrado na figura 10 a seguir.

Em seguida, as cicatrizes dos escorregamentos segmentadas foram classificadas, resultando na separação de cada fração do polígono da cicatriz e sua posterior associação à classe de susceptibilidade correspondente. Mediante a esta etapa, efetuou-se o cálculo da área total de todos os segmentos das cicatrizes no *software* QGIS, obtendo o valor da área em quilômetros quadrados da tabela 1 abaixo.

FIGURA 10 - CICATRIZES DOS ESCORREGAMENTOS SEGMENTADAS ATRAVÉS DO QGIS



FONTE: O autor (2021).

Por fim, ao fazer uso de outro recurso do *software* QGIS, denominado resumo estatístico, executou-se a soma da área total de todos os segmentos que compõem as cicatrizes dos escorregamentos já classificadas. Deste modo, aplicou-se a equação 4 ilustrada anteriormente, obtendo o respectivo grau de acerto para cada classe de susceptibilidade do mapa elaborado pela MINEROPAR e IBAMA (2005), sendo os resultados apurados em valores percentuais expressos na tabela 2.

4.1.6 Resultados

Durante o processo de cálculo do grau de acerto para o mapa de susceptibilidade foi obtido a área total, em quilômetros quadrados, dos segmentos das cicatrizes dos escorregamentos de cada classe de susceptibilidade. Os valores foram classificados como resultados preliminares e dispostos na tabela 1 abaixo.

TABELA 1 – RESULTADOS PRELIMINARES: ÁREA TOTAL DOS SEGMENTOS DAS CICATRIZES PARA CADA CLASSE DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE

Susceptibilidade	Área total dos segmentos das cicatrizes dos escorregamentos para cada classe
Alta	1981,81 km ²
Média	1666,42 km ²
Baixa	138,02 km ²

Ao somar a área das três classes de susceptibilidade, verificou-se a totalidade de 3786,25 km² de cicatrizes de escorregamentos situadas na área de estudo, representando aproximadamente 8% da área total de cerca de 4800 hectares da região norte do PNSHL.

Traduzindo os valores da tabela 1 em percentuais, obteve-se o grau de acerto para o estudo técnico da MINEROPAR e IBAMA (2005), exibidos na tabela 2 abaixo. Nota-se, ao reunir as classes de susceptibilidade alta e média, que o valor do grau de acerto total se eleva para 96,35%, existindo apenas 3,65% das cicatrizes dos escorregamentos deflagradas nas áreas de susceptibilidade baixa.

TABELA 2 - GRAU DE ACERTO PARA CADA CLASSE DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE

Susceptibilidade	Percentual das cicatrizes dos escorregamentos em cada classe
Alta	52,35%
Média	44,00%
Baixa	3,65%

4.1.7 Discussão

A seguir serão discutidos os principais pontos observados após a interpretação dos resultados encontrados, buscando trazer discussões relevantes e construtivas para o avanço dos estudos de predictabilidade para eventos perigosos, bem como dos métodos de análise de desempenho aplicados em modelos preditivos.

Os resultados relativos aos percentuais do grau de acerto, ao menos em termos probabilísticos, foram satisfatórios. Constatou-se que o total de 96,35% das cicatrizes dos escorregamentos, definidas pela zona de ruptura na interface solo-rocha da vertente, estavam situadas nas áreas classificadas em MINEROPAR e IBAMA (2005) como susceptibilidade alta e média. Por consequência, os locais com maior probabilidade para a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa foram realmente os mais atingidos pelo evento de março de 2011 na região norte do PNSHL.

Ainda que os resultados das classes de susceptibilidade sejam analisados individualmente, a classe alta representou 52,35% do total das cicatrizes dos escorregamentos no norte do PNSHL, refletindo a ocorrência de mais da metade dos movimentos gravitacionais de massa totais neste local do parque.

Logo, a experiência e capacidade técnica dos profissionais envolvidos neste mapeamento executado pela MINEROPAR e IBAMA (2005), também podem ser comprovadas ao detectar que apenas 3,65% dos escorregamentos aconteceram na classe de susceptibilidade baixa. Atendendo ao requisito básico para aplicação de um modelo preditivo heurístico.

Contudo, ao analisar separadamente o percentual das cicatrizes de escorregamentos da classe de susceptibilidade média, algumas discussões podem ser realizadas. Acredita-se que a criação de mais uma classe no mapa, a classe de susceptibilidade muito alta, permitiria uma maior divisão e readequação das áreas do parque inseridas na classe de susceptibilidade média. Assim, por exemplo, alguns locais do parque inseridos na classe de susceptibilidade alta passariam para a classe muito alta, gerando por consequência um rearranjo nas demais classes, e até possibilitaria um provável aumento na precisão do estudo.

Entretanto, é notório a complexidade do tema e a difícil execução de um prognóstico para eventos perigosos, a implementação de um monitoramento constante, em tempo real, de áreas propensas à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, certamente potencializaria a precisão de estudos e elaboração de prognósticos do tema.

Isto posto, neste exato momento um relevante questionamento deve ser aplicado. Se os resultados expressos pelo grau de acerto do estudo técnico elaborado pela MINEROPAR e IBAMA (2005) foram satisfatórios, ao menos em termos probabilísticos, por que o evento foi devastador para a região? Os municípios estavam preparados para fornecer uma resposta rápida a desastres deste tipo?

A resposta consiste na discussão de diversos pontos e nas respectivas atribuições de responsabilidades. Primeiramente, conforme observado nesta pesquisa até o momento, o mapa de susceptibilidade para movimentos gravitacionais de massa da MINEROPAR e IBAMA (2005) não é um estudo técnico de risco. Portanto, ao contrário de uma avaliação de risco, não foram apontados ou contabilizados os possíveis elementos expostos à ocorrência de eventos perigosos no PNSHL, como por exemplo as comunidades locais e ao seu entorno.

O estudo técnico, resumiu-se fundamentalmente na caracterização do meio físico do parque, passando por um detalhado processo de mapeamento e atualização das condições naturais existentes, visando o fornecimento de informações técnicas para a melhor gestão e manejo desta área de proteção ambiental.

Porém, Gomes (2006) define com essencial não apenas a previsibilidade dos deslizamentos, mas também a previsão do alcance e depósito das corridas de massa, que são a consequência de alguns tipos de fluxos gravitacionais. Para o autor, elas atingem zonas de baixos declives, muitas vezes classificadas como locais de baixo risco à ocorrência de movimentos de massa em estudos de predictabilidade.

Ainda assim, fica evidente que MINEROPAR e IBAMA (2005) forneceram aos gestores do parque e ao poder público um material técnico de qualidade, possibilitando que novos estudos pudessem ser conduzidos pela própria gerência do PNSHL ou pelos governantes responsáveis. Avançando nas questões dos riscos associados aos movimentos gravitacionais de massa, principalmente na identificação dos possíveis impactos, danos, e elementos potencialmente expostos.

Deste modo, apesar da existência do estudo anteriormente ao evento de março de 2011, alertando para a probabilidade e importante predisposição regional para o desencadeamento de movimentos gravitacionais de massa, os governantes e as autoridades locais não efetuaram ações mitigatórias, sequer trabalharam com medidas de resposta imediata para o caso de desastres deste tipo, como por exemplo: sistemas de alerta, simulações de evacuações, pontos de encontro seguros, preparação de locais para o recebimento de pessoas, dentre outros.

Este cenário demonstrou que os municípios da região não estavam preparados para a consolidação de desastres em razão de eventos perigosos desta natureza. O que foi a partir da ocorrência do evento trabalhado por intermédio da Defesa Civil do Estado do Paraná, que passou a atuar com maior presença e rigor no monitoramento das condições ambientais da região.

Destaca-se, por fim, que os resultados expressos pelo elevado grau de acerto do estudo técnico produzido pela MINEROPAR e IBAMA (2005) evidenciam a experiência e o amplo conhecimento dos profissionais desenvolvedores do trabalho, correspondendo a premissa fundamental para aplicação de um modelo preditivo heurístico. Da mesma forma, o avanço tecnológico na aquisição e geoprocessamento de informações remotas de alta qualidade, em conjunto com as atividades de campo realizadas, corroboraram para a boa performance do mapa de susceptibilidade.

Em concordância com o exposto, Zuquette (2018) enfatiza que a eficiência dos estudos de predictabilidade depende de muitos aspectos, principalmente da qualidade e quantidade dos dados disponíveis, conhecimento técnico dos profissionais envolvidos, tipos de eventos, escala espacial utilizada, dentre outros.

4.1.8 Conclusões

O estudo técnico de caracterização dos atributos do meio físico do PNSHL, em especial o mapa de susceptibilidade para movimentos gravitacionais de massa, elaborado pela MINEROPAR e IBAMA (2005), apresentou um grau de acerto satisfatório, ao menos em termos probabilísticos, resultando em 96,35% dos escorregamentos localizados nas classes de susceptibilidade alta e média, e apenas 3,65% na classe baixa.

Estes valores confirmam a experiência e o conhecimento técnico dos profissionais envolvidos no estudo, atendendo ao requisito fundamental para aplicação de um modelo preditivo heurístico definido pelos autores Barredo et al. (2000) e Nunes et al. (2016). Neste sentido, este tipo de abordagem efetuada pela MINEROPAR e IBAMA (2005) para a grande extensão territorial do PNSHL se demonstrou, em razão da escala aplicada, a mais adequada e correta, concordando com Van Westen (2000).

Entretanto, acredita-se que o estudo técnico da MINEROPAR e IBAMA (2005) poderia ter evoluído para uma análise de risco, identificando os prováveis impactos, danos e elementos potencialmente expostos a eventos perigosos desta natureza. Avançando ainda na simulação do trajeto das corridas de massa, e buscando prever o volume e tamanho de seus percursos. Contudo, ressalta-se que por um momento MINEROPAR e IBAMA (2005) cogitaram direcionar o estudo para contemplar alguma análise risco, porém após reuniões sem detalhes divulgados, foi considerado inviável.

Identificou-se igualmente uma oportunidade de melhoria, entende-se que a adição de mais uma classe no mapa de susceptibilidade para movimentos de massa, a classe muito alta, poderia contribuir para o aumento da precisão do estudo técnico e do próprio mapeamento. Proporcionando uma maior divisão das áreas que resultaria em uma maior facilidade na execução e interpretação de análises de desempenho.

Finalmente, a nova equação desenvolvida para análise de desempenho através do cálculo do grau de acerto para o mapa de susceptibilidade da MINEROPAR e IBAMA (2005), demonstrou-se pragmática e de grande aplicabilidade. Podendo ser utilizada, preferencialmente, no *software* livre QGIS, viabilizando sua execução por instituições públicas ou privadas com baixos recursos.

Considera-se, igualmente, que esta nova fórmula seguiu os princípios da proporcionalidade de área de Guimarães et al. (2003) e Huang e Kao (2006), porém substituindo o sistema de análise de *pixels* e células pela área total real das cicatrizes. Refletindo na forma ideal de apurar a precisão de um modelo preditivo de qualquer abordagem, determinística, heurística ou estatística.

4.1.9 Agradecimentos

O autor agradece a Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Laboratório de Estudos Costeiros (Lecost) da UFPR.

4.1.10 Referências

AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; CUNHA, C.; GONÇALVES, J. E. Eventos extremos de precipitação no litoral do Paraná (Baía de Paranaguá). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 563-575, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/wYCjXW4k39WGZKJ65rwqZjP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786354040>.

AVELAR, F. Classificação e quantificação dos escorregamentos ocorridos no dia 11 de março de 2011 na Serra do Mar Paranaense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 48, 2016. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 2016, p.1555-1555. Disponível em: <http://sbgeo.org.br>. Acesso em: 3 jul. 2019.

BARREDO, J. I.; BENAVIDES, A.; HERVÁS, J.; VAN WESTEN, C. J. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, n. 1, p. 9-23, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243400850229>. Acesso em: 3 ago. 2021. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85022-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85022-9).

BRASIL. **Lei nº 10.227, de 23 de maio de 2001**. Cria o Parque Nacional de Saint - Hilaire/Lange, no Estado do Paraná e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 maio. 2001. Seção 1, p.2.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. **Prevenção de riscos e deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais**. Brasília: Ministério das Cidades, Cities Alliance, 2006. 111 p. E-book. Disponível em: <https://www.crpsp.org/impresso/view/182>. Acesso em: 22 set. 2020.

COHEN J. A. Coefficient of agreement for nominal scales. **Journal of Educational and Measurement**, v. 20, n.1, p.37-46, 1960. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/001316446002000104>. Acesso em: 10 ago. 2021. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.

DA SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S. M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/366>. Acesso em: 20 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v15i1.366>.

DEFESA CIVIL DO ESTADO DO PARANÁ. Comunicação. **Relatório de ocorrências**. Curitiba, 2020. Disponível em: <http://www.defesacivil.pr.gov.br/#main-content>. Acesso em: 25 jul. 2020.

GOOGLE. **Google Earth Pro**, versão 7.3.3.7786. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/>.

GOMES, R. A. T. **Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa**. 180 f. Tese (Doutorado em Geografia) Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

GUIMARÃES, I. M. P. S.; CANEPARO, S. C. Identificação de áreas adequadas à implantação de infraestrutura arquitetônica através do uso do sistema de informação geográfica (SIG): estudo de caso - Parque Nacional Saint-Hilaire/Lange-Paraná. **Revista RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, v. 14, p. 67-83, 2007. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/8206>. Acesso em: 20 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v14i0.8206>.

GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; DE CARVALHO JÚNIOR, O. A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v. 69, n. 1-2, p. 99-108, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795202002636>. Acesso em: 2 ago. 2021. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00263-6).

GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; DE CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N.; FERNANDES, N. F. Análise temporal das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ) a partir de dados pluviométricos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 190-198, 2009. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7640/7067>. Acesso em: 3 fev. 2021.

HUANG, J. C.; KAO, S. J. Optimal estimator for assessing landslide model performance. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 10, n. 6, p. 957-965, 2006. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/articles/10/957/2006/>. Acesso em: 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.5194/hess-10-957-2006>.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. Brasília: ICMBio, mar. 2011. Fotografia área do Parque Nacional Saint Hilaire/Lange. Sem escala. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/portal/>. Acesso em: 10 out. 2021.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). **Portal do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/portal/>. Acesso em: 16 abril. 2021.

Instituto de Terras, Cartografia, e Geologia do Paraná (ITCG). **Mapa do clima do Estado do Paraná**. Curitiba: ITCG, 2008. Escala 1:50.000. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br>. Acesso em 16 abril. 2021.

KÖPPEN, W. Klassifikation der klima nach temperatur, niederschlag und jahreslauf. **Petermanns Geographische Mitteilungen**, Gotha, v. 64, p.193-203, 1918. Disponível em: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/koeppen.htm>. Acesso em: 20 abril. 2021.

LEE, S. Application and cross-validation of spatial logistic multiple regression for landslide susceptibility analysis. **Geosciences Journal**, v. 9, n. 63, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02910555>. Acesso em: 6 ago. 2021. <https://doi.org/10.1007/BF02910555>.

MARTINS, T. D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C.; BATEIRA, C. V. M.; MONTGOMERY, D. R. Avaliação de MDT na modelagem de instabilidade de vertentes. **Raega**, v. 41, p. 07-17, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/47607>. Acesso em: 7 out. 2021. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v41i0.47607>.

MINEROPAR (Serviço Geológico do Paraná); IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). **Mapeamento dos atributos do meio físico como subsídio à gestão de áreas protegidas: área piloto do Parque Nacional Saint Hilaire Lange – Litoral do Paraná**. Curitiba, 83 p., 2005. Relatório técnico.

MINOZZO, M. **Estudo probabilístico da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, no Município de Morretes (PR)**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/61392>. Acesso em 4 fev. 2021.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/93WR02979>. Acesso em: 1 set. 2021. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>.

MORESI, F.V.; MAESANO, M.; COLLALTI, A.; SIDLE, R. C.; MATTEUCCI, G.; MUGNOZZA, G. S. Mapping landslide prediction through a GIS-based model: a case study in a Catchment in Southern Italy. **Geosciences**, v. 10, n. 8: 309, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/10/8/309/>. Acesso em 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080309>.

NUNES, D. M.; COELHO, C. D.; SOUSA, A. B.; CALIJURI, M. L.; DOS SANTOS, A. P. Uso integrado do modelo SHALSTAB e análise multicritério para mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 9, 2016. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44447>. Acesso em 1 de ago. 2021.

OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION (OSGeo). **QGIS**, versão Standalone 3.16. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/index.html.

OTHMAN, A. N.; MOHD, W. M. N. W.; NORAINI, S. Accuracy assessment of landslide prediction models. In: International Symposium of the Digital Earth, 8, 2013, Malásia. **8th International Symposium of the Digital Earth (Conference Proceedings)**. IOP Series: Earth and Environmental Science. 2014. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/18/1/012078>. Acesso em: 1 ago. 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012078>.

SIEDLECKI, K. N.; PORTES, M. C. de O.; CIELO FILHO, R. Proposta de adequação dos limites do Parque Nacional Saint-Hilaire/Lange (Serra da Prata) - Estado do Paraná. In: SIMPÓSIO DE ÁREAS PROTEGIDAS - CONSERVAÇÃO NO ÂMBITO DO CONE SUL, 2, 2003. **Anais...** Pelotas: Universidade Católica de Pelotas – Rio Grande do Sul, 2003. p. 213-220.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP**. 240 f. Tese (Doutorado Geografia Física), Dep. de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-18102007-155204/pt-br.php>. Acesso em: 20 jun. 2020

VAN WESTEN, C. J. A the modeling of landslide hazards using GIS. **Surveys in Geophysics**, v. 21, p. 241-255, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1006794127521>. Acesso em: 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.1023/A:1006794127521>.

ZUQUETTE, L. V. **Riscos, desastres e eventos naturais perigosos: Aspectos conceituais na análise e estimativa de riscos.** 1 ed., v.1. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2018. 304 p.

4.2 ARTIGO 2: RESULTADO DA ANÁLISE DO PLANO DE REDUÇÃO DE RISCOS DO MUNICÍPIO DE NOVA FRIBURGO, RIO DE JANEIRO.

4.2.1 Resumo

Uma das medidas executadas pelo poder público visando a mitigação de impactos negativos em decorrência de eventos perigosos nas áreas urbanas, foi a elaboração de planos municipais de redução de riscos através da aplicação de modelos preditivos majoritariamente determinísticos, em que os assentamentos urbanos precários do município de Nova Friburgo, inserido na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, foram contemplados no ano de 2007. No entanto, quatro anos depois, em 2011, ocorreu a maior tragédia da cidade até o momento, em que movimentos gravitacionais de massa generalizados causaram a morte de centenas de habitantes e milhões de reais em danos materiais. Diante disso, observou-se uma oportunidade de realizar a análise de desempenho do Plano Municipal de Redução de Riscos de Nova Friburgo/RJ, elaborado pela CPRM e PMNF no ano de 2007. Para proceder com a avaliação do estudo foi desenvolvida uma nova equação para o cálculo do grau de acerto do mapa de setorização de risco para ocorrência de escorregamentos e solapamentos em margens de córregos e encostas, produto principal gerado neste Plano Municipal de Redução de Riscos de Nova Friburgo/RJ. Esta nova equação foi elaborada a partir de equações propostas anteriormente, mantendo uma relação direta de proporcionalidade de área ao confrontar, por intermédio do *software* livre QGIS, as zonas mapeadas dos assentamentos e suas respectivas classes de risco com as cicatrizes dos escorregamentos geradas durante o evento de 2011. Após o cálculo do grau de acerto, os valores apontaram para um resultado satisfatório, ao menos em termos probabilísticos, em que no mínimo 70% dos movimentos gravitacionais de massa ocorreram nos locais classificados previamente como risco muito alto e alto nos mapas. Entretanto, identificou-se a ausência de um prazo de validade para o Plano Municipal de Redução de Riscos de Nova Friburgo/RJ, podendo ser considerado um equívoco na produção deste estudo técnico. Cenário agravado em razão das constantes interações antrópicas que modificaram e continuam alterando as condições do meio físico local. Portanto, constatou-se que apenas do estudo técnico apresentar resultados satisfatórios, a Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro careceu de ações e políticas públicas preventivas, demonstrando uma falta de planejamento, gestão e recursos econômicos para o gerenciamento das suas áreas de risco.

Palavras-chave: Escorregamentos. Cicatrizes. Grau de acerto. Assentamentos urbanos precários. Planejamento territorial.

4.2.2 Introdução

O desenvolvimento e progresso de grande parte dos municípios brasileiros está diretamente associado ao crescimento populacional, gerando diversas demandas para o atendimento das necessidades desta população em expansão. Neste contexto, a ocupação de áreas indevidas, principalmente ao longo de encostas e margens de corpos hídricos constitui um grave problema para a sociedade. Dessa forma, as ações tomadas pelos governos municipais, estaduais e federais são na sua maioria em caráter de remediação, e não preventivas através de um planejamento territorial adequado e organizado.

Este contexto ficou notório no início do ano de 2011, marcado pela ocorrência de movimentos gravitacionais de massa altamente destrutivos na região sudeste do Brasil. Segundo Dourado, Arraes, e Silva (2012) nos dias 11/01/2011 e 12/01/2011 a Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro foi atingida por um dos maiores eventos de escorregamentos de encostas generalizados do Brasil (figura 11), ocasionando a morte de 947 pessoas e desabrigando dezenas de milhares de habitantes locais.

FIGURA 11 – FOTOGRAFIA AÉREA DE UM ASSENTAMENTO URBANO PRECÁRIO DE NOVA FRIBURGO/RJ, APÓS OCORRÊNCIA DO EVENTO DE JANEIRO DE 2011



FONTE: REIS; REUTERS; REVISTA VEJA (2011).

Para evitar novos desastres a execução de estudos e prognósticos para a ocorrência de escorregamentos nas vertentes, associado ao mapeamento de risco, torna-se um recurso fundamental capaz de fornecer importantes subsídios técnicos para a elaboração de um planejamento territorial adequado, zoneamentos, planos diretores, manejo, dentre outros aspectos relevantes na gestão ambiental e urbana (CARVALHO; GALVÃO, 2006; TOMINAGA, 2007; DA SILVEIRA et al., 2014).

Dentre os recursos atualmente empregados nesta temática, os modelos preditivos para movimentos gravitacionais de massa são uma importante ferramenta para definição de áreas predispostas a deslizamentos rasos, facilitando o emprego de ações preventivas e de medidas mitigatórias (MORESI et al., 2020).

Em razão disso, quatro anos antes do desastre, em 2007, uma iniciativa do Ministério das Cidades em conjunto com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e prefeituras municipais, utilizando-se de recursos federais, promoveu a elaboração de diversos planos municipais de redução de risco (PMRR) ao longo de zonas urbanas com maior grau de vulnerabilidade no território nacional (CPRM; PMNF, 2007).

Estes estudos que tiveram como objetivo identificar e mapear os riscos associados à ocorrência de escorregamentos e solapamentos em margens de córregos e encostas, utilizaram modelos de estabilidade de taludes juntamente com a avaliação de profissionais *in situ* para alguns aspectos associados às intervenções antrópicas nos assentamentos, caracterizando uma abordagem determinística e heurística para montagem de seu estudo técnico preditivo (CPRM; PMNF, 2007).

Deste modo, o município de Nova Friburgo foi contemplado neste programa para realização de um prognóstico de dez assentamentos urbanos precários. O resultado deste levantamento de dados sucedido entre o período de maio de 2006 e junho de 2007, proporcionou a geração de um mapa com setorização de risco e informações técnicas para o gerenciamento e tomada de ações pelo poder público municipal em cada um dos assentamentos (CPRM; PMNF, 2007).

Contudo, a produção de trabalhos científicos e técnicos deve acompanhar posteriormente análises de desempenho para os modelos preditivos empregados, assegurando e elevando a performance dos estudos desenvolvidos. Segundo Huang e Kao (2006), este processo avaliativo pode ser realizado através da comparação dos mapas gerados previamente a ocorrência do evento perigoso, com o mapeamento dos deslizamentos reais. Necessitando, igualmente, da criação de um indicador ou fórmula para cálculo da eficiência de um modelo preditivo.

Neste sentido, este artigo tem como objetivo calcular e analisar o grau de acerto do PMRR de Nova Friburgo, a partir da aplicação de uma nova equação desenvolvida nesta pesquisa, para os três assentamentos urbanos precários mais atingidos pelo evento perigoso de janeiro de 2011: Floresta/Alto Floresta, Lazareto e Village. Efetuando, por intermédio do *software* livre QGIS, a comparação do mapa de setorização de riscos produzido pela CPRM e PMNF (2007), com as cicatrizes dos escorregamentos geradas após o incidente.

Por fim, serão promovidas discussões com base nos resultados obtidos e a respeito do modo com que as prefeituras municipais enfrentam a problemática. Acredita-se que a discussão deste tema é essencial para a evolução dos estudos de predictabilidade, aperfeiçoamento dos modelos preditivos empregados, bem como melhor prognóstico das áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa, inclusive para a implementação de planejamentos territoriais adequados.

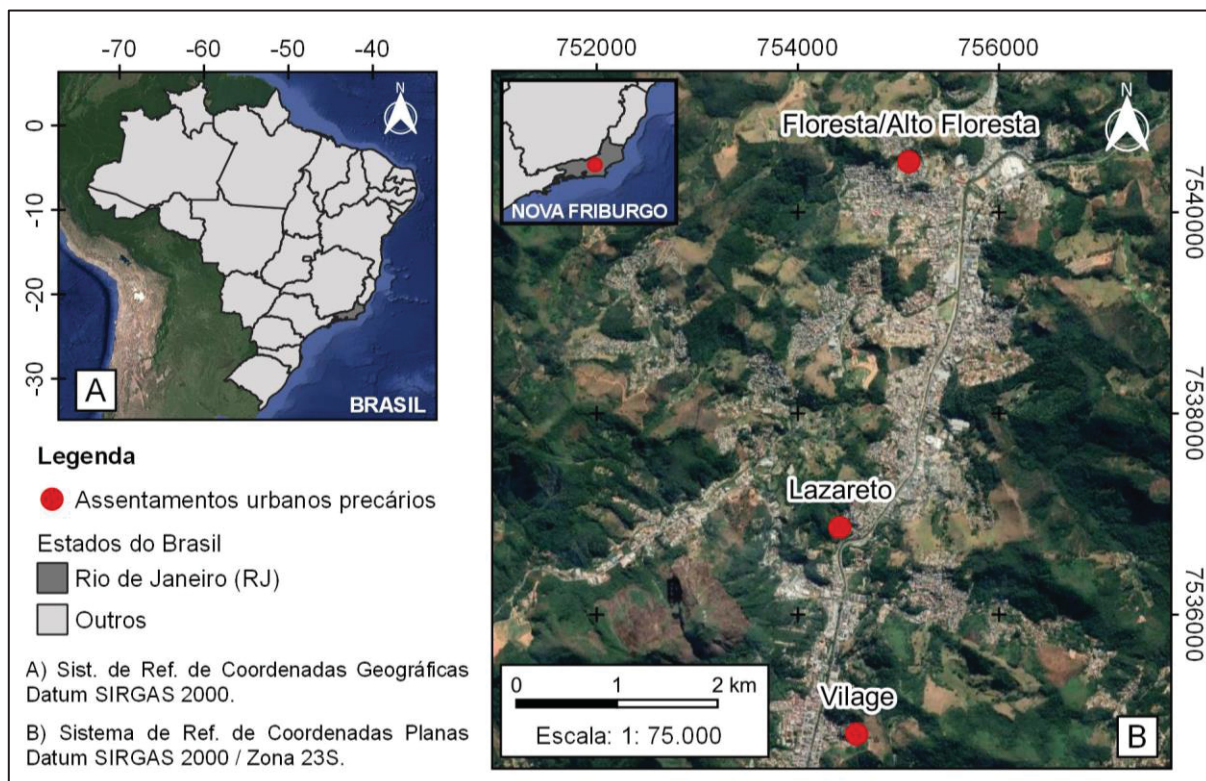
4.2.3 Área de estudo

O município de Nova Friburgo está situado na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, estando os três assentamentos urbanos precários analisados nesta pesquisa localizados nas periferias da cidade, sendo constituídos sobre a superfície inclinada de encostas distribuídas nas regiões sul, centro e norte (figura 12).

A cidade de Nova Friburgo foi constituída sobre um imponente sistema de montanhas denominado Serra do Mar, pertencendo à unidade geomorfológica da Serra dos Órgãos. Essa unidade compreende superfícies rochosas com solos muito rasos, além de um estreito planalto elevado cercado por diversas escarpas subverticais com coberturas florestais (DANTAS, 2000). Por sua vez, a Serra do Mar pode ser representada por um conjunto de escarpas festonadas com cerca de mil quilômetros de extensão. Ela compreende desde o norte do Estado de Santa Catarina até o Estado do Rio de Janeiro, apresentando diversas feições imponentes com topos angulosos e estruturas geológicas associadas (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998).

A origem desta cadeia de montanhas promove ainda algumas discussões, mas existem inicialmente autores que atribuíram sua gênese a processos tectônicos com movimentações verticais ocorridas durante o período Cenozoico, resultando em um complexo sistema de falhas que denota uma das mais notáveis topografias marginais do continente sul-americano (ALMEIDA, 1975; ASMUS; FERRARI, 1978).

FIGURA 12 – LOCALIZAÇÃO DOS ASSENTAMENTOS URBANOS PRECÁRIOS SELECIONADOS DE NOVA FRIBURGO, RIO DE JANEIRO



FONTE: O autor (2021).

O relevo acentuado da Serra do Mar também proporciona condições ideais para a deflagração de movimentos gravitacionais de massa por intermédio de grandes descargas hidráulicas. A existência de um complexo de rochas pré-cambrianas metamorizadas, associadas a um clima tropical úmido, geram espessos mantos de alteração e depósitos de vertentes ou tálus (GUIMARÃES et al. 2009).

Estas características submetidas à condição climática regional resultam em períodos de altos e intensos índices pluviométricos, elevando a média anual de chuvas. Este cenário é então favorável aos escorregamentos e movimentações de solo e rochas, aproveitando-se das geometrias das vertentes e dos processos erosivos naturais, favorecidos ainda por uma densa presença de discontinuidades geológicas que ocorrem ao longo da Serra do Mar (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998).

Pinho, Francisco e Salgado (2013) analisaram os registros dos índices pluviométricos na estação meteorológica de Nova Friburgo gerenciada pelo INMET. Os autores constataram que as normais climatológicas foram estabelecidas com base em dados pluviométricos do período de 1961 a 1990, apontando uma precipitação média anual de 1279,8 mm. As maiores médias mensais se encontram em dezembro e janeiro, próximas aos 220 e 230 mm de precipitação respectivamente.

Entre 11 e 12 de janeiro de 2011, data do desastre em Nova Friburgo, o posto pluviométrico de Vargem Grande no sul do município registrou o acumulado de 183 mm de chuva em apenas 24 horas. Anteriormente ao evento, a precipitação registrada foi superior a 430 mm em dezembro, e cerca de 250 mm do início de janeiro até o dia da ocorrência dos movimentos gravitacionais de massa, totalizando mais de 680 mm de chuva para um período de 63 dias (PINHO; FRANCISCO; SALGADO, 2013).

Contudo, ressalta-se que Ottero, Chargel e Hora (2018) ao realizarem uma análise aprofundada da frequência dos dados pluviométricos registrados neste desastre de 2011, juntamente com outros eventos ocorridos na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro em 2013, concluíram que o agravamento de um desastre não está associado unicamente ao volume total precipitado, mas também as características do relevo local, a umidade do solo, urbanização das áreas de risco, bem como existência ou não de zonas de possível reativação dos escorregamentos.

Desta forma, compreendendo com maior detalhe a história do município de Nova Friburgo, observou-se que inicialmente o seu processo de urbanização ocorreu em maiores concentrações ao decorrer das planícies de inundação do principal corpo hídrico do município, o Rio Bengalas, estendendo-se posteriormente para as áreas ao entorno de seus afluentes. Porém, o avanço do número de habitantes, incentivado pelo estabelecimento de um importante polo industrial ao final da década de 60 na cidade, promoveu a maciça ocupação urbana das encostas de menor valor de declividade, e logo em seguida o crescimento desordenado atingiu as regiões mais íngremes e instáveis (CPRM; PMNF, 2007).

Neste contexto, os assentamentos urbanos precários Floresta/Alto Floresta, Lazareto e Village foram construídos. Eles se estabeleceram em encostas com morfologia de anfiteatro, caracterizando-se pela existência de duas estruturas litológicas e uma drenagem central que concentra todo o escoamento superficial do terreno, contemplando ainda solos geotecnicaamente instáveis, constituídos por depósitos coluvionares e de tálus. Interferindo, portanto, diretamente nas condições de estabilidade em um ambiente já naturalmente sensível (CPRM; PMNF, 2007).

Após a instalação dos assentamentos outros fatores antrópicos passam a acelerar os processos geradores de instabilidades nas encostas. Dentre eles, destacam-se a inexistência de sistemas adequados para o esgotamento sanitário, causando inúmeras infiltrações de águas residuais no solo, resíduos sólidos dispostos irregularmente, e arruamento caótico para o acesso local (CPRM; PMNF, 2007).

Este cenário, agravado pelas enormes dificuldades para a organização estrutural e desenvolvimento urbano do município, não é exclusivo de Nova Friburgo. A ausência de gestão de risco, que pode ser parcialmente solucionada através do planejamento territorial, é uma realidade brasileira (TOMINAGA, 2007).

4.2.4 O Plano Municipal de Redução de Riscos de Nova Friburgo/RJ

O PMRR de Nova Friburgo, Rio de Janeiro, elaborado pela CPRM e PMNF (2007) a partir de dados levantados, inicialmente, pela Coordenadoria Municipal de Defesa Civil (COMDEC) em 2003, procurou proporcionar ao poder público municipal uma ampla base de dados técnicos quanto ao prognóstico de risco de solapamentos de margens de córregos, e escorregamentos de encostas em dez assentamentos urbanos precários do município.

Os aspectos contemplados pela CPRM e PMNF (2007) seguiram as diretrizes básicas da *United Nations Disaster Relief Office* para elaboração de avaliações de risco, são elas: conhecimento dos problemas existentes, identificação e análise dos riscos, planejamento e promoção de ações para mitigar os riscos, monitoramento permanente das áreas, e disseminação da informação através da capacitação da comunidade local (UNDRO, 1991).

Deste modo, agregando o conceito base definido por Carvalho e Galvão (2006), em que os autores conceituaram risco através das variáveis expressas na equação (3) a seguir, CPRM e PMNF (2007) desenvolveram o PMRR de Nova Friburgo, Rio de Janeiro.

$$R = P \left(\int A \right) \times C \left(\int V \right) \times g^{-1} \quad (3)$$

onde:

R = risco

P = probabilidade

A = perigo ou ameaça

C = consequências

V = vulnerabilidade

g = grau de gerenciamento

A partir da união entre as diretrizes para avaliações de risco da UNDRO (1991), e do conceito de Carvalho e Galvão (2006), os assentamentos urbanos precários foram reavaliados no ano de 2007 através do levantamento de dados sobre o meio físico de cada local. Neste novo levantamento realizado foram utilizadas fotografias aéreas, imagens de satélite, bem como identificados os processos de instabilidade passados ou em curso, como o que atingiu Nova Friburgo entre o final de 2006 e início do ano de 2007. Todos estes dados interpretados foram agrupados em um SIG, possibilitando a definição dos locais de cada assentamento para uma abordagem mais precisa em campo (CPRM; PMNF, 2007).

Posteriormente, CPRM e PMNF (2007) aplicaram alguns modelos de estabilidade para as vertentes, configurando o emprego de uma abordagem determinística ao utilizar *softwares* que fazem parte deste contexto para o cálculo do fator de segurança de taludes. Contudo, ressalta-se que os autores não citaram com maior detalhe a origem e escala das fotografias aéreas ou imagens de satélite utilizadas, assim como não existem informações sobre os modelos de instabilidade empregados no decorrer do desenvolvimento do PMRR.

Outro tipo de avaliação realizada durante o desenvolvimento do PMRR foi por intermédio da elaboração e aplicação de fichas descritivas de campo para levantamento de diversos aspectos *in situ* como: presença de resíduos sólidos nas encostas, distanciamento das residências, trincas nas moradias, inclinação de árvores, postes ou muros, vazamentos de canos, existência de tanques sépticos, dentre outros itens (CPRM; PMNF, 2007).

Diante disso, os profissionais técnicos envolvidos puderam analisar com maior detalhe e rigor as condições naturais e intervenções antrópicas ao longo de cada assentamento urbano precário, auxiliando na posterior classificação do respectivo setor de risco (CPRM; PMNF, 2007). Entretanto este procedimento adotado, segundo Barredo et al. (2000) e Nunes et al. (2016), indica que os autores do PMRR de Nova Friburgo complementaram o desenvolvimento do estudo técnico através de uma abordagem heurística.

Os modelos preditivos heurísticos partem essencialmente da opinião e avaliação de especialistas, geralmente se utilizando de métodos de mapeamento diretos ou indiretos para a avaliação dos fatores geradores de instabilidades, e definição do respectivo risco associado a ocorrência de escorregamentos ao longo das vertentes (BARREDO et al., 2000; NUNES et al., 2016; VAN WESTEN, 2000).

Ainda sobre os procedimentos adotados pela CPRM e PMNF (2007) para o desenvolvimento do PMRR de Nova Friburgo, destaca-se que os autores desconsideraram os impactos ou danos gerados em decorrência de eventos pluviométricos excepcionais, considerando apenas chuvas sazonais em sua avaliação de risco. Esta definição ocorreu em razão do limite orçamentário para a implementação de intervenções estruturais capazes de mitigar danos provocados por eventos perigosos desencadeados por índices pluviométricos atípicos, que necessitariam de obras altamente onerosas e inviáveis para a realidade econômica de Nova Friburgo.

Após a análise de todos estes fatores considerados e adotados para a elaboração do PMRR, juntamente com o geoprocessamento dos dados através de um SIG, CPRM e PMNF (2007), considerando principalmente as condicionantes geológicas, geotécnicas, pedológicas, e o nível de intervenção antrópica no setor, classificaram mediante um mapa de setorização de risco para escorregamentos e solapamentos de margens de córregos e encostas, cada assentamento urbano precário em quatro classes distintas (figura 3): risco baixo (R1), risco médio (R2), risco alto (R3) e risco muito alto (R4), (CPRM; PMNF, 2007).

Por fim, em uma fase final do PMRR, os autores elaboraram e sugeriram uma série de intervenções estruturais para cada assentamento urbano precário, valorando cada obra. Sugeriu-se, inclusive, a remoção de moradias quando necessário, sendo de responsabilidade integral da Prefeitura Municipal de Nova Friburgo a efetivação desta recomendação (CPRM; PMNF, 2007).

4.2.5 Materiais e métodos

Conforme mencionado no início do presente artigo, a produção de trabalhos científicos ou técnicos de predictabilidade para ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, são tanto importantes quanto as posteriores análises de desempenho executadas para avaliação dos modelos preditivos empregados.

Deste modo, destaca-se que independentemente do modelo preditivo aplicado em um estudo, o método de análise de desempenho utiliza as cicatrizes de escorregamentos em comparação com os mapas gerados a partir dos respectivos modelos preditivos empregados. Isto pode ser observado em Guimarães et al. (2003), Huang e Kao (2006), Guimarães et al. (2009) e Othman, Mohd e Noraini (2014).

Partindo desta premissa, a partir dos métodos de cálculo para avaliação da performance de modelos preditos para escorregamentos rasos de Guimarães et al. (2003), expresso pela equação 1, e de Huang e Kao (2006) ilustrado pelas equações 2 e 3, foi desenvolvida uma nova fórmula (equação 5) para validação nesta pesquisa, proporcionando o cálculo em percentual do grau de acerto.

A equação 1 abaixo aplicada por Guimarães et al. (2003) definiu um índice de ajuste de modelo (FI) para a análise do desempenho de modelos preditivos, utilizando-se da proporcionalidade de área. Este índice foi obtido através da razão entre o número de *pixels* que ocorrem tanto em uma cicatriz de escorregamento quanto nas áreas definidas pelo modelo como potencialmente instáveis (PMS), pelo número total de *pixels* que ocorrem dentro da área das cicatrizes dos deslizamentos (PS).

$$FI = \frac{PMS}{PS} \quad (1)$$

Quanto as equações 2 e 3 de Huang e Kao (2006), equivalem a outro método similar a Guimarães et al. (2003) para análise da performance de um modelo preditivo, sendo denominado *success rate* (ST). Neste caso, os autores utilizaram basicamente a comparação das predições de um modelo com o cenário após ocorrência de um evento. Este método teve como origem os estudos de Montgomery e Dietrich (1994), e desde então está sendo utilizado e adaptado de acordo com a perspectiva de cada autor (por exemplo: LEE, 2005).

$$SR = \frac{\text{number of sucessfully predicted landslides}}{\text{total number of actual landslides}} \quad (2)$$

No entanto, segundo Huang e Kao (2006), a equação 2 não contempla a análise de sucesso dos locais definidos pelos modelos preditivos como estáveis, considerando apenas a análise das regiões instáveis. Deste modo, objetivando corrigir este erro através da aplicação do *coefficient kappa* (Cohen, 1960), um método de análise estatística, os autores realizaram algumas modificações na fórmula para cálculo da *success rate* (SR), acrescentando alguns índices de correções e passando a utilizar células (uma grade de divisão dos mapas resultantes dos modelos preditivos de 20 x 20 metros) em suas análises de desempenho.

Em decorrência disso, a SR foi modificada e definida como *modified success rate* (MSR), podendo ser obtida através da equação (3) a seguir:

$$MSR = 0.5 \times SR + 0.5 \times \frac{\text{sucessfully predicted stable cells}}{\text{total number of actual stable cells}} \quad (3)$$

Isto posto, analisando as equações 1, 2 e 3 e buscando aplicabilidade para o estudo da CPRM e PMNF (2007), optou-se pela criação de uma nova equação para o cálculo do grau de acerto nesta pesquisa, a equação 5. Nesta nova fórmula os princípios da proporcionalidade de área de Guimarães et al. (2003) e Huang e Kao (2006) foram mantidos, porém sendo substituído o sistema de análise de *pixels* e células pela área total real das cicatrizes.

$$\text{Grau de acerto (\%)} = \frac{\text{área total dos segmentos para uma classe (km}^2\text{)}}{\text{área total das cicatrizes (km}^2\text{)}} \times 100 \quad (5)$$

Acredita-se que a avaliação exclusiva das áreas com cicatrizes de escorregamentos em associação com a respectiva classe de susceptibilidade seja a forma ideal de apurar a precisão de um modelo preditivo determinístico, heurístico ou estatístico. Da mesma forma, outro fator que influenciou o desenvolvimento de uma nova equação foi a simplificação do geoprocessamento de dados, que ao utilizar os polígonos das cicatrizes expressando a sua área real, estabelecida pela interface de ruptura solo-rocha, proporciona operar unicamente arquivos vetoriais. Possibilitando o processamento em computadores comuns e *softwares* menos robustos.

Ao contrário, o método de Guimarães et al. (2003) utilizada arquivos matriciais (raster), processando *pixels*. Da mesma forma, o método de Huang e Kao (2006) necessita da definição e emprego de células de 20 x 20 metros, resultando em uma demanda e capacidade de processamento de dados maior.

Partindo do estabelecimento da nova fórmula a ser aplicada para a análise de desempenho por intermédio do cálculo do grau de acerto, foram estabelecidas duas etapas principais para execução da metodologia estabelecida conforme figura 4, são elas: aquisição e preparação dos dados, e cruzamento e processamento dos arquivos *shapefile*. Ambas realizadas principalmente com o auxílio do *software* livre QGIS.

Iniciando o processo de aquisição e preparação dos dados, foi realizada uma análise prévia de diversas imagens de satélite, por intermédio do *software* Google Earth, referentes aos dez assentamentos urbanos precários contemplados no PMRR de Nova Friburgo/RJ. Estas imagens de satélite correspondem aos registros do dia 19/01/2011, cerca de uma semana após o evento que atingiu toda a Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, sendo disponibilizadas gratuitamente pela empresa privada americana Maxar Technologies.

Até a presente data do registro das imagens de satélite, a Maxar Technologies possuía ao menos dois satélites em órbita com imagem multiespectral (MS) que poderiam ter efetuado o registro na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro: *geoeye-1*, lançado em 06/09/2008; e *worldview-2*, lançado em 08/10/2009. Segundo Globalgeo Geotecnologias (2021), distribuidora autorizada da Maxar Technologies no Brasil desde 2010, ambos os satélites possuem resolução espacial de até 40 centímetros, imagem pancromática, e capacidade de aquisição de imagens estéreo. No entanto, eles se diferenciam pela existência de 8 bandas multiespectrais no satélite *worldview-2*, e apenas 4 bandas multiespectrais no satélite *geoeye-1*.

Deste modo, após uma breve análise dos dez assentamentos urbanos precários contemplados no PMRR de Nova Friburgo, utilizando estas imagens de satélite posteriores ao evento de janeiro de 2011, foram selecionados apenas os três assentamentos mais afetados pelos movimentos gravitacionais de massa generalizados: Floresta/Alto Floresta, Lazareto e Village (figura 3).

Em paralelo, foram obtidos junto ao banco de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) os respectivos mapas de setorização de risco para escorregamentos e solapamentos de margens de córregos e encostas, produzidos pela CPRM e PMNF (2007), para cada assentamento urbano precário selecionado nesta pesquisa.

Anteriormente ao início do processo de identificação e vetorização das cicatrizes dos escorregamentos, foi efetuado através do *software* livre QGIS o georreferenciamento das imagens de satélite para os três assentamentos selecionados e para os respectivos mapas de setorização de risco elaborados pela CPRM e PMNF (2007). O procedimento utilizou 8 pontos de controle ou de amarração; tipo de transformação do QGIS: polinomial 1; e método de reamostragem vizinho mais próximo. A taxa de erro residual, calculada automaticamente pelo programa para determinar a eficiência do georreferenciamento, ficou abaixo de 1 pixel para ambos os dados de entrada, atendendo aos padrões de qualidade definidos pelos usuários.

O georreferenciamento de ambos arquivos resultou na adoção do sistema de referência de coordenadas planas, zona 23S, datum SIRGAS2000, expresso pelo código EPSG 31983 - nomenclatura adotada pelo *European Petroleum Survey Group* para padronizar os sistemas de referência de coordenadas.

Finalizado o processo descrito anteriormente, foi efetuada a identificação e vetorização das cicatrizes dos escorregamentos de cada assentamento urbano precário, utilizando no *software* QGIS as imagens georreferenciadas do dia 19/01/2011. Para a execução deste procedimento foi empregado o auxílio do recurso de visualização em 3D para o terreno do *software* Google Earth (figura 5), aplicando variações de exagero vertical em até 3 vezes, permitindo uma melhor definição dos limites das cicatrizes dos escorregamentos nas encostas.

Outro recurso do *software* Google Earth utilizado foi o histórico de imagens de satélite, possibilitando diversas comparações ao longo da linha temporal do programa. Deste modo, imagens de satélite do período anterior ao evento de janeiro de 2011, assim como dos meses posteriores (maio e junho de 2011) foram avaliadas.

Estas técnicas permitem identificar com precisão a interface de ruptura entre o solo e a rocha, proporcionando maior segurança no traçado dos limites das cicatrizes dos escorregamentos ao longo das vertentes. Ressalta-se, conforme figura 6, que as corridas de massa não foram consideradas como partes integrantes destas feições.

Em seguida, conforme figura 7, o procedimento de vetorização dos mapas de setorização de risco para os assentamentos Floresta/Alto Floresta, Lazareto e Village também foi efetuado, delimitando os respectivos polígonos dos setores de risco muito alto, alto, médio e baixo estabelecidos pela CPRM e PMNF (2007).

Após o término da vetorização das cicatrizes dos escorregamentos e dos mapas de setorização de risco para cada assentamento, viabilizou-se a realização da segunda etapa principal empregada nesta metodologia, o cruzamento e processamento dos dados mediante a comparação entre a incidência das cicatrizes com cada classe de risco definida previamente no PMRR de Nova Friburgo.

O cruzamento dos dados foi efetuado através da aplicação da ferramenta interseção, nativa do *software* QGIS. Neste recurso o programa identificou cada feição vetorial e a sua respectiva posição espacial, confrontando automaticamente as cicatrizes dos escorregamentos e os respectivos mapas de setorização de risco para cada assentamento, produzindo um único arquivo *shapefile* apenas com as áreas que se sobrepõem.

Deste modo, as cicatrizes dos escorregamentos passaram a se encontrar segmentadas de acordo com o respectivo setor de risco que estavam situadas subjetivamente acima, conforme ilustrado na figura 7. Estas cicatrizes de escorregamentos segmentadas foram posteriormente classificadas, o que representa na prática a separação de cada fração do polígono da cicatriz e sua posterior associação ao setor de risco correspondente.

Avançando em outro processo, ao utilizar o recurso calculadora de campo, igualmente nativo do *software* QGIS, efetuou-se o cálculo da área total de todos os segmentos das cicatrizes dos escorregamentos, obtendo o valor da área em quilômetros quadrados conforme tabela 4 a seguir.

Por fim, ao fazer uso de outro recurso deste mesmo programa, denominado resumo estatístico, executou-se a soma da área total de todos os segmentos que compõem as cicatrizes dos escorregamentos já classificadas. Assim, viabilizou-se a aplicação da equação 5 anteriormente desenvolvida, possibilitando a obtenção do grau de acerto para os mapas de setorização dos riscos de cada assentamento urbano precário selecionado. Os resultados em valores percentuais foram expressos na tabela 5 abaixo.

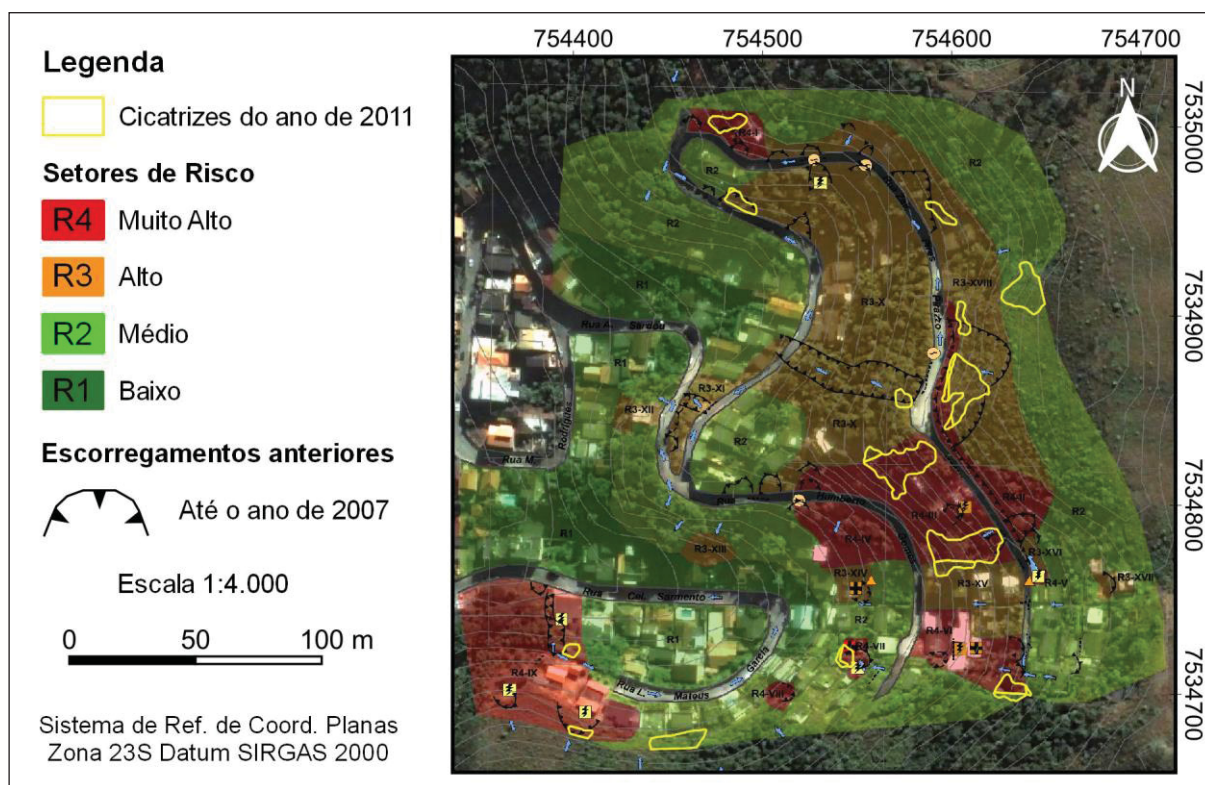
4.2.5.1 Análise secundária: reativação de escorregamentos

Outro processo efetuado a partir da metodologia empregada, considerado fundamental em estudos desta natureza conforme Zuquette (2018), trata-se da avaliação dos escorregamentos reativados, ou zonas com recorrência de movimentações de terreno.

Este dado foi interpretado e será apresentado no presente artigo como um resultado secundário, demonstrando o valor em percentual dos movimentos gravitacionais de massa gerados sobre os locais com registros anteriores de escorregamentos até a data da elaboração do PMRR de Nova Friburgo, em 2007.

Para a obtenção deste percentual de escorregamentos reativados no evento de 2011, executou-se a contabilização do número total das cicatrizes dos escorregamentos geradas durante o desastre de 2011, comparando, posteriormente, com a demarcação das áreas que já haviam colapsado anteriormente nos mapas de risco da CPRM e PMNF (2007), conforme ilustrado na figura 13 a seguir. Os resultados se encontram dispostos na tabela 6.

FIGURA 13 – MAPA PARA OBSERVAÇÃO DOS MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA REATIVADOS: SOBREPOSIÇÃO DAS CICATRIZES DOS ESCORREGAMENTOS DE 2011 COM O MAPA DE SETORIZAÇÃO DE RISCO, ASSENTAMENTO VILAGE



FONTE: Adaptada de CPRM e PMNF (2007).

4.2.6 Resultados

Durante o processo de cálculo do grau de acerto para o PMRR de Nova Friburgo, foi obtido a área total, em quilômetros quadrados, de todos os segmentos das cicatrizes dos escorregamentos de cada setor de risco. Estes valores foram classificados como resultados preliminares, sendo dispostos na tabela 3 abaixo.

TABELA 3 - ÁREA TOTAL DAS CICATRIZES EM CADA ASSENTAMENTO URBANO PRECÁRIO

Assentamento	Área total de cicatrizes dos escorregamentos
Floresta/alto floresta	4,29 km ²
Lazareto	1,72 km ²
Village	3 km ²

Ao separar estes segmentos (polígonos) de acordo com os respectivos setores de risco, foi possível estabelecer o valor da área total de cicatrizes dos escorregamentos para cada classe. Os valores foram expressos na tabela 4 abaixo.

TABELA 4 - ÁREA TOTAL DOS SEGMENTOS DAS CICATRIZES EM CADA SETOR DE RISCO

Setor de risco/Assentamento	Floresta/alto floresta	Lazareto	Village
Risco muito alto	1,17 km ²	0,75 km ²	1,46 km ²
Risco alto	1,85 km ²	0,68 km ²	0,84 km ²
Risco médio	1,27 km ²	0,14 km ²	0,70 km ²
Risco baixo	Zero	0,15 km ²	Zero

Após os resultados e dados preliminares exibidos, o grau de acerto do PMRR de Nova Friburgo, que consiste no principal resultado desta pesquisa, foi exibido na tabela 5 a seguir.

TABELA 5 - GRAU DE ACERTO DE CADA SETOR DE RISCO POR ASSENTAMENTO

Setor de risco/Assentamento	Floresta/alto floresta	Lazareto	Village
Risco muito alto	27,27%	43,61%	48,67%
Risco alto	43,22%	39,53%	28%
Risco médio	29,51%	8,14%	23,33%
Risco baixo	0%	8,72%	0%

Ao analisar os índices de acertos do PMRR de Nova Friburgo, verifica-se que o assentamento Lazareto obteve um grau de acerto de 83,14% referente à soma dos escorregamentos ocorridos nas áreas predeterminadas em mapeamento como risco muito alto e alto, seguido, respectivamente, por 76,67% e 70,49% dos assentamentos Village e Floresta/Alto Floresta.

O valor mínimo do grau de acerto obtido para a soma das áreas com maior potencial para ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, representadas pelas classes de risco muito alto e alto, conforme CPRM e PMNF (2007), não foi inferior a 70%.

4.2.6.1 Resultados secundários: reativação de escorregamentos

Na tabela 6 abaixo foram apresentados para cada assentamento urbano precário o percentual total das cicatrizes de escorregamentos situadas sobre os registros de movimentos gravitacionais de massa anteriores, datados até o período do levantamento dos dados para elaboração do PMRR em 2007. Da mesma forma, também foram contempladas na tabela 6 as cicatrizes desencadeadas pela primeira vez em decorrência do evento de janeiro de 2011.

TABELA 6 - PERCENTUAL DOS ESCORREGAMENTOS REATIVADOS NO EVENTO DE 2011

Tipo de escorregamento/Assentamento	Floresta/alto floresta	Lazareto	Village
Escorregamentos reativados	23%	50%	71%
Escorregamentos novos	77%	50%	29%

Os assentamentos Floresta/Alto Floresta e Lazareto concentraram em novos locais 77% e 50%, respectivamente, das cicatrizes dos escorregamentos de 2011. O assentamento Village obteve um resultado inferior, cerca de 29% das movimentações gravitacionais de massa ocorrerem em novas áreas, e 71% podem ser associadas à reativação de escorregamentos.

Ressalta-se que existiu uma variação natural na dimensão total das cicatrizes dos escorregamentos de 2007 em relação as provenientes do evento de 2011. Este fato se deve justamente em decorrência das características de cada evento e da resposta do meio físico para cada um deles.

4.2.7 Discussões

Em termos probabilísticos, os resultados relativos aos percentuais do grau de acerto foram satisfatórios. Constatou-se que no mínimo 70% das cicatrizes dos escorregamentos generalizados de 2011 estavam localizadas nas áreas mapeadas e classificadas como risco muito alto e alto. Portanto, os locais com maior risco para a ocorrência de escorregamentos nas vertentes e solapamento de margens de córregos, foram efetivamente os mais atingidos.

Entretanto, a validade do PMRR de Nova Friburgo, que retrata o período em que os setores de risco permanecerão em acordo com a realidade encontrada nos assentamentos urbanos precários durante o levantamento das informações, não foi determinada, mencionada, ou estabelecida posteriormente em novos estudos. Apenas no ano de 2013, após o desastre de janeiro de 2011, uma empresa terceira foi contratada para que juntamente com a Defesa Civil de Nova Friburgo promovessem a atualização do PMRR.

Neste contexto, destaca-se que o meio físico está em constante modificação, acelerada pela dinâmica natural do ambiente e pelas ações antrópicas locais, principalmente quanto a expansão da ocupação urbana ao longo das encostas. Logo, a necessidade de determinar um prazo de validade para realização de uma nova avaliação técnica nos setores de risco nos assentamentos é fundamental.

Este ponto revela a importância do monitoramento em tempo real das condições naturais e antrópicas destes locais. Acredita-se ainda que em caso da execução de vistorias frequentes após a finalização do PMRR, possíveis redefinições dos setores risco poderiam ter sido efetuadas, indicando o agravamento de alguma situação no assentamento, e até recomendando a remoção de moradias.

Quanto a equação 5 desenvolvida e aplicada neste artigo, constatou-se grande aplicabilidade e praticidade para avaliação do desempenho de avaliações de risco. Esta nova fórmula permitiu efetuar por intermédio do *software* livre QGIS um processo avaliativo prático, rápido e preciso. Atestando a qualidade do método executado pela CPRM e PMNF (2007) mediante o emprego de um modelo preditivo determinístico, utilizando-se de modelos de estabilidade de terreno, bem como dos profissionais envolvidos na análise das intervenções antrópicas *in situ*, que identificaram relevantes condicionantes através de uma abordagem heurística.

O valor percentual mínimo de 70% de acerto do PMRR após aplicação da equação 5 e soma das classes de risco muito alto e alto, demonstra uma performance relevante para o contexto. Assim como, os resultados observados nos setores de risco muito baixo, refletindo percentuais extremamente baixos e até nulos em alguns assentamentos.

Entretanto, é exatamente por esta razão que a falta de monitoramentos posteriores a finalização do PMRR, permitindo a atualização do estudo e identificação ou agravamento dos processos de instabilidades ao longo das vertentes, foi um fator determinante para a consumação deste grande desastre na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro.

Deste modo, ao expor estes resultados e tomando ciência da existência de intervenções estruturais sugeridas no PMRR pela CPRM e PMNF (2007), inclusive valorando cada obra a ser realizada e recomendando a remoção de moradias, evidencia-se a ausência ou insuficiência de ações efetivas pelo poder público para mitigação dos riscos nestes assentamentos urbanos precários. Não foram encontrados motivos concretos para esta carência de políticas públicas, mas se acredita na falta de recursos e inexistência de integração entre o governo municipal, estadual e federal.

4.2.7.1 Oportunidade de melhoria 1: inventário de moradias e pessoas

Apesar dos resultados satisfatórios e da qualidade técnica dos profissionais envolvidos identificada, é possível fazer uma crítica construtiva para o estudo. Diante disso, destaca-se que o PMRR de Nova Friburgo dividiu os assentamentos urbanos precários em quatro setores de risco distintos, contabilizando o número de moradias e habitantes sob elevado risco apenas para as classes muito alto e alto. Isso significa que as residências localizadas nas classes de risco médio e baixo não foram inventariadas pela CPRM e PMNF (2007).

Contudo, segundo Zuquette (2018) o impacto do evento perigoso deve ser medido de acordo com o elemento exposto, e consequentemente estabelecido o nível de risco correspondente. Desta forma, como os elementos expostos foram moradias e principalmente pessoas, acredita-se que CPRM e PMNF (2007) poderiam ter aplicado um maior peso em suas avaliações nestes locais, elevando a classe de risco independentemente se o meio físico tivesse apresentado condições naturais mais estáveis.

Ainda segundo Zuquette (2018), a fase inicial de análise da possível ocorrência de um evento perigoso e suas características é o ponto central para elaborar estudos com vistas à estimativa dos riscos, devendo ser avaliado a vulnerabilidade de cada elemento exposto em diferentes cenários futuros.

Isto posto, caso a CPRM e PMNF (2007) tivessem contabilizado o número de moradias e pessoas potencialmente atingidas em todos os setores de risco, poderia ter existido uma maior pressão sobre o poder público. Resultando na necessidade de agilizar ações mitigatórias, e efetivar com urgência políticas públicas em razão do conhecimento do grande número de habitantes residentes em zonas vulneráveis.

4.2.7.2 Oportunidade de melhoria 2: relação com eventos perigosos excepcionais

Dentre todas as premissas adotadas para a elaboração do PMRR de Nova Friburgo, conforme descritas inicialmente juntamente com os objetivos do estudo técnico, destaca-se que a condução deste PMRR não considerou a probabilidade de ocorrência de eventos perigosos desencadeados sob influência de índices pluviométricos excepcionais, apenas sazonais (CPRM; PMNF, 2007).

Segundo CPRM e PMNF (2007), a incorporação de medidas e intervenções mitigatórias direcionadas para eventos perigosos decorrentes de índices pluviométricos não convencionais, iria gerar custos desproporcionais para implementação de obras estruturais capazes de reduzir o risco associado a este tipo de evento. Os autores também descrevem que o evento anterior ao de janeiro de 2011, ocorrido entre dezembro de 2006 e janeiro de 2007 na Região Serrana do Rio de Janeiro, já foi considerado atípico. Resultando na necessidade de executar intervenções estruturais altamente onerosas para a prevenção de eventos de igual ou maior intensidade.

Contudo, com a ocorrência do próprio evento perigoso em janeiro de 2011, além de outros que ocorreram posteriormente na região como em 2013, conforme descritos por Ottero, Chargel e Hora (2018), fica evidente que os índices pluviométricos e os eventos perigosos de grandes proporções não foram atípicos, e sim passaram a incorporar, infelizmente, um cenário recorrente.

Para exemplificar o supracitado, destaca-se que ambos os eventos de 2011 e 2013 ocorridos na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, apresentaram destacados índices pluviométricos. No município de Nova Friburgo o ponto mais crítico encontrado em 2011 foi no posto pluviométrico Ypu do INEA, com o registro de 273,8 mm para um período de 24 horas. Em 2013, novamente em 24 horas, Nova Friburgo registrou no posto pluviométrico Piller do INEA o total de 220 mm (OTTERO; CHARGEL; HORA, 2018).

Ainda, segundo CPRM e PMNF (2007), entre os meses de dezembro de 2006 e janeiro de 2007 no município, foi registrado na estação de medição Fazenda Mendes um grande volume de precipitação acumulada, totalizando 900 mm.

Deste modo, acredito existir uma oportunidade de melhoria para os posteriores PMRR a serem desenvolvidos pelos municípios e demais órgãos. Devendo ser revisto as normais climatológicas para a região de interesse, e considerado eventos climáticos de grandes proporções como algo recorrente para o emprego de modelos preditivos de qualquer natureza para escorregamentos de encostas.

Consequentemente, analisando os índices pluviométricos e suas frequências, será que estes eventos podem ser considerados como excepcionais? Ao compararmos o período de recorrência destes volumes de chuva para a Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro.

Entrando, deve-se ressaltar que ao ocorrer um grande e intenso volume pluviométrico sobre determinado local, não se pode afirmar que irão ser desencadeados movimentos gravitacionais de massa. A associação direta na forma de causa e consequência não é realista, outros fatores exercem importante e relevante papel para a determinação da ocorrência de escorregamentos ou não. Estes fatores estão associados principalmente às condições prévias do ambiente como: umidade do solo e do material geológico; condições atuais de infiltração da água meteórica; circunstâncias para reativação de zonas de escorregamentos pretéritos; interferências antrópicas; dentre outros (ZUQUETTE, 2018)

4.2.8 Conclusões

Inicialmente é destacado que a equação 5 desenvolvida e aplicada para a análise de desempenho neste artigo, mediante o cálculo do grau de acerto para o PMRR de Nova Friburgo sob autoria da CPRM e PMNF (2007), demonstrou-se com elevada aplicabilidade, praticidade e capacidade de reprodução.

Nesta nova fórmula os princípios da proporcionalidade de área de Guimarães et al. (2003) e Huang e Kao (2006) foram mantidos, porém sendo substituído o sistema de análise de *pixels* e células pela área total real das cicatrizes. Concluiu-se que a avaliação exclusiva das áreas com cicatrizes de escorregamentos em associação com a respectiva classe de risco, seja a forma ideal de apurar a precisão de um modelo preditivo de qualquer abordagem, determinística, heurística ou estatística. Refletindo a condição real encontrada após ocorrência de um evento perigoso.

Ao utilizar a equação 5, ficou evidente uma maior simplificação para o geoprocessamento de dados, que ao utilizar os polígonos das cicatrizes expressando a sua área real, estabelecida pela interface de ruptura solo-rocha, proporciona operar unicamente arquivos vetoriais. Viabilizando o processamento em computadores comuns e *softwares* livres ou menos robustos.

Em termos probabilísticos, os resultados referentes aos percentuais do grau de acerto encontrados foram satisfatórios, evidenciando a qualidade dos modelos preditivos utilizados pela CPRM e PMNF (2007) para a classificação dos setores de risco. A utilização de modelos de estabilidade para as encostas, associada ao trabalho *in situ* de avaliação das intervenções antrópicas nos assentamentos, resultou em uma importante combinação entre a abordagem determinística e heurística.

As cicatrizes dos escorregamentos generalizados constituídas neste desastre, localizaram-se, em grande maioria, nos setores de risco muito alto e alto de cada assentamento urbano precário. Portanto, os setores apontados como os mais propensos aos riscos e danos resultantes de movimentos gravitacionais de massa, foram igualmente aos mais atingidos.

Essa qualidade metodológica pode ser constatada pela incorporação do registro de escorregamentos pretéritos no desenvolvimento deste PMRR, em que os resultados desta pesquisa apontaram estes locais como realmente relevantes neste contexto. Considerar estruturas ou feições de movimentações de massa anteriores durante o processo de nova classificação de riscos é fundamental.

Entretanto, elaborar um estudo técnico desta natureza utilizando bons modelos preditivos, ferramentas eficientes e profissionais competentes é insuficiente para garantir ações efetivas que minimizem os riscos associados aos eventos perigosos. As intervenções necessárias após entrega e disponibilização de um plano municipal de redução de riscos são tão importantes quanto o desenvolvimento destes estudos.

Ressalta-se, igualmente, a existência de uma lacuna quanto aos futuros mapeamentos e prazo de validade do PMRR de Nova Friburgo. Em avaliações de risco para áreas de encostas fortemente urbanizadas, deve-se ter ciência que o meio físico associado as atividades antrópicas resultam em constantes modificações na estabilidade do ambiente, tornando os monitoramentos frequentes e a atualização constante dos estudos imprescindíveis.

Porém, o cenário ideal e essencial é trabalhar previamente com planejamento territorial, evitando, deste modo, uma série de desastres, além de proporcionar uma redução significativa de recursos públicos aplicados em ações de remediação. Qualquer ação tomada em caráter de remediação é infinitamente mais complexa e onerosa do que intervenções prévias.

Portanto, respaldado por Zuquette (2018), torna-se necessário atualmente implementar um planejamento territorial adequado, e de fato, executá-lo. Permitindo, por exemplo, que os planos diretores municipais sejam seguidos e assim obtida uma organização territorial nos municípios. Em contrapartida, é de conhecimento público que os moradores dos assentamentos Floresta/Alto Floresta, Lazareto e Vilage vivem sob condições de alta vulnerabilidade social, econômica e ambiental. Sendo difícil a atuação individual das prefeituras municipais nestes cenários.

4.2.9 Agradecimentos

O autor agradece a Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Laboratório de Estudos Costeiros (Lecost) da UFPR, e, em especial, aos professores que auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa.

4.2.10 Referências

ALMEIDA, F. F. M. The system of continental rifts bordering the Santos Basin. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONTINENTAL MARGINS OF ATLANTIC TYPE, 48 (supl), 1975. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1975, p. 13-26. Disponível em: <http://www.neotectonica.ufpr.br/morfoestrutural/riftes.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2020.

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, p. 135–150, 1998. Disponível em: <http://papegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11205>. Acesso em: 3 fev. 2020.

ASMUS, H. E.; FERRARI, A. L. **Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozóico na região sudeste do Brasil**. In: Petrobras. Aspectos estruturais da margem continental leste e sudeste do Brasil. Rio de Janeiro: CENPES, Projeto REMAC, v. 4, p. 75–88, 1978.

BARREDO, J. I.; BENAVIDES, A.; HERVÁS, J.; VAN WESTEN, C. J. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, n. 1, p. 9-23, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243400850229>. Acesso em: 3 ago. 2021. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85022-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85022-9).

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. **Prevenção de riscos e deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais**. Brasília: Ministério das Cidades, Cities Alliance, 2006. 111 p. E-book. Disponível em: <https://www.crpsp.org/impresso/view/182>. Acesso em: 22 set. 2020.

COHEN J. A. Coefficient of agreement for nominal scales. **Journal of Educational and Measurement**, v. 20, n.1, p.37-46, 1960. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/001316446002000104>. Acesso em: 10 ago. 2021. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.

CPRM (Serviço Geológico do Brasil); PMNF (Prefeitura Municipal de Nova Friburgo). **Plano municipal de redução de riscos de Nova Friburgo, Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: CPRM, 87 p., 2007. Relatório técnico. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21726>. Acesso em: 1 jul. 2019.

DANTAS, M. E. **Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro**. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2000. DOI:10.13140/RG.2.2.32582.57923.

DA SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S. M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/366>. Acesso em: 20 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v15i1.366>.

DOURADO, F.; ARRAES, T. C.; SILVA, M. F. O megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as causas do evento, os mecanismos dos movimentos de massa e a distribuição espacial dos investimentos de reconstrução no pós-desastre. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 35, n. 2, p. 43-54, 2012. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/6935/5502>. Acesso em 7 jun. 2020. https://doi.org/10.11137/2012_2_43_54.

GLOBALGEO GEOTECNOLOGIAS (GLOBALGEO). Disponível em: <https://www.globalgeo.com.br/imagens-de-sat%C3%A9lites/maxar-digitalglobe/>. Acesso em: 10 out. 2021.

GOOGLE. **Google Earth Pro**, versão 7.3.3.7786. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/>.

GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; DE CARVALHO JÚNIOR, O. A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v. 69, n. 1-2, p. 99-108, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795202002636>. Acesso em: 2 ago. 2021. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00263-6)

GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; DE CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N.; FERNANDES, N. F. Análise temporal das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ) a partir de dados pluviométricos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 190-198, 2009. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7640/7067>. Acesso em: 3 fev. 2021.

HUANG, J. C.; KAO, S. J. Optimal estimator for assessing landslide model performance. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 10, n. 6, p. 957-965, 2006. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/articles/10/957/2006/>. Acesso em: 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.5194/hess-10-957-2006>.

LEE, S. Application and cross-validation of spatial logistic multiple regression for landslide susceptibility analysis. **Geosciences Journal**, v. 9, n. 63, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02910555>. Acesso em: 6 ago. 2021. <https://doi.org/10.1007/BF02910555>.

MAXAR TECHNOLOGIES. **Município de Nova Friburgo, Rio de Janeiro**: conjunto de fotografias aéreas. Nova Friburgo, 2011.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/93WR02979>. Acesso em: 1 set. 2021. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>.

MORESI, F.V.; MAESANO, M.; COLLALTI, A.; SIDLE, R. C.; MATTEUCCI, G.; MUGNOZZA, G. S. Mapping landslide prediction through a GIS-based model: a case study in a Catchment in Southern Italy. **Geosciences**, v. 10, n. 8: 309, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/10/8/309/>. Acesso em 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080309>.

NUNES, D. M.; COELHO, C. D.; SOUSA, A. B.; CALIJURI, M. L.; DOS SANTOS, A. P. Uso integrado do modelo SHALSTAB e análise multicritério para mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 9, 2016. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44447>. Acesso em 1 de ago. 2021.

OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION (OSGeo). **QGIS**, versão Standalone 3.16. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/index.html.

OTHMAN, A. N.; MOHD, W. M. N. W.; NORAINI, S. Accuracy assessment of landslide prediction models. In: International Symposium of the Digital Earth, 8, 2013, Malásia. **8th International Symposium of the Digital Earth (Conference Proceedings)**. IOP Series: Earth and Environmental Science. 2014. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/18/1/012078>. Acesso em: 1 ago. 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012078>.

OTTERO, C. R.; CHARGEL, L. T.; HORA, M. de A. G. M. da. Análise de frequência dos dados pluviométricos observados em 2011 e 2013 na Região Serrana, Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 131–139, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862018000100131&tlng=pt. Acesso em 13 abril. 2021.

PINHO, G. M. DE; FRANCISCO, C. N.; SALGADO, C. M. Análise espacial dos movimentos de massa em Nova Friburgo/RJ: o caso do desastre natural de janeiro de 2011. **Revista Tamoios**, v. 9, n. 1, p. 15–27, 2013. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/tamoios/article/view/5355>. Acesso em: 7 dez. 2020.

REIS, S.; REUTERS; VEJA. **Chuvas no Rio de Janeiro: Confirma imagens da tragédia no Rio de Janeiro causada pelas chuvas**. Fotografia aérea de Nova Friburgo/RJ após desastre de janeiro de 2011. Revista Veja, 12 jan. 2011. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/galeria-fotos/chuvas-no-rio-de-janeiro/>. Acesso em: 10 out. 2021.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP**. 240 f. Tese (Doutorado Geografia Física), Dep. de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-18102007-155204/pt-br.php>. Acesso em: 20 jun. 2020.

UNITED NATIONS DISASTER RELIEF OFFICE (UNDRO). UNDRO's approach to disaster mitigation. **UNDRO News jan./feb.**, v. 91, 27 p., 1991. Geneva: Office of the United Nations. Disponível em: <<http://digitallibrary.un.org/record/114830>>. Acesso em 17 jun. 2020.

VAN WESTEN, C. J. A the modeling of landslide hazards using GIS. **Surveys in Geophysics**, v. 21, p. 241-255, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1006794127521>. Acesso em: 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.1023/A:1006794127521>.

ZUQUETTE, L. V. **Riscos, desastres e eventos naturais perigosos: Aspectos conceituais na análise e estimativa de riscos**. 1 ed., v.1. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2018. 304 p.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dois trabalhos técnicos analisados são conceitualmente distintos, o estudo de susceptibilidade para ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, elaborado pela MINEROPAR e IBAMA (2005), concentrou-se no mapeamento e caracterização dos atributos do meio físico do PNSHL, uma área de preservação ambiental. Em contexto distinto, o PMRR de Nova Friburgo, produzido pela CPRM e PMNF (2007), contemplou a elaboração de uma análise de risco completa nos assentamentos urbanos precários do município.

Este cenário mostra que o PMRR de Nova Friburgo foi mais complexo, considerando diversos fatores em sua elaboração como: aspectos antrópicos, vulnerabilidade, inventário de moradias e pessoas potencialmente atingidas, sugestão de intervenções estruturais para cada assentamento urbano precário, estimativa de custos para realização destas obras, e até indicação de remoção de residências. Ao contrário, o trabalho conduzido pela MINEROPAR e IMBAMA (2005) se concentrou exclusivamente no mapeamento da susceptibilidade para movimentos de massa no PNSHL, avaliando essencialmente o meio físico local e suas condições naturais.

Contudo, indiferentemente do tipo de estudo de predictabilidade para ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, a equação 5 desenvolvida e aplicada para a análise de desempenho dos estudos técnicos da MINEROPAR e IBAMA (2005) e CPRM e PMNF (2007), mediante o cálculo do grau de acerto, demonstrou-se com elevada aplicabilidade, praticidade e capacidade de reprodução.

Nesta nova fórmula os princípios da proporcionalidade de área de Guimarães et al. (2003) e Huang e Kao (2006) foram mantidos, porém sendo substituído o sistema de análise de *pixels* e células pela área total real das cicatrizes. Concluiu-se que a avaliação exclusiva das áreas com cicatrizes de escorregamentos, estabelecida pela interface de ruptura solo-rocha, em associação com a respectiva classe de susceptibilidade ou setor de risco, seja a forma ideal de apurar a precisão de um modelo preditivo de qualquer abordagem: determinística, heurística ou estatística. Refletindo a realidade encontrada após ocorrência de um evento perigoso.

Ainda ao utilizar a equação 5 ficou evidente a existência de maior agilidade no geoprocessamento dos dados, que ao utilizar os polígonos das cicatrizes dos escorregamentos, proporciona a operação de arquivos unicamente vetoriais. Viabilizando o processamento destes dados em *softwares* livres ou menos robustos.

Neste contexto, o *software* QGIS se mostrou eficiente e com recursos nativos do programa muito interessantes para o geoprocessamento de dados, apresentando ferramentas importantes como interseção, resumo estatístico e calculadora de campo. O QGIS foi um elemento fundamental para a execução desta presente pesquisa. Logo, recomenda-se a sua utilização para replicação da metodologia adotada, em especial da nova equação desenvolvida para o cálculo em percentual do grau de acerto. No entanto, a utilização de outros *softwares* de mesma função também pode ser realizada.

Avaliando os resultados encontrados para ambos os estudos após o cálculo do grau de acerto, constatou-se percentuais satisfatórios, ao menos em termos probabilísticos, em que os locais indicados como os mais prováveis para ocorrência de movimentos gravitacionais de massa foram efetivamente os mais atingidos.

Os motivos responsáveis pela efetiva performance dos estudos técnicos correspondem ao emprego correto do modelo preditivo, obedecendo a escala de trabalho indicada para cada tipo de abordagem, conforme estabelecido por Van Westen (2000), bem como conhecimento técnico dos profissionais envolvidos, e qualidade dos dados de entrada. Todos estes pontos são fundamentais para um bom desempenho do modelo preditivo adotado.

Estes resultados também indicam que existem ferramentas disponíveis para a correta predição dos eventos perigosos, assim como qualificação técnica nos órgãos federais, estaduais e municipais. Entretanto, o Brasil carece de monitoramentos constantes das suas áreas de risco, atualizações frequentes dos estudos de predictabilidade desenvolvidos, integração dos governos e políticas públicas efetivas.

Portanto, o objetivo da presente pesquisa foi alcançado, sendo possível efetuar o cálculo do grau de acerto para os estudos de predictabilidade selecionados. Adicionando-se ainda o desenvolvimento uma nova equação com maior aplicabilidade e facilidade de reprodução, proporcionando a utilização de softwares livres para o processamento dos dados, e obtenção dos resultados da análise de desempenho para o modelo preditivo utilizado mediante valores em percentuais.

Deste modo, recomenda-se a avaliação da performance de estudos de susceptibilidade para escorregamentos de encostas ou avaliações de risco por intermédio do cálculo do grau de acerto, independentemente modelo preditivo adotado. A partir da obtenção deste dado em outros estudos, será possível estabelecer valores de referência para aperfeiçoamento dos trabalhos de predição.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. The system of continental rifts bordering the Santos Basin. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONTINENTAL MARGINS OF ATLANTIC TYPE, 48 (supl), 1975. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1975, p. 13-26. Disponível em: <http://www.neotectonica.ufpr.br/morfoestrutural/riftes.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2020.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, p. 135–150, 1998. Disponível em: <http://papegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11205>. Acesso em: 3 fev. 2020.
- AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; CUNHA, C.; GONÇALVES, J. E. Eventos extremos de precipitação no litoral do Paraná (Baía de Paranaguá). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p. 563-575, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/wYCjXW4k39WGZKJ65rwqZjP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786354040>.
- AN, K.; KIM, S.; CHAE, T.; PARK, D. Developing an accessible landslide susceptibility model using open-source resources. **Sustainability**, v. 10, n. 2: 293, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/2/293/>. Acesso em 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.3390/su10 020293>.
- ASHOURNEJAD, Q.; HOSSEINI, A.; PRADHAN, B.; HOSSEINI, S. J. Hazard zoning for spatial planning using GIS-based landslide susceptibility assessment: a new hybrid integrated data-driven and knowledge-based model. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 126, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12517-019-4236-0#article-info>. Acesso em: 7 ago. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4236-0>.
- ASMUS, H. E.; FERRARI, A. L. **Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozóico na região sudeste do Brasil**. In: Petrobras. Aspectos estruturais da margem continental leste e sudeste do Brasil. Rio de Janeiro: CENPES, Projeto REMAC, v. 4, p. 75–88, 1978.
- AUTODESK. **AUTOCAD MAP**, versão AutoCAD Map 2000. Disponível em: <https://www.autodesk.com/>.
- AVELAR, F. Classificação e quantificação dos escorregamentos ocorridos no dia 11 de março de 2011 na Serra do Mar Paranaense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 48, 2016. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 2016, p.1555-1555. Disponível em: <http://sbgeo.org.br>. Acesso em: 3 jul. 2019.
- BARREDO, J. I.; BENAVIDES, A.; HERVÁS, J.; VAN WESTEN, C. J. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, n. 1, p. 9-23, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243400850229>. Acesso em: 3 ago. 2021. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(00\)85022-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(00)85022-9).

BAUM; R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS: A fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis**. Colorado: USGS. 61 p., 2002. Relatório Técnico. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/ofr02424>. Acesso em: 3 ago. 2021.

BONETTI, J.; WOODROFFE, C. D. 2017. Spatial analysis on GIS for coastal vulnerability assessment. In: BARTLETT, D; CELLIERS, L. (Eds.). **Geoinformatics for marine and coastal management**. CRC Press: Boca Raton, p. 367-396. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781315181523-17>. Acesso em 15 ago. 2019.

BRASIL. **Lei nº 10.227, de 23 de maio de 2001**. Cria o Parque Nacional de Saint - Hilaire/Lange, no Estado do Paraná e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 maio. 2001. Seção 1, p.2.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nºs 12.340 de 1º de dezembro de 2010, 10.257 de 10 de julho de 2001, 6.766 de 19 de dezembro de 1979, 8.239 de 4 de outubro de 1991, e 9.394 de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 abr. 2012. Seção 1, p. 1.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. **Prevenção de riscos e deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais**. Brasília: Ministério das Cidades, Cities Alliance, 2006. 111 p. E-book. Disponível em: <https://www.crpsp.org/impresso/view/182>. Acesso em: 22 set. 2020.

COHEN J. A. Coefficient of agreement for nominal scales. **Journal of Educational and Measurement**, v. 20, n.1, p.37-46, 1960. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/001316446002000104>. Acesso em: 10 ago. 2021. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.

COROMINAS, J.; MAVROULI, J. **Living with landslide risk in Europe: assessment, effects of global change, and risk management strategies**. European Commission's 7th Framework Programme, 98 p., 2011. Relatório técnico. Disponível em: <https://www.ngi.no/content/download/6681/470773/file/D4.2.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2020.

CPRM (Serviço Geológico do Brasil); PMNF (Prefeitura Municipal de Nova Friburgo). **Plano municipal de redução de riscos de Nova Friburgo, Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: CPRM, 87 p., 2007. Relatório técnico. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21726>. Acesso em: 1 jul. 2019.

DA SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S. M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/366>. Acesso em: 20 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v15i1.366>.

DANTAS, M. E. **Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2000. 75 p.

DE CASTRO, C. M.; PEIXOTO, M. N. de O.; DO RIO, G. A. P. Riscos ambientais e geografia: conceituações, abordagens e escalas. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 28, n. 2, p. 11-30, 2005. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/anigeo/article/view/4830/4342>. Acesso em: 5 jun 2019.

DE ROO, A. P. I. **Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using geographical information systems. Validity and applicability of the ANSWERS model in two catchments in the loess area of South Limburg (The Netherlands), and one in Devon (UK)**, v. 157. Amsterdã: Nederlandse Geografische Studies; Utrecht, 1993. 295 p.

DEFESA CIVIL DO ESTADO DO PARANÁ. Comunicação. **Relatório de ocorrências**. Curitiba, 2020. Disponível em: <http://www.defesacivil.pr.gov.br/#main-content>. Acesso em: 25 jul. 2020.

DEYLE, R. E.; FRENCH, S. P.; OLSHANSKY, R. B.; PATERSON, R. G. The factual basis for planning and mitigation. In: Raymond, J. B. (Ed.). **Cooperating with nature. Confronting natural hazards with land-use planning for sustainable communities**. Washington, D.C.: Joseph Henry Press, 1998. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/5785>. Acesso em: 15 set. 2020.

DOURADO, F.; ARRAES, T. C.; SILVA, M. F. O megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as causas do evento, os mecanismos dos movimentos de massa e a distribuição espacial dos investimentos de reconstrução no pós-desastre. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 35, n. 2, p. 43-54, 2012. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/6935/5502>. Acesso em 7 jun. 2020. https://doi.org/10.11137/2012_2_43_54.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ARCVIEW**, versão 3.2. Disponível em: <https://arcview.software.informer.com/3.2/>.

FORMETTA, G.; RAGO, V.; CAPPARELLI, G.; RIGON, R.; MUTO, F.; VERSACE, P. Integrated Physically based System for Modeling Landslide Susceptibility. **Procedia Earth Planetary Science**, v. 9, p. 74-82, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878522014000356>. Acesso em: 3 ago. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.06.006>.

GIRÃO, I. R. F.; RABELO, D. R.; ZANELLA, M. E. Análise teórica dos conceitos: riscos socioambientais, vulnerabilidade e suscetibilidade. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 71-83, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregn/article/view/13273>. Acesso em 3 ago. 2020.

GLOBALGEO GEOTECNOLOGIAS (GLOBALGEO). Disponível em: <https://www.globalgeo.com.br/imagens-de-sat%C3%A9lites/maxar-digitalglobe/>. Acesso em: 10 out. 2021.

GOOGLE. **Google Earth Pro**, versão 7.3.3.7786. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/>.

GOLDEN SOFTWARE. **SURFER**, versão 8. Disponível em: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>.

GOMES, R. A. T. **Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa**. 180 f. Tese (Doutorado em Geografia) Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

GUIMARÃES, I. M. P. S.; CANEPARO, S. C. Identificação de áreas adequadas à implantação de infraestrutura arquitetônica através do uso do sistema de informação geográfica (SIG): estudo de caso - Parque Nacional Saint-Hilaire/Lange-Paraná. **Revista RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, v. 14, p. 67-83, 2007. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/8206>. Acesso em: 20 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v14i0.8206>

GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; DE CARVALHO JÚNIOR, O. A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v. 69, n. 1-2, p. 99-108, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795202002636>. Acesso em: 2 ago. 2021. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00263-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00263-6)

GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; DE CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N.; FERNANDES, N. F. Análise temporal das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ) a partir de dados pluviométricos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 190-198, 2009. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7640/7067>. Acesso em: 3 fev. 2021.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, n. 1-4, p. 181-216, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X99000781>. Acesso em 1 ago. 2021. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1).

HUANG, J. C.; KAO, S. J. Optimal estimator for assessing landslide model performance. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 10, n. 6, p. 957-965, 2006. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/articles/10/957/2006/>. Acesso em: 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.5194/hess-10-957-2006>.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. Brasília: ICMBio, mar. 2011. Fotografia área do Parque Nacional Saint Hilaire/Lange. Sem escala. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/portal/>. Acesso em: 10 out. 2021.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). **Portal do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/portal/>. Acesso em: 16 abril. 2021.

Instituto de Terras, Cartografia, e Geologia do Paraná (ITCG). **Mapa do clima do Estado do Paraná**. Curitiba: ITCG, 2008. Escala 1:50.000. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br>. Acesso em 16 abril. 2021.

IVERSON, R. M. Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research**, v. 36, n. 7, p. 1897-1910, 2000. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000WR900090>. Acesso em 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.1029/2000WR900090>.

JONES, R.; BOER, R. Assessing current climate risks. In: LIM, B.; SPANGER-SIEGFRIED, E (Ed.). **Adaptation policy framework: a guide for policies to facilitate adaptation to climate change**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2004. p. 92-115. E-book: Disponível em: <https://www.cambridge.org/>. Acesso em 15 set. 2020.

KÖPPEN, W. Klassifikation der klima nach temperatur, niederschlag und jahreslauf. **Petermanns Geographische Mitteilungen**, Gotha, v. 64, p.193-203, 1918. Disponível em: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/koeppen.htm>. Acesso em: 20 abril. 2021.

LEE, S. Application and cross-validation of spatial logistic multiple regression for landslide susceptibility analysis. **Geosciences Journal**, v. 9, n. 63, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02910555>. Acesso em: 6 ago. 2021. <https://doi.org/10.1007/BF02910555>.

LISTO, F. de L. R. Modelos matemáticos aplicados à previsão de escorregamentos translacionais rasos: exemplos em áreas naturais e de risco. **Clio Arqueológica**, v. 31, n. 3, p. 91-114, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/clioarqueologica/article/view/246542>. Acesso em: 5 ago. 2021. <https://doi.org/10.20891/clio.V31N3p91-114>.

MARANDOLA JR. E.; HOGAN, D. J. N. Natural hazards: o estudo geográfico dos riscos e perigos. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, n. 2. p. 95-110, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/jY8HBwMg4rJJP49Z6zH9RdJ/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 2 ago. 2020. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2004000200006>.

MARTINS, T. D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C.; BATEIRA, C. V. M.; MONTGOMERY, D. R. Avaliação de MDT na modelagem de instabilidade de vertentes. **Raega**, v. 41, p. 07-17, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/47607>. Acesso em: 7 out. 2021. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v41i0.47607>

MAXAR TECHNOLOGIES. **Município de Nova Friburgo, Rio de Janeiro**: conjunto de fotografias aéreas. Nova Friburgo, 2011.

METEN, M.; PRAKASHBHANDARY, N.; YATABE, R. Effect of landslide factor combinations on the prediction accuracy of landslide susceptibility maps in the Blue Nile Gorge of Central Ethiopia. **Geoenvironmental Disasters**, v. 2, n. 9, 2015. Disponível em: <https://rdcu.be/czCUY>. Acesso em: 14 ago. 2021. <https://doi.org/10.1186/s40677-015-0016-7>.

MINEROPAR (Serviço Geológico do Paraná); IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). **Mapeamento dos atributos do meio físico como subsídio à gestão de áreas protegidas: área piloto do Parque Nacional Saint Hilaire Lange – Litoral do Paraná**. Curitiba, 83 p., 2005. Relatório técnico.

MINOZZO, M. **Estudo probabilístico da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa na Bacia Hidrográfica do Rio Sagrado, no Município de Morretes (PR)**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/61392>. Acesso em 4 fev. 2021.

MITRA, D.; GHOSH, A. R. Landslide susceptibility zonation, using machine learning techniques, in a part of the hilly areas of the Darjeeling District, West Bengal. **International Journal of Statistical Sciences**, v. 21, n. 1, p. 124-146, 2021. https://www.researchgate.net/publication/350133993_Landslide_Susceptibility_Zonation_Using_Machine_Learning_Techniques_in_a_Part_of_the_Hilly_Areas_of_the_Darjeeling_District_West_Bengal. Acesso em: 1 ago. 2021. <https://10.13140/RG.2.2.33466.11200>.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/93WR02979>. Acesso em: 1 set. 2021. <https://doi.org/10.1029/93WR02979>.

MORESI, F.V.; MAESANO, M.; COLLALTI, A.; SIDLE, R. C.; MATTEUCCI, G.; MUGNOZZA, G. S. Mapping landslide prediction through a GIS-based model: a case study in a Catchment in Southern Italy. **Geosciences**, v. 10, n. 8: 309, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/10/8/309/>. Acesso em 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080309>.

NAM, K.; WANG, F. The performance of using an autoencoder for prediction and susceptibility assessment of landslides: A case study on landslides triggered by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake in Japan. **Geoenvironmental Disasters**, v. 6, n. 19, 2019. Disponível em: <https://geoenvironmental-disasters.springeropen.com/articles/10.1186/s40677-019-0137-5#article-info>. Acesso em 4 ago. 2021. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0137-5>

NUNES, D. M.; COELHO, C. D.; SOUSA, A. B.; CALIJURI, M. L.; DOS SANTOS, A. P. Uso integrado do modelo SHALSTAB e análise multicritério para mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 9, 2016. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44447>. Acesso em 1 de ago. 2021.

OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION (OSGeo). **QGIS**, versão Standalone 3.16. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/index.html.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Living with risk. A global review of disaster reduction initiatives**. New York e Geneva: Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), 2004. v.2. 152 p. E-book. Disponível em: https://www.preventionweb.net/files/657_lwr21.pdf. Acesso em: 2 ago. 2020.

OTHMAN, A. N.; MOHD, W. M. N. W.; NORAINI, S. Accuracy assessment of landslide prediction models. In: International Symposium of the Digital Earth, 8, 2013, Malásia. **8th International Symposium of the Digital Earth (Conference Proceedings)**. IOP Series: Earth and Environmental Science. 2014. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/18/1/012078>. Acesso em: 1 ago. 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012078>.

OTHMAN, A. N.; NAIM, W. M.; NORAINI, S. GIS based multi-criteria decision making for landslide hazard zonation. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 35, p. 95-602, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812004387>. Acesso em: 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.02.126>.

OTTERO, C. R.; CHARGEL, L. T.; HORA, M. de A. G. M. da. Análise de frequência dos dados pluviométricos observados em 2011 e 2013 na Região Serrana, Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 131–139, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862018000100131&tlng=pt. Acesso em 13 abril. 2021.

PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. **Terrain stability mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00**. Canadá, Salmon Arm: Terratech Consulting Ltd, 68 p., 1998. Relatório técnico. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/247713872_Terrain_Stability_Mapping_with_SINMAP_Technical_Description_and_Users_Guide_for_Version_100. Acesso em: 28 ago. 2021.

PINHO, G. M. DE; FRANCISCO, C. N.; SALGADO, C. M. Análise espacial dos movimentos de massa em Nova Friburgo/RJ: o caso do desastre natural de janeiro de 2011. **Revista Tamoios**, v. 9, n. 1, p. 15–27, 2013. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/tamoios/article/view/5355>. Acesso em: 7 dez. 2020.

REIS, S.; REUTERS; VEJA. **Chuvas no Rio de Janeiro: Confirma imagens da tragédia no Rio de Janeiro causada pelas chuvas**. Fotografia aérea de Nova Friburgo/RJ após desastre de janeiro de 2011. Revista Veja, 12 jan. 2011. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/galeria-fotos/chuvas-no-rio-de-janeiro/>. Acesso em: 10 out. 2021.

ROMERO, G.; MASKREY, A. Como entender los desastres naturales. In: MASKREY, A. (Ed.). **Los desastres no son naturales**. Panamá: Red de estudios sociales em prevención de desastres em América Latida (LA RED), 1993. p. 6-10. E-book. Disponível em: <https://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/>. Acesso em: 5 ago. 2020.

SIEDLECKI, K. N.; PORTES, M. C. de O.; CIELO FILHO, R. Proposta de adequação dos limites do Parque Nacional Saint-Hilaire/Lange (Serra da Prata) - Estado do Paraná. In: SIMPÓSIO DE ÁREAS PROTEGIDAS - CONSERVAÇÃO NO ÂMBITO DO CONE SUL, 2, 2003. **Anais...** Pelotas: Universidade Católica de Pelotas – Rio Grande do Sul, 2003. p. 213-220.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP.** 240 f. Tese (Doutorado Geografia Física), Dep. de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-18102007-155204/pt-br.php>. Acesso em: 20 jun. 2020.

UNITED NATIONS DISASTER RELIEF OFFICE (UNDRO). UNDRO's approach to disaster mitigation. **UNDRO News jan./feb.**, v. 91, 27 p., 1991. Geneva: Office of the United Nations. Disponível em: <<http://digitallibrary.un.org/record/114830>>. Acesso em 17 jun. 2020.

VAN WESTEN, C. J. A the modeling of landslide hazards using GIS. **Surveys in Geophysics**, v. 21, p. 241-255, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1006794127521>. Acesso em: 2 ago. 2021. <https://doi.org/10.1023/A:1006794127521>.

VARNES, D. J. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice.** Paris, França: Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e Cultura (UNESCO), 1984. 60 p. E-book. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000063038>. Acesso em: 5 maio 2019.

ZHAO, S.; ZHAO, Z. A comparative study of landslide susceptibility mapping using SVM and PSO-SVM models based on grid and slope units. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2021, 2021. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2021/8854606/>. Acesso em: 8 ago. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8854606>.

ZUQUETTE, L. V. **Riscos, desastres e eventos naturais perigosos: Aspectos conceituais na análise e estimativa de riscos.** 1 ed., v.1. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2018. 304 p.