



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO (UFPE)
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS (CFCH)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA (PPGEO)

JOHN KENNEDY RIBEIRO DE SANTANA

**APLICAÇÃO DO MODELO HIERÁRQUICO ANALÍTICO
(AHP) NA PREVISÃO DAS ÁREAS DE PERIGO A
ESCORREGAMENTOS EM RECIFE (PE)**

RECIFE

2020

JOHN KENNEDY RIBEIRO DE SANTANA

**APLICAÇÃO DO MODELO HIERÁRQUICO ANALÍTICO
(AHP) NA PREVISÃO DAS ÁREAS DE PERIGO A
ESCORREGAMENTOS EM RECIFE (PE)**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Regionalização e Análise Regional.

Orientador: Prof. Dr. Fabrizio de Luiz Rosito Listo.

RECIFE

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria do Carmo de Paiva, CRB4-1291

S232a Santana, John Kennedy Ribeiro de.
 Aplicação do Modelo Hierárquico Analítico (AHP) na previsão das áreas de
 perigo a escorregamentos em Recife (PE) / John Kennedy Ribeiro de Santana. –
 2020.
 132 f. : il. ; 30 cm.

 Orientador: Prof. Dr. Fabrizio de Luiz Rosito Listo.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.
 Programa de Pós-Graduação em Geografia, Recife, 2020.
 Inclui referências.

 1. Geografia. 2. Deslizamentos (Geologia). 3. Encostas. 4. Mecânica do solo. 5.
 Geotecnologias. I. Listo, Fabrizio de Luiz Rosito (Orientador). II. Título.

910 CDD (22. ed.)

(BCFCH2020-145)

JOHN KENNEDY RIBEIRO DE SANTANA

**APLICAÇÃO DO MODELO HIERÁRQUICO ANALÍTICO (AHP) NA
PREVISÃO DAS ÁREAS DE PERIGO A ESCORREGAMENTOS EM
RECIFE (PE)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em geografia.

Aprovada em: 19/02/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabrizio de Luiz Rosito Listo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rodrigo Dutra Gomes (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Tullius Dias Nery (Examinador externo)
Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer pelo apoio da minha família para a construção deste trabalho, que me incentivaram ao longo destes dois anos de mestrado. Especialmente minha mãe e meu pai que, ao longo da minha vida, sempre se dedicaram ao máximo para que eu pudesse estudar, me graduar e ingressar no mestrado.

Agradeço ao meu orientador, Fabrizio Listo, por toda paciência nesses anos, entre graduação, mestrado e, futuramente, doutorado. Como também, por ser um excelente professor que contribuiu e vem contribuindo para a minha formação profissional e acadêmica.

Quero agradecer à minha companheira, amiga e namorada, Camilla Monte, por toda paciência e apoio nessa caminhada. Sempre aconselhando e estando presente nos momentos mais difíceis. Agradeço de coração por todo o seu companheirismo.

Não poderia se esquecer de agradecer ao meu parceiro Joaquim Xavier que sempre ajudou ao longo da minha trajetória na universidade. Desde já, agradeço ao pessoal do grupo de pesquisa do ENPLAGEO/GEODEQC. Como também, aos meus amigos de graduação no qual tenho um imenso carinho.

Devo reconhecer à importância da Defesa Civil do Recife, por disponibilizar dados fundamentais para a construção da pesquisa e por sempre se colocaram a disposição para a realização de atividades de campo.

Por fim, quero agradecer a CAPES por ser a agência financiadora da pesquisa, financiando custos operacionais e de campo.

RESUMO

Segundo IBGE (2010), existem no Brasil mais de 8 milhões de pessoas em áreas de risco, muitas delas expostas a escorregamentos. Em função deste cenário, tornou-se competência dos municípios a elaboração de medidas para redução do risco a estes processos, como por exemplo, a criação de cartas de perigo. Por serem processos complexos, uma série de modelos estão sendo utilizados para a construção de cartas de previsão de perigo a escorregamentos, dentre eles o Modelo *Analytic Hierarchy Process* (AHP) – Modelo Hierárquico Analítico. Ainda neste contexto, destaca-se que a expansão populacional da cidade do Recife (PE) corroborou para o surgimento de áreas de perigo a escorregamentos por meio da ocupação de áreas impróprias. Desta forma, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar o perigo a escorregamentos na cidade do Recife (PE) a partir do modelo AHP. Especificamente, objetivou-se: (I) caracterizar, espacialmente, as ocorrências de escorregamentos no município; (II) elaborar cenários de perigo, em áreas já ocupadas, e de perigo potencial (áreas não ocupadas) e (III) validar os cenários de perigo propostos. Para cumprir estes objetivos, foram elaborados: (I) um mapa de ocorrências de escorregamentos, a partir de banco de dados da Defesa Civil municipal do Recife, (II) três cenários de perigo (dois cenários de perigo atual e um cenário de perigo potencial) por meio das seguintes variáveis: declividade, curvatura, índice de potência de fluxo (SPI), geologia, pedologia e uso da terra e (III) validação dos cenários propostos, a partir da sobreposição das áreas de ocorrência dos processos e do cálculo do índice Concentração de Escorregamentos (CE) com os cenários elaborados. Foram mapeadas 850 ocorrências de escorregamentos no município, entre os anos de 2013 e 2018. Em relação aos cenários de perigo instalado (cenários 1 e 2), o cenário 2 apresentou uma melhor acurácia, tendo como principal variável o uso da terra, que se mostrou ser um dos principais parâmetros na deflagração de escorregamentos no município. No cenário de perigo potencial, a Unidade de Conservação da Natureza denominada Beberibe possuiu a maior quantidade percentual de áreas de perigo potencial alto e muito alto a escorregamentos. Os resultados desta pesquisa poderão auxiliar no planejamento urbano e estratégico do município do Recife, auxiliando no processo de expansão urbana da cidade e no gerenciamento de áreas de perigo a escorregamentos.

Palavras-chave: Geotecnologias. Escorregamentos. Perigo. Processo Hierárquico Analítico. Recife.

ABSTRACT

According to IBGE (2010), there are more than 8 million people in risk areas in Brazil, often exposed to landslides that although they are landscape shaping processes cause social losses and prejudiced, especially for the vulnerable population. Due to this scenario, it became the responsibility of municipalities to develop measures to reduce the risk to these processes, such as the creation of hazard maps. Because they are complex processes, various models are being used to construct landslide hazard prediction maps, including the Analytic Hierarchy Process (AHP). This allows the combination of several conditioning factors, hierarchically organized, which influence the deflagration of events. Also in this context, it stands out that the expansion population of the city of Recife (PE) corroborated the emergence of hazard areas to landslides through the occupation of improper areas. Thus, the main objective of this work is to evaluate the hazard of landslides in the city of Recife (PE) based on AHP model. Specifically, it aimed to: (I) characterize spatially the occurrences of landslides in the municipality; (II) elaborate hazard scenarios in areas already occupied and of hazard potential (unoccupied areas) and (III) validate the proposed hazard scenarios. In order to fulfill these objectives, were elaborated: (I) a map of landslide occurrences, based on the database of the Municipal Civil Defense of Recife. (II) Three hazard scenarios (two current hazard scenarios and one potential hazard scenario) through the following variations: slope, curvature, stream power index (SPI), geology, pedology and land use. (III) Validation of the proposed scenarios, based on the overlapping of the areas where the processes occur and the calculation of the Landslide Concentration Index (CE) with the scenarios developed. 850 occurrences of landslides were mapped in the city between the years 2013 and 2018. Most of the processes recorded between the months of May, June and July, periods of greatest precipitation in Recife. In relation to the installed hazard scenarios (scenarios 1 and 2), scenario 2 presented a better accuracy, with land use as the main variable which proved to be one of the main parameters in the onset of landslides. In the scenario of hazard potential, the Nature Conservation Unit called Beberibe had the highest percentage of areas of high and very high hazard potential of the landslides. The results of this research may assist in the urban and strategic planning in the city of Recife, assisting in the process of urban expansion of the city and in the management of areas of hazard to landslides.

Keywords: Geotechnologies. Landslides. Hazard. Analytical Hierarchical Process. Recife.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	A) Exemplo de área afetada por movimento de rastejo. B) Queda de blocos na BR -259, entre os municípios de Colatina e Baixo Guandu (ES). C) Corrida de detritos em Teresópolis, região serrana do Rio de Janeiro.	19
Figura 2-	A) Escorregamento rotacional ocorrido no Vale do Rio Beaton, British Columbia, Canada. B)Exemplo de escorregamento rotacional em um trecho da BR-101 no estado de Pernambuco.	20
Figura 3-	Exemplo de escorregamento do tipo cunha.	21
Figura 4-	Escorregamentos translacionais rasos que resultaram em uma corrida de detritos na Serra do Mar paulista.	22
Figura 5-	Escorregamento translacional ocorrido no município de Olinda, Região Metropolitana do Recife.	23
Figura 6-	Exemplo de mapa de ocorrências de escorregamentos no bairro de Nova Descoberta, Zona norte do Recife.	32
Figura 7-	Comparação par a par, realizada por Xiong et al.(2017), das variáveis influentes na deflagração de escorregamentos consideradas na pesquisa. Cada elemento na vertical está sendo comparado com os da horizontal.	38
Figura 8-	Mapa de localização e hipsometria do município de Recife (PE).	41
Figura 9-	Mapa de localização dos Bairros da cidade do Recife (nomenclaturas indicadas na tabela à esquerda).	42
Figura 10-	Afloramento rochoso do embasamento cristalino em um talude de corte.	43
Figura 11-	Mapa geomorfológico do município do Recife.	45
Figura 12-	Feições de tabuleiros dissecados na zona norte do Recife.	46
Figura 13-	Perfil de Argissolo vermelho, onde é possível observar camadas bem diferenciadas.	47
Figura 14-	Perfil de Latossolo amarelo, apresentando camadas mais homogêneas.	48
Figura 15-	Mapa hidrológico do Município de Recife.	50
Figura 16-	Médias mensais de precipitação na cidade do Recife.	51
Figura 17-	Relação precipitação e escorregamentos no mês de julho de 2014. As colunas azuis indicam o índice de precipitação, as laranjas o número de ocorrências de escorregamentos e a linha vermelha o limiar de 100mm de precipitação.	53

Figura 18-	Relação precipitação e escorregamentos no mês de junho de 2014. As colunas azuis indicam o índice de precipitação, as laranjas o número de ocorrências de escorregamentos e a linha vermelha o limiar de 100mm de precipitação.	54
Figura 19-	Ações antrópicas que influenciam na deflagração de escorregamentos. A) Água servida diretamente nas encostas. B) Realização de cortes e aterros para a construção de moradias.....	56
Figura 20 -	Áreas de encostas, com ocupações antrópicas, cobertas por lonas desgastadas em bairros da zona norte do Recife. a) Guabiraba, b) Macaxeira, c) Nova Descoberta, d) Dois Unidos.	58
Figura 21-	Fluxograma dos procedimentos metodológicos (materiais e métodos da pesquisa).	59
Figura 22-	Caixa de ferramenta Topo do Raster (ArcGIS) e MDT elaborado.....	61
Figura 23-	Tipos de curvatura.	62
Figura 24-	Fluxograma dos cenários de perigo instalados (cenários 1 e 2).	72
Figura 25-	Localização das áreas selecionadas para o cenário 3 (perigo potencial).	77
Figura 26-	Fluxograma do cenário de perigo potencial (cenário 3).	78
Figura 27-	Exemplo da estruturação da Equação do Cenário 1 na ferramenta Raster Calculador.....	81
Figura 28-	Exemplo de comparação entre as ocorrências de escorregamentos e as classes de perigo. Em vermelho estão as áreas de perigo muito alto indicadas na modelagem, em laranja os locais de perigo alto e assim sucessivamente. Os pontos pretos representam locais onde ocorreram escorregamentos.	82
Figura 29-	Mapeamento das ocorrências de escorregamentos do município de Recife (2013-2018).	85
Figura 30-	Exemplo de escorregamento no bairro de Dois Unidos - zona norte do Recife..	86
Figura 31	Imagem aérea de bairros da zona norte atingidos por escorregamentos, sendo possível observar a elevada densidade de moradias.	86
Figura 32-	Frequência de Distribuição (FD) das classes de declividade.....	88
Figura 33-	Mapa de Declividade do município de Recife.....	89
Figura 34-	Frequência de Distribuição (FD) das classes de curvatura.	90
Figura 35-	Mapa de curvatura do município de Recife.	91
Figura 36-	Frequência de Distribuição (FD) das classes de SPI.	92
Figura 37-	Mapa de SPI do município de Recife.	93
Figura 38-	Frequência de Distribuição (FD) das classes pedológicas.....	94

Figura 39-	Mapa pedológico do município de Recife.	95
Figura 40-	Frequência de Distribuição (FD) das classes geológicas.	96
Figura 41-	Mapa geológico do município de Recife.	97
Figura 42-	Frequência de Distribuição (FD) das classes de uso da terra.	98
Figura 43-	Mapa de uso da terra do município de Recife.	99
Figura 44-	Mapa de perigo do cenário 1 e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.	101
Figura 45-	Destaque para os principais locais de perigo alto e muito alto presentes no cenário 1.	102
Figura 46-	Sobreposição das ocorrências de escorregamentos e carta de perigo do cenário 1 (índice CE – Concentração de Escorregamentos).	104
Figura 47-	Mapa de perigo do cenário 2 e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.	106
Figura 48-	Destaque dos principais locais de perigo alto e muito alto presentes no cenário 2.	107
Figura 49-	Comparação do índice FD das classes de perigo nos cenários 1 e 2.	108
Figura 50-	Sobreposição das ocorrências de escorregamentos e a carta de perigo do cenário 2 (índice Concentração de Escorregamentos - CE).	109
Figura 51-	Comparação do índice Concentração de Escorregamentos (CE) em relação as classes de perigo para ambos os cenários.	110
Figura 52 -	Área pertencente à UCN Beberibe.	112
Figura 53-	Mapa de perigo potencial na UCN Beberibe e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.	113
Figura 54-	Área pertencente à APA da Várzea.	114
Figura 55-	Mapa de perigo potencial na APA da Várzea e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.	115
Figura 56-	Área pertencente à UCN das nascentes.	116
Figura 57-	Mapa de perigo potencial na UCN das Nascentes e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.	117
Figura 58-	Trecho da Reserva Ecológica de Dois Irmãos.	118
Figura 59-	Mapa de perigo potencial da Reserva Ecológica de Dois Irmãos e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.	119
Figura 60-	Comparação dos resultados do cenário 3.	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Classificação dos movimentos de massa. Em destaque (cinza) os processos avaliados nesta pesquisa.	18
Quadro 2- Classificação dos perigos naturais.	30
Quadro 3- Trecho da planilha eletrônica (banco de dados) de ocorrências de escorregamentos na cidade do Recife.	60
Quadro 4- Classes de uso da terra adaptadas de Almeida e Freitas (1996) e do Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013) para elaboração do mapa de uso.	64
Quadro 5- Pesos das classes de declividade.	69
Quadro 6- Pesos das classes de curvatura.	70
Quadro 7- Pesos das classes do SPI.	70
Quadro 8- Pesos das classes geológicas.	70
Quadro 9- Pesos das classes pedológicas.	71
Quadro 10- Pesos das classes de uso da terra.	71
Quadro 11- Hierarquia de decisão do cenário 1.	73
Quadro 12- Hierarquia de decisão do cenário 2.	75
Quadro 13- Hierarquia de decisão do cenário de perigo potencial.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Escala de juízo absoluto na comparação par a par no modelo AHP.	36
Tabela 2-	Intervalos dos mapas de curvatura.....	62
Tabela 3-	Escala de comparação AHP usada na pesquisa.	66
Tabela 4-	Exemplo de comparação par a par no AHP.....	67
Tabela 5-	Índices randômicos de acordo com a quantidade de parâmetros utilizados no modelo.	68
Tabela 6 -	Relação dos graus de perigo e pesos (segundo conjunto).....	69
Tabela 7-	Tabela de comparação par a par no cenário 1.....	73
Tabela 8-	Matriz normalizada do cenário 1.	74
Tabela 9-	Pesos das variáveis no cenário 1, representando o valor de cada variável na modelagem deste cenário.....	74
Tabela 10-	Comparação par a par do cenário 2.	75
Tabela 11-	Matriz Normalizada do cenário 2.	75
Tabela 12-	Pesos das variáveis no cenário 2.....	76
Tabela 13-	Comparação par a par do cenário de perigo potencial.....	79
Tabela 14-	Matriz normalizada do cenário de perigo potencial.	79
Tabela 15-	Pesos das variáveis do cenário de perigo potencial.....	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO e JUSTIFICATIVA	14
1.1	OBJETIVOS.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	ESCORREGAMENTOS: BASES CONCEITUAIS, TIPOLOGIAS E FATORES CONDICIONANTES	17
2.2	CONCEITOS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE DO PERIGO.....	27
2.3	MODELAGEM EM AHP (PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO).....	34
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	40
3.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E SUAS RELAÇÕES COM PROCESSOS DE ESCORREGAMENTOS	43
3.2	EVOLUÇÃO DA OCUPAÇÃO NAS ENCOSTAS DO RECIFE E ASPECTOS ANTRÓPICOS.....	55
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS (MATERIAIS E MÉTODOS).....	59
4.1	ELABORAÇÃO DO MAPA DE OCORRÊNCIAS	60
4.2	FATORES CONDICIONANTES NATURAIS E ANTRÓPICOS E ELABORAÇÃO DOS MAPAS TEMÁTICOS (PARÂMETROS AHP)	61
4.3	ELABORAÇÃO DAS CARTAS DE PERIGO E DE PERIGO POTENCIAL (CENÁRIOS DE PERIGO) POR MEIO DO MODELO AHP	65
4.3.1	Cenário 01 e Cenário 02 (cartas de perigo instalado)	72
4.3.2	Cenário 3 (cartas de perigo potencial).....	76
4.3.3	Criação das cartas de perigo e de perigo potencial	80
4.4	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	82
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
5.1	MAPEAMENTO DAS OCORRÊNCIAS DE ESCORREGAMENTOS	84
5.2	ANÁLISE DOS PARÂMETROS CONDICIONANTES UTILIZADOS NAS MODELAGENS	87

5.3	MAPEAMENTO E VALIDAÇÃO DAS CARTAS DE PERIGO INSTALADO (CENÁRIOS 1 E 2).....	100
5.4	MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PERIGO POTENCIAL	111
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	121
	REFERÊNCIAS	124

1 INTRODUÇÃO e JUSTIFICATIVA

A expansão das cidades brasileiras ocorreu, em linhas gerais, sem a adoção de critérios adequados de ordenamento territorial, o que criou uma organização desigual de muitas regiões metropolitanas do país. Consequentemente, populações de menor poder aquisitivo acabaram, geralmente, ocupando encostas muito declivosas ou margens de rios; situação que vem contribuindo para o aumento de assentamentos precários em áreas impróprias para a moradia e para a formação de novas áreas de risco e de perigo (FERNANDES *et al.*, 2002; BRASIL *et al.*, 2007, BRITO e WEBER, 2013).

De acordo com IBGE (2010), oito milhões de pessoas vivem em áreas de risco no país, distribuídas em 872 municípios com 2,4 milhões de moradias. Os habitantes desses locais estão expostos a fenômenos perigosos, como os escorregamentos e as inundações, que podem gerar vítimas e perdas econômicas. Dentre as cidades brasileiras, o município de Salvador (BA) é aquele que apresenta o maior número de setores de risco, seguido pelos municípios de São Paulo (SP) e do Rio de Janeiro (RJ). Nesse contexto, a cidade do Recife (PE) ocupa a quinta posição (IBGE, 2018).

Segundo a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC (2012) é dever da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios adotarem medidas necessárias à redução dos riscos de desastres naturais, promovendo estudos referentes às causas e às possibilidades de ocorrência de processos potencialmente perigosos (ex. escorregamentos); sua incidência, extensão e consequências (Lei Federal N° 12.608, 2012). Legalmente, as cartas de perigo são elementos indispensáveis, de competência obrigatória para todos os municípios brasileiros, uma vez que possibilitam o melhor direcionamento das políticas de prevenção contra desastres, sendo um instrumento fundamental para o planejamento urbano das cidades.

Embora os processos de inundações e de alagamentos sejam os mais frequentes no Brasil, são os movimentos gravitacionais de massa aqueles que provocam o maior número de vítimas fatais. Em um levantamento realizado pelo IPT (2017) (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo), entre 1998 e 2017, foram registradas aproximadamente 3.458 vítimas fatais devido a escorregamentos, destacando-se aqueles ocorridos na Serra do Mar Paulista e Carioca onde foram contabilizados 969 óbitos.

Os escorregamentos são processos complexos resultantes da interação de vários fatores, como a precipitação, a inclinação e a forma das encostas, as características litológicas e pedológicas, entre outros. Diante disso, uma série de modelos geoespaciais, muitas vezes associados com modelos matemáticos, começaram a ser utilizados na construção de mapas de suscetibilidade, de perigo ou de risco. Pois permitem ora a combinação de fatores condicionantes destes processos, ora a aplicação de equações matemáticas em rotinas automatizadas, possibilitando a criação de mapeamentos com maior acurácia. Dentre estes métodos, destaca-se o Processo Hierárquico Analítico (AHP), modelo que vem sendo bastante utilizado por muitos pesquisadores, tanto no Brasil (ex. BRITO, *et al.*, 2017 e BISPO, 2018), como internacionalmente (ex. KAYASTHA *et al.*, 2013 e KUMAR *et al.*, 2015).

O modelo AHP foi criado por Thomas Saaty na década de 1970, desenvolvido para auxiliar na tomada de decisões, principalmente na área de administração. No entanto, ele também pode ser aplicado em outras áreas, como na geomorfologia, no planejamento urbano, entre outras. Tal método tenta reduzir a subjetividade dos mapas de suscetibilidade e de perigo elaborados a partir de métodos heurísticos. Permite assim, que as considerações qualitativas, realizadas pelo pesquisador, encaixem-se em uma base estatística/matemática, produzindo cartas com maior acurácia e, ao mesmo tempo, podendo ser adaptadas as características locais da área estudada.

É importante destacar uma diferença conceitual entre os conceitos perigo, suscetibilidade, vulnerabilidade e risco nos estudos sobre escorregamentos. O **perigo** (*hazard*), conceito adotado nos cenários elaborados nesta pesquisa, representa a probabilidade de um processo danoso (escorregamentos) ocorrer e impactar a sociedade (WHITE, 1973). **Suscetibilidade** indica as condições de uma área que influenciam na deflagração de eventos perigosos. Segundo Ayala (2002), a **vulnerabilidade** representa os graus de perda, ou quantidade de danos sofridos, por uma comunidade frente a um desastre. Dessa forma, a vulnerabilidade quando somada ao perigo indica o **risco**.

Conforme já mencionado, a cidade do Recife apresenta a quinta maior população com áreas de risco no Brasil, em torno de 206 mil habitantes (IBGE, 2018). Muitas delas localizadas em encostas declivosas, exposta ao perigo a escorregamentos. De acordo com Bandeira (2010), entre 1984 e 2009, os processos de escorregamentos na cidade causaram 134 vítimas. De acordo com a Defesa Civil, entre os anos 2013 e 2017, foram registradas mais de 1000 ocorrências. Em 2019, ocorrências de escorregamentos na zona norte do município causaram nove vítimas fatais.

Nesse sentido, o mapeamento das áreas de perigo a escorregamentos na cidade pode ser uma ferramenta essencial para a localização dos pontos mais críticos, indicando os locais impróprios para a ocupação e aqueles que necessitam de futuras intervenções técnicas. Poderá, ainda, facilitar o planejamento de novas áreas de expansão urbana; contribuindo na instalação de novas redes de infraestrutura, entre outros.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é **avaliar o perigo a escorregamentos na cidade do Recife (PE) a partir do modelo AHP**. Visando cumprir o objetivo principal, os objetivos específicos são:

1. **Caracterizar, especialmente, as ocorrências de escorregamentos no município;**
2. **Elaborar dois cenários de perigo, em áreas já ocupadas, e um cenário de perigo potencial (áreas não ocupadas) e;**
3. **Validar os cenários de perigo propostos.**

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico desta pesquisa é apresentado em três capítulos: **(2.1)** escorregamentos: bases conceituais, tipologias e fatores condicionantes; **(2.2)** conceitos envolvidos na análise do perigo e **(2.3)** Modelagem em AHP (Processo Analítico Hierárquico).

2.1 ESCORREGAMENTOS: BASES CONCEITUAIS, TIPOLOGIAS E FATORES CONDICIONANTES

Os escorregamentos são um dos tipos de movimentos de massa. De maneira geral, os movimentos de massa caracterizam-se como eventos naturais de movimentação de solo, de rocha ou de vegetação ao longo de uma encosta sob a ação direta da gravidade, podendo ser acrescida, ou não, por outros agentes de transporte (ex. água ou gelo), que reduzem a resistência dos materiais das encostas, induzindo um comportamento plástico e fluido dos solos (SELBY, 1992; BIGARELLA *et al.*, 2003; GUERRA e MARÇAL, 2006). Para Drew (1983), os movimentos variam em função da natureza do material, da topografia, do clima e da vegetação, com baixas velocidades (ex. *creep* ou rastejo) ou bruscos, como as quedas e as corridas de detritos. São geralmente desencadeados por vários estímulos, que podem incluir chuvas intensas e prolongadas, terremotos, mudanças no nível da água, processos erosivos pretéritos, entre outros (HUABIN *et al.*, 2005).

Os movimentos de massa fazem parte da dinâmica da paisagem e destacam-se como um dos principais processos geomorfológicos responsáveis pela evolução e pela dinâmica do relevo, assim como outros processos exógenos (CROZIER, 1986). Remobilizam materiais ao longo das encostas em direção às planícies e promovem, juntamente com os processos erosivos, o recuo das encostas e a formação de rampas coluviais (DIAS e HERRMANN, 2002).

A grande variedade de materiais e de processos envolvidos na ocorrência dos movimentos de massa possibilita a existência de diferentes tipos. Neste sentido, existem classificações que diferem algumas características específicas quanto ao tipo do material e a velocidade dos processos, dividindo-os em relação a sua dinâmica, velocidade, geometria e material mobilizado (VARNES, 1978; SELBY, 1992; GUERRA, 2006). Existem diversas

classificações internacionais, como as propostas de Varnes (1978) e de Hutchinson (1968), entretanto, nacionalmente, a mais utilizada é a sugerida por Augusto Filho (1992), conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos movimentos de massa. Em destaque (cinza) os processos avaliados nesta pesquisa.

Processos	Dinâmica/Geometria/Material
Rastejos	• Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada
Escorregamentos	• Poucos planos de deslocamento (externos) • Pequenos a grandes volumes de material • Geometria e materiais variáveis: Planares – solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas	• Sem planos de deslocamento • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. Rolamento de matacão Tombamento
Corridas	• Muitas superfícies de deslocamento • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso • Desenvolvimento ao longo das drenagens • Velocidades médias a altas • Mobilização de solo, rocha, detritos e água • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho (1992).

Os **Rastejos (*creep*)** são movimentos lentos, com velocidade muito baixa a baixa (cm/ano), contínuos ou sazonais e com geometria indefinida, sem planos de ruptura e, geralmente, subsuperficiais (Figura 1, A) (SELBY, 1992; AUGUSTO FILHO, 1992.). Augusto Filho (1992, 1994) definiu as **Quedas de blocos (*rockfalls*)** como o desprendimento de materiais rochosos e de volumes variáveis de encostas íngremes, como movimentos rápidos (m/s), tipo queda livre ou em plano inclinado (Figura 1, B). As **Corridas de Detritos (*debris-flows*)** possuem caráter essencialmente hidrodinâmicos (Figura 1, C). Podem ocorrer a partir de movimentos de massa coletivos de encostas, cujo grande volume de material mobilizado (solo, rocha e vegetação) atingem as drenagens e formam uma massa viscosa de elevada densidade (SELBY, 1988; AUGUSTO FILHO, 1992.).

Figura 1 - A) Exemplo de área afetada por movimento de rastejo. B) Queda de blocos na BR 259, entre os municípios de Colatina e Baixo Guandu (ES). C) Corrida de detritos em Teresópolis, região serrana do Rio de Janeiro.



Fonte: A) UNESP/IGCE (1999). B) Folha de Vitória (2018). C) Foto de Fabio Motta/AE.

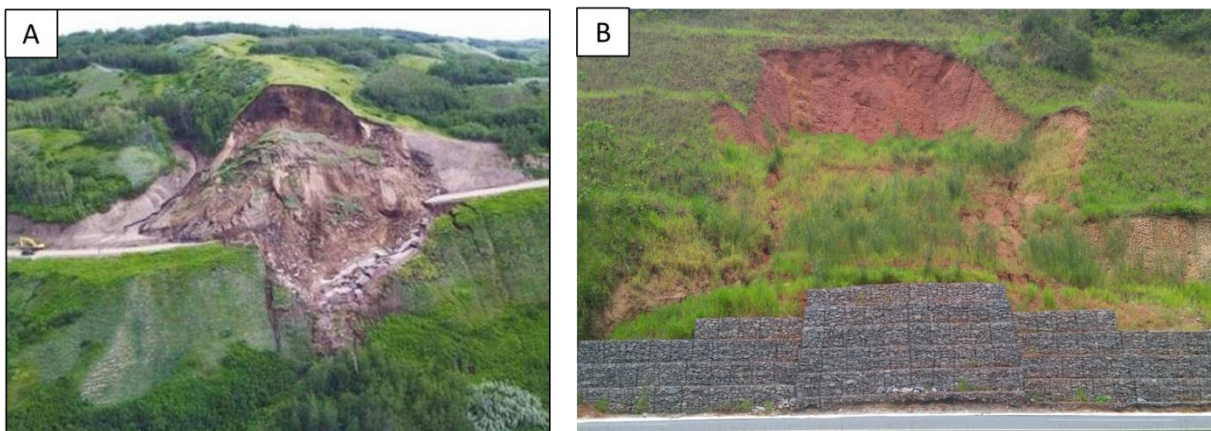
Os **escorregamentos (*landslides*)**, processo estudado neste trabalho, são movimentos rápidos, com volumes definidos, deslocando-se pela ação da gravidade, para baixo e para fora

do talude ou da encosta. Apresentam um plano de ruptura bem definido, que permite a distinção entre o material deslizado (solo, rocha e/ou vegetação) e aquele que não foi movimentado (AUGUSTO FILHO, 1992; TOMINAGA *et al.*, 2007; RODRIGUES, 2013). São movimentos resultantes de falhas do cisalhamento ao longo de um ou mais pontos em uma encosta (VARNES, 1984).

O material movimentado pode ser constituído por solo, rocha ou por materiais tecnogênicos (ex. lixo doméstico e sedimentos da construção civil), ou pelo conjunto destes. Assim, considerando-se a geometria e a natureza dos materiais instabilizados, os escorregamentos podem ser subdivididos em três tipologias: **escorregamentos rotacionais ou circulares**, **escorregamentos translacionais ou planares** e **escorregamentos em cunha** (IPT, 1991; FERNANDES e AMARAL, 1996; TOMINAGA *et al.*, 2007; RODRIGUES, 2013).

Escorregamentos rotacionais ou circulares (*slumps*) (Figura 2) se caracterizam por uma superfície de ruptura curva, côncava para cima, e bem definida, ocasionados por movimentos rápidos e rotacionais do solo (VARNES, 1978; SELBY, 1988; USGS, 2004; RODRIGUES, 2013). Segundo Selby (1988), esses movimentos são causados pela retirada de materiais da base da encosta, sendo comuns em encostas alteradas pela realização de cortes, ou por condições naturais, especialmente quando o sopé é erodido pela ação fluvial.

Figura 2 - A) Escorregamento rotacional ocorrido no Vale do Rio Beaton, British Columbia, Canada.
B) Exemplo de escorregamento rotacional em um trecho da BR-101 no estado de Pernambuco.



Fonte: A) Rejean Couture, Canada Geological Survey (2001). B) Autor.

Os escorregamentos do tipo cunha (Figura 3) estão associados à saprólitos e a maciços rochosos, onde a existência de dois planos de fraqueza desfavorável à estabilidade condiciona o deslocamento ao longo do eixo de intersecção destes planos. Os escorregamentos em cunha são os mais comuns em taludes de corte ou em encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento natural, como erosão e escorregamentos pretéritos, ou devido a causas antrópicas (AUGUSTO FILHO, 1992; LIMA, 2002; BRASIL *et al.*, 2007).

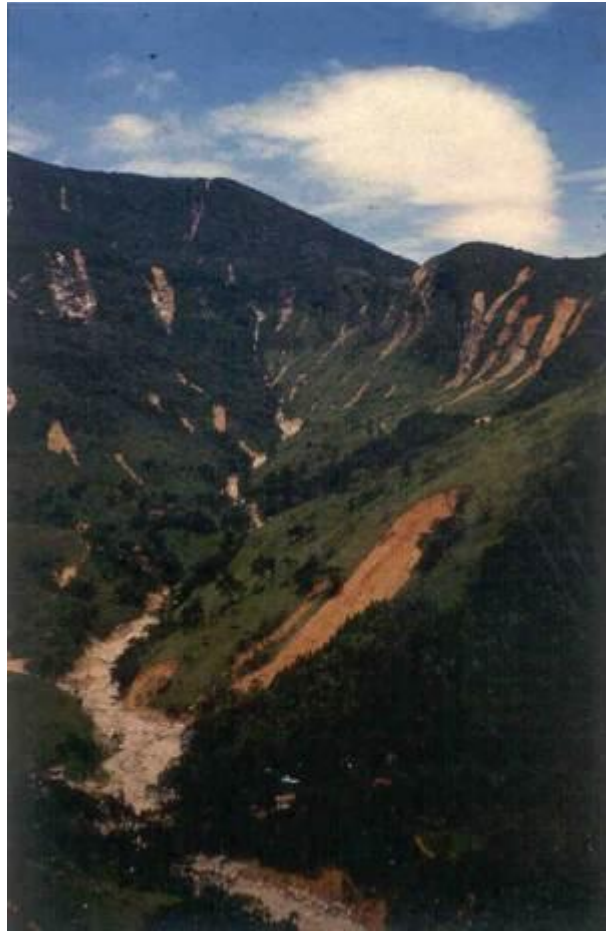
Figura 3: Exemplo de escorregamento do tipo cunha.



Fonte: Slideshare, Giovanna Ortiz (2013).

Escorregamentos translacionais rasos ou planares (Figura 4) são os mais frequentes no Brasil, sendo típicos em perfis de solo rasos, separados por planos de fraqueza, tais como o contato entre dois horizontes de solo; entre duas camadas de sedimentos; entre horizontes de solo e saprólitos ou entre horizontes de solo e rocha sã, que representam descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas derivadas de processos geológicos, geomorfológicos e/ou pedológicos (SELBY, 1988; HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008). Ocorrem, normalmente, durante períodos de chuva intensa e prolongada, sendo deflagrados em encostas íngremes, cujo plano de ruptura varia entre 0,5 m e 5 m de profundidade (SELBY, 1988; AUGUSTO FILHO, 1992; FERNANDES e AMARAL, 1996; RODRIGUES, 2003).

Figura 4 - Escorregamentos translacionais rasos que resultaram em uma corrida de detritos na Serra do Mar paulista.



Fonte: UNESP/IGCE (1999).

Os escorregamentos translacionais associados com maior quantidade de água podem evoluir para corridas de detritos, sobretudo quando ocorrem diversos processos em uma mesma encosta que está próxima a cabeceiras de drenagem. Ou podem ser converter em rastejos, após acumulação do material coluvionar depositado no sopé das encostas, geralmente incoesos e instáveis. O material nesse tipo de escorregamento pode variar de solo desfragmentado e não adensado até grandes placas de rochas, ou ambos (SELBY, 1992; TOMINAGA, 2007; HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

Os escorregamentos translacionais são os mais comuns nas encostas da Região Metropolitana do Recife (RMR) (Figura 5). Segundo Alheiros (1998), esses processos são resultados da ruptura das condições de equilíbrio, definidas por fatores geológicos, geomecânicos e climáticos, tendo as chuvas um papel fundamental na deflagração, como

também, as ações antrópicas. O solo pode ter seus espaços vazios preenchidos por ar e água, determinando um maior ou menor grau de saturação, reduzindo a resistência no caso de solos coesivos e em variações de pressões no interior dos maciços (ALHEIROS, 1998). Na cidade, eles ocorrem principalmente sobre sedimentos miocênicos da Formação Barreiras, muito em função da diferenciação no teor de argila nas camadas subsuperficiais do solo, principalmente nos Argissolos, que favorece zonas de rupturas na transição entre camadas mais arenosas e argilosas. (ALHEIROS, 1998). Diferentemente dos escorregamentos ocorridos no sudeste do Brasil, especialmente na região da Serra do Mar, os escorregamentos no município são mais rasos, com zonas de ruptura mais superficiais, e ocorrem, predominantemente, em formações sedimentares. Estes estão ligados diretamente a ações antrópicas sobre as encostas (realização de corte, aterros, entre outras).

Figura 5 - Escorregamento translacional ocorrido no município de Olinda, Região Metropolitana do Recife.



Fonte: Diário Causa Operária (2019).

Os escorregamentos são processos complexos desencadeados por vários fatores condicionantes, influenciados por fatores intrínsecos à encosta, como também, por fatores externos, naturais, que podem ser potencializados por atividades antrópicas. Assim, os principais condicionantes na deflagração desses eventos são os fatores geológicos,

geomorfológicos, climáticos, pedológicos, fitogeográficos e antrópicos. Dessa forma, a análise morfodinâmica, que considera a dinâmica atual do relevo, na qual o homem se constitui como principal agente modificador da paisagem, mas também numa perspectiva histórica (eventos morfogenéticos, pedológicos e climáticos/paleoclimáticos), é essencial para se entender esses processos. (CASSETI, 2001).

Segundo Guidicini e Nieble (1984) e Tominaga (2007) os fatores condicionantes podem ser classificados como agentes predisponentes e agentes efetivos. Os agentes predisponentes correspondem ao conjunto de condições geológicas, topográficas e ambientais da área de desenvolvimento dos escorregamentos, sendo, portanto, agentes naturais relacionados às características dos materiais, desconsiderando ações antrópicas na paisagem. Esses agentes podem ser diferenciados nos complexos geológico-geomorfológico (comportamento das rochas, perfil e espessura do solo em função da maior ou da menor resistência da rocha ao intemperismo) e hidrológico (escoamento superficial e sub-superficial e tipo de drenagem), sendo que, a vegetação natural e a gravidade também podem ser incluídas (BRASIL *et al.*, 2007).

Os agentes efetivos referem-se aqueles diretamente responsáveis pelo desencadeamento dos processos, subdivididos em preparatórios (ex. pluviosidade, erosão pela água e pelo vento, congelamento e degelo, variação de temperatura e de umidade, dissolução química, ação de animais ou humana) e imediatos (chuva intensa, terremotos, erosão, vento, ação humana, entre outras) (BRASIL *et al.*, 2007; TOMINAGA, 2007).

A **precipitação** representa um dos principais agentes de input de energia dentro de um sistema na ocorrência dos escorregamentos (VARNES, 1984), já que a água é um dos principais influenciadores nos processos morfodinâmicos em ambientes tropicais úmidos. Segundo Selby (1988), para a ocorrência de escorregamentos, são necessários intensos e prologados eventos de precipitação. Além da análise individual da pluviometria, é de considerável importância à análise da precipitação acumulada, grande responsável pela saturação do solo, em conjunto com eventos extremos de precipitação. No contexto da cidade do Recife, a precipitação acumulada é um dos principais deflagradores dos processos.

A **morfologia das encostas** (ou parâmetros topográficos) apresenta um papel importante na ocorrência dos processos, uma vez que condicionam as relações entre a forma e a hidrologia (superficial e sub-superficial) da encosta, influenciado, portanto, em uma suscetibilidade atual. Tais parâmetros englobam elementos como a declividade, a forma da

encosta (em perfil e em planta), a área de contribuição, a orientação das encostas (aspecto), o comprimento da rampa, a forma e a composição dos depósitos, entre outros (FERNANDES e AMARAL, 1996; FERNANDES *et al.*, 2002; GIRÃO e CORRÊA, 2004). A declividade refere-se ao gradiente da encosta (níveis de inclinação), influenciando na velocidade do escoamento superficial da água sobre a encosta e na ação gravitacional dos materiais presentes (GIRÃO e CORRÊA, 2004; LISTO, 2011). Sidle *et al.* (1985) apontam que existem muitas generalizações sobre o grau de inclinação necessária para a ocorrência de escorregamentos, no entanto, inclinações superiores a 25° são, geralmente, muito sujeitas a escorregamentos.

Em relação à forma da encosta (curvatura), estas podem ser classificadas em três tipos distintos: convexa, côncava e retilínea. Conforme Guerra (1998) e Fernandes e Amaral (1996) as formas côncavas, por serem zonas de convergência de sedimentos e de fluxos d'água, são mais favoráveis aos escorregamentos. Segundo Sidle *et al.* (1985), as formas côncavas são mais propensas a desenvolver lençóis freáticos, de modo que as pressões nos poros aumentam mais rapidamente e em maior extensão do que em outras formas de encostas. Selby (1988) considera que as encostas retilíneas potencializam processos erosivos de grande velocidade, que podem influenciar na ocorrência de escorregamentos. Já as encostas convexas apresentam uma maior dissipação da água (SIDLE *et al.*, 1985).

Stream power index (SPI) é um atributo topográfico usado em várias pesquisas relacionadas a escorregamentos, como: Kumar *et al.* (2015), Kumar e Annadurai (2015), Kanwal *et al.* (2017). Representa a potência dos fluxos superficiais, indicando o poder de erosão da água, levando em consideração apenas a morfologia do relevo. Podendo ser usado para identificar locais com maior potencial à ocorrência de processos erosivos, que no geral, desestabilizam as encostas e influenciam na deflagração dos escorregamentos. O SPI é um produto gerado a partir da relação dos parâmetros declividade e acumulação de fluxos. Os locais de elevado SPI representam áreas de maior dissecação do relevo, com maior atuação de processos erosivos e de movimentos de massa (MOORE *et al.*, 1991; POURGHASEMI *et al.*, 2012).

A natureza dos processos morfodinâmicos, incluindo os escorregamentos, é influenciado pelas características **litológicas** e da **estrutura geológica** dos modelados. A litologia inclui a composição, a textura e outros atributos, que influenciam na física ou na química de sedimentos e de rochas. São fundamentais na determinação da força do cisalhamento, da permeabilidade, da suscetibilidade ao intemperismo físico ou químico, do

tamanho dos sentimentos e de outras características de materiais rochosos, solos ou sedimentos, influenciando, diretamente, na estabilidade das encostas (VARNES, 1984; PACHAURI e PANT, 1992).

Além da litologia (composição física e química dos materiais), a estrutura geológica: em falhas, em fraturas nas rochas, em depósitos de encostas (colúvio ou talos), também influenciam na ocorrência dos processos. Estes permitem a formação de descontinuidades no contanto de diferentes tipos de materiais, favorecendo à ocorrência de escorregamentos, principalmente, os rasos. Pode-se tomar como exemplo a descontinuidade existente entre o contato do elúvio ou colúvio e a rocha, considerando que, inicialmente, há infiltração da água no material sedimentar incoeso e, posteriormente, o escoamento subsuperficial sobre a rocha, induzindo a instabilidade (VARNES, 1984; PACHAURI e PANT, 1992; FERNANDES e AMARAL, 1996; DAI e LEE, 2002).

As propriedades dos **solos** que mais afetam a estabilidade de encostas são aquelas que influenciam na taxa de movimentação de água nas camadas subsuperficiais e na sua capacidade de retenção. Estas incluem propriedades intrínsecas, como a distribuição de partículas, de granulometria, de tamanho dos poros (porosidade), de resistência ao cisalhamento e das características hidrológicas, condutividade hidráulica saturada e não saturada (SIDLE *et al.*, 1985; FERNANDES *et al.*, 2002). Sidle *et al.*(1985) ainda apontam os fatores de gradiente e de forma da encosta, de profundidade do lençol freático, de evapotranspiração e de uso da terra, com influência direta no armazenamento e na movimentação da água nas camadas subsuperficiais.

A **cobertura vegetal** pode influenciar tanto negativamente quanto positivamente para a estabilidade das encostas (VARNES, 1984). Os sistemas de raízes propiciam maior grau de resistência dos solos (ancoramento), promovendo uma maior coesão (condição de estabilidade). As condições de desestabilização da vegetação incluem porte inadequado, peso, ação do vento sobre a copa das árvores, entre outras. (SIDLE *et al.*, 1985; CASSETI, 2001).

Com relação aos **fatores antrópicos**, a apropriação de novos espaços, e mesmo a expansão de espaços já ocupados, por meio de diversas intervenções que o homem realiza no ambiente urbano, caracteriza-se como um fator que atua de forma mais intensa na desestabilização do relevo (GIRÃO e CORRÊA, 2004). As pressões antrópicas alteram as morfologias originais e criam morfologias antropogênicas, muitas vezes com elevado grau de instabilidade (RODRIGUES, 2005).

São exemplos de agentes deflagradores antrópicos: a remoção da cobertura vegetal; o lançamento e a concentração de águas pluviais e/ou servidas; o vazamento na rede de água e de esgoto; a presença de fossas; a execução de cortes com alturas e com inclinações acima de limites tecnicamente seguros; a execução deficiente de aterros (quanto à compactação, geometria e fundação); a execução de patamares (aterros lançados) com o próprio material de escavação dos cortes lançados sobre o terreno natural; o lançamento de lixo e de entulho nas encostas; a retirada de solo superficial, expondo os horizontes mais suscetíveis a processos de dinâmica superficial; entre outros (ALHEIROS, 1998; GIRÃO e CORRÊA, 2004; RODRIGUES, 2005; BRASIL *et al.*, 2007; SANTANA e LISTO, 2018).

Nesse sentido, embora sejam processos naturais, os movimentos de massa são influenciados diretamente pelas ações antrópicas supracitadas. Assim, o crescente número de habitações em áreas naturalmente suscetíveis no Brasil, sem o adequado planejamento do uso da terra e sem a adoção de técnicas adequadas de estabilização, está aumentando a ocorrência de acidentes associados a estes processos, que muitas vezes acabam atingindo dimensões de desastres (DREW, 1983; GUERRA e MARÇAL, 2006; BRASIL *et al.*, 2007; TOMINAGA *et al.*, 2007).

2.2 CONCEITOS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE DO PERIGO

Um dos principais problemas nas pesquisas sobre desastres naturais é a existência de múltiplas definições de importantes conceitos, como suscetibilidade, perigo, risco e vulnerabilidade. Devido à polissemia destes termos, o seu estudo se tornou fragmentado, apresentando diferentes perspectivas em vários campos da ciência, alguns considerando seus aspectos mais práticos, outros mais teóricos (MARANDOLA e HOGAN, 2004; RODRIGUES, 2013). Dessa forma, no estudo destes processos em áreas urbanas, torna-se relevante a definição da linha de pensamento e da forma como os conceitos serão abordados nesta pesquisa.

De acordo com a UN-ISDR (2004) - Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres, Risco pode ser definido como: “a probabilidade de consequências prejudiciais, ou danos esperados (morte, ferimentos a pessoas, prejuízos econômicos) resultantes da interação entre perigos naturais ou induzidos pela ação humana e as condições de vulnerabilidade”. Segundo BRASIL *et al.* (2007), risco é a relação entre a possibilidade de

ocorrência de um processo ou fenômeno perigoso e a magnitude de danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade. Assim, risco é a relação entre o perigo e a vulnerabilidade conforme a Equação 1.

$$\text{RISCO} = \text{PERIGO} \times \text{VULNERABILIDADE}$$

(Equação 1)

O risco deve ser um fator calculável avaliável. A partir do momento em que o cálculo probabilístico atinge seu limite, a noção de risco perde a sua pertinência e entra-se no domínio da incerteza (VEYRET, 2003). Segundo Veyret (2003), risco pode ser definido como uma representação de uma *aléa* (perigo) afetando os alvos que constituem indicadores de vulnerabilidade, indicando tanto a probabilidade dos acontecimentos quanto as suas possíveis consequências. Deve-se esclarecer que a autora usa o termo *danger* (perigo), para definir eventos totalmente aleatórios, sem a possibilidade de previsão (ex. a queda de um meteoro), e usa o termo francês *aléa*, equivalente a *hazard* no inglês, como um acontecimento possível, que pode ser previsto pelos membros da sociedade, existindo assim, a possibilidade de análise da probabilidade espacial de sua ocorrência.

Para Highland e Bobrowsky (2008), a análise do risco deve contar com três principais elementos; sendo o primeiro a probabilidade de ocorrência de um evento, cujo tamanho e localização causariam vítimas, danos ou rompimento de um padrão existente da segurança. O segundo é a localização e a extensão esperadas dos efeitos do evento sobre o solo, as estruturas ou as atividades socioeconômicas. E por fim (terceiro elemento), a estimativa da gravidade dos efeitos sobre o solo, as estruturas ou as atividades socioeconômicas.

Os mapeamentos de risco são importantes instrumentos no gerenciamento de áreas urbanas, tendo uma relevante utilização técnica, social e política, podendo ser utilizados como instrumentos de planejamento, indicador de áreas prioritárias para intervenções com base técnica, sistema de monitoramento de pontos críticos, entre outros. Mas sua realização não é uma tarefa simples, devido ao nível de informações detalhadas do local, motivo que tem levado a maioria desses mapeamentos serem em áreas de extensões limitadas, devido, também, à complexidade e à dificuldade de se estimar a composição do perigo e do potencial de perda (CERRI, 1993; TOMINAGA, 2006; BANDEIRA, 2010).

Segundo Cerri (1993), os mapeamentos de risco podem ser realizados em duas escalas (zoneamento ou cadastramento de risco). Os zoneamentos compreendem a identificação dos processos destrutivos atuantes, onde são delimitados setores, nos quais, em geral, encontram-se instaladas várias moradias. Nos setores são observados as características da área de forma geral e o grau de risco do setor. Um setor de risco alto pode apresentar algumas moradias (situações pontuais) que não apresentam situação de risco condizente com este grau, mas que são inseridas devido à generalização escalar.

Nos mapeamentos cadastrais (cadastro de risco), o risco é avaliado de forma pontual, com informações específicas de cada moradia. Nesse tipo de mapa, os pontos são plotados, tendo informações sobre a moradia (números de moradores, tipologia da construção, grau de risco da moradia, entre outros) (BANDEIRA, 2010; BRASIL *et al.*, 2007). Desse modo, os resultados do zoneamento de risco podem indicar as áreas prioritárias para a realização do cadastramento, otimizando, assim, os trabalhos de campo a serem executados (CERRI *et al.*, 2007). No Brasil, os mapeamentos de risco já foram amplamente realizados, tais como Macedo *et al.* (2004), Cerri *et al.* (2007), Listo (2011).

De acordo com a UN-ISDR (2004), o perigo (*hazard/aléa*) é definido como: “Evento, fenômeno ou atividade humana potencialmente danosa, o qual pode causar perda de vidas ou ferimentos a pessoas, danos a propriedades, rupturas socioeconômicas ou degradação ambiental”. Pode ser considerado a possibilidade de um evento ou fenômeno natural potencialmente danoso ocorrer em um determinado local e num período de tempo (VARNES, 1984; TOMINAGA *et al.*, 2004). Segundo Veyret (2003), perigo é um acontecimento possível, podendo ser um processo natural, tecnológico, social, econômico e sua probabilidade de acontecer. A *United Nations Disaster Relief Office* (Undro) (1982) também coloca perigo como a probabilidade da ocorrência de um fenômeno potencialmente prejudicial.

Como mencionado anteriormente, o perigo representa a probabilidade da ocorrência de um processo, mas um acontecimento só se caracteriza como perigoso quando existe a possibilidade de afetar, indiretamente ou diretamente, o homem, trazendo prejuízos para uma determinada comunidade (WHITE, 1973). Dessa forma, o perigo pode ser entendido como a associação entre os processos (ex. escorregamentos) e a sua possibilidade de impactar o homem, englobando assim, elementos naturais e antrópicos, tal como será trabalhado nesta pesquisa.

Segundo Monteiro (1991), é necessário considerar que a existência de natural hazard (perigos naturais) é uma função do ajustamento humano a eles, envolvendo sempre a iniciativa e a decisão humana. Nessa perspectiva, as inundações não seriam danosas se a população não ocupasse as planícies de inundação, como também, os escorregamentos não causariam danos se parte de seus habitantes não fossem induzidos a formas de urbanização espontânea, precária, em locais declivosos. Assim, pode-se definir que as cartas de perigo a escorregamentos indicam as áreas, com ocupações ou estruturas antrópicas, que possam ser impactadas por processos danosos, apresentando menor ou maior grau de probabilidade.

Nesse contexto, os perigos naturais (natural hazard) podem ser subdivididos em três grandes topologias: hidrometeorológicos, geológicos e biológicos conforme o Quadro 2 (AYALA, 2001; VEYRET, 2003; UN-ISDR, 2004; KOBAYAMA *et al.*, 2006).

Quadro 2 - Classificação dos perigos naturais.

Perigos Naturais (<i>Natural Hazard</i>)	
Processos ou fenômenos naturais que ocorrem na biosfera e que podem constituir-se em um evento danoso. Podem ser classificados em hidrometeorológicos, geológicos e biológicos.	
Origem (perigos naturais)	Exemplo de fenômenos
Perigos geológicos Processos ou fenômenos naturais que podem ser de origem endógena ou exógena	Terremotos, tsunamis; Movimentos de massa, escorregamentos quedas de blocos; Atividades vulcânicas
Perigos hidrometeorológicos Processos ou fenômenos naturais de natureza atmosférica, hidrológica ou oceanográfica	Inundações/enchentes, corridas de detritos; Ciclones tropicais, ventanias, tempestades, furacões, nevasca relâmpagos;
Perigo Biológico Processo de origem biológica ou aqueles transmitidos por vetores biológicos, incluindo exposição aos microrganismos patogênicos, tóxicos e substâncias bioativas.	Eclosão de doenças epidêmicas, contágios de plantas ou animais e de infecções extensivas.

Fonte - Tominaga *et al.* (2006) baseado em UN-ISDR (2004).

Guzzetti *et al.* (1999) afirma que a definição de *hazard* incorpora três conceitos: magnitude, localização geográfica e tempo de recorrência. O primeiro refere-se à dimensão ou à intensidade do fenômeno, quais foram as condições para seu acontecimento e o seu poder destrutivo. O segundo está relacionado à identificação dos lugares de maior ocorrência dos processos. Por fim, o terceiro, a recorrência temporal desses fenômenos. Selby (1992), também pontua *hazard* como a probabilidade de ocorrência de um processo, englobando sua localização espacial, seu período de tempo e sua magnitude.

Tominaga *et al.* (2007) consideram a suscetibilidade natural do terreno e as características de uso e ocupação da terra como indicadores de perigo. Incluem, ainda, os mapeamentos de inventários e de ocorrências como métodos quantitativos de avaliação do perigo. Já as análises geomorfológicas de campo (combinações de mapas índices dos fatores que afetam a estabilidade das encostas), podem ser consideradas elementos qualitativos (TOMINAGA *et al.*, 2007).

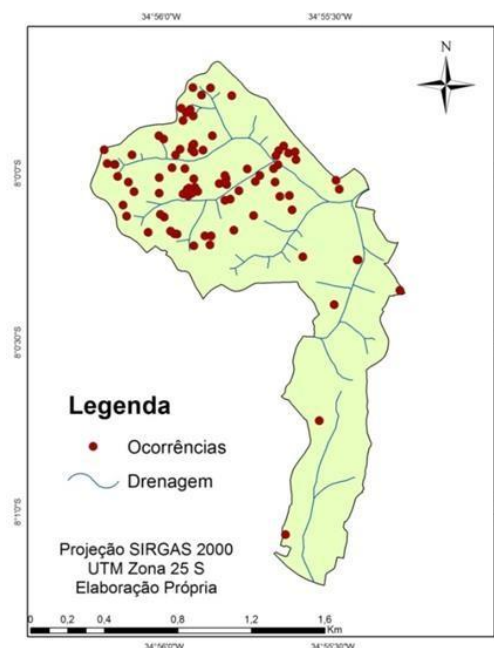
Outro conceito importante é a suscetibilidade, podendo ser considerada a incidência espacial do perigo. Representando a propensão natural, ou induzida, de uma área para a deflagração de eventos perigosos. Os estudos da suscetibilidade devem preceder a avaliação do perigo, indicando os locais que apresentem potencialidades para a ocorrência dos processos. Estes podem auxiliar no direcionamento das políticas públicas para o planejamento do uso da terra, indicando locais inadequados para a ocupação (FELL *et al.*, 2008; JAAFARI *et al.*, 2014; SILVEIRA *et al.*, 2014; BRITO, 2014). Diferente do perigo, a suscetibilidade não avaliará a probabilidade de uma comunidade ou estrutura social ser atingida por um evento danoso. Tal termo, nesta pesquisa, será referente às condições e as chances de um escorregamento acontecer em um determinado local.

A vulnerabilidade avalia os impactos danosos dos processos sobre os alvos, ou seja, o grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área passível de ser afetada por escorregamentos, colocando sempre o agente antrópico como elemento vulnerável dos eventos estudados. Desta forma, a vulnerabilidade corresponde a um conjunto de condições sociais, econômicas, políticas, culturais, técnicas, educativas e ambientais que tornam a sociedade mais exposta ao perigo (VEYRET, 2003; UN-ISDR, 2004; BRASIL *et al.*, 2007). A vulnerabilidade analisa o grau de perda e o impacto de um evento danoso sobre as pessoas, já o perigo avalia apenas as chances dessas pessoas serem atingidas.

A análise do perigo a escorregamentos pode incluir métodos empíricos, heurísticos e determinísticos (FERNANDES E AMARAL, 1996). No método empírico são considerados os mapas de inventário, que representam a distribuição espacial dos processos contendo registros antigos e recentes dos escorregamentos (GUZZETI *et al.*, 1999; PARISE, 2001). O mapa de inventário é a base necessária para a produção de mapas adicionais, como cartas de perigo, considerando que as condições de terreno onde ocorreram os processos pretéritos e recentes, geralmente, serão as mesmas que poderão deflagrar novos eventos (BAUZYS, 2012).

É importante esclarecer, que os mapas de inventário não representam apenas a localização espacial dos eventos, uma vez que indicam mais dados dos processos (ex. quantidade de material mobilizado, data, saturação do solo, número de imóveis atingidos, extensão do evento, perímetro, área, entre outros). Dessa forma, quando se apresenta somente a localização espacial dos eventos, estes mapas se classificam como mapas de ocorrências. Estes também são instrumentos essenciais para a validação de mapeamentos de perigo, bem como para indicar a localização exata de escorregamentos. São bastante aplicáveis em diversas escalas (ex. municipais, bairros, distritos, entre outros), conforme exemplificado na Figura 6.

Figura 6 - Exemplo de mapa de ocorrências de escorregamentos no bairro de Nova Descoberta, Zona norte do Recife.



Fonte: Santana *et al.* (2018).

Os métodos heurísticos utilizam combinações de diferentes mapas temáticos (ex. pedológico, geológico, geomorfológico, vegetação, entre outros) com base no conhecimento prévio de especialistas sobre processos de instabilização e da área de estudo (GUZZETI *et al.*, 1999; entre outros). Nestes são atribuídos notas e pesos para cada fator condicionante, a partir da experiência do profissional e das características específicas de cada área (FERNANDES *et al.*, 2002). Esse método pode ser considerado como uma análise da suscetibilidade quando engloba apenas elementos intrínsecos a paisagem natural. Quando são considerados também os fatores condicionantes antrópicos (ex. uso e ocupação da terra) caracteriza-se a avaliação do perigo.

Dos métodos heurísticos, existem três lógicas principais adotadas, atualmente, em Geoprocessamento: lógicas Booleana, lógica Fuzzy e lógica AHP (Processo Analítico Hierárquico). O Modelo Booleano baseia-se na combinação de vários mapas binários, em cada posição x e y , para produzir um mapa final, no qual a classe 1 indica áreas que satisfazem determinadas condições pré-estabelecidas (ex. áreas mais perigosas a movimentos de massa) e a classe 0 indica as demais áreas (CARTER, 1994).

A lógica Fuzzy se distingue da Booleana por permitir um intervalo dos limites 0 e 1; em outras palavras, ela permite a utilização de valores intermediários neste intervalo, como por exemplo, de 0 a 0,2 (menor suscetibilidade), 0,21 a 0,5 (suscetibilidade média), 0,51 a 0,7 (suscetibilidade alta) e de 0,71 a 1 (suscetibilidade muito alta). Como é uma lógica que utiliza valores contínuos, é necessária uma representação por conjuntos, descritos por funções (LEITE, 2005 apud SUI, 1992).

Na evolução dos métodos heurísticos, sobretudo para a redução da subjetividade, foi criado o método conhecido como Processo Analítico Hierárquico (AHP), desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, descrito no próximo capítulo seguir.

Vários trabalhos, nacionais e internacionais, que utilizaram métodos heurísticos em estudos sobre a probabilidade da ocorrência de escorregamentos se referem ao termo suscetibilidade, mesmo usando parâmetros antrópicos. São os exemplos de: Hasekiogullari e Ercanoglu (2012), Kayastha *et al.*(2013), Torres (2014), Jaafari *et al.*(2014), Ashok e Reghunath (2017), Bispo (2018), Xiong *et al.*(2017).

Isso acontece, provavelmente, porque referências internacionais, bastante influentes, como Varnes (1984), Selby (1992), Guzzeti *et al.*(1999), Fell *et al.*(2008), afirmarem que na análise do perigo é necessário tanto a probabilidade espacial, em qual local vai acontecer, e a

temporal, em qual momento. Escorregamentos são fenômenos complexos, estimções do seu tempo de recorrência ou de ocorrência são grandes desafios, estando sempre sujeitas a erros. Desta forma, grande parte das pesquisas preferem usar o termo suscetibilidade, mesmo que os fenômenos estudados possam atingir diretamente elementos sociais.

No entanto, uma encosta é suscetível a escorregamentos pelas suas características naturais ou induzidas. Mas as populações que habitam, sobre ou próximas a essa encosta, estão em situação de perigo. Assim, perigo está relacionado sempre ao elemento social exposto a determinado evento danoso. A partir disso, nada impede de se analisar o perigo apenas pela sua representação espacial. Elaborando mapas que indiquem áreas, com comunidades ou estruturas sociais, que apresentem maior ou menor probabilidade de serem impactadas por eventos perigosos, realizando ou não estimativas temporais.

2.3 MODELAGEM EM AHP (PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO)

Modelagens espaciais propõem simular, em ambiente computacional, fenômenos do mundo real que possuem uma dimensão espacial e temporal (KAWASHIMA *et al.*, 2016). Caracterizam-se como expressões dos processos da dinâmica do espaço, apresentando diversas aplicações, tais como modelos de simulações de processos naturais (ex. erosão, movimentos de massa, inundações), entre vários outros. Incluem também modelos de processos sociais, como a segregação residencial ou o crescimento urbano (CARTER, 1994; ALMEIDA *et al.*, 2003; KAWASHIMA *et al.*, 2016).

Segundo Longly *et al.*(2011), o elemento comum em todos os modelos espaciais é a manipulação de informações geográficas em múltiplos estágios. Dessa forma, são simplificações da realidade e os seus componentes são objetos espaciais, que permitem uma aproximação com o empírico (CARTER, 1994). Tais modelos são construídos para apoiar uma decisão no qual o pesquisador busca uma solução para um problema que se distribui espacialmente (LONGLY *et al.*,2011).

Existem vários tipos de modelos, o estático é um deles. A sua representação cartográfica representa um único ponto no tempo e tipicamente combina múltiplas entradas, diferentes mapas temáticos (ex. declividade, precipitação, uso do solo, pedologia), e apenas uma saída (ex. mapa de localização das áreas de perigo a escorregamentos). Não há passos temporais nem ciclos, mas os resultados frequentemente são de grande valor como

indicadores para tomadas de decisões. (LONGLY *et al.*,2011). O modelo aplicado nesta pesquisa se enquadra nessa categoria.

Os modelos espaciais tornaram-se um ramo bastante difundido nas ciências, particularmente na Geografia. Suas escalas podem variar desde a molecular para a astronômica, mas sempre restritas a uma escala geográfica definida (FOTHERINGHAM e WEGENER, 1999). Assim, é sempre necessário o estabelecimento de uma escala, temporal e espacial, para analisar fenômenos geográficos, que ocorrem em determinado momento e local do espaço.

As representações nas primeiras gerações de modelos espaciais computadorizados eram generalistas e simples, ao mesmo tempo ineficientes, já que os fenômenos espaciais não se apresentam de forma simplista. Neles não ocorriam representações espaciais e nem análise das interações dos elementos. Assim, os fenômenos eram vistos isoladamente, em relação ao seu meio (FOTHERINGHAM e WEGENER, 1999). Com o avanço da tecnologia dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), os modelos espaciais vêm se tornando mais complexos, com uma grande gama de variáveis relacionadas.

O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) ou Processo Analítico Hierárquico representa, para alguns pesquisadores, a evolução dos métodos heurísticos. Este método busca diminuir a subjetividade, muitas vezes apontada como aspecto negativo desses métodos, uma vez que permite que as considerações realizadas pelo pesquisador sejam inseridas numa base estatística/matemática.

O AHP é uma metodologia matemática destinada a ponderar quantitativamente variáveis mediante a interação do pesquisador com o modelo. Ao fazer isso, as considerações qualitativas feitas pelo pesquisador, baseadas na sua experiência e no seu embasamento bibliográfico, transforma-se em dados numéricos enquadrados numa modelagem matemática. (SILVA e NUNES, 2009; RAFFO, 2012). De maneira mais específica, o AHP permite o estabelecimento de pesos para as variáveis utilizadas na construção das cartas de perigo ou suscetibilidade a escorregamentos.

Trata-se de um método semi-qualitativo, que envolve uma comparação de pares baseada em uma matriz, na qual diferentes fatores que influenciam na tomada de decisão são organizados hierarquicamente e comparados entre si (ex. declividade é comparada com a curvatura). Desta comparação será atribuído pelo pesquisador um número baseado numa escala de juízo absoluto (Tabela 1), que mostra o quanto um elemento é mais influente que o

outro (ex. declividade ao ser comparada com a curvatura recebeu o número 5, indicando que ela é mais influente que a curvatura) (SILVA e NUNES, 2009; POURGHASEMI *et al.*, 2012; RAFFO, 2012).

Tabela 1 - Escala de juízo absoluto na comparação par a par no modelo AHP.

Intensidade da importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância fraca de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o juízo favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.

Fonte: Saaty (2008).

Segundo Saaty (2008), para se aplicar o AHP de forma organizada, alguns passos devem ser seguidos; dentre eles, definir o problema e determinar o tipo de conhecimento necessário para analisá-lo; estruturar uma hierarquia para as variáveis utilizadas, no qual será colocado no topo da hierarquia o elemento mais influente (ex. declividade), seguida dos elementos menos influentes, até chegar ao final da hierarquia, onde o elemento menos influente é inserido (ex. curvatura); construir uma matriz de comparação entre pares, em que

cada elemento em um nível hierárquico maior é usado para comparar os elementos no nível menor. Na identificação das áreas de perigo ou de suscetibilidade a escorregamentos usando a abordagem AHP, para cada fator condicionante dos processos é atribuído um peso (ex. declividade peso 6), quanto maior o peso, mais influente será esse parâmetro dentro da modelagem.

Embora o modelo AHP diminua a subjetividade na criação de cartas de perigo e de suscetibilidade a escorregamentos dentre os métodos heurísticos, ainda apresenta um certo grau de subjetividade e, conseqüentemente, algumas limitações. As considerações do pesquisador são a base para a construção da matriz do modelo AHP. Dessa forma, colocações errôneas, tanto pela falta de embasamento, como também, pelo não conhecimento das características físicas e/ou antrópicas da área avaliada, podem ocasionar erros significativos nos mapeamentos finais.

Diversas pesquisas, no Brasil e no exterior, vêm usando esse método na análise do perigo ou da suscetibilidade, tais como os trabalhos descritos a seguir. Kayastha *et al.*(2013), por exemplo, aplicaram o modelo AHP na identificação das áreas com maior probabilidade aos escorregamentos na bacia hidrográfica de Tinau (oeste do Nepal). Estes autores utilizaram a correlação dos parâmetros declividade, curvatura, orientação das encostas, geologia, uso da terra, entre outros, cujos resultados da modelagem foram validados por um mapa de ocorrência dos processos.

Saadatkhan *et al.*(2014) realizaram uma pesquisa no distrito de Hulu Kelang, na cidade de Gombak (Malásia), aplicando o AHP para a identificação de locais de perigo a escorregamentos rasos. Utilizaram os parâmetros declividade, curvatura, uso da terra, SPI, litologia, distância em relação às encostas, córregos, riachos e rodovias, orientação das encostas e altitude.

Kumar *et al.*(2015) produziram um mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no setor oriental do Distrito de Nilgiri (Índia), aplicando o método AHP. Os autores utilizaram diversas variáveis que influenciaram diretamente na deflagração dos processos (declividade, curvatura, geologia, uso da terra, entre outros). Essa modelagem apresentou uma precisão de 83% na localização de áreas mais propensas a escorregamentos.

Xiong *et al.* (2017) realizaram um mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos na bacia de Tinalah (Indonésia). Os autores usaram 6 variáveis (declividade, litologia, distância de falhas, uso da terra, distância de rios e precipitação) e estabeleceram seus pesos a partir de uma comparação par a par (Figura 7). Os resultados apresentaram uma precisão de 78,4% na identificação das áreas suscetíveis.

Figura 7 - Comparação par a par, realizada por Xiong *et al.*(2017), das variáveis influentes na deflagração de escorregamentos consideradas na pesquisa. Cada elemento na vertical está sendo comparado com os da horizontal.

Parâmetros	Declividade	Litologia	Distância de falhas	Uso da terra	Distância de rios	Precipitação
Declividade	1	2	5	1	3	3
Litologia	1/2	1	3	1/2	3	2
Distância de falhas	1/5	1/3	1	1/2	1/3	1
Uso da terra	1	2	2	1	2	3
Distância de rios	1/3	1/3	3	1/2	1	2
Precipitação	1/3	1/2	1	1/3	1/5	1

Fonte: Traduzida de Xiong *et al.* (2017).

Nacionalmente, Cardozo e Herrmann (2011) utilizaram-se da técnica AHP no mapeamento e análise das áreas suscetíveis a escorregamentos da bacia do rio Forquilhas no município de São José (SC). Os autores usaram 5 variáveis (geologia, geomorfologia, pedologia, forma das encostas e declividade). O resultado dessa pesquisa mostrou que 18,24 km da área apresentou suscetibilidade alta a escorregamentos e 3,69 km, muito alta.

Torres (2014) adotou a técnica AHP para elaborar uma carta de suscetibilidade a movimentos de massa no município de Ipojuca, Região Metropolitana do Recife, utilizando os parâmetros: uso da terra, declividade, curvatura, geologia e pedologia. Os resultados indicaram 3 classes de suscetibilidade (baixa, média e alta), na qual foi criado um “*buffer*” (zona de transição intermediária) de distância com 12 metros em relação as áreas de alta

suscetibilidade, considerando, assim, que as áreas no sopé das encostas também sofreriam danos, caso ocorressem escorregamentos.

No contexto da cidade do Recife, a técnica AHP foi aplicada por Rocha e Schuler (2015) que realizaram uma análise espaço temporal da suscetibilidade a movimentos de massa somente nos bairros de Jordão e Ibura (zona sul da cidade). A maior parte das ocorrências de escorregamentos registrados, cerca de 90%, coincidiram com as classes de suscetibilidade alta indicadas no mapeamento.

Bispo (2018) utilizou o modelo AHP para criar cartas de suscetibilidade a escorregamentos no litoral do município de Maceió. Foram elaboradas duas cartas, uma de suscetibilidade induzida e outra de suscetibilidade natural. As variáveis utilizadas foram: declividade, forma das encostas, pedologia, geologia, geomorfologia e uso da terra.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

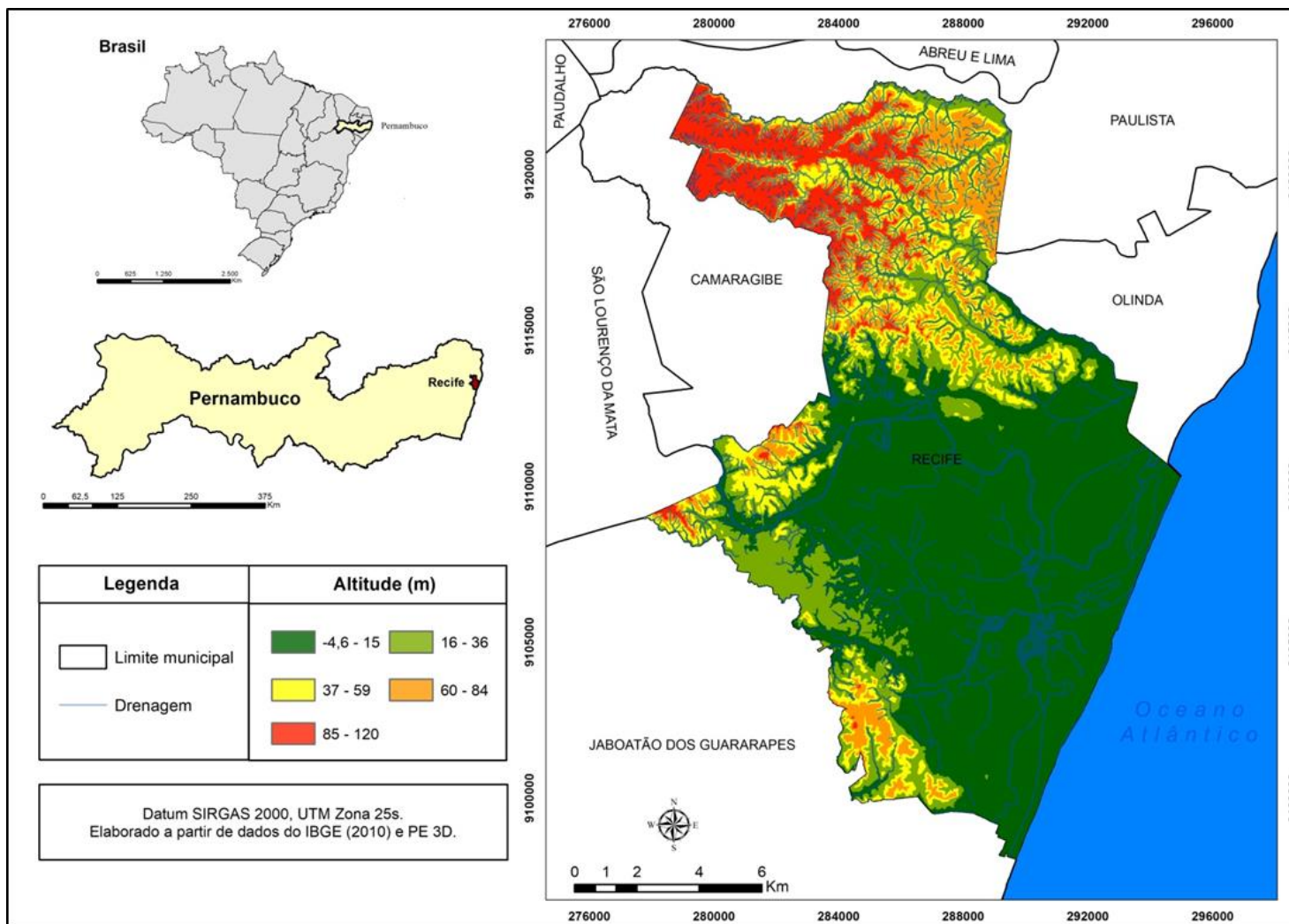
O recorte escalar adotado nesta pesquisa é o município do Recife (PE) (Figura 8), cuja população estimada é de 1 milhão e 600 mil habitantes com área de 218km², apresentando uma grande densidade populacional, por volta de 7 mil habitantes por km² (IBGE, 2010). Embora ainda existam locais não ocupados pela população, a cidade apresenta um grande inchaço urbano, com moradias em áreas sujeitas tanto as inundações e alagamentos nas áreas de planície quanto a escorregamentos nas áreas íngremes.

As áreas sujeitas a inundações e escorregamentos são, geralmente, ocupadas por populações de baixa renda, classificadas, de acordo com o Zoneamento Urbanístico municipal, como áreas ZEIS (Zona Especial de Interesse Social), que correspondem a áreas de assentamentos habitacionais de população de baixa renda, surgidos espontaneamente, existentes, consolidados ou propostos pelo Poder Público, onde haja possibilidade de urbanização e regularização fundiárias (Lei Municipal Nº 16.176/96).

Alguns dessas áreas também foram classificados como ZAC - Restrita (Zona de Ambiente Construído Restrita), que se caracteriza pela presença, predominante, de relevo acidentado com restrições quanto à ocupação, objetivando adequar a tipologia edifícia à geomorfologia da área (Lei Municipal Nº 17511, art. 95). É comum, nestas áreas, a ocorrência de um crescimento espontâneo, devido ao grande déficit habitacional existente e a ausência de fiscalização, com padrões construtivos incompatíveis com a estruturação do relevo.

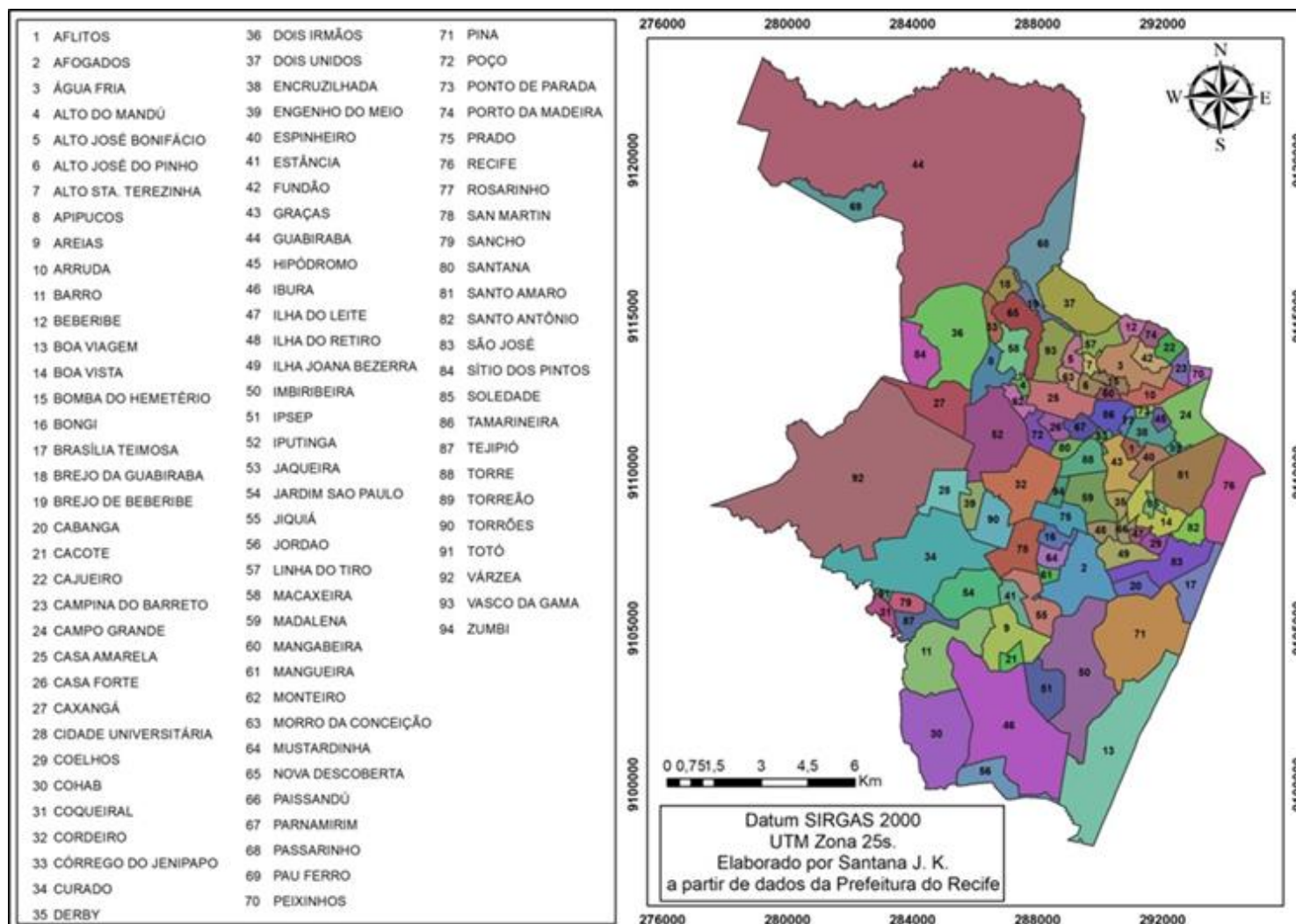
O município é composto por 94 bairros (Figura 9), alguns divididos com cidades limítrofes, como Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Camaragibe e Paulista.

Figura 8 - Mapa de localização e hipsometria do município de Recife (PE).



Fonte: Autor.

Figura 9 - Mapa de localização dos Bairros da cidade do Recife (nomenclaturas indicadas na tabela à esquerda).



Fonte: Autor.

3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E SUAS RELAÇÕES COM PROCESSOS DE ESCORREGAMENTOS

Do ponto de vista geológico, o município pode ser dividido em 4 principais categorias: depósitos fluviolagunares, depósitos fluviomarinhos, estruturas cristalinas e estruturas sedimentares.

Os **depósitos fluviolagunares** são formados por sedimentos aluvionares, de deposição fluvial, situadas próximas a rios e córregos, compõem as unidades geomorfológicas das planícies fluviais, tanto as localizadas na planície costeira como nas áreas de fundo de vales. Constituídas de areias finas, siltes e argilas (PFALTZGRAFF, 2007).

Os **depósitos fluviomarinhos** são formados por sedimentos marinhos e fluviais. Composta pelos terraços holocênicos, formados por regressão marinha há cerca de 5100 anos e representam a atual linha de costa do município. Terraços pleistocênicos, antigas linhas de costa formadas por regressão marinha há 120.000 anos. E por fim, terraços marinhos indiferenciados, constituídos por sedimentos marinhos e fluviais, e os depósitos de maré (SOUZA *et al.*, 2017).

A **estrutura cristalina** representa o antigo Embasamento Cristalino, pré-cambriano, formadas por gnaisses, migmatitos, xistos e granitos, recobertos por solos residuais de até 20m de profundidade (GUSMÃO, 1995; ALHEIROS, 1998; CPRM, 2013; PFALTZGRAFF, 2007) (figura 10).

Figura 10: Afloramento rochoso do embasamento cristalino em um talude de corte.



Fonte: Google Maps (2015).

As **estruturas sedimentares** são representadas pelas formações Barreiras, Gramane e Cabo. A Formação Barreiras apresenta sedimentos característicos de deposição fluvial do Mioceno, com camadas mais arenosas na base e arenosas e argilosas intercaladas nos topos, resultantes de depósitos por enxurradas (leques aluviais), também são encontradas camadas seixos rolados (quartzo) (ALHEIROS *et al.*, 2003). As areias típicas dessa formação apresentam um elevado teor de feldspatos, sujeitos aos processos de argilização em função de climas quentes e úmidos, o que favorece a ocorrência de escorregamentos e de processos erosivos (ALHEIROS, 1998).

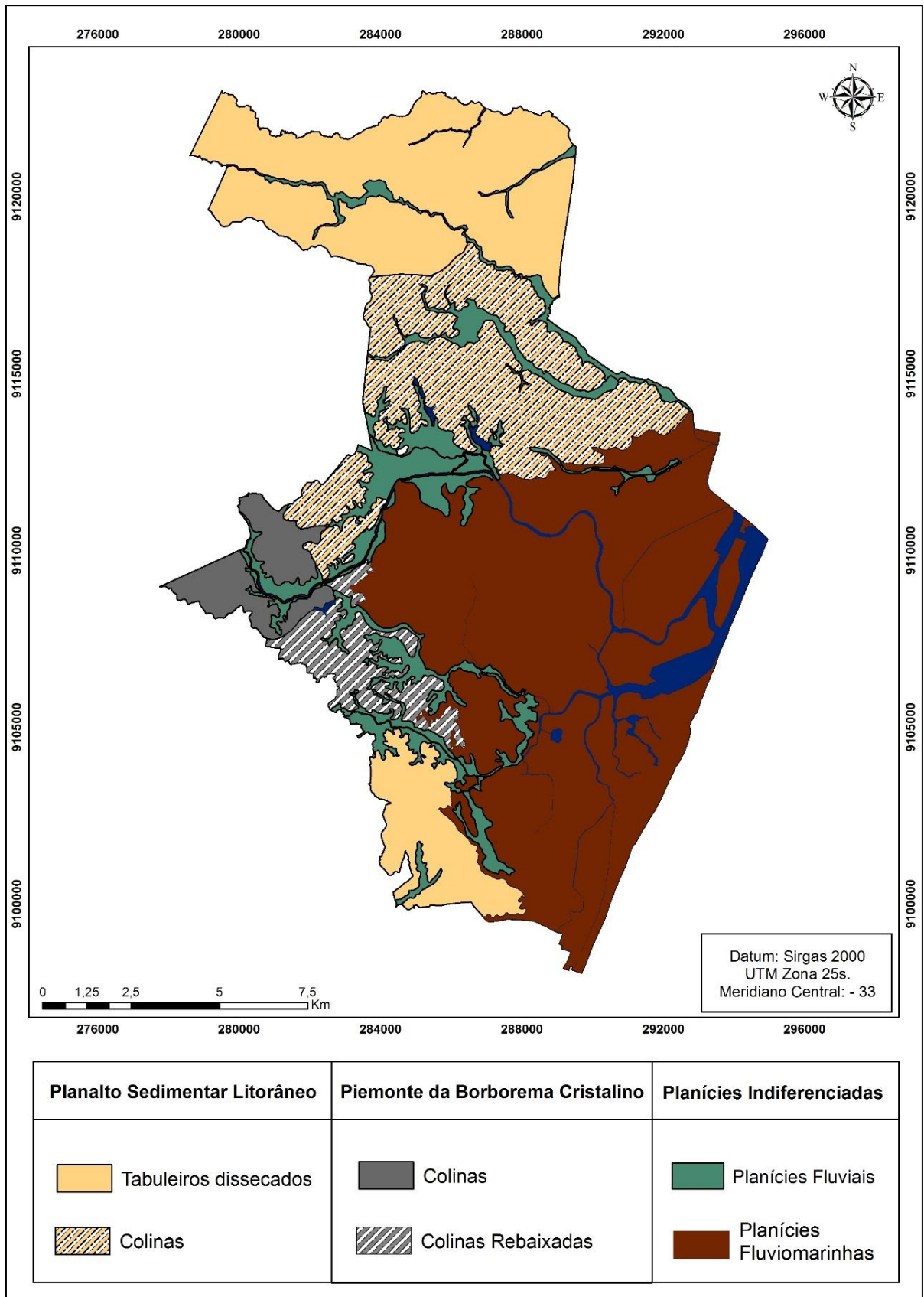
A formação Gramane tem origem marinha, sua deposição está associada com fase marinha transgressiva do Cretáceo Superior. Constituída por sedimentos calcáricos, os depósitos dessa formação apresentam-se, frequentemente, recobertos por sedimentos da formação barreiras (CPRM, 2013).

A Formação Cabo é constituída por conglomerados e argilitos, os sedimentos dessa formação, embora muito argilosos, mostram boa estabilidade em suas encostas, graças ao pré-adensamento resultante do soterramento profundo a que foram submetidos. Entretanto algumas encostas expostas a grandes cortes apresentam, em alguns casos, instabilidades. (ALHEIROS *et al.*, 2003).

Geomorfologicamente, segundo Fonsêca *et al.* (2016), a região está inserida em três unidades morfoestruturais: no Planalto Sedimentar Litorâneo, no Piemonte da Borborema e nas Planícies Indiferenciadas (Figura 11).

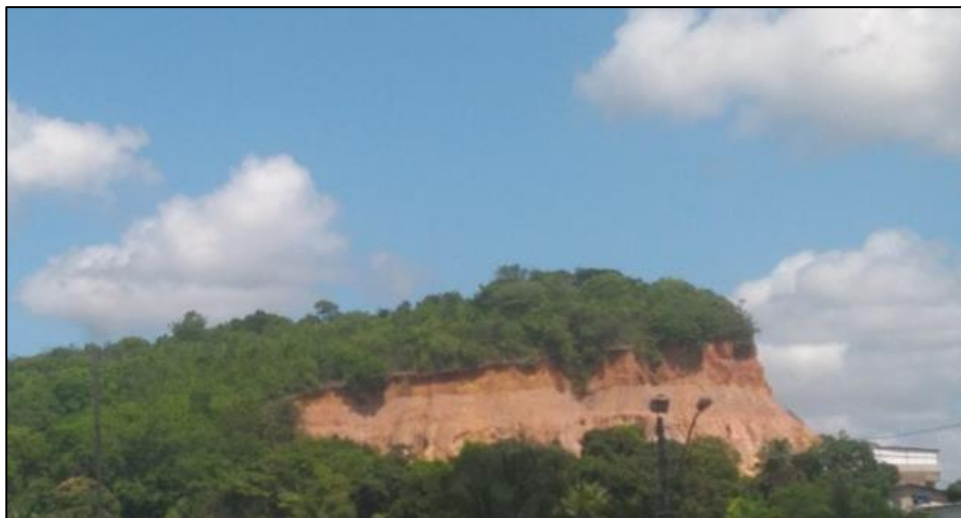
A unidade do Planalto Sedimentar Litorâneo, dentro do município, é formada por Tabuleiros dissecados e Colinas, que estão sobre as formações geológicas sedimentares. As feições Tabulares dissecadas estão localizadas no extremo norte do município, como também, em algumas partes da zona sul da cidade (Figura 11 e Figura 12). Possuem altitudes que variam entre 60 e 100 metros. Esses modelados apresentam topos tabulares ainda conservados, embora ocorra uma elevada dissecação nas suas bordas. Nos topos, por serem áreas de declividade baixa, não ocorrem escorregamentos, no entanto, em suas laterais, esses processos são comuns.

Figura 11 - Mapa geomorfológico do município do Recife.



Fonte: Autor.

Figura 12 - Feições de tabuleiros dissecados na zona norte do Recife.



Fonte: Autor.

Mais próximas à costa, norte/nordeste, encontram-se às Colinas da unidade morfoestrutural do Planalto Sedimentar Litorâneo. São antigas formas tabulares que sofreram processo de dissecação, o que permitiu a formação de feições com topos mais arredondados e irregulares (colinas) (ALHEIROS, 1998). São mais rebaixadas, com altitudes de 30m a 80m. Nestas áreas, os escorregamentos deflagram-se com bastante intensidade no município (FONSÊCA *et al.*, 2016).

As Colinas inseridas na unidade morfoestrutural do Piemonte da Borborema estão localizadas ao sudoeste do município, sobre o antigo embasamento cristalino. Em linhas gerais, são feições sedimentares de perfil convexo, em decorrência do processo de dissecação linear, com topos arredondados (colinas), sobre o embasamento cristalino pré-cambriano. Possuem cotas que ultrapassam os 30m, apresentando também, feições mais rebaixadas, com cotas de 15m a 30m. Nesses modelados, ocorrem processos erosivos e escorregamentos, relacionados diretamente com atividade antrópicas.

A Planície Fluvial é formada por processos relacionados à erosão, ao transporte e à deposição de sedimentos em ambientes aluvionares (SOUZA *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2017). Apresentam ondulações suaves com amplitude média entre 5m e 15m, em nível de terraços (FONSÊCA *et al.*, 2016). A Planície Fluviomarinha é formada por sedimentos marinhos depositados em momentos pretéritos, durante a vigência de um nível médio do mar mais elevado que o atual, e por sedimentos aluviais (SOUZA *et al.*, 2017). Possuem

ondulações suaves e amplitude média inferior a 5m, compostas por manguezais, apicuns e praias. Essas duas feições pertencem à unidade morfoestrutural das Planícies Indiferenciadas (FONSÊCA *et al.*, 2016).

De acordo com o Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE, 2001) Recife apresenta, em geral, solos bastante profundos e evoluídos. As áreas de colinas e tabuleiros apresentam solos dos tipos Argissolos Amarelos ou Vermelhos e Latossolos Amarelos. No geral, esses dois tipos de solos apresentam uma coesão natural forte quando encontrados secos, mas esse estágio é revertido quando se encontram úmidos/saturados (GUSMÃO, 1995; FILHO *et al.*, 2014).

Os Argissolos contêm perfis bem diferenciados (Figura 13), profundos, ácidos, moderadamente a bem drenados, apresentando erosão laminar ligeira ou moderada, tendo nos setores de maior declividade, ravinas e voçorocas (FILHO, *et al.*, 2014). Tais solos foram formados pelos sedimentos incoesos da Formação Barreiras encontrados, predominantemente, em superfícies onduladas, cujo teor de argila no horizonte subsuperficial é maior em relação ao horizonte superficial, favorecendo e aumentando fluxos subsuperficiais no contato entre diferentes texturas de solo. Desta forma, esse tipo de solo é o mais influente na ocorrência de escorregamentos translacionais rasos na cidade (LEVANTAMENTO EXPLORATÓRIO RECONHECIMENTO DE SOLOS NO ESTADO DE PERNAMBUCO, 1975).

Figura 13 - Perfil de Argissolo vermelho, onde é possível observar camadas bem diferenciadas.



Fonte: Acervo da Embrapa Solos.

Os Latossolos Amarelos são solos desenvolvidos formados, principalmente, de sedimentos da Formação Barreiras, bastante uniformes em termos de cor, textura e estrutura (Figura 14), não existe uma variação grande de argila nas suas camadas. São solos profundos, bem drenados, com predominância de textura argilosa. Nos tabuleiros e colinas, predominam em locais mais planos e suaves ondulados (FILHO *et al.*, 2014).

Figura 14 - Perfil de Latossolo amarelo, apresentando camadas mais homogêneas.



Fonte: Acervo da Embrapa Solos.

Destaca-se que o contanto entre diferentes texturas de solo (argilosos e arenosos) favorece a ocorrência de escorregamentos translacionais, devido o favorecimento de zonas de rupturas em áreas de contato, principalmente, nos solos formados por sedimentos da Formação Barreiras, principalmente os Argissolos (ALHEIROS, 1998).

Dos demais solos encontrados na região, predominantemente nas áreas de planícies, destacam-se os Gleissolos, os Solos de Mangue e os Neossolos (Flúvicos e Quartzarênicos) (EMBRAPA, 2001). Os Gleissolos são solos hidromórficos, típicos de ambientes de várzea.

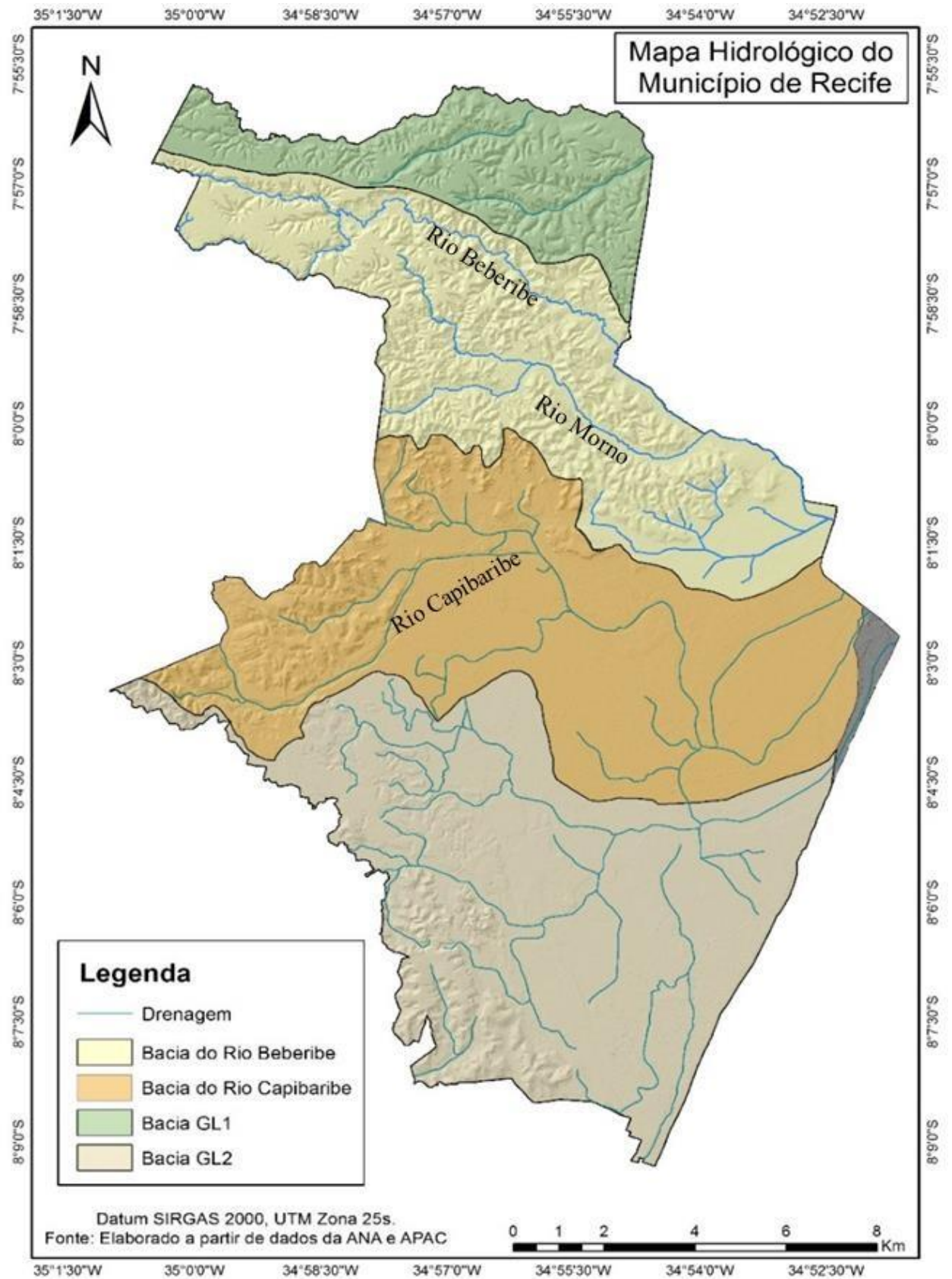
Os solos Indiscriminados de Mangue são halomórficos, pouco desenvolvidos, lamacentos, escuros e com alto teor de sais provenientes da água do mar, formados em ambientes de mangues a partir de sedimentos fluviomarinheiros recentes (Quaternário) misturados com detritos orgânicos. Tais sedimentos são decorrentes da deposição pelas águas dos rios quando se encontram com as águas do mar, em condição de baixa energia (FILHO *et al.*, 2014; EMBRAPA, 2018).

Os Neossolos Flúvicos são desenvolvidos pela deposição de sedimentos aluviais recentes (Quaternário) e estratificados. Os Neossolos Quartzarênicos são formados por areias de quartzo e estão localizados na faixa costeira (FILHO *et al.*, 2014; EMBRAPA, 2018).

Hidrologicamente, o município é composto por quatro bacias hidrográficas (Figura 15). A norte localiza-se o alto e o médio curso da bacia do Rio Beberibe, trechos dos seus principais rios (ex. Rio Morno e Rio Beberibe) estão inseridos na cidade. A área central pertence ao baixo curso da bacia do Rio Capibaribe.

Muitas áreas com perigo a escorregamentos estão localizadas no setor interfluvial que separa essas duas bacias, devido ser uma área de Colinas com intensa ocupação antrópica. Ainda no contexto hidrológico, o grupo de bacias GL1, de pequenos rios litorâneos, e a GL2, formado por rios que desembocam no Oceano Atlântico, também compõem a hidrografia da cidade.

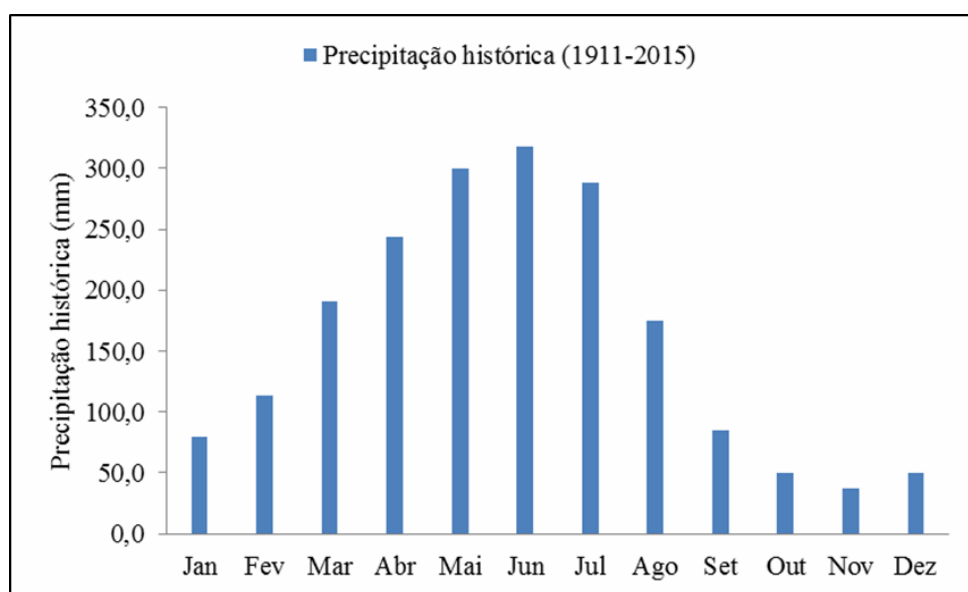
Figura 15 - Mapa hidrológico do Município de Recife.



Fonte: Autor.

O fator climático possui uma importância fundamental na deflagração dos escorregamentos em Recife. O clima do município configura-se por ser quente e úmido, cuja precipitação média anual apresenta isoietas que ultrapassam os 2000 mm. Os meses de maio, de junho e de julho apresentam os índices de precipitação mais elevados (Figura 16), nos quais ocorrem os maiores episódios de escorregamentos (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2016).

Figura 16 - Médias mensais de precipitação na cidade do Recife.



Fonte: Holanda *et al.* (2016).

Nesse sentido, os altos índices pluviométricos, muitas vezes um dos responsáveis pela instabilização das encostas da área, são condicionados pelos sistemas atmosféricos *La Niña*; pela ZCITs (Zona de Convergência Intertropical), pelos VCANs (Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis) e pelas DOLs (Distúrbios Ondulatórios de Leste), sob influência dos ventos alísios, provocando precipitações intensas na região costeira do litoral do Nordeste, (OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Os VCANs atuam no leste do nordeste brasileiro (consequentemente em Recife) entre os meses de novembro e março (MOREIRA *et al.*, 2017). Os eventos pluviométricos associados a esse sistema costumam ocorrer nas regiões periféricas do vórtice, onde há

incidência do ar quente e úmido proveniente do oceano. Já em sua parte central ocorre subsidência de ar seco, mais frio, que inibe a formação de nuvens (MOREIRA *et al.*, 2017).

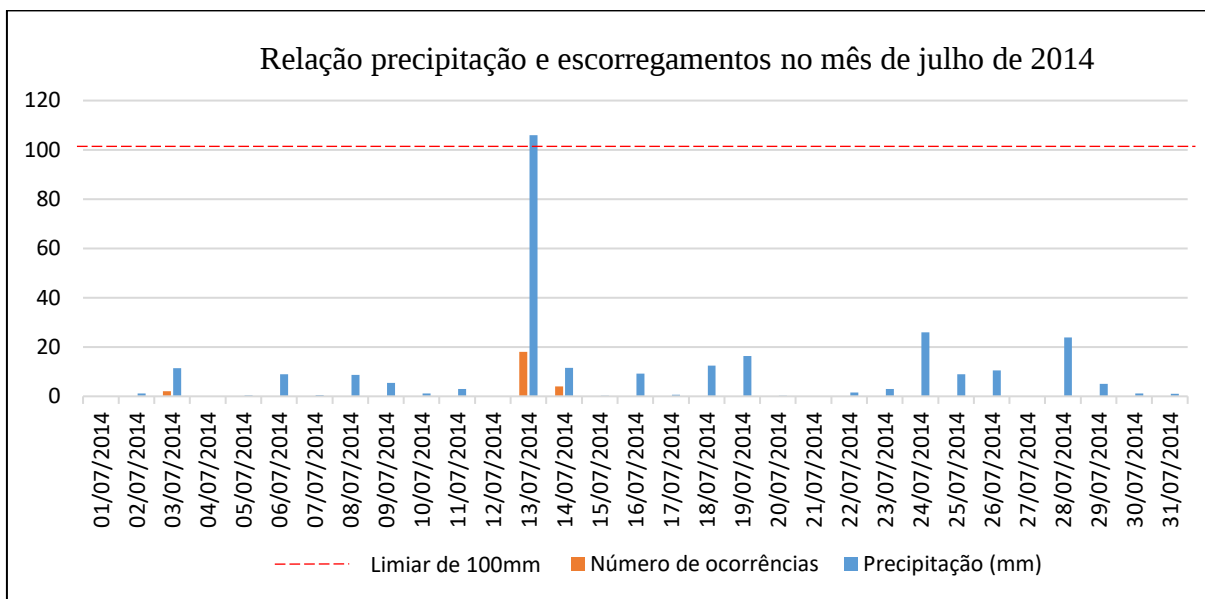
De acordo com Duarte *et al.* (2015), o principal sistema pluviométrico no Recife são as DOLs formadas por cavados barométricos no Oceano Atlântico que avançam rumo a oeste, atuando principalmente entre os meses de abril e agosto, com maior força em maio, junho e julho, com totais pluviométricos intensos (GIRÃO *et al.*, 2006).

De acordo com Wanderley *et al.* (2018), os eventos de precipitação diária, maior que 100 mm em 24h, na cidade do Recife, entre os anos de 1961 e 2016, foram concentrados entre maio e julho, tendo os meses de junho e julho maior frequência. De acordo com os autores, dos 56 anos analisados, em 41 deles foram registrados esses eventos diários.

Os eventos de precipitação, maiores que 100mm, de acordo com Wanderley *et al.* (2018), podem causar escorregamentos. No entanto, os eventos prolongados de precipitação são os principais responsáveis pelas ocorrências dos processos. Essa afirmação pode ser confirmada na análise dos eventos expostos a seguir.

No dia 13 de julho de 2014, ocorreu um evento de precipitação de 102mm (em 24h), que causou 18 escorregamentos (Figura 17). Dessa forma, observa-se que a precipitação superior a 100 mm em 24h foi suficiente para deflagrar processos.

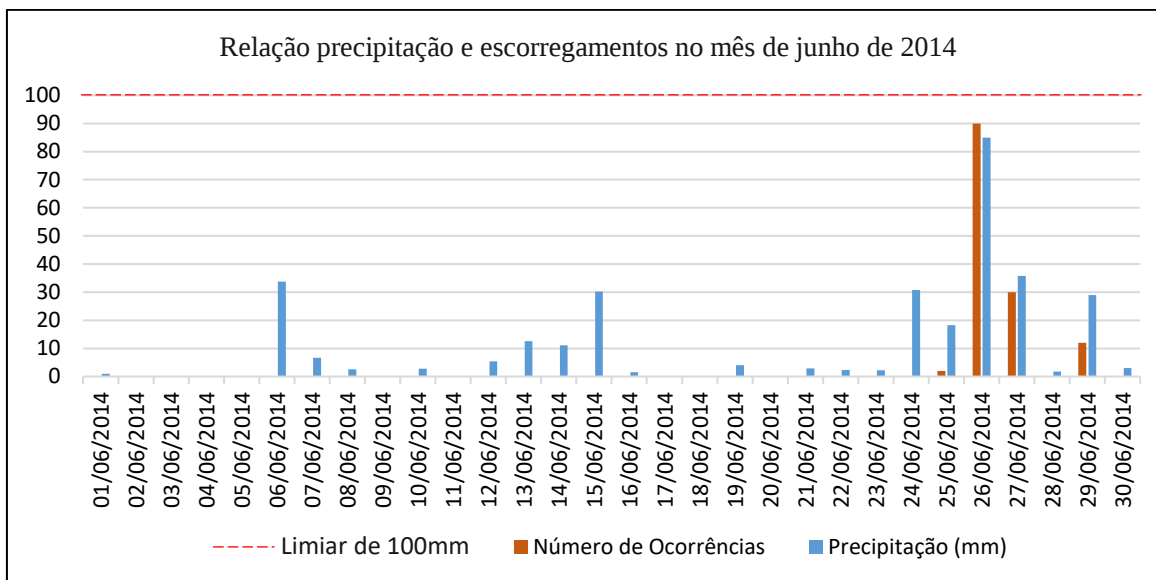
Figura 17 - Relação precipitação e escoamentos no mês de julho de 2014. As colunas azuis indicam o índice de precipitação, as laranjas o número de ocorrências de escoamentos e a linha vermelha o limiar de 100mm de precipitação.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir da correlação de dados de ocorrências de escoamentos do mês de junho no ano de 2014 na cidade do Recife, obtidos na Defesa Civil do Recife, com os índices diários de precipitação, desta mesma data, adquiridos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e na Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), estação do Curado (zona sul).

No dia 26 de junho de 2014, ocorreu um evento pluviométrico de 82mm em 24h, que resultou em 90 escoamentos, número superior do que o evento citado no parágrafo anterior. Mesmo não atingindo os 100mm de precipitação diária, esse episódio gerou uma grande quantidade de escoamentos. Isso porque, nos dias anteriores, ocorreram eventos de precipitação prévios (Figura 18), responsáveis pela saturação do solo, tal acontecimento, influenciou na ocorrência dos processos no dia 26. Tais dados enfatizam, portanto, a importância da chuva acumulada na deflagração dos processos.

Figura 18 - Relação precipitação e escorregamentos no mês de junho de 2014. As colunas azuis indicam o índice de precipitação, as laranjas o número de ocorrências de escorregamentos e a linha vermelha o limiar de 100mm de precipitação.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir da correlação de dados de ocorrências de escorregamentos do mês de junho no ano de 2014 na cidade do Recife, obtidos na Defesa Civil do Recife, com os índices diários de precipitação, desta mesma data, adquiridos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e na Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), estação do Curado (zona sul).

No dia 24 de julho de 2019, três pessoas foram a óbito e cerca de 200 ficaram desabrigadas devido escorregamentos no município, após um episódio de 101mm de precipitação em seis horas. No entanto, as chuvas nos dias anteriores (acumuladas) tiveram uma grande influência na deflagração desses processos (Defesa Civil do Recife, 2019). Segundo a APAC (dados da estação Alto da Brasileira, zona norte), no dia 24 de julho/2019 ocorreu uma precipitação de 122,3mm e no dia anterior (23 de julho) foi registrada uma precipitação de 77,9mm, confirmando o papel da chuva acumulada. No entanto, deve-se considerar que eventos diários de precipitação intensa também podem acarretar processos de escorregamentos na região.

3.2 EVOLUÇÃO DA OCUPAÇÃO NAS ENCOSTAS DO RECIFE E ASPECTOS ANTRÓPICOS

A formação do município de Recife aconteceu, inicialmente, sobre as áreas de planície costeira. No final do século XVI a cidade era apenas um lugarejo, com um pequeno porto projetado sobre um cordão litorâneo iniciado em Olinda, que hoje representa a ilha do bairro do Recife. Com a invasão Holandesa em Pernambuco, em 1630, começou-se a construção do bairro portuário do Recife, que se expandiu e originou o município (MELO, 1978).

A expansão urbana da cidade, até o século XX, ocorreu sobre as áreas mais planas (planície costeira), cujas camadas mais pobres habitavam locais denominados de Mocambos. É a partir do século XIX que este tipo de habitação se espalha por zonas menos propícias para a ocupação, como manguezais e alagados (SANTOS e GOMES, 2016).

Com a ocorrência das grandes enchentes e inundações, que afetaram fortemente as planícies estuarinas, a Liga Social Contra os Mocambos determinou a erradicação parcial dos mocambos nas áreas centrais, deixando um déficit de quase cinco mil habitações. Iniciou-se então, na década de 1940, a transferência, ora planejada ora não planejada, dos moradores expropriados dessas habitações para as colinas de Casa Amarela (futuramente dividida em vários bairros), Beberibe e Água Fria, impulsionando a ocupação sistemática dos morros da zona norte do Recife (ALHEIROS *et al.*, 2003).

O espaço urbano da cidade evoluiu por meio da especulação imobiliária de áreas mais favoráveis à ocupação, caracterizando o cenário de exclusão social. Assim, as áreas que exigiam um maior conhecimento técnico (encostas e margens de rios) e, conseqüentemente, maiores investimentos para moradias adequadas, foram ocupadas por populações de menor poder aquisitivo, mais vulneráveis a processos de escorregamentos e de inundações (PFALTZGRAFF, 2007; SANTOS e GOMES, 2016).

Em 1951, boa parte da planície e dos terraços fluviais de Recife já se encontravam ocupados (MELO, 1978). Entre 1950 e 1960, houve um crescimento de 272,5 mil habitantes, totalizando 797,2 mil habitantes. Entre 1960 e 1970, houve um incremento de 263,5 mil habitantes (MELO, 1978). Tal aumento populacional gerou um aumento da ocupação antrópica sobre as encostas da região. No ano 2000, cerca de 33% da população da cidade já ocupava essas áreas (Figura 19) (ALHEIRO *et al.*, 2007).

De acordo com o Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR, 2006), existem cerca de 470.000 habitantes em áreas de morros (colinas), sendo que deste total, 10.374 vivem em locais de risco alto ou muito alto, com 140 áreas de risco a escorregamentos distribuídas pelo município (PMRR, 2006). Embora exista, atualmente, um grande número de habitantes em locais íngremes, muitos dos terrenos declivosos ainda não foram ocupados e apresentam, majoritariamente, vegetação natural de Mata Atlântica ainda preservada (resquícios).

As atividades antrópicas modificam a dinâmica do sistema, causando desequilíbrios, resultando assim, na ocorrência de escorregamentos. Em toda a área metropolitana do Recife, os fatores decorrentes da forma inadequada de ocupação das encostas, são importantes condicionantes na deflagração dos escorregamentos, sendo agravados pelos condicionantes naturais (ex. litologia, declividade, forma da encosta, pluviometria, entre outros). Dessa forma, cortes nas encostas para construção de moradias, aterros com solo remanescente dos cortes, acúmulo de lixo, desmatamentos, inexistência de rede de drenagem (Figura 19), entre outras práticas inadequadas, contribuem para os processos (LIMA, 2002; PFALTZGRAFF, 2007).

Figura 19 - Ações antrópicas que influenciam na deflagração de escorregamentos. A) Água servida diretamente nas encostas. B) Realização de cortes e aterros para a construção de moradias.



Fonte: Autor.

Santana e Listo (2018) afirmaram que a realização de cortes e de aterros nas encostas da região criaram *knickpoints* artificiais que romperam o perfil de equilíbrio das encostas e geraram taludes artificiais com declividades incompatíveis com o ângulo de repouso dos materiais que estruturam o relevo (ex. Tabuleiros Costeiros), deixando-os mais propensos a escorregamentos. Os cortes também alteram a pedogênese das encostas e retiram a sua proteção natural (horizontes de solo e vegetação) e os aterros se apresentam, de forma geral, pouco compactados e incoesos. Deve-se também considerar o excesso de lixo em diversas encostas da região, aumentam relativamente o peso sobre as encostas, influenciando negativamente para a sua estabilidade.

Também foram registrados escorregamentos causados por rompimentos de canos de distribuição de água, conforme observado em novembro de 2018, no bairro de Dois Unidos (zona norte de Recife) (TV JORNAL, 2018). Outro exemplo ocorreu em 2016, no bairro de Nova Descoberta, no qual três moradias foram atingidas (TV JORNAL, 2016), também em função do rompimento de tubulações.

Embora o número de ocorrências de escorregamentos seja elevado, a prefeitura municipal realiza obras estruturais e não estruturais como a colocação de gel impermeabilizante ou gel manta (impede a infiltração de água no solo), construção de muros de arrimos e retirada de resíduos sólidos nas encostas, além da remoção de famílias onde as situações são mais perigosas. Realiza, também, parcerias (ex. população local e Defesa Civil) para aplicação de tais medidas.

Embora existam obras estruturais e não estruturais, é comum a presença de encostas cobertas com lonas, muitas vezes já desgastadas e por longos períodos (Figura 20). Ressalta-se que as lonas plásticas são medidas paliativas emergenciais, como duração de dias ou semanas e que, muitas vezes, excedem o prazo seguro de proteção das encostas, tornando-se insuficientes.

Figura 20 - Áreas de encostas, com ocupações antrópicas, cobertas por lonas desgastadas em bairros da zona norte do Recife. a) Guabiraba, b) Macaxeira, c) Nova Descoberta, d) Dois Unidos.

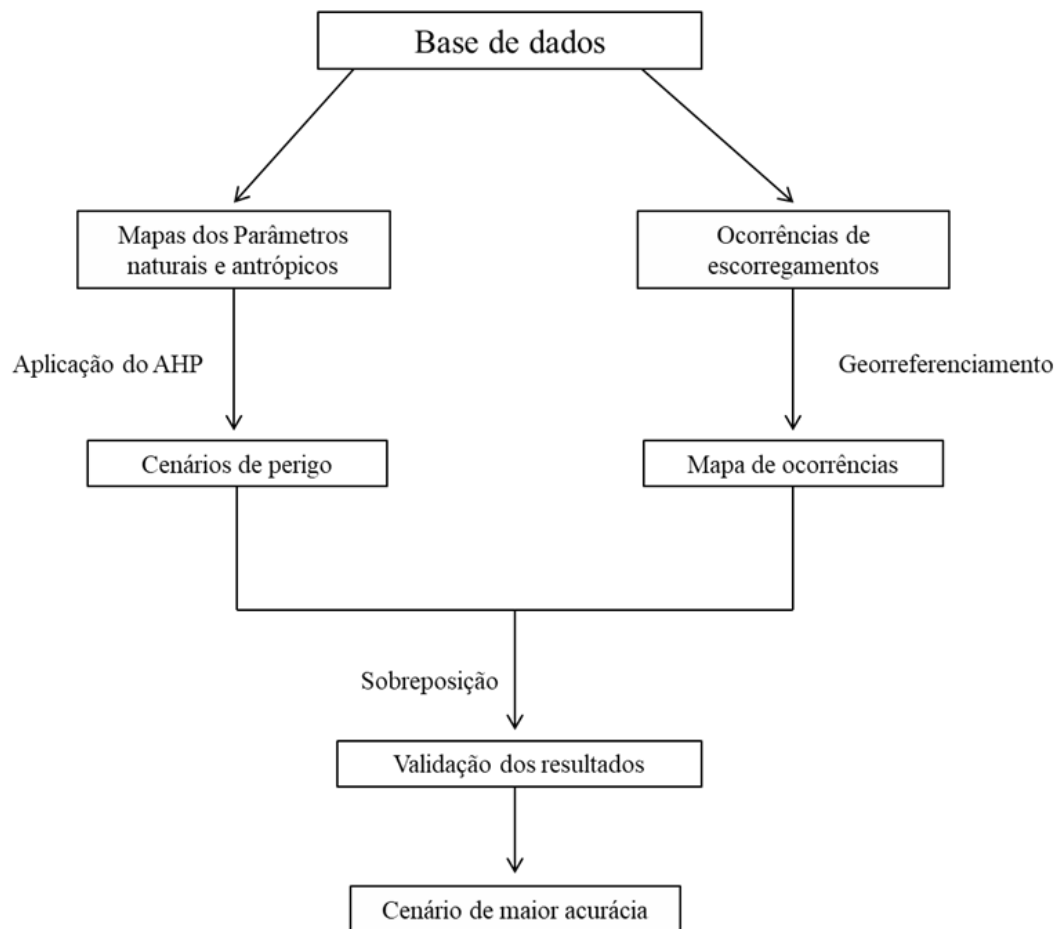


Fonte: Autor.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS (MATERIAIS E MÉTODOS)

Os procedimentos metodológicos desta pesquisa foram divididos em cinco etapas (Figura 21): **(4.1)** Mapeamento das ocorrências de escorregamento; **(4.2)** Estabelecimentos dos fatores condicionantes e elaboração dos mapas temáticos; **(4.3)** Construção dos cenários de perigo; **(4.4)** Validação dos cenários de perigo e **(4.5)** Desenvolvimento do cenário de perigo potencial.

Figura 21: Fluxograma dos procedimentos metodológicos (materiais e métodos da pesquisa).



Fonte: Autor.

4.1 ELABORAÇÃO DO MAPA DE OCORRÊNCIAS

O mapeamento das ocorrências de escorregamentos foi construído a partir de banco de dados fornecidos pela Defesa Civil da cidade do Recife, adquiridos gratuitamente, apresentando os locais de ocorrência dos processos entre os anos de 2013 e 2018. Os dados fornecidos pela Defesa Civil continham os endereços dos imóveis afetados, o nome dos proprietários, a data das ocorrências e, em alguns casos, as coordenadas UTM conforme o Quadro 3.

Quadro 3 - Trecho da planilha eletrônica (banco de dados) de ocorrências de escorregamentos na cidade do Recife.

1.088	1.088	1.088	1.066	1.086	1.081	1.078
Mês	Data	Ocorrencia	Solicitacao	Endereco	Bairro	Localidad
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Ladeira da Alegria, 210 AeB	Bomba do Hemetério	Cgo. Antônio Rodrigues
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	1ª Trav. Do Araxá, 172	Alto Santa Terezinha	Alto Santa Terezinha
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Ladeira da Alegria, 202A	Bomba do Hemetério	Cgo. Antônio Rodrigues
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Arapixuma, 243	Alto Santa Terezinha	Alto Santa Terezinha
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Maria Martins, 23	Dois Unidos	Alto do Capitão
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Caburai, 78	Várzea	Brega e Chique
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Caburai, 85	Várzea	Brega e Chique
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Ochope Jerf Fernando Machado, 41	Várzea	Rosa Selvagem
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Caminho da Areinha, 07	Várzea	Barreiras
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	rua afonso pena 140	Barro	Pantanal
Abril	16/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	trv dolores duran 12	Barro	Vila dos Milagres
Abril	17/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Major Gercino, 779	Guabiraba	Cgo. José Idalino
Abril	17/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Maurilândia, 52-C	Nova Descoberta	Alto do Refúgio
Abril	17/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Alexandrina, 17	Brejo da Guabiraba	Alto da Guabiraba
Abril	17/04/2016	Deslizamentos de Barreiras	Vistoria	Rua Alexandrina, 12	Brejo da Guabiraba	Alto da Guabiraba

Fonte: Banco de Dados da Defesa Civil municipal de Recife.

Por meio do auxílio da fotointerpretação de imagens de satélite, adquiridos no *software Google Earth Pro*, e também a partir de trabalhos de campo para validação, os dados obtidos na Defesa Civil foram georreferenciados (atribuição de um par de coordenadas UTM), sendo posteriormente plotados/vetorizados em um ambiente SIG, *software ArcGIS* (Licença do Grupo de pesquisa - ENPLAGEO).

O mapa de ocorrências foi elaborado utilizando-se a extensão *ArcCatalog*, na qual foi criado, inicialmente, um arquivo *shapefile* do tipo ponto. Posteriormente, foram inseridas as coordenadas UTM dos locais afetados pelos escorregamentos, criando-se assim o mapa final de ocorrências de escorregamentos.

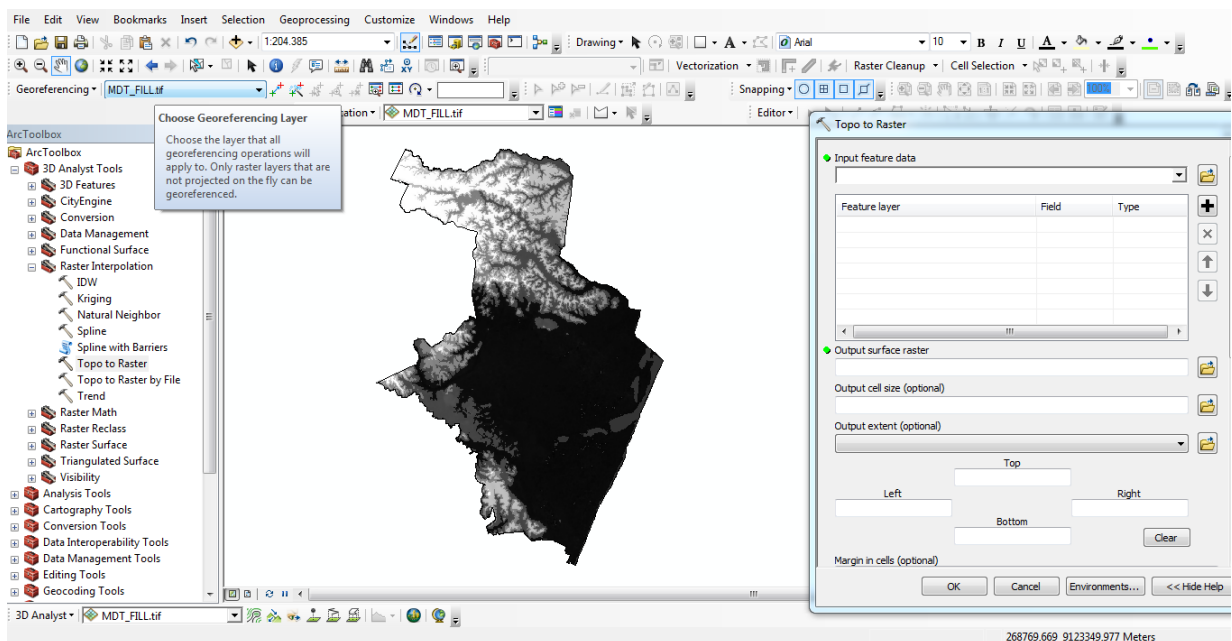
É importante destacar que os escorregamentos foram mapeados como pontos de ocorrências (vetor do tipo ponto) e não como polígonos (cicatrizes) em função da maioria destes processos, na cidade, estarem encobertos pela ocupação urbana, dificultando sua fotointerpretação e delimitação adequada de cicatrizes.

4.2 FATORES CONDICIONANTES NATURAIS E ANTRÓPICOS E ELABORAÇÃO DOS MAPAS TEMÁTICOS (PARÂMETROS AHP)

Para a identificação das áreas de perigo e de perigo potencial, conforme a metodologia AHP, foram utilizados seis fatores condicionantes (variáveis) em ambiente SIG (*software* ArcGIS 10.3), sendo elas: declividade, curvatura, SPI (índice de potência de fluxo), geologia, pedologia e uso da terra.

Os mapeamentos de declividade, de curvatura (formas da encosta) e do SPI, tiveram como base um Modelo Digital do Terreno (MDT) com precisão de 5m (Figura 22), elaborado por meio de informações planialtimétricas adquiridas no ESIG Recife (Informações Geográficas do Recife). O MDT foi elaborado utilizando o *software* ArcGIS 10.3, a partir da extensão *3D Analyst Tools*, ferramenta *Topo to Raster* (Figura 22).

Figura 22: Caixa de ferramenta *Topo do Raster* (ArcGIS) e MDT elaborado.



Fonte: Autor.

O mapa de declividade foi elaborado a partir da ferramenta *Raster Surface* (ferramenta *3D Analyst*), no qual foram classificados quatro intervalos de declividade ($0 - 3^\circ$, $3^\circ - 9,6^\circ$, $9,6^\circ - 16,7^\circ$ e maior que $16,8^\circ$), adaptada da Lei Lehman (Lei Federal nº. 6.766/79), que afirma que a ocupação urbana é permitida nos primeiros três intervalos de $0^\circ - 16,7^\circ$ de declividade. Já no último intervalo (maior que $16,8^\circ$), a ocupação só será permitida a partir de laudos técnicos de autoridades competentes.

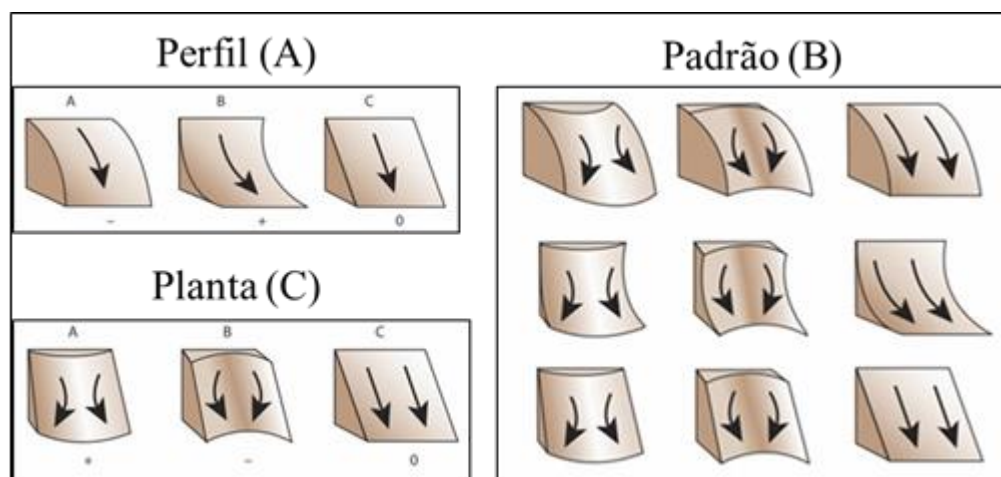
O mapa de curvatura também foi gerado por meio da ferramenta *Raster Surface* (*curvature*). Optou-se pela elaboração do mapa de curvatura padrão (em planta e em perfil), adaptada com base nos intervalos propostos por Valeriano (2013), conforme a Tabela 2 e a Figura 23. O mapa de curvatura foi classificado em encostas côncavas, convexas e retilíneas.

Tabela 2 - Intervalos dos mapas de curvatura.

Tipo de curvatura	Convexa	Côncava	Retilínea
Mapa de curvatura padrão	$> 0,08$	$-0,08 - 0,08$	$< -0,08$

Fonte: Valeriano (2013).

Figura 23 - Tipos de curvatura.



Fonte: Valeriano (2013).

O SPI, conforme mencionado anteriormente, representa a força dos fluxos superficiais da drenagem, influenciando nos processos de dissecação do relevo. Este mapa foi construído a partir de uma interpolação entre os mapas de declividade e de acumulação de fluxos, representando o poder erosivo da água em função da morfologia do terreno.

O mapa de acumulação de fluxos foi criado, com base no MDT supracitado, utilizando-se a ferramenta *Flow Accumulation (hydrology)*. Assim, o SPI foi gerado com base na equação de Moore *et al.* (1991) (Equação 2), aplicando-se a ferramenta *Raster Calculator (map algebra)* para interpolação dos mapas. O mapa de SPI foi classificado com base nos trabalhos de Pourghasemi *et al.* (2012) e Jaafari *et al.* (2014), sendo estabelecidas 5 classes que indicam a força do fluxo da água. As áreas de maior valor de SPI são aquelas com maior potencial de erosão de acordo com o fluxo de água.

$$SPI = As \times \tan B$$

(Equação 2)

Onde: *As* corresponde a área de captação específica (Acumulação de fluxos) e *B* a declividade (em °).

O mapa geológico foi elaborado a partir do compilamento de dados da CPRM (2013) em escala 1:25.000. Este foi dividido em quatro principais estruturas geológicas (classes): depósitos fluviolagunares, depósitos fluviomarinhos, estruturas cristalinas e estruturas sedimentares. Conforme supracitado, a estrutura sedimentar compreende as formações Cabo, Beberibe e Barreiras. A estrutura cristalina representa o antigo embasamento cristalino pré-cambriano. Os depósitos fluviolagunares e fluviomarinhos são áreas formadas por sedimentos marinhos e fluviais.

O mapa pedológico foi gerado a partir de dados do ZAPE (2001) (Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco) em escala 1:100.000. As classes pedológicas presentes no município foram: Argissolos Amarelos e Vermelhos, Latossolos Amarelos, Gleissolos, Neossolos Flúvicos, Neossolos Quartzarênicos e os Solos Indiscriminados de Mangue.

O mapa de uso da terra foi elaborado a partir da fotointerpretação de imagens de satélite e de fotos aéreas, de 2018, do *software Google Earth Pro*, da *base map* do *software*

ArcGIS (ambas forneceram um conjunto de imagens de satélites e de fotos aéreas com resolução média de 15 m) e por uma imagem fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) do ano de 2010. As imagens foram utilizadas conjuntamente, visando alcançar a expressão mais atual dos tipos de uso da terra na cidade.

Para a definição das classes de uso da terra foram utilizadas as propostas metodológicas de Almeida e Freitas (1996) e do Manual Técnico do Uso da Terra (IBGE, 2013). Assim, o mapa de uso da terra foi dividido em 6 classes: vegetação, campo antrópico (vegetação esparsa já desmatada), solo exposto, áreas urbanas consolidadas, áreas urbanas em consolidação (assentamentos precários) e áreas de planície (locais inseridos na planície costeira do município onde não ocorrem processos de escorregamentos) conforme o Quadro 4.

Quadro 4 - Classes de uso da terra adaptadas de Almeida e Freitas (1996) e do Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013) para elaboração do mapa de uso.

Classes	Significado
Vegetação	Áreas de Mata Atlântica ainda preservada, de vegetação densa e de predominância arbórea.
Campo antrópico	Locais de vegetação natural já desmatada, predominância de vegetação rasteira (gramíneas), restando apenas algumas árvores esparsas na paisagem.
Solo exposto	Locais sem cobertura vegetal e sem edificações, onde o solo está inteiramente exposto aos fatores exógenos.
Área agrícola	Locais de cultivo (agricultura no geral).
Área urbana consolidada	Áreas urbanas mais antigas, que apresentam uma melhor infraestrutura urbana e das moradias, com boa parte de suas ruas asfaltadas, sistemas de drenagem nas encostas e obras de contenção.
Área urbana em consolidação	Locais com ocupações mais recentes ou que ainda estão sendo ocupados. Possuem estruturas habitacionais mais defasadas, em comparação com as consolidadas e ainda não apresentam uma grande quantidade de obras estruturais.
Área edificada na planície	São áreas construídas na planície do município e conseqüentemente não apresentam perigo a escorregamentos. Assim, o uso da terra nesses locais não precisou ser classificado.

Fonte: Autor com base em Almeida e Freitas (1996) e Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013).

4.3 ELABORAÇÃO DAS CARTAS DE PERIGO E DE PERIGO POTENCIAL (CENÁRIOS DE PERIGO) POR MEIO DO MODELO AHP

As cartas de perigo elaboradas por meio do modelo AHP tiveram como parâmetros condicionantes os mapas explicados no capítulo anterior. Ao todo, foram gerados três cenários de perigo a escorregamentos para o município (dois cenários de perigo instalado e um cenário de perigo potencial), conforme detalhados a seguir. É importante destacar que o modelo permite a inserção de um número infinito de parâmetros, de acordo com as necessidades de cada área de estudo, sendo que para Recife, foram selecionados os mapeamentos temáticos supracitados para a determinação do perigo.

Em todos os cenários foi essencial, primeiramente, o estabelecido de dois conjuntos de pesos: o primeiro corresponde aos pesos das variáveis, que variam de 0 a 1, tendo este somatório sempre o valor 1 (ex. geologia 0.2 + declividade 0.3 + uso da terra 0.2 + pedologia 0.2 + curvatura 0.1 = 1). Assim, quanto maior for o peso de determinada variável, mais elevada será a sua influência na ocorrência dos processos.

O segundo conjunto caracteriza-se pelos pesos das classes temáticas inseridas em cada variável (ex. fator declividade: de 0° e 3° peso 1, de 3° e 9,6° peso 3 e de 9,6° e 16° peso 7). Sendo que neste momento, a soma dos pesos não necessariamente deve atingir um valor máximo.

Os pesos das variáveis (primeiro conjunto citado) foram obtidos a partir do método AHP. O primeiro procedimento para se estabelecer os pesos desse conjunto foi a definição de uma hierarquia para cada parâmetro utilizado. Nesta etapa, o parâmetro/variável de maior influência de cada cenário foi colocado em posição acima até a variável considerada de menor influência, e assim sucessivamente.

Em seguida, foi realizada uma comparação pareada (par a par) de cada parâmetro. Em tais comparações, foi necessária a adoção de uma escala numérica (escala de juízo absoluto), que indicasse quantas vezes mais importante ou influente (ou menos importante) um parâmetro é em relação ao outro, como também, em relação ao critério ou a propriedade no qual eles são comparados de acordo com os fundamentos de Saaty (2008) exibidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Escala de comparação AHP usada na pesquisa.

Valor	Definição
1	Influência igual
3	Pouco mais influente
5	Influência grande
7	Influência muito grande
9	Extremamente mais influente
Valores Recíprocos	Definição
1/3	Pouco menos influente
1/5	Influência menor
1/7	Bem menos influente
1/9	Extremamente menos influente

Fonte: Adaptada de Saaty (2008).

A Tabela 4 expõe um exemplo dessa comparação par a par, na qual, os exemplos de critérios (B1, B2, etc.) na vertical são comparados com estes mesmos critérios na horizontal. Assim, B1 quando comparado com B1 apresenta importância igual (1), por representar o mesmo elemento, por exemplo. Já B1, quando comparado com B2, recebeu o número 3, indicando que é levemente mais influente em relação à B2. Deve-se esclarecer que na comparação do elemento B2 com o elemento B1 atribui-se o valor de 1/3, representando uma matriz recíproca, indicando que B2 é levemente menos importante do que B1 e assim por diante (Tabela 4).

Tabela 4 - Exemplo de comparação par a par no AHP.

Critérios	B1	B2	B3
B1	1	3	7
B2	1/3	1	5
B3	1/7	1/5	1

Fonte: Autor.

Após a comparação par a par, realizou-se a normalização das matrizes de julgamento: obtenção de quadros normalizados por meio da soma dos elementos de cada coluna das matrizes de julgamento e, posteriormente, a divisão de cada elemento das matrizes pelo somatório dos valores da respectiva coluna. Esses procedimentos resultaram em uma matriz normalizada, sendo a média de cada linha da matriz o resultado de um vetor de prioridade (w), que serão os pesos de cada variável utilizada em cada cenário.

Um dos principais procedimentos do AHP é o conhecimento da consistência lógica da matriz, importante para evitar erros nos resultados de w . O próprio método se propõe a calcular a consistência lógica (CR), a partir da Equação 3. Se o resultado de CR (consistência lógica) for maior que 0,10 recomenda-se que o tomador de decisão revise alguns de seus julgamentos, já que eles estão inconsistentes (HARKER *et al*, 1989).

$$CR = IC/IR \quad \text{(Equação 3).}$$

Onde: IC é o índice de consistência e IR equivale ao Índice de Consistência Randômico, obtido para uma matriz recíproca de ordem n (número de variáveis).

Para alcançar o CR é preciso obter o Índice de Consistência (IC) e o Índice de Consistência Randômico (IR). O IC (Índice de consistência) pode ser obtido por meio da Equação 4. Já o IR (índice randômico) pode ser obtido a partir de uma tabela proposta por Saaty (1991), que fornece um número padrão de IR para a quantidade de variáveis/parâmetros

utilizadas no modelo (Tabela 5). Por exemplo, em um modelo com três variáveis (ex. declividade, curvatura, uso da terra) o IR é de 0.58 (conforme a Tabela 5).

$$IC \text{ (Índice de Consistência)} = \lambda_{\max} - n / n-1 \quad \textbf{(Equação 4).}$$

Onde: $\lambda_{\max}$ é a média da matriz e n o número de variáveis.

Tabela 5 - Índices randômicos de acordo com a quantidade de parâmetros utilizados no modelo.

Quantidade de Variáveis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor de IR	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Fonte: Saaty (1991).

Para a obtenção do segundo conjunto de pesos (classes temáticas inseridas nas variáveis) foi necessário enquadrar cada classe em um grau de perigo a escorregamentos. Desta forma, foram estabelecidas cinco classes: sem perigo, perigo baixo, perigo médio, perigo alto e perigo muito alto. Tais classes receberam um peso de acordo com a Tabela 6, na medida em que quanto maior for o peso, maior será a sua influência na deflagração dos escorregamentos. Vale acrescentar, que os pesos estabelecidos para esse conjunto foram aplicados em todos os cenários.

Os pesos utilizados nos cenários foram definidos por meio de trabalhos de campo (para validação), como também, por meio de trabalhos prévios da literatura que utilizaram o modelo AHP e demais análises multicritério na Região Metropolitana de Recife, próximas à capital, tais como os trabalhos de: Pfaltzgraff (2007), Torres (2014), Menezes (2015) e Rocha e Schuler (2016); além de observações clássicas da literatura quanto à análise do perigo e da suscetibilidade para processos de escorregamentos.

Tabela 6 - Relação dos graus de perigo e pesos (segundo conjunto).

Grau de perigo	Pesos
Sem perigo	0
Perigo baixo	1
Perigo médio	3
Perigo alto	5
Perigo muito alto	7

Fonte: Autor.

Para as classes de declividade (Quadro 5), os setores com 0°-3° receberam peso zero (áreas planas), e as áreas de maior declividade (maior que 16,8°), peso 7 (perigo mais alto). Para a curvatura, as áreas côncavas receberam o maior peso (maior probabilidade) e as convexas, o menor (menor probabilidade) (Quadro 6).

No SPI (Quadro 7), os locais de menor valor (0-20) receberam o menor peso, uma vez que são áreas com baixa taxa de poder erosivo, enquanto os locais de maior valor (maior que 80) receberam o peso mais alto (7). Com relação à geologia, as estruturas sedimentares (Formação Barreiras) receberam o maior peso, devido ao maior grau de perigo (Quadro 8). Pedologicamente, os solos do tipo Argissolos, vermelho ou amarelo, receberam o maior peso, em função da sua elevada suscetibilidade (Quadro 9). Antropicamente, as áreas urbanas, tanto consolidadas quanto em consolidação, receberam pesos elevados (Quadro 10).

Quadro 5 - Pesos das classes de declividade.

Declividade (°)	Pesos
0-3°	0
3°-9,6°	3
9,6°-16,7°	5
Maior que 16,8°	7

Fonte: Autor.

Quadro 6 - Pesos das classes de curvatura.

Curvatura	Pesos
Convexa	1
Retilínea	5
Côncava	7

Fonte: Autor.

Quadro 7 - Pesos das classes do SPI.

SPI	Pesos
0-20	0
20-40	1
40-60	3
60-80	5
>80	7

Fonte: Autor.

Quadro 8 - Pesos das classes geológicas.

Geologia	Pesos
Depósitos Flúvio- marinhos	0
Depósitos Flúvio- lagunares	1
Estruturas Cristalinas	5
Estruturas Sedimentares	7

Fonte: Autor.

Quadro 9 - Pesos das classes pedológicas.

Pedologia	Pesos
Neossolos Quartzarénicos	0
Gleissolos	1
Solos de Manguê	1
Neossolos Flúvicos	1
Latossolos Amarelos	5
Argissolos Amarelos	7
Argissolos Vermelhos	7

Fonte: Autor.

Quadro 10 - Pesos das classes de uso da terra.

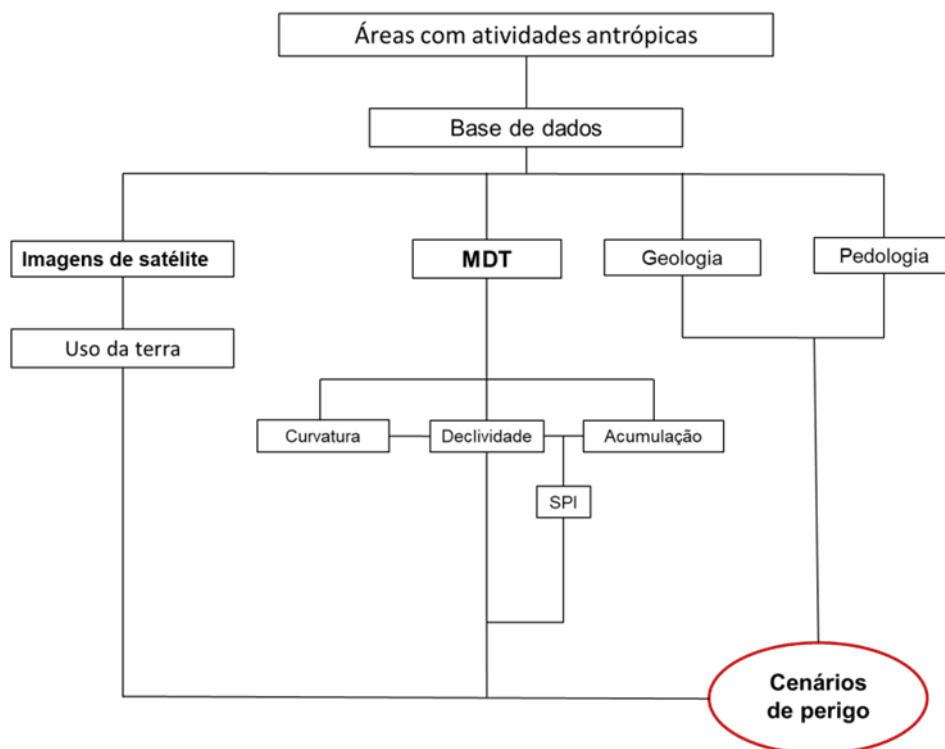
Uso da Terra	Pesos
Áreas na planície	0
Vegetação	1
Campo antrópico	5
Agricultura	5
Solo exposto	5
Área urbana consolidada	7
Área urbana em consolidação	7

Fonte: Autor.

4.3.1 Cenário 01 e Cenário 02 (cartas de perigo instalado)

O primeiro e o segundo cenários foram referentes ao perigo já instalado, isto é, com áreas ocupadas antropicamente ou com estruturas sociais, que possam ser diretamente afetadas por escorregamentos (Figura 24). Desta forma, algumas áreas de vegetação natural foram excluídas dessa modelagem, especificamente a Área de Proteção Ambiental da Várzea (APA da Várzea), a Unidade de Conservação da Natureza Mata das Nascentes (UCN Mata das Nascentes), a Reserva Ecológica de Dois Irmãos e um trecho da UCN Beberibe. Todos esses locais são regiões de proteção ambiental, compostos majoritariamente, por vegetação natural e não possuem moradias ou edificações, por isso foram excluídos dos cenários de perigo, sendo apenas analisados no cenário 3.

Figura 24 - Fluxograma dos cenários de perigo instalados (cenários 1 e 2).



Fonte: Autor.

No cenário 1, foi estabelecida uma hierarquia com a declividade no topo, sendo considerada a variável mais influente (Quadro 11). A Tabela 7 indica a comparação par a par

realizada nesse cenário, na qual as colunas foram somadas e o resultado pode ser observado no campo soma das colunas da Tabela 7.

A divisão de cada elemento desta matriz pelo somatório dos valores das respectivas colunas gerou a matriz normalizada (Tabela 8). Dessa forma, realizando-se uma média de cada linha da matriz normalizada foi possível alcançar os pesos das variáveis (w) (Tabela 9).

Quadro 11 - Hierarquia de decisão do cenário 1.

Hierarquia de decisão
Declividade
Uso da terra
Pedologia
SPI
Geologia
Curvatura

Fonte: Autor.

Tabela 7 - Tabela de comparação par a par no cenário 1.

Variáveis	Declividade	Uso da Terra	Pedologia	SPI	Geologia	Curvatura
Declividade	1	3	3	3	5	7
Uso da terra	1/3	1	3	3	5	5
Pedologia	1/3	1/3	1	1	3	5
SPI	1/3	1/3	1	1	3	5
Geologia	1/5	1/5	1/3	1/3	1	3
Curvatura	1/7	1/5	1/5	1/5	1/3	1
Soma das colunas	2,34	5,07	8,53	8,53	17,33	26,00

Fonte: Autor.

Tabela 8 - Matriz normalizada do cenário 1.

0,43	0,59	0,35	0,35	0,29	0,27
0,14	0,20	0,35	0,35	0,29	0,19
0,14	0,07	0,12	0,12	0,17	0,19
0,14	0,07	0,12	0,12	0,17	0,19
0,09	0,04	0,04	0,04	0,06	0,12
0,06	0,04	0,02	0,02	0,02	0,04

Fonte: Autor

Tabela 9 - Pesos das variáveis no cenário 1, representando o valor de cada variável na modelagem deste cenário.

Variáveis	Pesos (w)
Declividade	0,38
Uso da terra	0,25
Pedologia	0,13
SPI	0,13
Geologia	0,06
Curvatura	0,03

Fonte: Autor.

Em relação à consistência da matriz, o cenário 1 apresentou uma CR de 0,072466933, valor abaixo de 0,10 indicando que os pesos foram consistentes. Salientando-se que a IC foi de 0,08985996 e o IR foi igual a 1,24, valor padrão para uma matriz de 6 elementos, conforme já mencionado.

No segundo cenário, a variável uso da terra foi colocada no topo da hierarquia de decisão (Quadro 12), sendo a variável mais influente neste cenário, seguida pela declividade. A Tabela 10 mostra a comparação par a par e a Tabela 11 a matriz normalizada. Os pesos das variáveis podem ser observados na Tabela 12.

Quadro 12 - Hierarquia de decisão do cenário 2.

Hierarquia de decisão
Uso da terra
Declividade
SPI
Pedologia
Geologia
Curvatura

Fonte: Autor.

Tabela 10 - Comparação par a par do cenário 2.

Variáveis	Uso da terra	Declividade	SPI	Pedologia	Geologia	Curvatura
Uso da terra	1	1	3	3	7	7
Declividade	1	1	3	3	5	5
SPI	1/3	1/3	1	3	3	5
Pedologia	1/3	1/3	1/3	1	3	5
Geologia	1/7	1/5	1/3	1/3	1	3
Curvatura	1/7	1/5	1/5	1/5	1/3	1
Soma das Colunas	2,95	3,07	7,87	10,53	19,33	26,00

Fonte: Autor.

Tabela 11 - Matriz Normalizada do cenário 2.

0,34	0,33	0,38	0,28	0,36	0,27
0,34	0,33	0,38	0,28	0,26	0,19
0,11	0,11	0,13	0,28	0,16	0,19
0,11	0,11	0,04	0,09	0,16	0,19
0,05	0,07	0,04	0,03	0,05	0,12
0,05	0,07	0,03	0,02	0,02	0,04

Fonte: Autor.

Tabela 12 - Pesos das variáveis no cenário 2.

Variáveis	Pesos (w)
Uso da terra	0,33
Declividade	0,30
SPI	0,16
Pedologia	0,12
Geologia	0,06
Curvatura	0,04

Fonte: Autor.

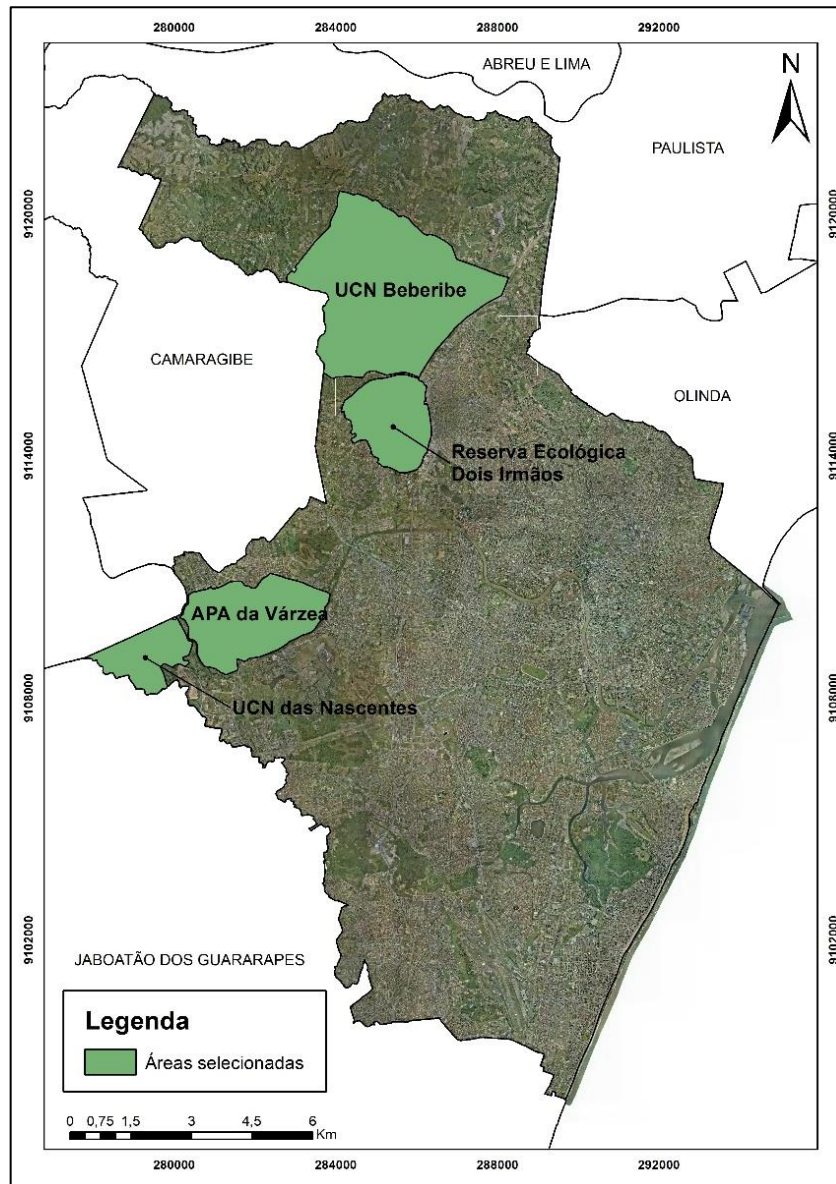
Esse cenário apresentou um IC de 0,094350865 e um IR padrão (para uma matriz de seis variáveis) de 1,24. Assim, obteve-se o CR, equação já mostrada anteriormente, com valor de 0,076089407. Assim como no cenário 1, o CR ficou abaixo de 0,10 indicando que os resultados obtidos (w) foram consistentes.

4.3.2 Cenário 3 (cartas de perigo potencial)

O terceiro cenário representou o perigo potencial (áreas não ocupadas), que também pode ser denominado de suscetibilidade, uma vez que serão identificadas as áreas com potencialidade natural para a ocorrência dos processos.

As áreas selecionadas para esse cenário foram: a Área de Proteção Ambiental da Várzea (APA da Várzea), a Unidade de Conservação da Natureza Mata das Nascentes (UCN Mata das Nascentes), a Reserva Ecológica de Dois Irmãos e uma parte na UCN Beberibe (Figura 25). Tal cenário foi denominado de perigo potencial considerando-se o fato de que esses locais poderão, com a expansão urbana, ser ocupados futuramente, originando novas áreas de perigo instalado.

Figura 25 - Localização das áreas selecionadas para o cenário 3 (perigo potencial).



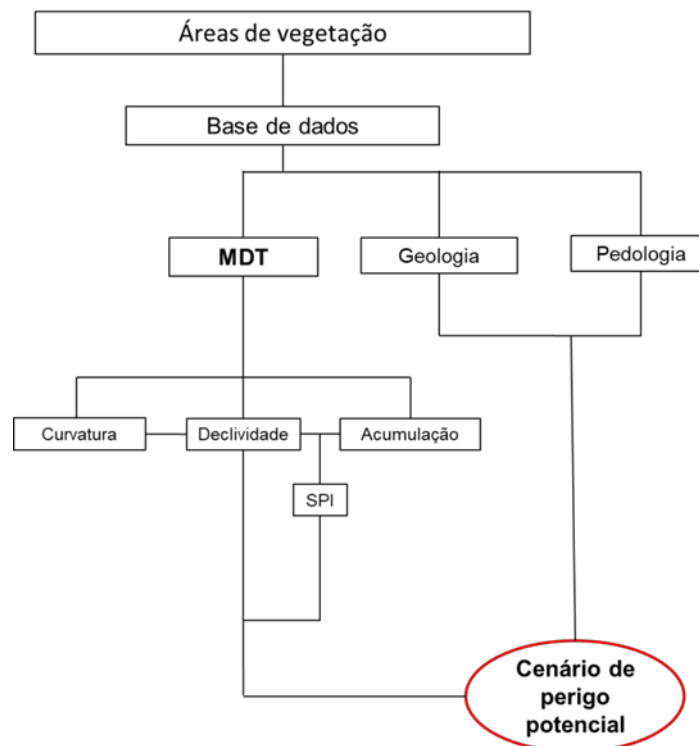
Fonte: Autor.

Os locais delimitados neste cenário foram, exclusivamente, de vegetação natural, sem ocupação ou estruturas sócias em seus perímetros. No entanto, essas áreas podem vir a ser ocupadas futuramente, tanto informalmente como formalmente.

A variável uso da terra não foi utilizada, pelo fato de ser um parâmetro exclusivamente antrópico. Desta forma, para a criação da carta de perigo potencial foram utilizadas as variáveis de declividade, de curvatura, de pedologia, de geologia e do SPI (Figura 26). Com o uso da ferramenta *Clip*, software ArcGIS, os mapeamentos temáticos foram recortados na

escala das quatro regiões selecionadas. Assim, cada carta de perigo potencial foi criada, separadamente, para cada uma das unidades. No entanto, todos os pesos alcançados foram aplicados igualmente para todas as áreas, como também, foram utilizadas as mesmas variáveis.

Figura 26 - Fluxograma do cenário de perigo potencial (cenário 3).



Fonte: autor.

Neste cenário, a declividade foi colocada no topo da hierarquia de decisão (Quadro 13). Conforme a Tabela 13, é possível verificar a comparação par a par do cenário 3, que resultou na matriz normalizada da Tabela 14. Realizando-se uma média de cada linha da matriz normalizada foi possível alcançar os pesos das variáveis para este cenário (w) (Tabela 15).

Quadro 13 - Hierarquia de decisão do cenário de perigo potencial.

Variáveis
Declividade
Pedologia
SPI
Geologia
Curvatura

Fonte: Autor.

Tabela 13 - Comparação par a par do cenário de perigo potencial.

Variáveis	Declividade	Pedologia	SPI	Geologia	Curvatura
Declividade	1	1	3	5	5
Pedologia	1	1	1	3	3
SPI	1/3	1	1	3	3
Geologia	1/5	1/3	1/3	1	3
Curvatura	1/5	1/3	1/3	1/3	1
Valor	2,73	3,67	5,67	12,33	15,00

Fonte: Autor.

Tabela 14 - Matriz normalizada do cenário de perigo potencial.

0,37	0,27	0,53	0,41	0,33
0,37	0,27	0,18	0,24	0,20
0,12	0,27	0,18	0,24	0,20
0,07	0,09	0,06	0,08	0,20
0,07	0,09	0,06	0,03	0,07

Fonte: Autor.

Tabela 15 - Pesos das variáveis do cenário de perigo potencial.

Variáveis	Pesos (w)
Declividade	0,38
Pedologia	0,25
SPI	0,20
Geologia	0,10
Curvatura	0,06

Fonte: Autor.

Esse cenário apresentou um IC de 0,076923, IR padrão para matriz de 5 variáveis de 1,12. Assim, obteve-se o CR com valor de 0,068682, tal como nos cenários 1 e 2, o CR ficou abaixo de 0,10; indicando que os resultados obtidos (w) forma consistentes.

4.3.3 Criação das cartas de perigo e de perigo potencial

Após o estabelecimento dos pesos e a verificação da consistência lógica, as cartas de perigo, instalado e potencial, foram elaboradas em ambiente SIG, utilizando-se o *software ArcGIS 10.3*. Inicialmente, todos os mapas das variáveis foram rasterizados, transformados em arquivos do tipo raster, por meio da ferramenta de conversão *Polygon to Raster (Conversion Tools)*.

O segundo procedimento foi a reclassificação dos mapas temáticos para os cinco graus de perigo estabelecidos (sem perigo, perigo baixo, médio, alto e muito alto), a partir da ferramenta *Reclassify*. Por fim, aplicou-se a ferramenta *Raster Calculador (Map Algebra)*. A partir da Equação 4 foi elaborada a carta de perigo no cenário 1.

A Equação 5 foi utilizada para criação do segundo cenário e todos os mapas do terceiro cenário foram gerados a partir da Equação 6. Observa-se na Figura 27 um exemplo da aplicação da álgebra de mapas, por meio ferramenta *Raster Calculador*, para o cenário 1 de perigo.

$$P = (\text{Decl} * 0,38) + (\text{Uso} * 0,25) + (\text{Pedo} * 0,13) + (\text{SPI} * 0,13) + (\text{Geol} * 0,6) + (\text{Curv} * 0,3) \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde: *P* representa o perigo, *Curv* = fato curvatura, *Decl* = fator declividade, *SPI* = fator SPI, *Geol* = fator geologia, *Pedo* = fator pedologia e *Uso* = fator do uso da terra.

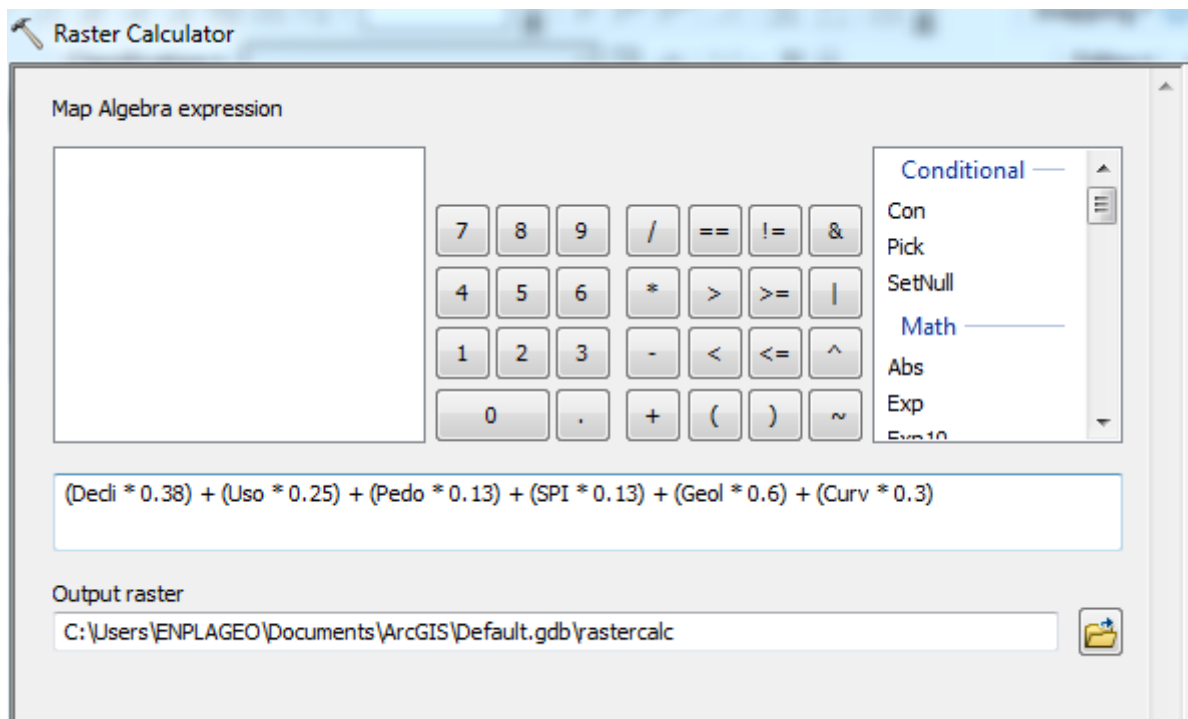
$$P = (\text{Uso} * 0,33) + (\text{Decl} * 0,30) + (\text{SPI} * 0,16) + (\text{Pedo} * 0,12) + (\text{Geol} * 0,6) + (\text{Curv} * 0,4) \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde: *P* representa o perigo, *Curv* = fato curvatura, *Decl* = fator declividade, *SPI* = fator SPI, *Geol* = fator geologia, *Pedo* = fator pedologia e *Uso* = fator do uso da terra.

$$P = (\text{Decl} * 0,38) + (\text{Pedo} * 0,25) + (\text{SPI} * 0,20) + (\text{Geol} * 0,10) + (\text{Curv} * 0,6) \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde: *P* representa o perigo, *Curv* = fato curvatura, *Decl* = fator declividade, *SPI* = fator SPI, *Geol* = fator geologia, e *Pedo* = fator pedologia.

Figura 27 - Exemplo da estruturação da Equação do Cenário 1 na ferramenta Raster Calculador.



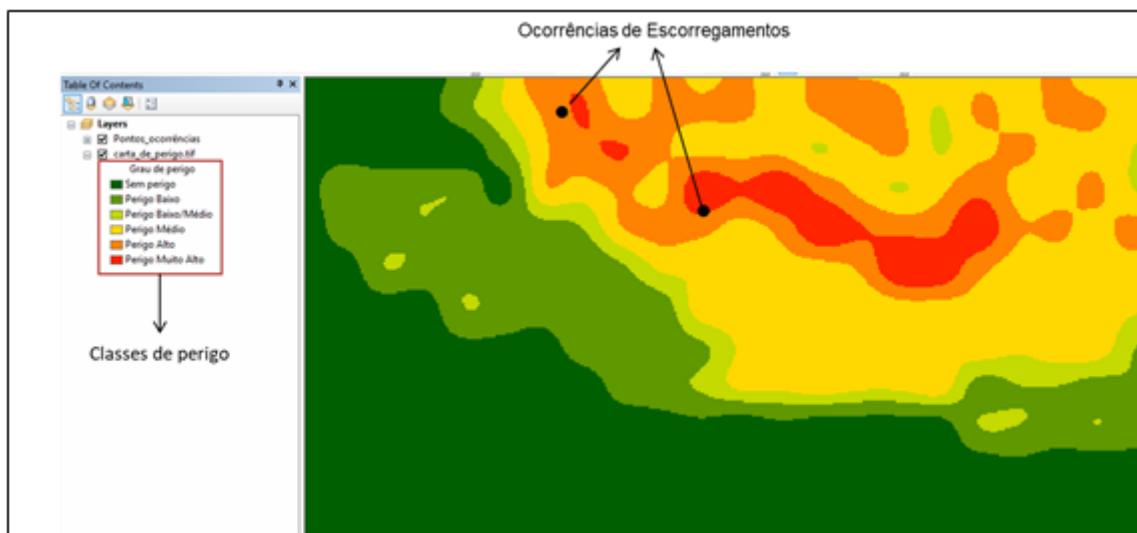
Fonte: Autor.

4.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Visando a veracidade das cartas de perigo foram necessárias validações, como meios de verificar se os resultados obtidos na modelagem foram condizentes com a realidade empírica. Na maioria dos mapas de perigo gerados por modelos, as validações são feitas a partir da comparação/sobreposição entre os resultados obtidos e os mapas de ocorrência dos processos, tal como esta pesquisa.

As validações dos cenários 1 e 2 foram realizadas a partir da sobreposição do mapa de ocorrências de escorregamentos com as cartas de perigo geradas. Dessa forma, foi calculado o índice Concentração de Escorregamentos (CE): razão entre o número de células das classes de perigo e os pontos de escorregamentos. Em outras palavras, tal índice demonstrou as classes de perigo mais atingidas pelos escorregamentos, por meio da sobreposição das cartas de perigo com o mapa de ocorrências (Figura 28).

Figura 28 - Exemplo de comparação entre as ocorrências de escorregamentos e as classes de perigo. Em vermelho estão as áreas de perigo muito alto indicadas na modelagem, em laranja os locais de perigo alto e assim sucessivamente. Os pontos pretos representam locais onde ocorreram escorregamentos.



Fonte: Autor.

A validação do terceiro cenário não foi possível, devido à falta de dados de ocorrências nas áreas selecionadas. As ocorrências registradas pela Defesa Civil estão restritas as áreas edificadas, e ausentes nas áreas do cenário 3.

Além disso, não foi possível identificar, com clareza, cicatrizes por fotointerpretação de imagens de satélite e fotos aéreas. Como já mostrado anteriormente, os escorregamentos no município estão atrelados, fortemente, à atividades antrópicas. Desta forma, nos locais de aplicação do cenário três não devem ocorrer escorregamentos na mesma frequência em relação às áreas urbanas, no caso de Recife. Por tais motivos, as cartas deste cenário não foram validadas e foram apresentadas como cartas equivalentes a suscetibilidade, visando-se o planejamento de tais áreas pela gestão pública em sua preservação ou ocupação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados e discussões obtidos nesta pesquisa: **(5.1)** Mapeamento das ocorrências de escorregamentos; **(5.2)** Análise dos parâmetros condicionantes utilizados nas modelagens; **(5.3)** Mapeamento e validação das cartas de perigo instalado e **(5.4)** Mapeamento das áreas de perigo potencial.

5.1 MAPEAMENTO DAS OCORRÊNCIAS DE ESCORREGAMENTOS

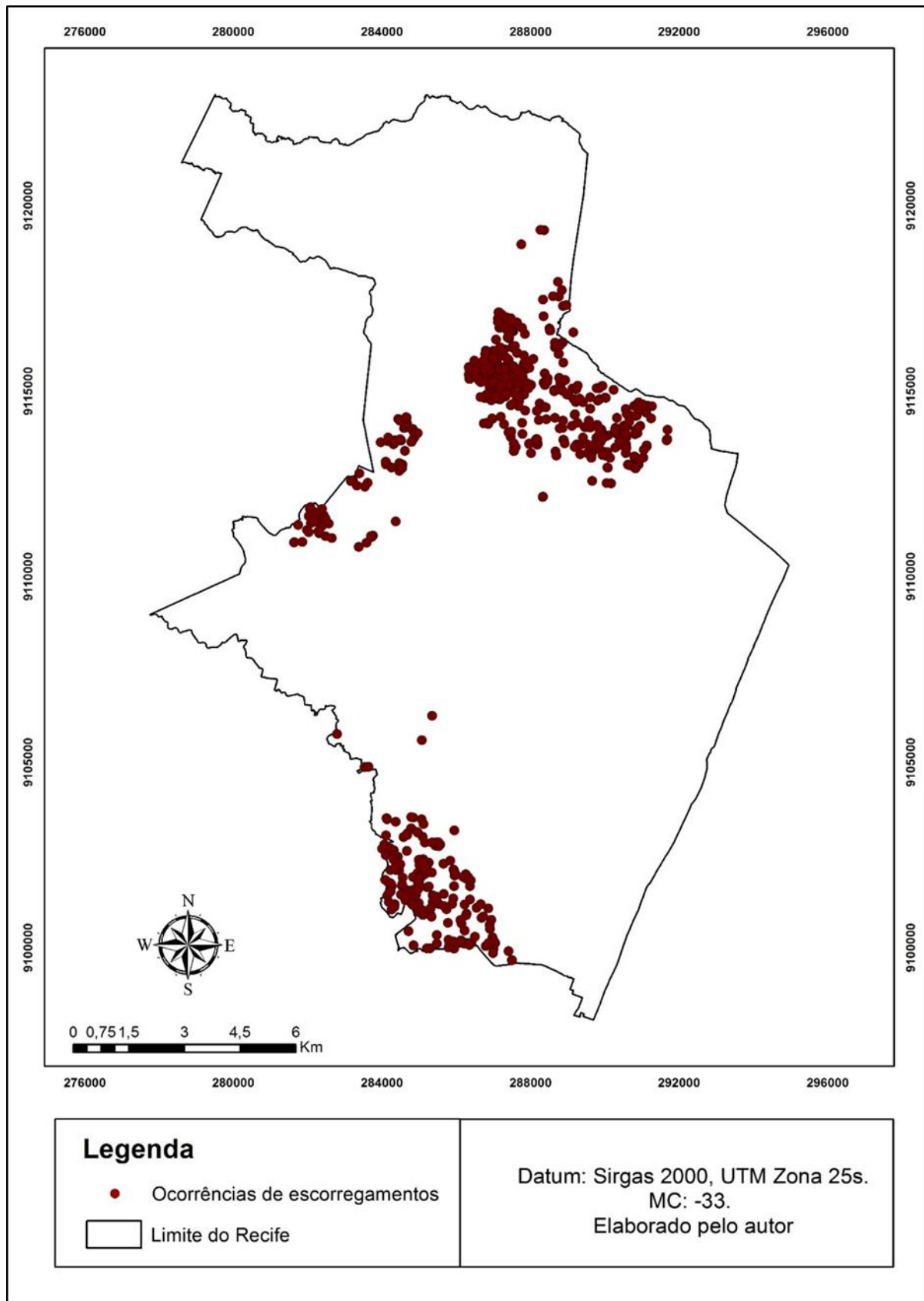
Foram mapeadas 850 ocorrências de escorregamentos no município, entre os anos de 2013 e 2018 (Figura 29). A maior parte dos processos foi registrada entre os meses de maio, de junho e de julho, períodos de maior precipitação em Recife.

Os escorregamentos concentraram-se, predominantemente, nas zonas norte e sul (Figura 30), com alguns casos na zona oeste da cidade, especificamente nos bairros da Várzea e do Sítio dos Pintos. O bairro da Cohab (zona sul de Recife) apresentou a maior concentração de ocorrências, 16% do total (136 ocorrências). O bairro de Nova Descoberta (zona norte) obteve a segunda maior concentração, com 14% das ocorrências, seguido pelo bairro de Dois Unidos (zona norte) com 9%. Os bairros do Ibura (zona sul) e do Brejo da Guabiraba (zona norte) concentraram 7%.

Os bairros mais atingidos pelos escorregamentos estão em terrenos constituídos por sedimentos da Formação Barreiras, apresentando, majoritariamente, Argissolos. Os bairros da zona norte da cidade localizam-se sobre Colinas pertencentes à unidade morfoestrutural do Planalto Sedimentar Litorâneo (Tabuleiros Costeiros).

Os bairros da zona sul estão inseridos nos Tabuleiros Costeiros dissecados também pertencentes à unidade do Planalto Sedimentar Litorâneo. Além disso, os bairros mais atingidos possuem uma intensa ocupação antrópica (Figura 31), precariamente ocupados e com ausência de infraestrutura.

Figura 29 - Mapeamento das ocorrências de escorregamentos do município de Recife (2013-2018).



Fonte: Autor.

Figura 30 - Exemplo de escorregamento no bairro de Dois Unidos - zona norte do Recife.



Fonte: Jornal Folha de São Paulo (2019).

Figura 31 - Imagem aérea de bairros da zona norte atingidos por escorregamentos, sendo possível observar a elevada densidade de moradias.



Fonte: CPRM, 2013.

Em outras pesquisas, que também utilizaram abordagens semelhantes para compreender a distribuição espacial de escorregamentos, como Nery (2011) que realizou um mapeamento de cicatrizes de escorregamentos translacionais rasos na bacia da Ultrafértil, Serra do Mar (SP), utilizado a interpretação visual de ortofotos. O autor mapeou 216 cicatrizes de escorregamentos em uma área natural, sem ocupação antrópica. Dessa forma, ressalta-se que o autor conseguiu mapear os escorregamentos na forma de cicatrizes a partir das diferenças de textura de solo e aspectos alongados; diferentemente desta pesquisa, cuja ocupação antrópica, muitas vezes sobre as cicatrizes, dificultou sua fotointerpretação.

Torres (2010) também mapeou cicatrizes de escorregamentos no município de Ipojuca, Região Metropolitana do Recife. Seu mapeamento foi elaborado por meio da interpretação e da vetorização das imagens *WordView*, *Quickbird* e do *Google Earth* entre os anos de 2010 e de 2014. No total, foram identificadas 103 cicatrizes de escorregamentos, 52 localizadas em áreas de cultivo temporário de cana-de-açúcar, 49 em locais urbanizados e apenas 2 em zonas florestadas.

5.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS CONDICIONANTES UTILIZADOS NAS MODELAGENS

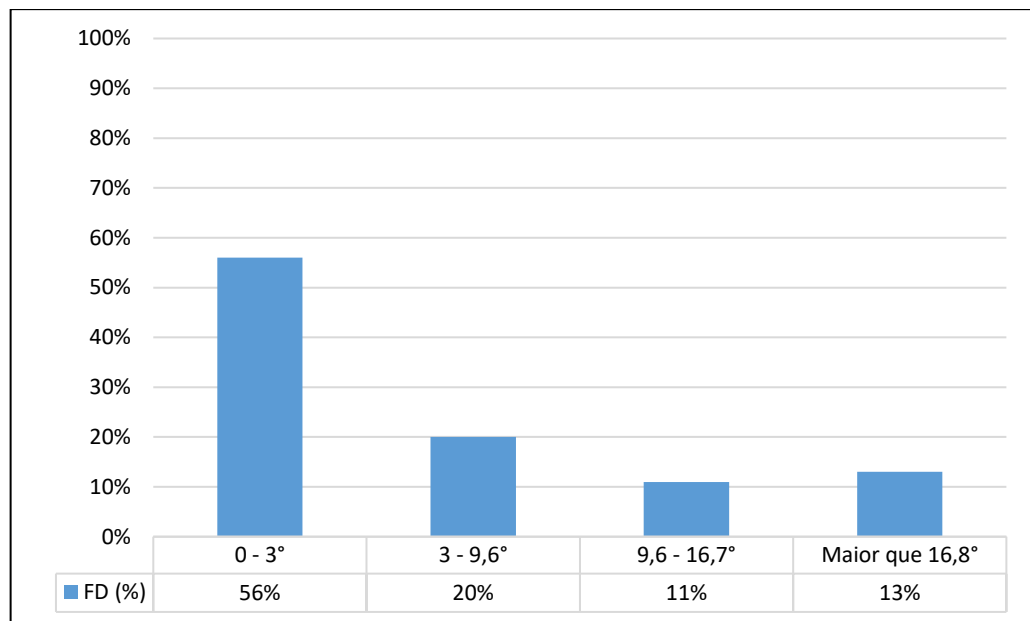
Conforme mencionado, os escorregamentos são fenômenos complexos, com elevada quantidade de fatores condicionantes, sendo, a seleção destes parâmetros de grande relevância para a construção de cartas de perigo ou de suscetibilidade a esses processos.

O mapa de declividade foi expresso em graus e dividido em 4 classes (Figura 32 e Figura 33), adaptadas da Lei Lehman (Lei Federal n. 6.766/79). O intervalo de 0° a 3° representa terrenos planos, cuja Frequência de Distribuição (FD) foi de 56% da área total do município. Já a classe de declividade maior que 16,8°, onde o parcelamento do solo é restrito e requer laudos técnicos, apresentou uma FD de 13%.

Pesquisas anteriores na Região Metropolitana no Recife (RMR) mostram que as áreas de maior declividade (maior que 16,8°) concentram mais escorregamentos. Santos *et al.* (2019) realizaram seu estudo no município de Camaragibe e verificaram que a classe de declividade maior que 16,8° obteve uma Concentração de Escorregamentos (CE) de 52,7%. Esta classe apresentou uma FD de 15%, mostrando que nos locais de declividade superior a 16,8° ocorrem mais escorregamentos.

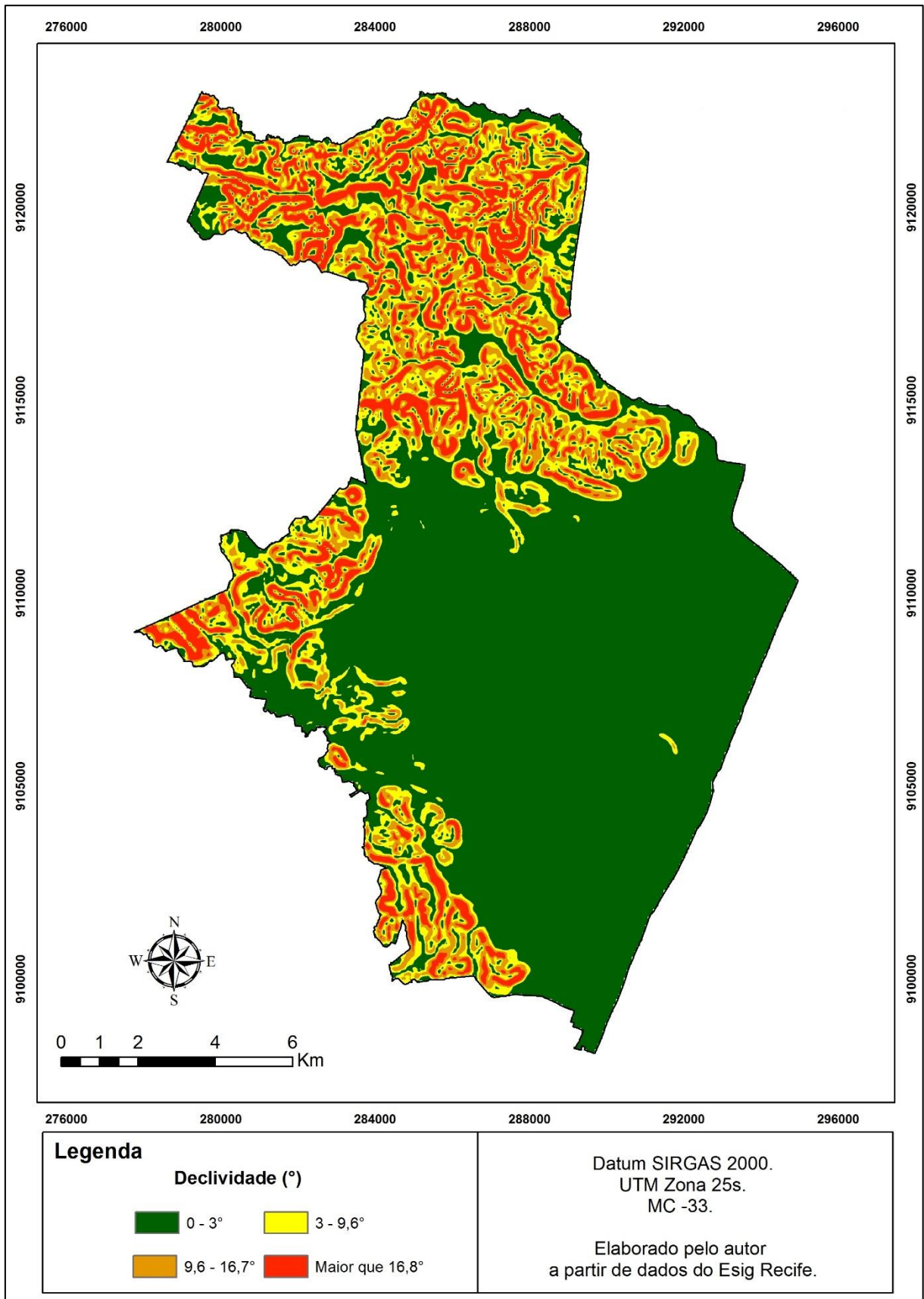
Santana *et al.* (2018) realizaram uma pesquisa no bairro de Nova Descoberta (zona norte do Recife). A classe de declividade maior que $16,8^\circ$ teve uma FD de 50% e uma CE de 82%. Tais análises indicam que a classe de declividade superior a $16,8^\circ$ é mais propensa para a deflagração de escorregamentos na região.

Figura 32 - Frequência de Distribuição (FD) das classes de declividade.



Fonte: Autor.

Figura 33 - Mapa de Declividade do município de Recife.



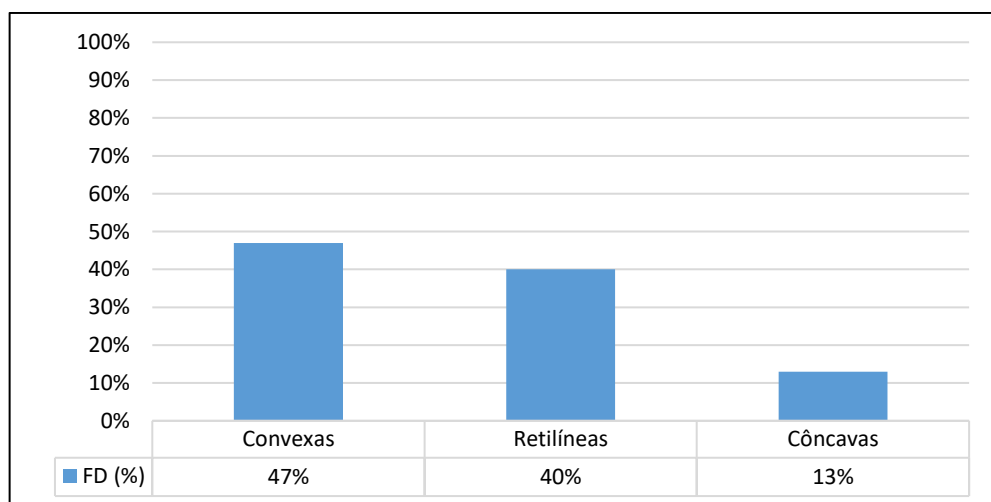
Fonte: Autor.

Em relação à curvatura das encostas, as formas côncavas são zonas de convergência de sedimentos e de fluxos d'água, com maior probabilidade de formação de lençol freático (SIDLE *et al.*, 1985), tornando-as mais propensas às ocorrências de escorregamentos. As áreas côncavas apresentaram uma FD de 13% da área total do município (Figura 34 e Figura 35).

As formas convexas são menos favoráveis a escorregamentos, uma vez que permitem uma maior dissipação da água (SIDLE *et al.*, 1985). Contudo, ações antrópicas podem alterar a estabilidade dessas encostas, modificando sua forma e criando zonas de convergência de fluxos e de sedimentos. Esse tipo de forma é a mais comum no Recife, com uma FD de 47%. Já as retilíneas apresentaram uma FD de 40% (Figura 34 e Figura 35).

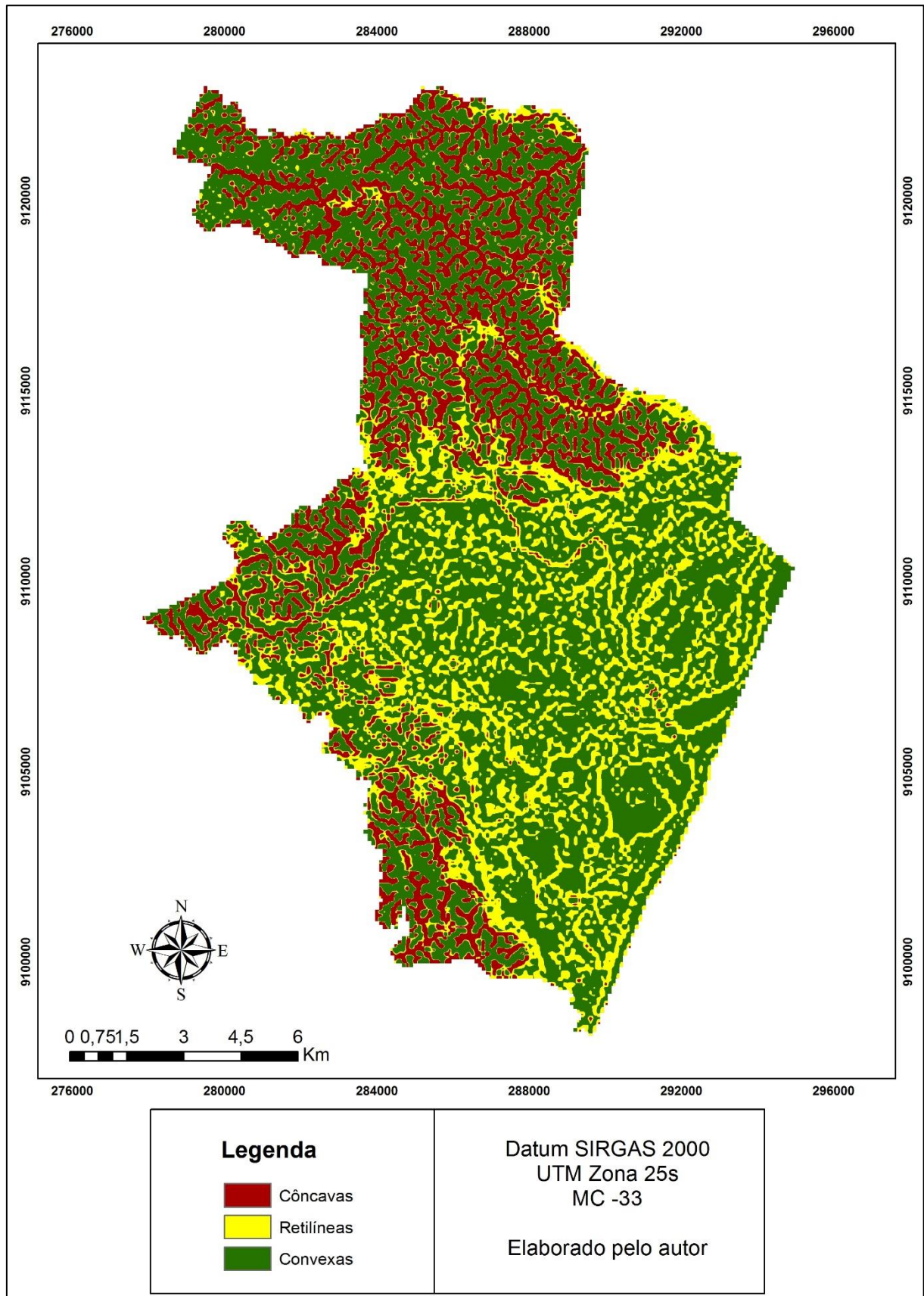
Em Santana *et al.* (2018), ao analisar encostas da zona norte de Recife, as formas convexas tiveram a maior FD (58%) e uma CE de 70%, mostrando que os escorregamentos são frequentes em encostas convexas, muitos deles ligados a atividades antrópicas. As encostas côncavas tiveram FD de apenas 3%, porém uma CE de aproximadamente 10%, isto é, apesar da baixa frequência desta classe, muitos escorregamentos foram deflagrados neste tipo de encosta, confirmando a menor instabilidade de feições côncavas. No trabalho de Santos *et al.* (2019) no município de Camaragibe, as encostas côncavas tiveram uma CE de 51% e as convexas 47%. Verificou-se, também, que as encostas convexas, mesmo sendo menos suscetíveis, concentraram uma quantidade significativa de processos.

Figura 34 - Frequência de Distribuição (FD) das classes de curvatura.



Fonte: Autor.

Figura 35 - Mapa de curvatura do município de Recife.

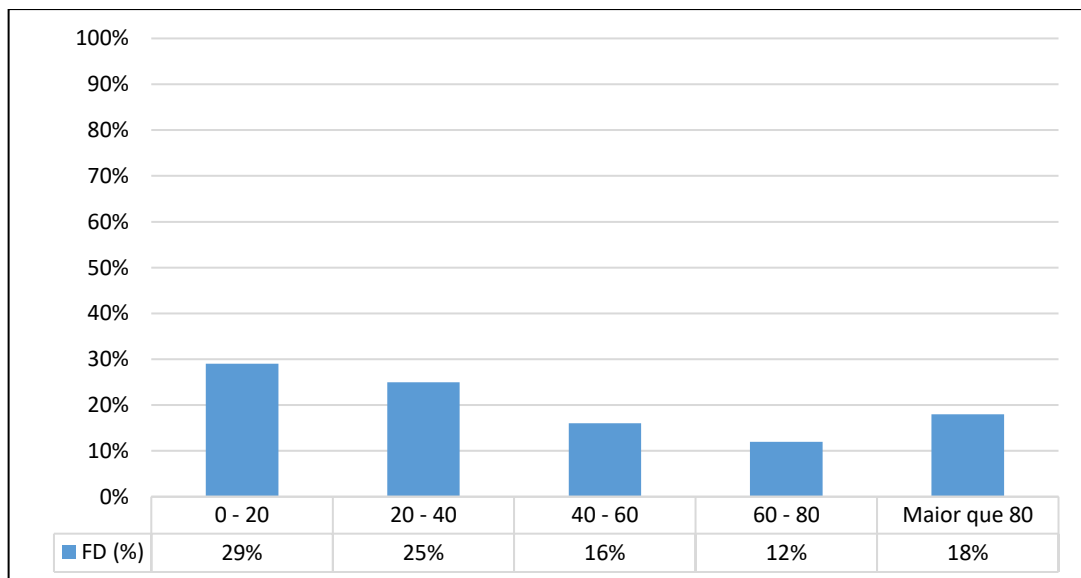


Fonte: Autor.

Outra variável utilizada nas modelagens foi o índice de potência de fluxo ou SPI (*Stream Power Index*). É um atributo que descreve o potencial da topografia para concentrar grandes quantidades de água superficial, promovendo a dissecação do relevo pelo entalhamento dos talwegues (CAPOANE, 2015). Os locais de SPI mais elevado concentram uma maior quantidade de fluxos superficiais de água e de sedimentos, caracterizando-se como áreas de maior incidência de processos erosivos e de escorregamentos.

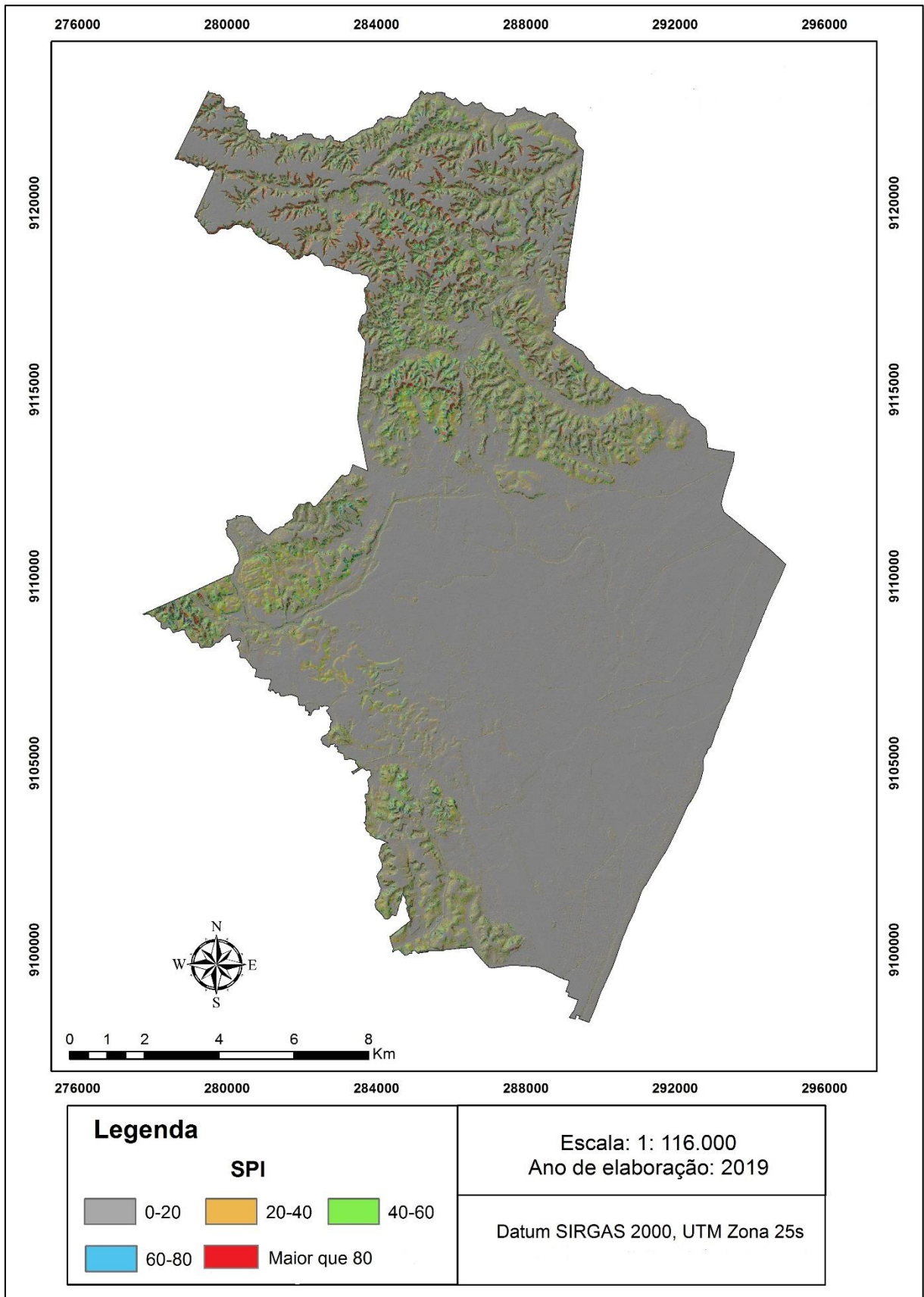
A classe de SPI > 80 corresponde as áreas com maior potência dos fluxos superficiais e apresentou uma FD de 18%. As áreas de menor valor de SPI (0 – 20) corresponderam a 29% da área total do município, sendo a classe de maior FD (Figura 36 e Figura 37). Em Kumar *et al.* (2015), as classes de SPI entre 60 e 80 e maior que 80 concentraram a maior quantidade de escorregamentos, com uma CE em torno de 40% para ambas as classes. Já a classe de SPI de 0 a 20 não apresentou nenhum escorregamento.

Figura 36 - Frequência de Distribuição (FD) das classes de SPI.



Fonte: Autor.

Figura 37 - Mapa de SPI do município de Recife.



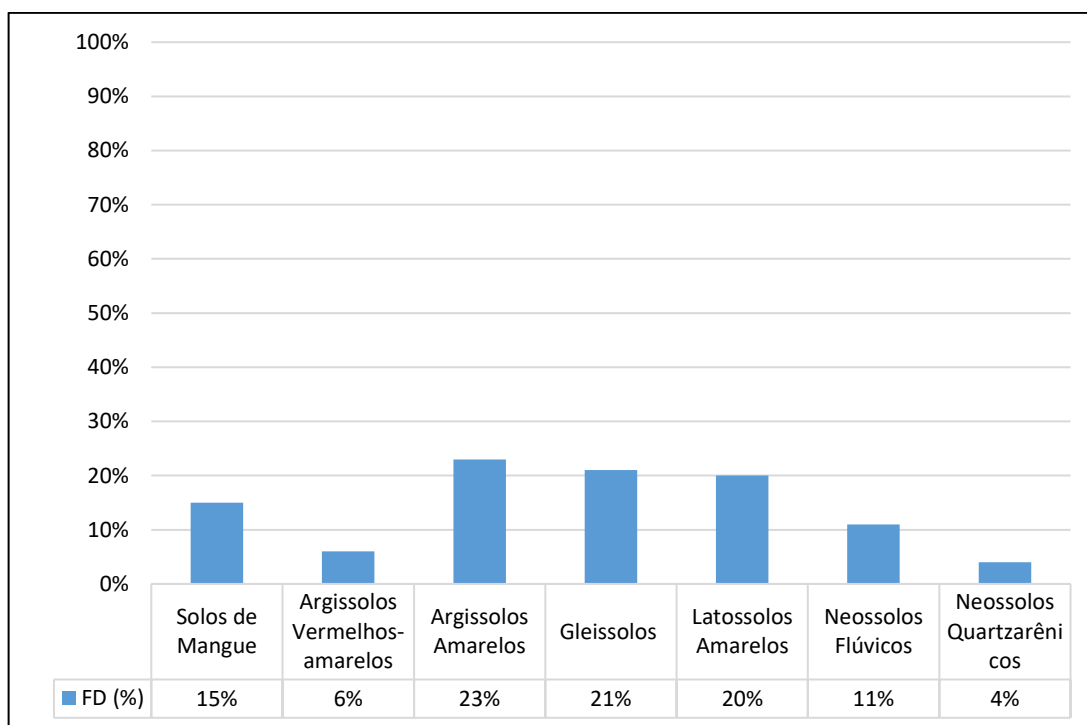
Fonte: Autor.

Pedologicamente, como já exposto, o Argissolo Vermelho e Amarelo é o tipo de solo mais influente na deflagração de escorregamentos na região. Isso ocorre pela alta variação de argila entre seus horizontes, especificamente nas camadas subsuperficiais. Os Argissolos apresentaram uma FD de 29%, sendo o solo de maior frequência no município. Os Gleissolos concentraram uma FD de 21%, seguida pelos Latossolos (FD de 20%) (Figura 38 e Figura 39).

Em Torres (2010), ao realizar sua pesquisa no município de Ipojuca (RMR), verificou que 40% das cicatrizes de escorregamentos ocorreram em Latossolos Amarelos, sendo o tipo de solo mais frequente. Os Argissolos Amarelos apresentaram uma CE de 23% e os Argissolos Vermelhos e Amarelos de 28%.

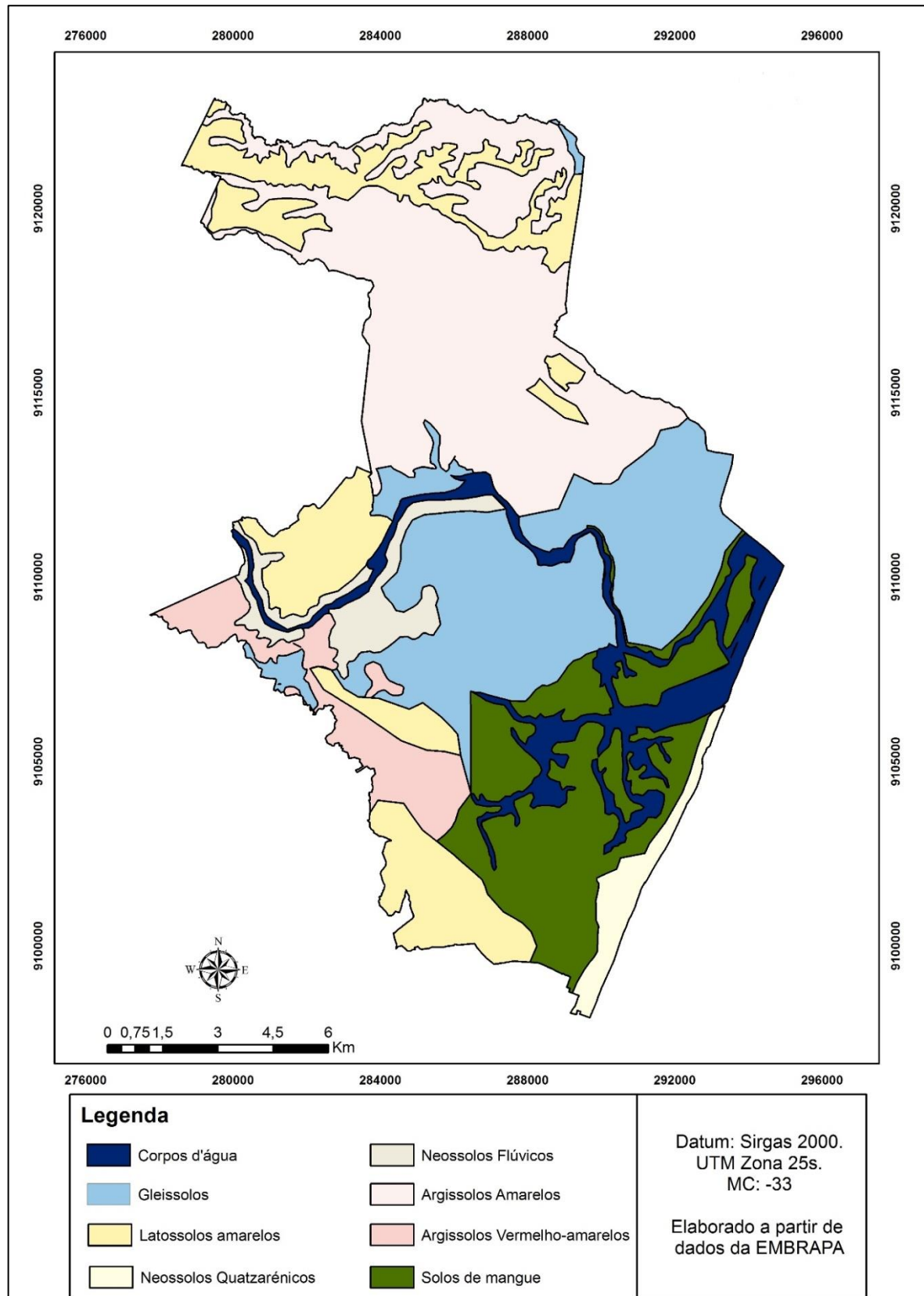
Em Santos *et al.* (2019), das 215 ocorrências de escorregamentos registradas no município de Jaboatão dos Guararapes (RMR), 118 foram deflagradas em Argissolos Amarelos ou Vermelhos e 21 em Latossolos. Tais resultados indicam, portanto, que esses dois tipos de solos são mais propensos para a ocorrência de escorregamentos na região.

Figura 38 - Frequência de Distribuição (FD) das classes pedológicas.



Fonte: Autor.

Figura 39 - Mapa pedológico do município de Recife.

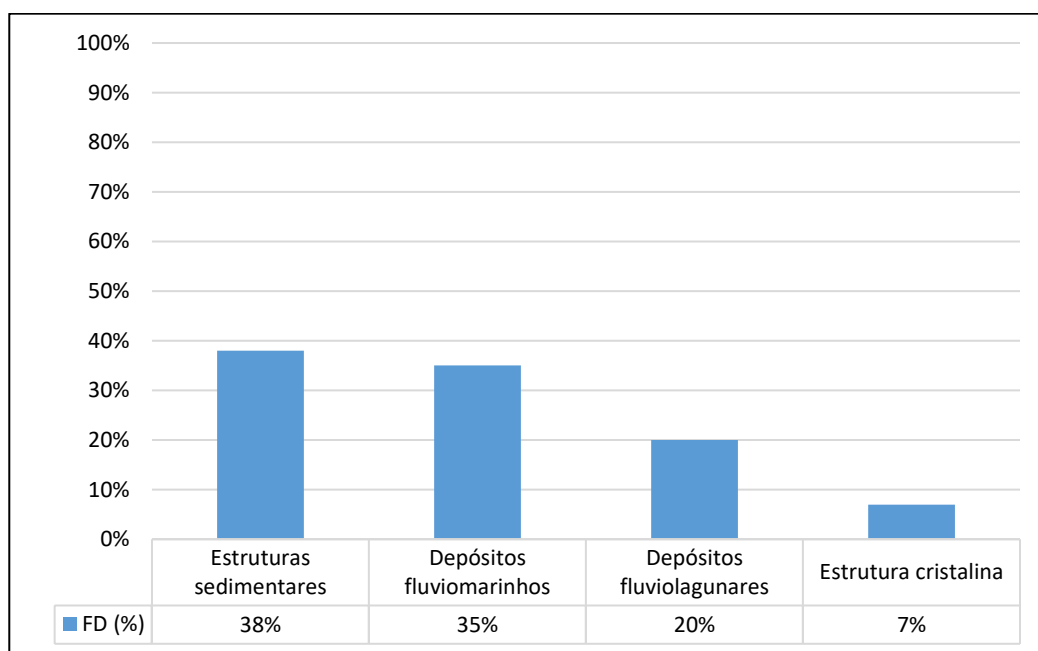


Fonte: Autor.

O mapa geológico foi agrupado em 4 classes: estruturas sedimentares, estrutura cristalina, depósitos fluviomarinhos e depósitos fluviolagunares. Assim, os escorregamentos foram mais comuns na classe das estruturas sedimentares, principalmente, na Formação Barreiras.

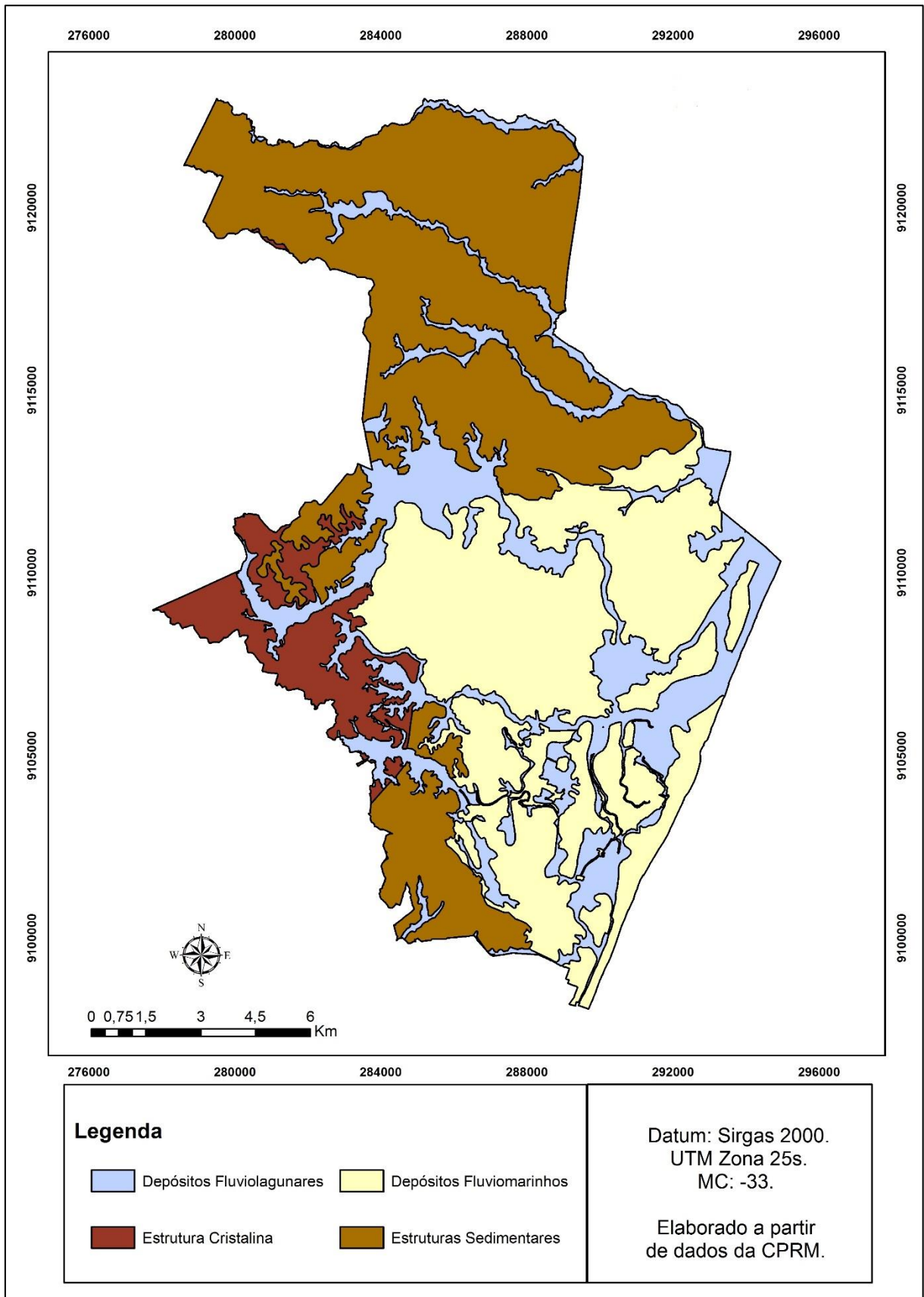
As estruturas sedimentares apresentaram a maior Frequência de Distribuição, com um total de 38%. A classe dos depósitos fluviomarinhos apresentou uma FD de 35% e os fluviolagunares 20% (Figura 40 e Figura 41). Os escorregamentos no município ocorrem, majoritariamente, nas estruturas sedimentares, especificamente nos sedimentos da Formação Barreiras (ALHEIROS *et al.*, 2003). As áreas sobre a estrutura cristalina também são suscetíveis a escorregamentos (PFALTZGRAFF, 2007), mas são restritas ao oeste do município (pouca expressividade para Recife), com uma FD de apenas 7%.

Figura 40 - Frequência de Distribuição (FD) das classes geológicas.



Fonte: Autor.

Figura 41 - Mapa geológico do município de Recife.

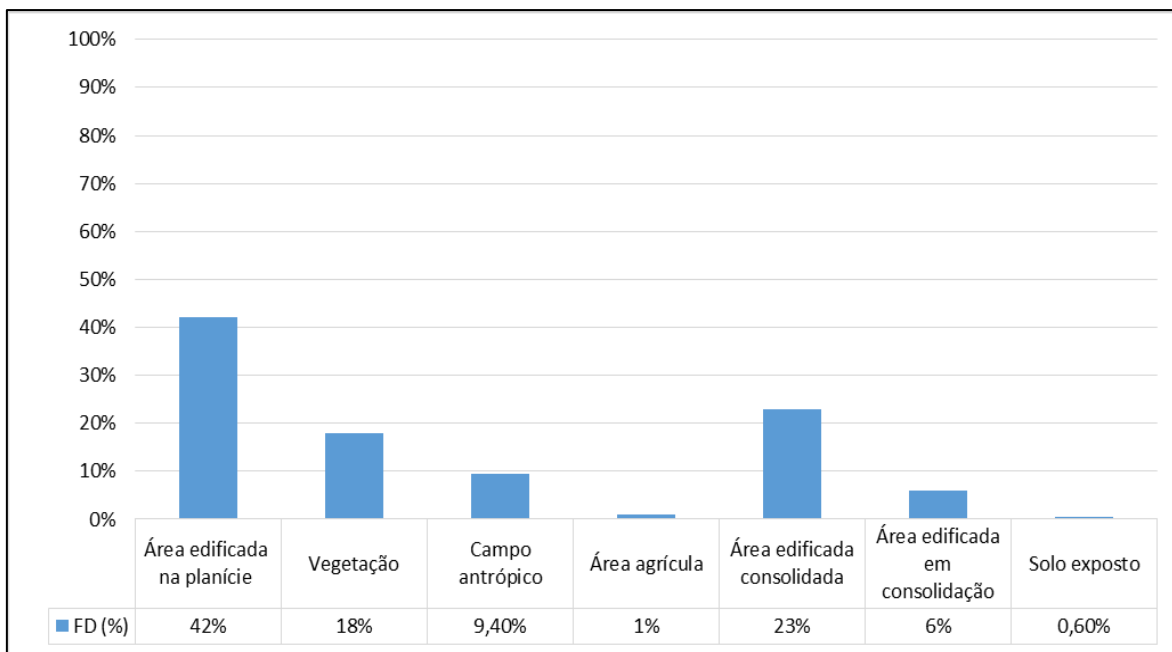


Fonte: Autor.

As atividades antrópicas e o tipo de uso da terra influenciam diretamente na ocorrência de escorregamentos. No município de Recife, os escorregamentos estão, frequentemente, relacionados com tais atividades. Dessa forma, as áreas edificadas são mais propensas aos processos. Vale acrescentar, que na análise do perigo, as áreas edificadas devem ser consideradas as de maior grau, já que a ocorrência de escorregamentos, nesses locais, possui alta probabilidade de causar danos sociais e econômicos.

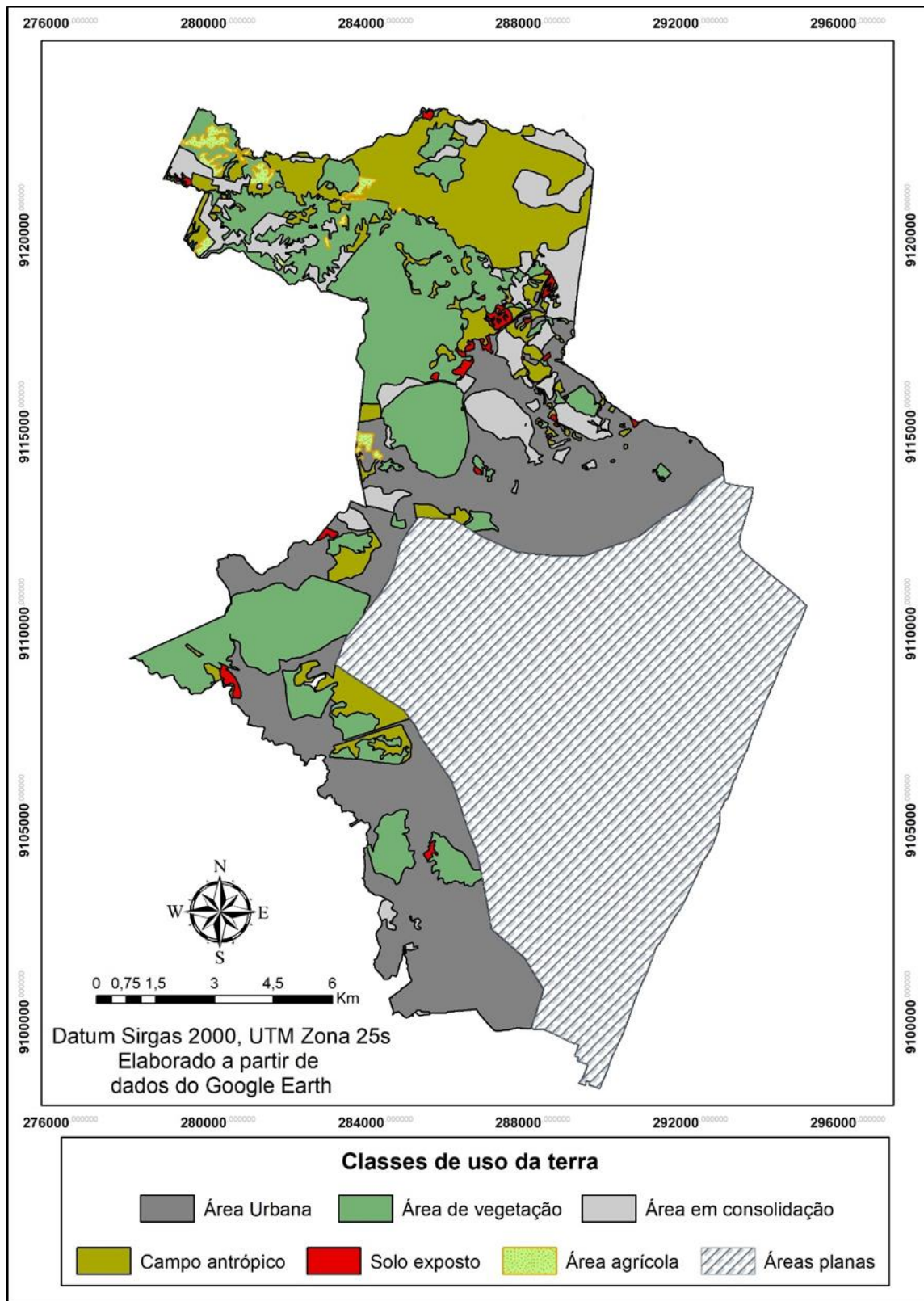
Na área de estudo, os locais de edificação em consolidação são mais propensos para a deflagração de escorregamentos, muito em função da falta de estrutura urbana e da precariedade da ocupação. Esta classe apresentou uma FD de 6%. As áreas de edificação consolidada totalizaram uma FD 20%. As áreas edificadas na planície, excluídas da modelagem por caracterizarem-se como terrenos planos e com ausência de escorregamentos em Recife, apresentaram uma FD de 42% (Figura 42 e Figura 43).

Figura 42 - Frequência de Distribuição (FD) das classes de uso da terra.



Fonte: Autor.

Figura 43 - Mapa de uso da terra do município de Recife.



Fonte: Autor.

5.3 MAPEAMENTO E VALIDAÇÃO DAS CARTAS DE PERIGO INSTALADO (CENÁRIOS 1 E 2)

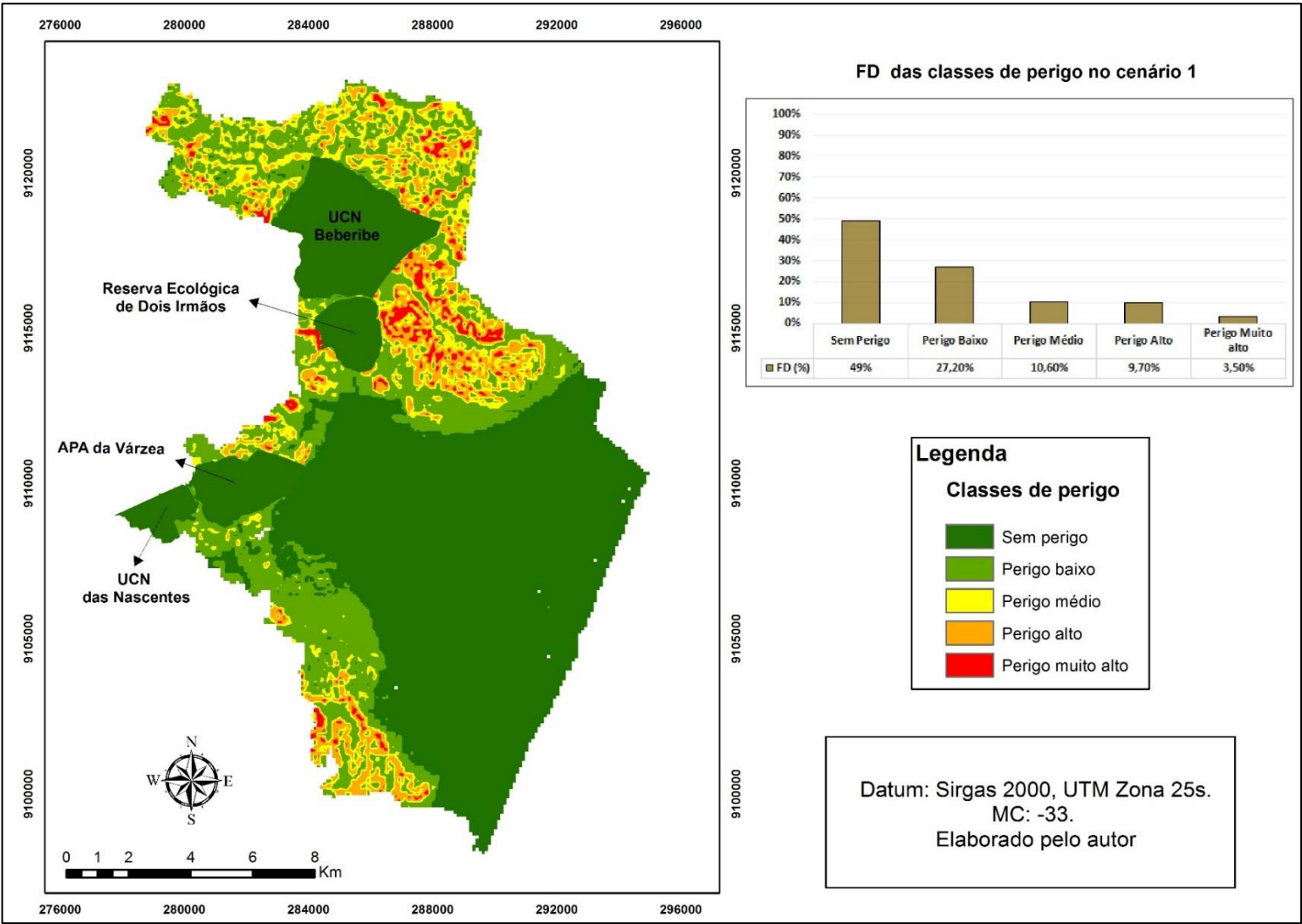
As cartas de perigo instalado (cenários 1 e 2) foram realizadas em áreas com ocupação ou estruturas urbanas, que possam ser impactadas por escorregamentos (situações de perigo). Conforme supracitado, as cartas foram geradas em 5 graus de perigo (sem perigo, perigo baixo, perigo médio, perigo alto e perigo muito alto).

As áreas de perigo alto e muito alto foram, para a modelagem, aquelas com maior probabilidade de serem impactados por escorregamentos (mais críticas). Destaca-se que algumas áreas foram excluídas dessa modelagem, tais como: UCN das Nascentes, APA da Várzea, Reserva Ecológica de Dois Irmãos e parte da UCN Beberibe, uma vez que apresentam exclusivamente cobertura vegetal (ausência de ocupação). Nos dois primeiros cenários, as regiões de maior perigo concentraram-se em locais com moradias instaladas, conforme o esperado.

No **cenário 1**, a classe de perigo muito alto apresentou uma FD de somente 3,5%, em relação a área total do município (Figura 44). Na classe de perigo alto houve uma FD de 9,7%. As classes de perigo médio e baixo apresentaram uma FD, respectivamente, de 10,6% e de 27,2% (Figura 44). Já a classe sem perigo, uma FD de 49% (Figura 44).

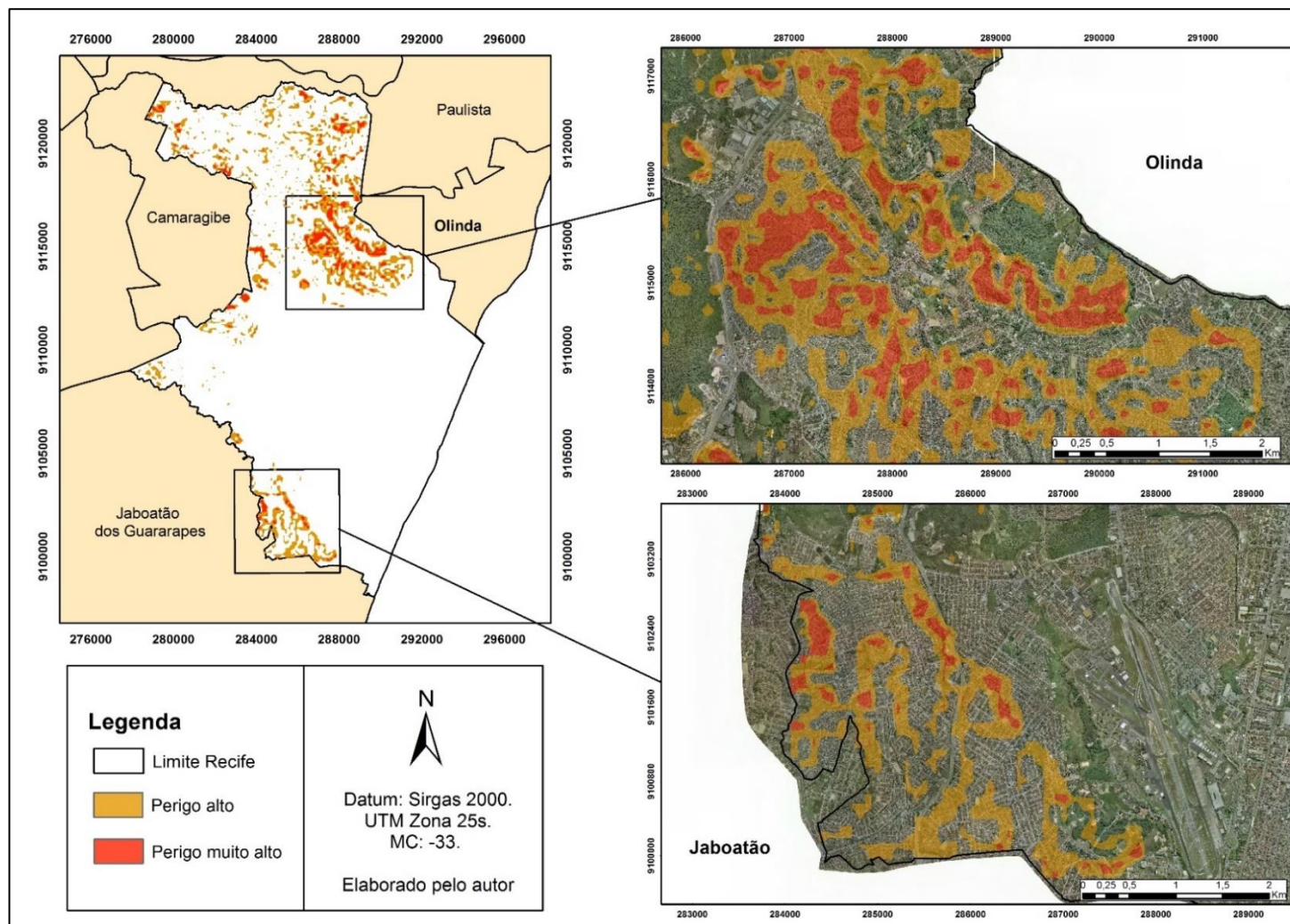
As áreas com perigo elevado (perigo alto e muito alto) no cenário 1 concentraram-se na zona norte e sul do município (Figura 45), especialmente na zona norte de Recife que teve a maior incidência de classes de perigo alto e muito alto. Neste cenário, os bairros de Nova Descoberta, de Guabiraba, de Brejo da Guabiraba, do Córrego do Jenipapo, de Dois Unidos, todos da zona norte, obtiveram a maior concentração de áreas de perigo muito alto (Figura 45). Tais bairros estão situados em colinas do Planalto Sedimentar Litorâneo (embasamento sedimentar, especialmente a Formação Barreiras), com várias encostas declivosas de formas côncavas e convexas, solos do tipo Argissolo e são espaços urbanos ocupados por populações pobres.

Figura 44 - Mapa de perigo do cenário 1 e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.



Fonte: Autor.

Figura 45 - Destaque para os principais locais de perigo alto e muito alto presentes no cenário 1.



Fonte: Autor.

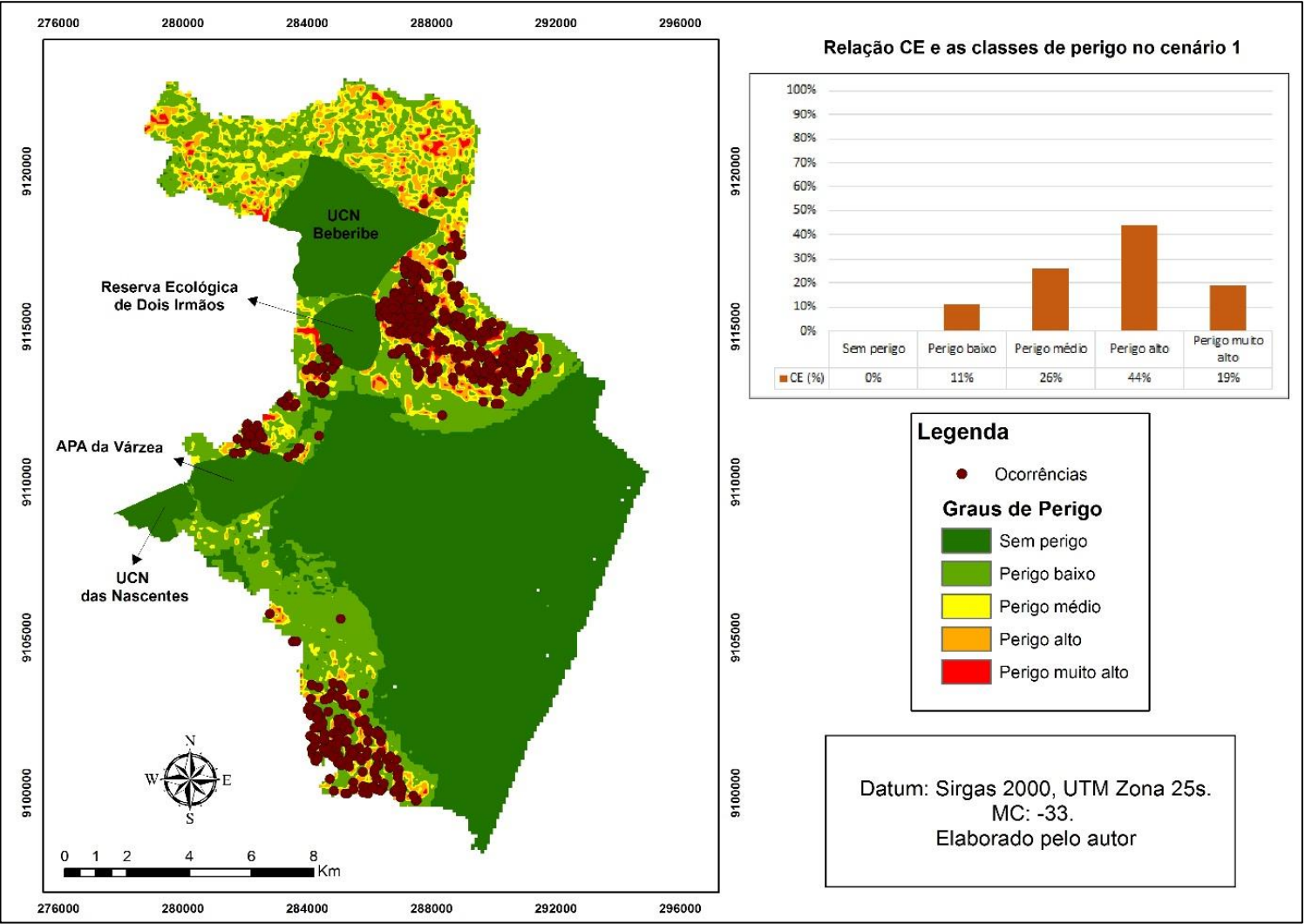
Em relação à Concentração de Escorregamentos (CE) no cenário 1, embora as classes de perigo alto e muito alto apresentarem, juntas, uma FD de somente 13,2%, as mesmas concentraram 63% dos escorregamentos (mais da metade das ocorrências de escorregamentos (Figura 46).

A classe de perigo alto obteve uma CE de 44% e a de perigo muito alto, 19%. As áreas de perigo médio apresentaram uma CE de 26%, e a classe de perigo baixo, 11% (Figura 46). A classe sem perigo apresentou uma CE de 0%, não havendo nenhuma ocorrência de escorregamento nesta classe, indicando, nesse aspecto, acerto na previsão realizada pelo modelo (Figura 46).

Comparando-se estes índices com a literatura, no trabalho de Santana *et al.* (2019), por exemplo, as classes de perigo alto e muito alto apresentaram uma FD de 20% e concentraram mais de 90% dos escorregamentos. Entretanto, este trabalho utilizou a técnica multicritério, cujos pesos da modelagem foram definidos apenas pela literatura e por trabalhos de campo, sem a hierarquia do modelo AHP. Em Bispo (2018), que aplicou a técnica AHP na análise da suscetibilidade a escorregamentos no município de Maceió, 74% das cicatrizes de escorregamentos estavam presentes na classe de suscetibilidade alta.

Os resultados do cenário 1 indicaram que na classe de perigo baixo houve uma concentração de 11% do total de escorregamentos (Figura 46). Embora não seja um valor tão expressivo, esperava-se um índice menor de concentração para esta classe.

Figura 46 - Sobreposição das ocorrências de escorregamentos e carta de perigo do cenário 1 (índice CE – Concentração de Escorregamentos).



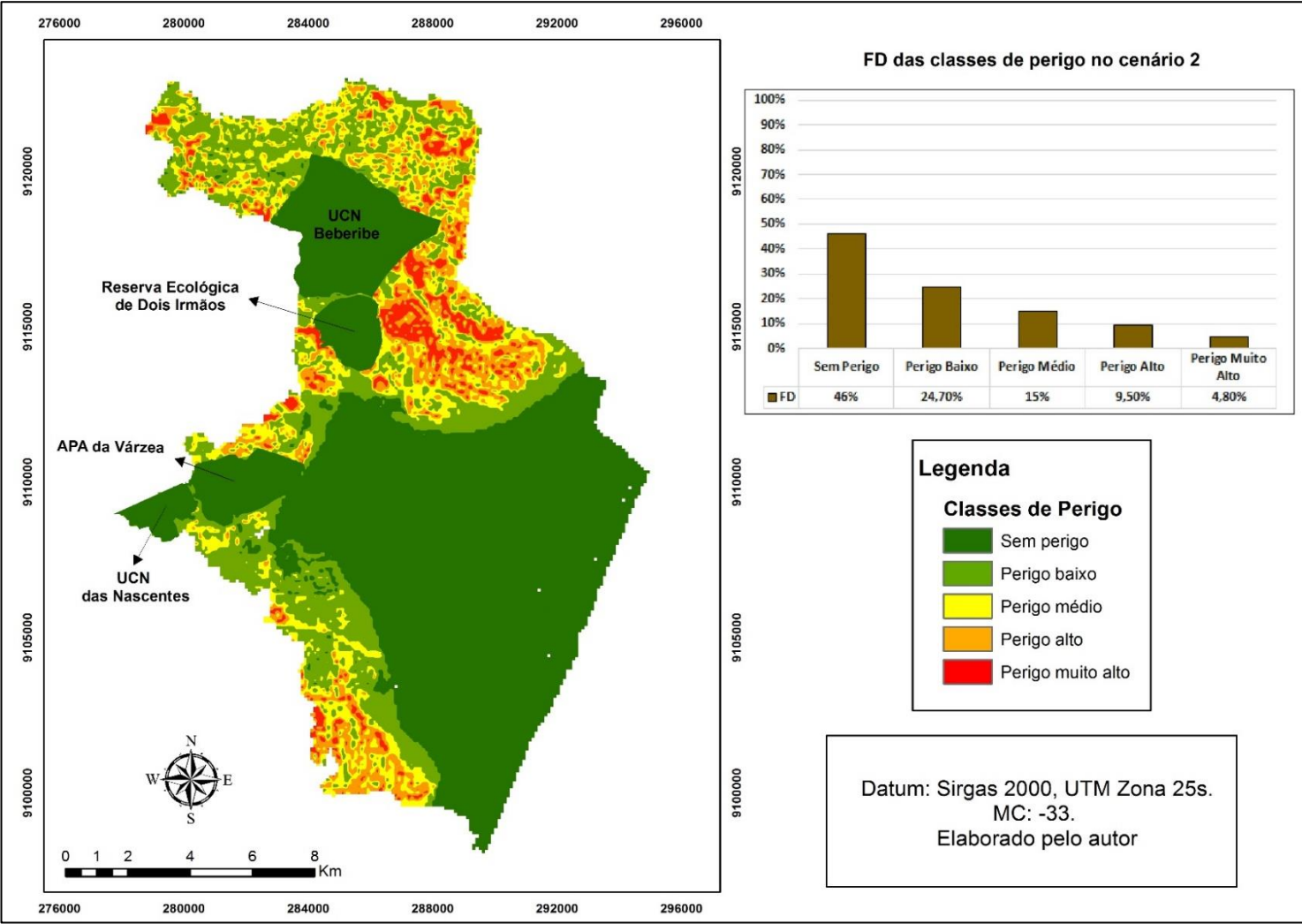
Fonte: Autor.

No **cenário 2**, as classes de perigo alto e muito alto, somadas, apresentaram uma FD de 15% (perigo alto com FD de 9,5% e muito alto com 4,8%) conforme a Figura 47. As classes de perigo médio e baixo obtiveram uma FD de 15% e de 24%, respectivamente. Por fim, a classe sem perigo uma FD de 46% (Figura 47).

As áreas de maior perigo do cenário 2 localizaram-se, com maior incidência, nas zonas norte e sul do município, assim como no primeiro cenário (Figura 48). Os bairros de Nova Descoberta (zona norte), Cohab (zona sul), Brejo da Guabiraba (zona norte), Dois Unidos (zona norte) e Córrego do Jenipapo (zona norte) concentram a maior parte das classes de perigo alto e muito alto (Figura 48), cujas características naturais e antrópicas já foram supracitadas.

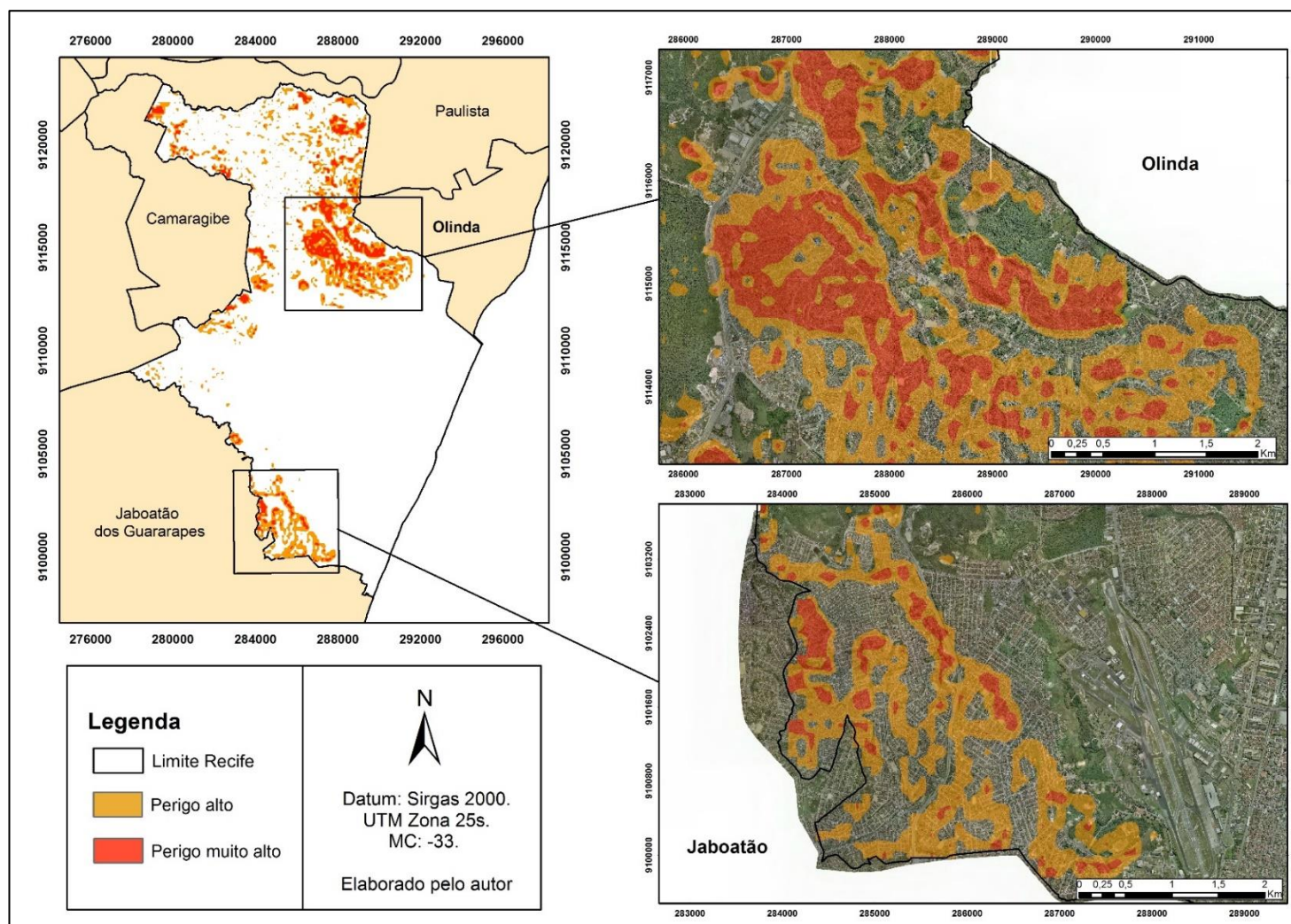
Comparando-se a FD de ambos os cenários, observou-se que não ocorreram grandes divergências, havendo, em linhas gerais, equilíbrio entre as classes (Figura 49). Nas classes de perigo alto e muito alto do segundo cenário ocorreu um aumento de 2% em relação à FD do cenário 1. A classe de perigo médio apresentou uma FD 4% maior do que o cenário 1. As classes de perigo baixo e sem perigo apresentaram uma redução em torno de 3% conforme a Figura 49.

Figura 47 - Mapa de perigo do cenário 2 e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.



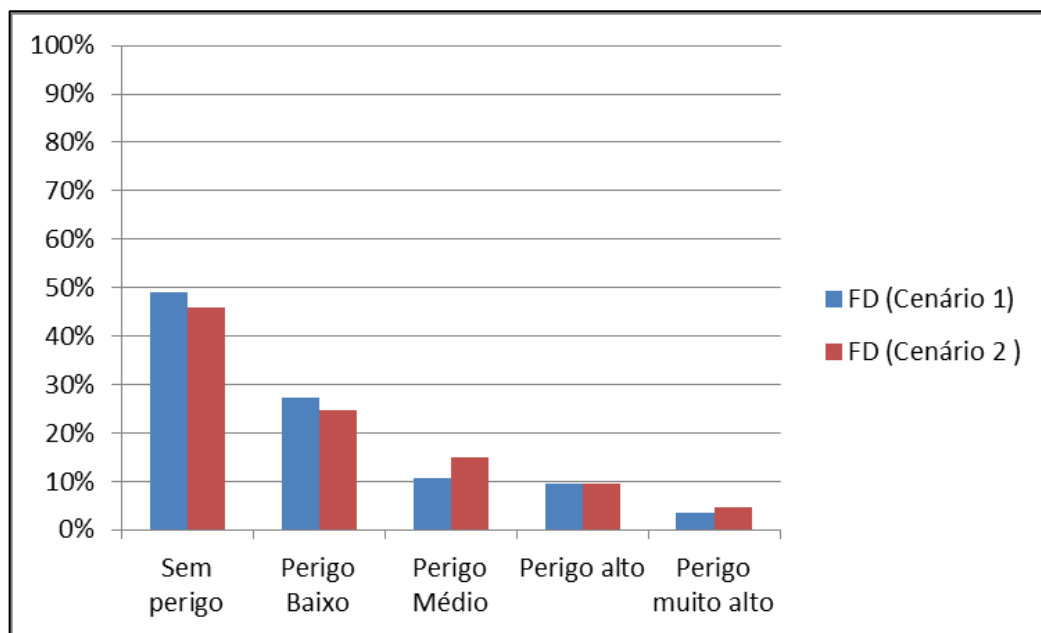
Fonte: Autor.

Figura 48 - Destaque dos principais locais de perigo alto e muito alto presentes no cenário 2.



Fonte: Autor.

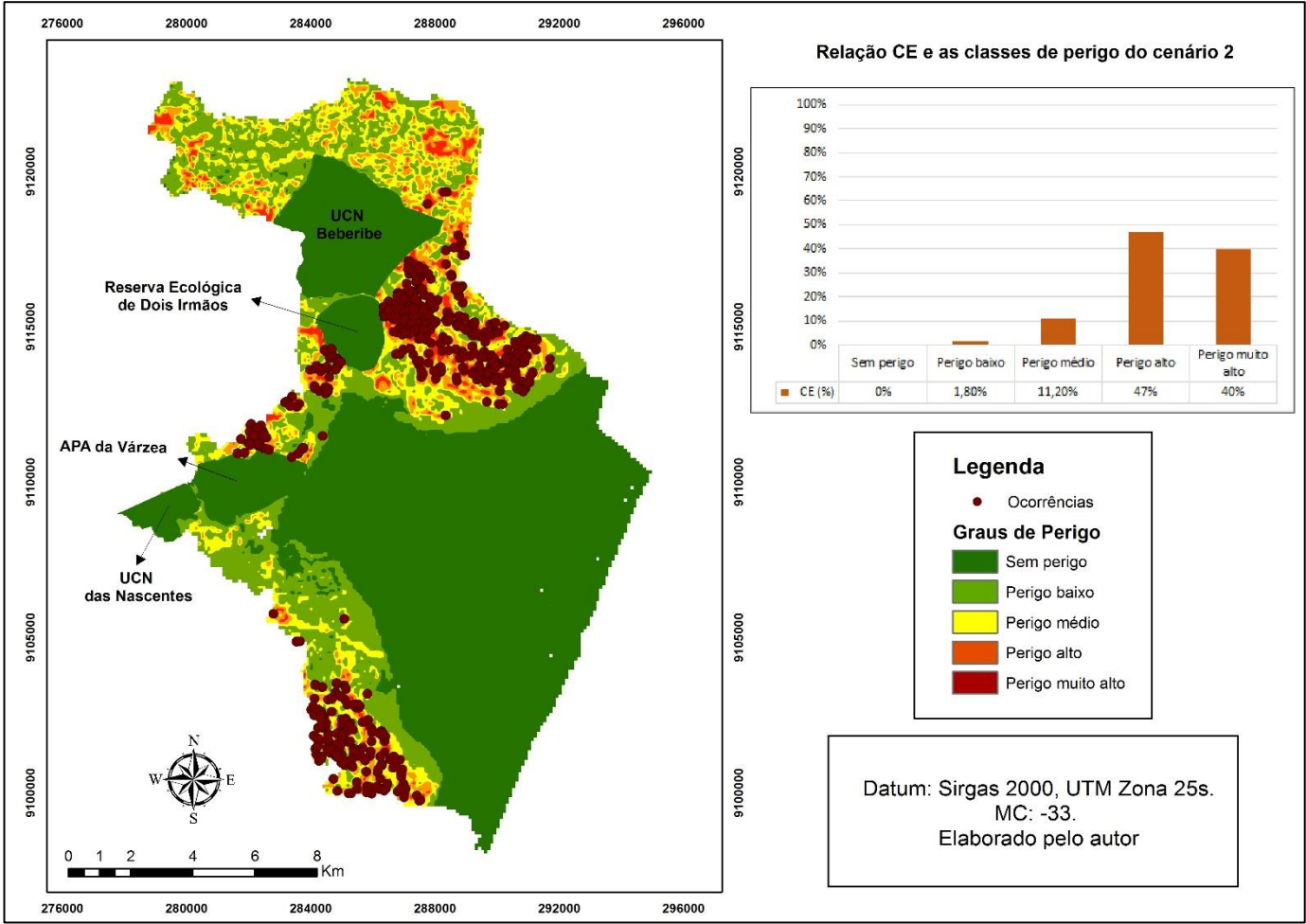
Figura 49 - Comparação do índice FD das classes de perigo nos cenários 1 e 2.



Fonte: Autor.

Em relação ao índice CE do cenário 2 (Figura 50), as classes de perigo alto e muito alto concentraram 87% dos escorregamentos (perigo alto com CE de 47% e muito alto de 40%). O perigo médio obteve uma CE de 11%. Já as classes de perigo baixo e sem perigo concentraram 1% e 0%, respectivamente, quanto à CE (Figura 50).

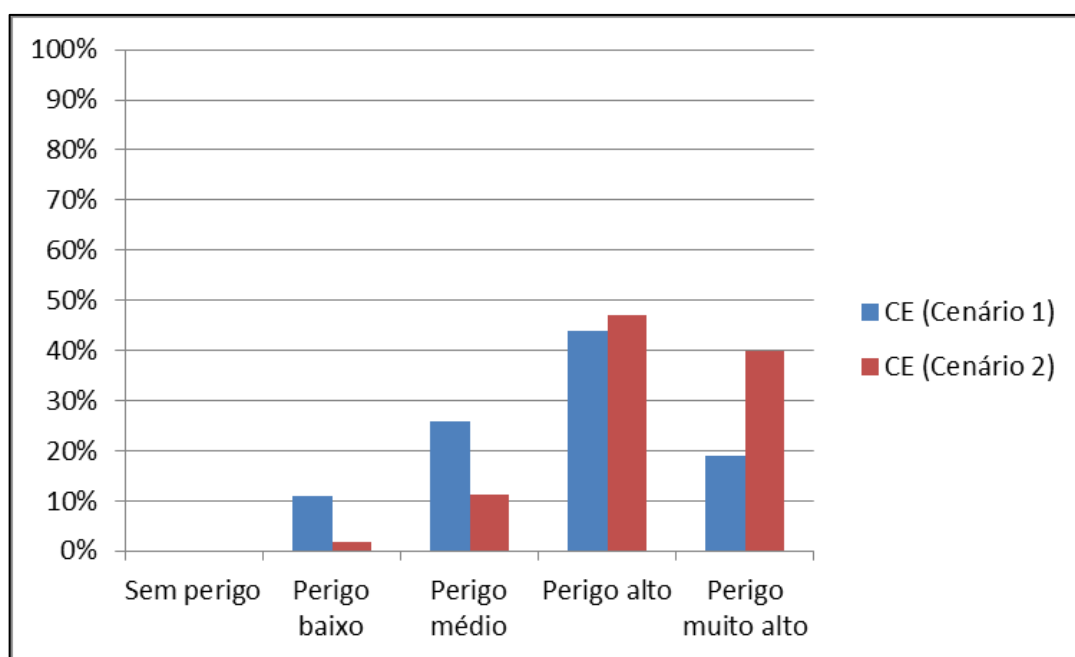
Figura 50 - Sobreposição das ocorrências de escorregamentos e a carta de perigo do cenário 2 (índice Concentração de Escorregamentos - CE).



Fonte: Autor.

Nota-se que os resultados do cenário 2 apresentaram uma maior acurácia em relação ao cenário 1 (Figura 51). Isso porque, a classe de perigo muito alto do cenário 2 apresentou uma FD de apenas 4%, mas uma CE de 40% de todas as ocorrências de escorregamentos mapeadas. Além disso, a CE da classe de perigo baixo foi em torno de 1%, diferentemente do cenário 1, de 11 %, conforme a Figura 51.

Figura 51 - Comparação do índice Concentração de Escorregamentos (CE) em relação as classes de perigo para ambos os cenários.



Fonte: Autor.

No cenário 2, as classes de perigo muito alto equivalem às áreas do município caracterizadas por colinas da unidade morfoestrutural do Planalto Sedimentar Litorâneo, embasadas sobre sedimentos da Formação Barreiras e com intensa ocupação antrópica, na sua maioria, precariamente instaladas.

A elevada porcentagem de CE nas classes de perigo alto e muito alto do cenário 2 (87%), com uma baixa FD destas mesmas classes (de apenas 15%), juntamente, com o baixo índice de CE na classe de perigo baixo deste mesmo cenário, indica, portanto, que os resultados do cenário 2 foram os mais satisfatórios. Assim, apresentaram maior acurácia para a análise do perigo instalado para a cidade de Recife em relação aos resultados do cenário 1.

Destaca-se que o parâmetro com maior peso para geração da carta de perigo no cenário 2 foi o uso da terra, enquanto para o cenário 1, foi a declividade. Tais resultados mostraram-se, portanto, condizentes com a ocorrência de escorregamentos para a cidade de Recife, na medida em que, são frequentes os processos em função de parâmetros antrópicos, em relação aos fatores condicionantes naturais (vulnerabilidade superior em relação à suscetibilidade), indicando sucesso na previsão realizada.

Nesse sentido, muitas encostas de Recife possuem uma alta instabilidade potencial, quando submetidas à convergência de certos elementos desencadeadores de processos, derivados dos tipos de ocupação, de eventos climáticos e de características intrínsecas (topográficas e geológicas), além da criação de *knickpoints* artificiais incompatíveis com os ângulos de repouso dos materiais que estruturam tais terrenos.

5.4 MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PERIGO POTENCIAL

Neste capítulo foi mapeado o perigo potencial nas áreas definidas para o cenário 3. Estas, conforme já mencionado, são reservas de Mata Atlântica ainda preservadas, sem ocupação antrópica em seu perímetro. Devido esse fator e com base na literatura, elas não puderam ser classificadas como áreas de perigo a escorregamentos. No entanto, caso tais regiões sejam ocupadas sem o estabelecimento de critérios técnicos e sem medidas de planejamento urbano, poderão originar novas áreas de perigo no município.

A Unidade de Conservação da Natureza (UCN Beberibe) está localizada a norte do município (Figura 52), da qual foi selecionada apenas um trecho dessa unidade, desprovido de ocupação antrópica. A área é constituída por Tabuleiros Costeiros dissecados sobre a Formação Barreiras, com algumas Planícies Fluviolagunares formadas por processos de dissecação dos tabuleiros. O principal tipo de solo é o Argissolo Amarelo e a maioria das encostas apresentam declividades superiores a 16,8° (CPRM, 2013; EMBRAPA 2013).

Figura 52 - Área pertencente à UCN Beberibe.

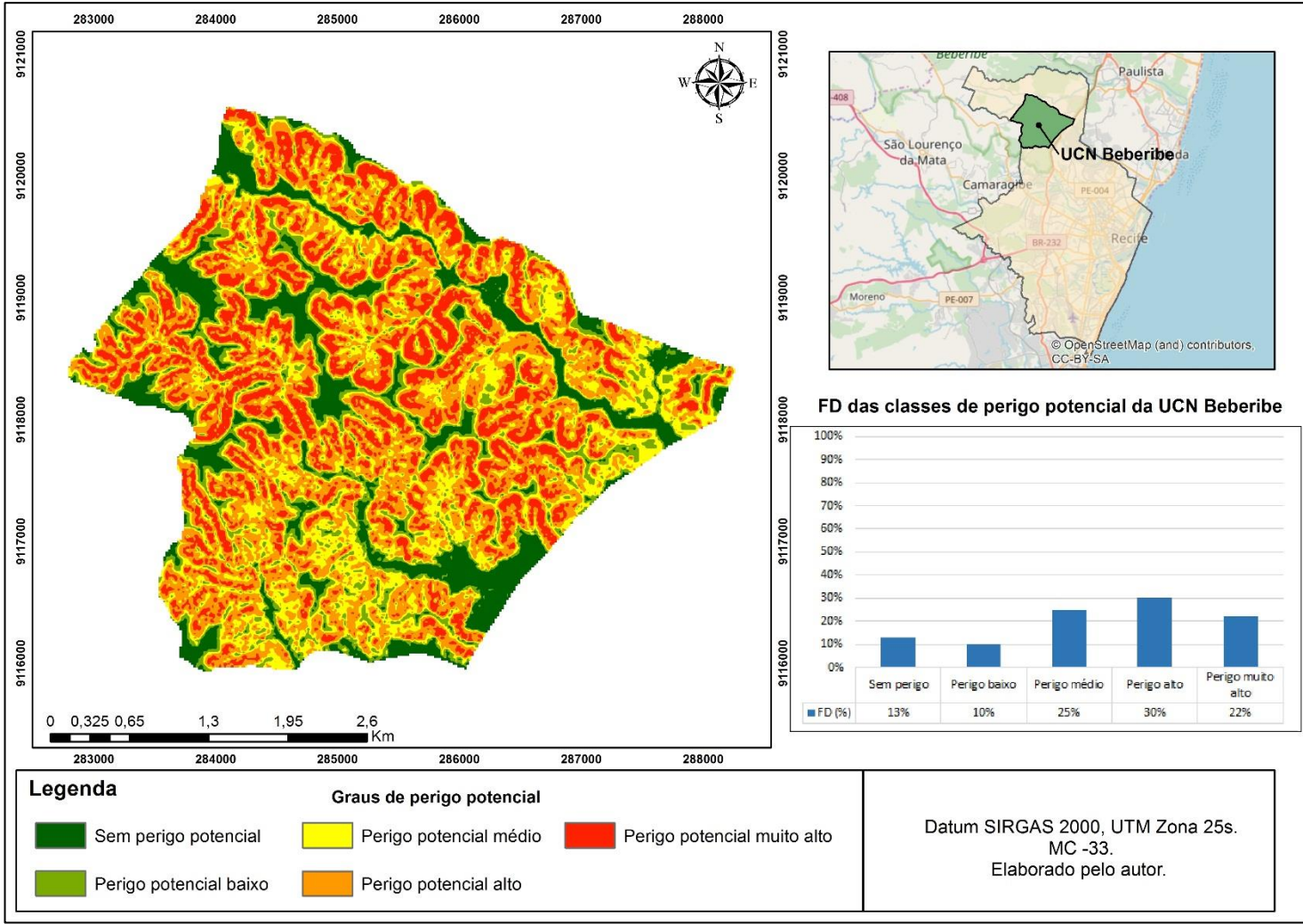


Fonte: Google Maps (2017).

De acordo com os resultados da modelagem do cenário 3 (Figura 53), na UCN Beberibe, a classe de perigo muito alto obteve uma FD de 22% e a classe de perigo alto, 30%. Tais resultados mostraram que há perigo potencial elevado em mais da metade do perímetro desta área (Figura 53).

A ocupação dos locais de perigo alto e muito alto, caso ocorra, deverá ser restrita e controlada, ou até mesmo proibida (visando-se a preservação), visto que são locais suscetíveis para a ocorrência de escorregamentos.

Figura 53 - Mapa de perigo potencial na UCN Beberibe e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.



Fonte: Autor.

A Área de Proteção Ambiental (APA) da Várzea está localizada a oeste do município, no bairro de mesmo nome (Figura 54 e Figura 55). É caracterizada por colinas sobre a Formação Barreiras e sobre o embasamento cristalino, como também, pelas Planícies Fluvialagunar e Fluviomarinha. Os solos dessa área são bem diversificados, apresentando Argissolos Vermelhos e Amarelos, Latossolos Amarelos e Neossolos Flúvicos (CPRM, 2013; EMBRAPA 2013). Apenas algumas encostas apresentam declividade superior a 16,8°.

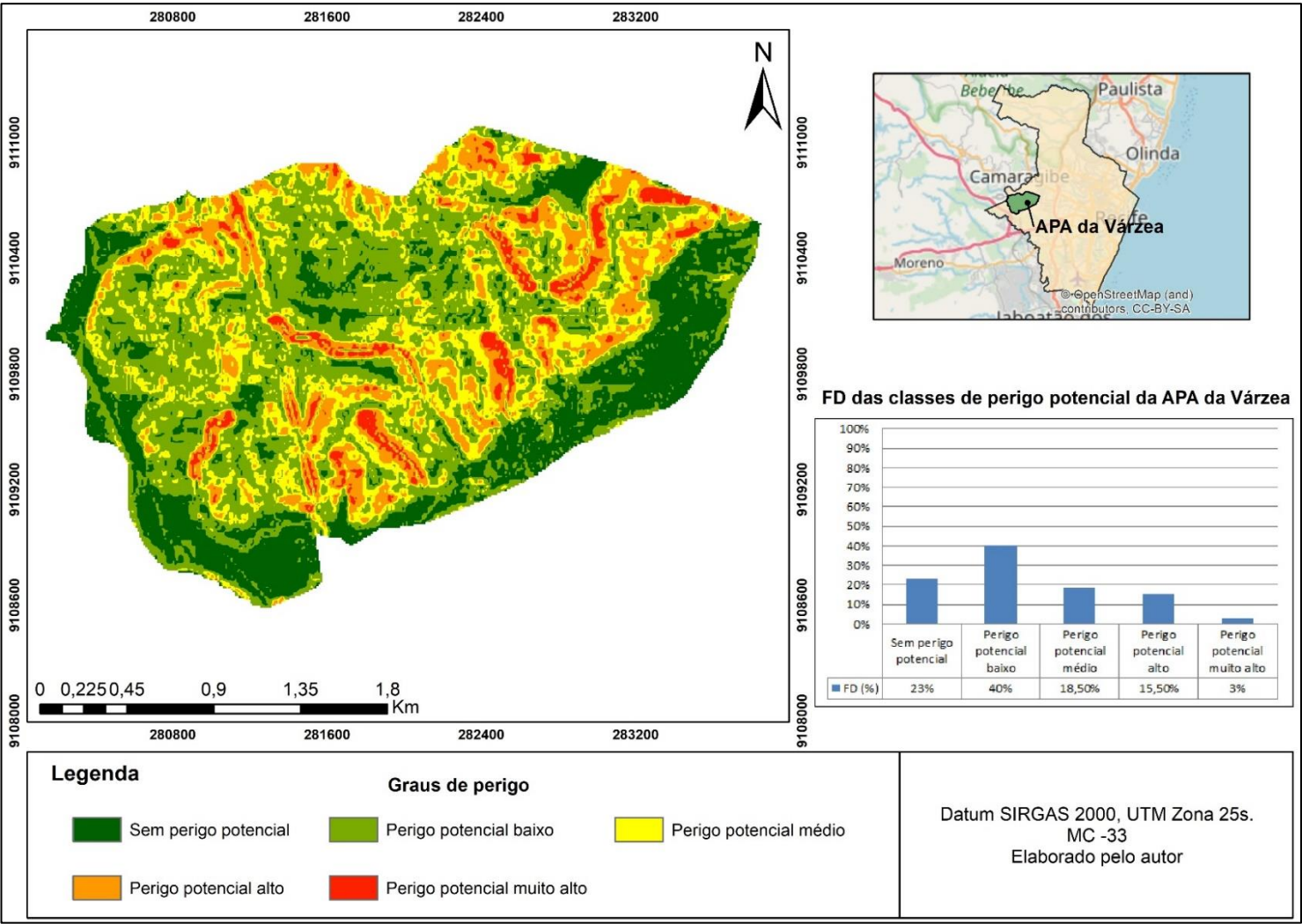
A classe de perigo potencial muito alto, na APA da Várzea, obteve uma FD de apenas 3% e a de perigo potencial alto, 15,5% (Figura 46). Somadas, estas representam 18,5% da área total da reserva. A classe de perigo potencial baixo apresentou a maior FD (40%) e a FD da classe sem perigo equivaleu a 23% (Figura 46). Em comparação com a UCN Beberibe, a APA da Várzea não apresentou muitas áreas com perigo potencial elevado. Contudo, ainda existe uma quantidade, significativa, de locais que poderão se tornar perigosos, caso ocorra uma expansão urbana sem planejamento.

Figura 54 - Área pertencente à APA da Várzea.



Fonte: Autor.

Figura 55 - Mapa de perigo potencial na APA da Várzea e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.



Fonte: Autor.

A UCN das Nascentes localiza-se no extremo oeste de Recife (Figura 56 e Figura 57). É formada, predominantemente, por colinas sobre o antigo embasamento cristalino Pré-cambriano. O principal solo são os Argissolos Vermelhos-Amarelos, embora haja uma pequena mancha de Neossolos Flúvicos nas áreas mais rebaixadas, que coincidem com a Planície do Rio Capibaribe.

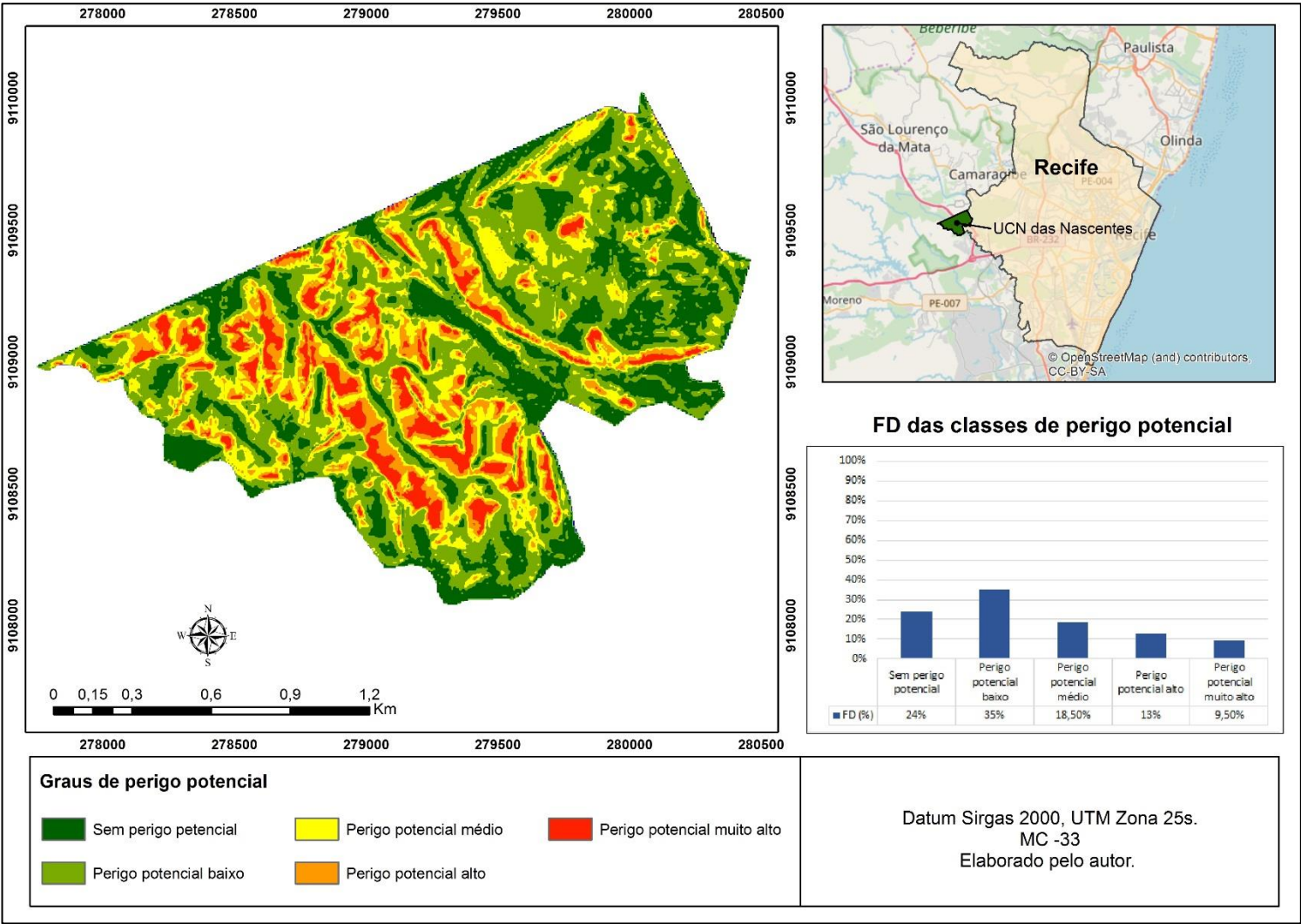
Em relação à Frequência de Distribuição (FD) do perigo potencial (Figura 57), na UCN das Nascentes, a classe de perigo potencial muito alto foi de 9,5% e o FD da classe de perigo potencial alto foi de 13% (Figura 57), sendo estas duas classes aquelas de menor FD. As classes de perigo potencial médio e baixo possuíram uma FD de 18% e de 35%, respectivamente.

Figura 56 - Área pertencente à UCN das nascentes.



Fonte: Autor.

Figura 57 - Mapa de perigo potencial na UCN das Nascentes e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.



Fonte: Autor.

A Reserva Ecológica de Dois Irmãos foi criada por meio da Lei estadual nº. 9989 de 13 de janeiro de 1987 (Figura 58). A secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco coordena uma série de estudos e pesquisas sobre a área com o objetivo de elaborar uma proposta para a adequação da Reserva no sistema nacional de unidades de conservação.

Localizada a norte do município, no bairro de Dois Irmãos (Figura 58), corresponde a uma área de Colinas sobre sedimentos da Formação Barreiras, na qual há uma Planície Fluvialagunar ao sul da reserva. O principal tipo de solo são os Argissolos Amarelos e as encostas possuem declividade superior a 16,8°.

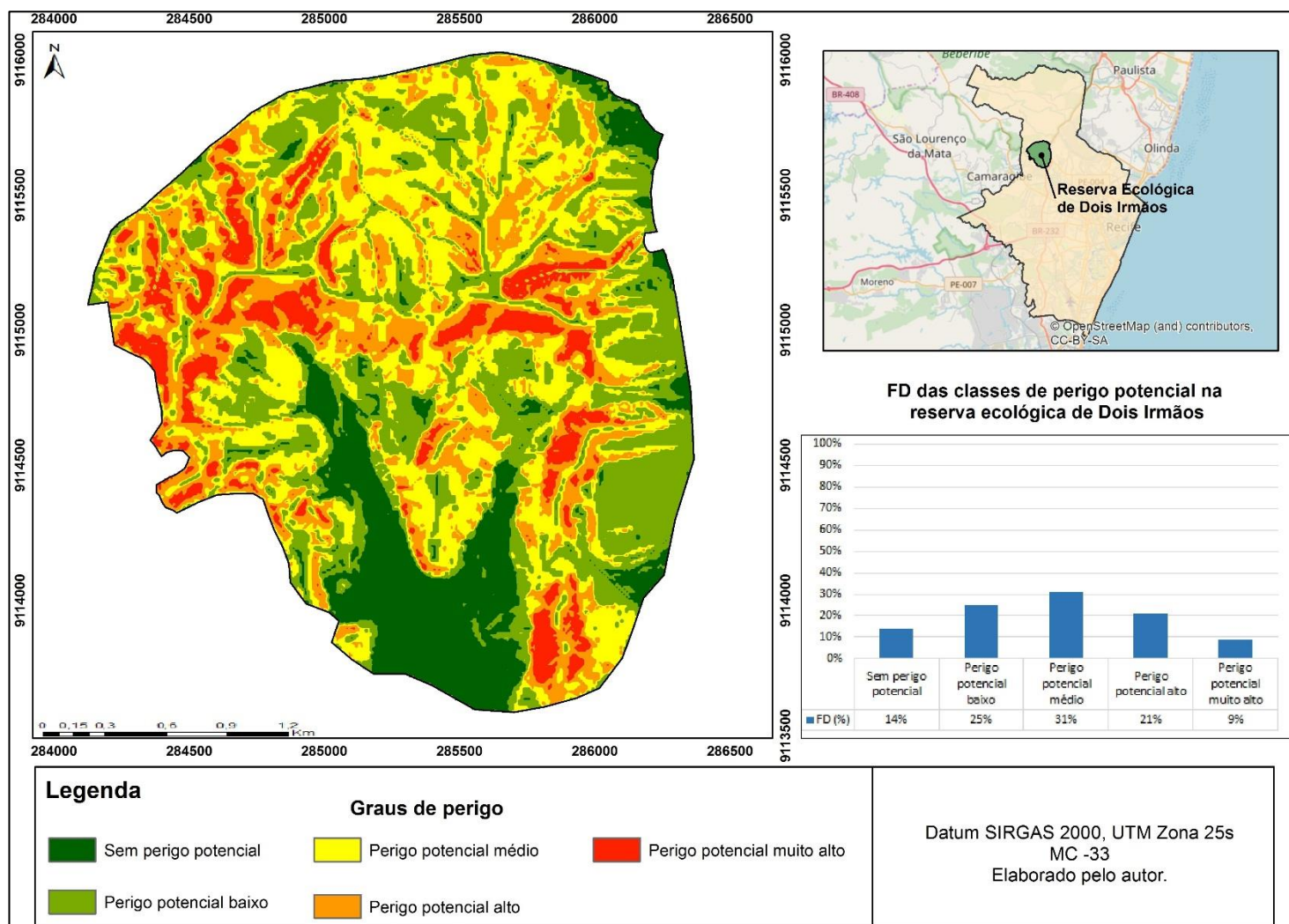
Na reserva, a FD das classes de perigo potencial muito alto foi de 9% e o perigo potencial alto foi de 21% (Figura 59). A classe de perigo potencial médio apresentou a maior FD (31%). As classes de perigo baixo e sem perigo potencial obtiveram uma FD de 25% e 14%, respectivamente (Figura 59). Os locais com elevado perigo potencial (alto e muito alto) correspondem a 30% da área total da reserva (Figura 59).

Figura 58 - Trecho da Reserva Ecológica de Dois Irmãos.



Fonte: Autor.

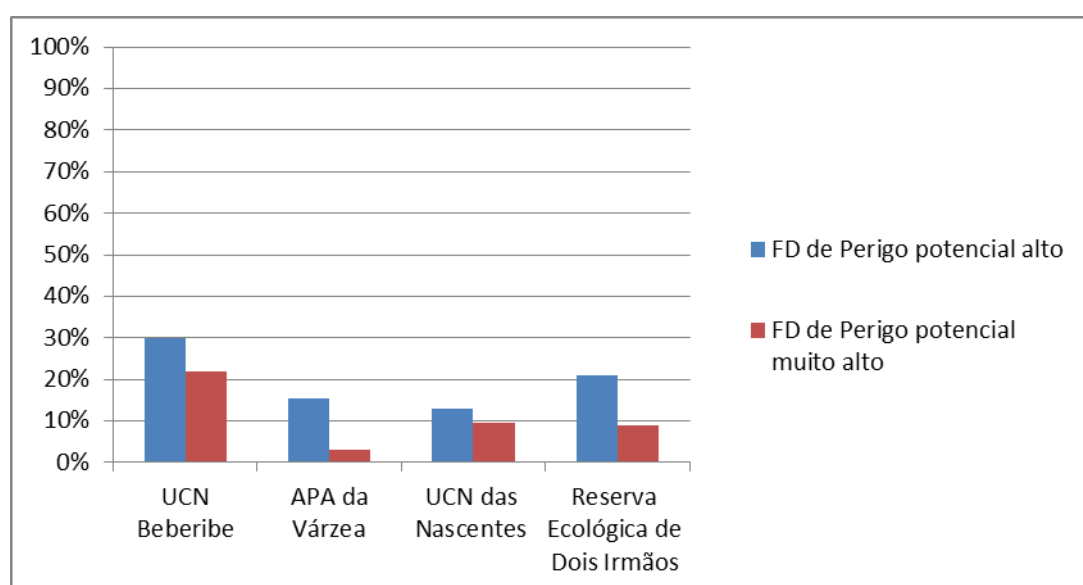
Figura 59 - Mapa de perigo potencial da Reserva Ecológica de Dois Irmãos e Frequência de Distribuição (FD) das classes de perigo.



Fonte: Autor.

Na comparação dos resultados do cenário 3, a área selecionada da UCN Beberibe teve o maior percentual de locais de perigo potencial alto e muito alto, as duas classes somadas tiveram uma FD de 52% (Figura 60). A Reserva Ecológica de Dois Irmãos apresentou uma FD de 21% na classe de perigo potencial alto e 9% na de perigo potencial muito alto. Já APA da Várzea teve o menor percentual de FD, quando somadas as classes de perigo potencial alto e muito alto (Figura 60).

Figura 60 - Comparação dos resultados do cenário 3.



Fonte: Autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo AHP mostrou-se satisfatório como base para a criação de cartas de perigo a escorregamentos, especialmente, para escalas municipais, visando facilitar a tomada de decisões quanto à ocupação de cidades por parte da gestão pública e órgãos competentes. Este é um método importante no estabelecimento de pesos para as variáveis utilizadas na modelagem e que pode ser usado para fins de planejamento urbano e/ou rural. Além disso, a depender dos critérios utilizados, é um modelo flexível tanto para análises de suscetibilidade, quanto perigo. Dessa forma, o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa foram cumpridos. As cartas de perigo elaboradas, bem como o mapeamento de ocorrências e demais mapeamentos temáticos, apresentaram resultados condizentes na localização das áreas de perigo a escorregamentos, indicando sucesso nas previsões realizadas para todo o perímetro municipal de Recife.

Conforme já mencionado em outros trabalhos da literatura, a modelagem AHP possui um certo grau de subjetividade. Contudo, pode ser amenizada, na medida em que as considerações feitas pelo pesquisador são enquadradas em uma base matemática e estatística. Dessa forma, os pesos da modelagem não serão, totalmente, atribuídos pelo grau de experiência do pesquisador. Tal fator permitiu que as cartas de perigo fossem construídas por uma rotina mais complexa, em relação a demais métodos heurísticos, reduzindo erros nos resultados finais.

Em relação aos cenários de perigo instalado (cenários 1 e 2), o cenário 2 apresentou uma maior acurácia, tendo como principal variável o uso da terra, que se mostrou ser um dos principais parâmetros na deflagração de escorregamentos no município. No primeiro cenário (cuja variável mais importante foi a declividade), as áreas de perigo alto e muito alto concentraram 63% das ocorrências de escorregamentos. No segundo cenário, 87% dos escorregamentos concentraram-se nessas mesmas classes, indicando assim, que o mesmo apresentou uma maior precisão na localização das áreas de perigo. Em linhas gerais, as cartas de ambos os cenários não apresentaram grandes generalizações, uma vez que as classes de perigo alto e muito alto, consideradas as mais perigosas, tiveram uma FD de 13% e de 15%, respectivamente.

O resultado supracitado mostrou como os parâmetros condicionantes antrópicos são muito influentes na deflagração de escorregamentos para a cidade de Recife, sendo um

elemento indispensável nos estudos sobre escorregamentos na região. Conclui-se, portanto, que a vulnerabilidade possui um peso maior em relação à suscetibilidade para a ocorrência de escorregamentos no município. Em outras palavras, mesmo nas áreas naturalmente estáveis acabam ocorrendo processos, devido à precariedade da ocupação e ausência de infraestrutura.

Considerando-se a maior acurácia do cenário 2, as áreas/classes de maior perigo localizaram-se, majoritariamente, em áreas de estrutura sedimentar (Formação Barreiras), sobre colinas da unidade morfoestrutural do Planalto Sedimentar Litorâneo e em solos do tipo Argissolo. Antropicamente, os locais de perigo alto e muito alto estão em áreas de intensa ocupação urbana, na sua maioria, de populações de menor classe social. Estas se localizaram, com mais expressividade, nos seguintes bairros da cidade: Cohab, Nova Descoberta, Dois Unidos, Brejo da Guabiraba, Guabiraba e Córrego do Jenipapo.

O mapeamento das ocorrências de escorregamentos de Recife na forma de vetores também foi de grande importância para uma melhor análise espacial de onde ocorrem os processos na cidade. Nesse sentido, foram mapeadas 850 ocorrências de escorregamentos entre 2013 e 2018, que poderão ser úteis ao planejamento urbano, além de padronizações das ocorrências na criação de sistemas de monitoramento e de alerta, especialmente para Defesa Civil.

Em relação às áreas de perigo potencial (cenário 3), a UCN Beberibe apresentou a maior porcentagem de perigo alto e muito alto. Ainda nesta questão, a APA da Várzea obteve a menor Frequência de Distribuição (FD) dessas classes. Em linhas gerais, todas as áreas do cenário 3 possuíam classes de perigo potencial alto e muito alto. Desta forma, caso esses locais sejam ocupados com a expansão urbana da cidade, o poder público deverá restringir, ou até mesmo coibir, a construção de moradias nos terrenos de elevado perigo potencial, com o intuito de prevenir o surgimento de novas áreas de perigo no município.

Das principais dificuldades desta pesquisa, destacam-se a obtenção de dados em escalas grandes (de detalhe), o que tornaria ainda mais precisa a localização dos locais de maior perigo. Menciona-se, novamente, a dificuldade de fotointerpretação de cicatrizes de escorregamentos para Recife devido elevada ocupação antrópica sobre as mesmas e dificuldade de acesso em muitas áreas de risco.

Em linhas gerais, os resultados desta pesquisa mostraram uma representação dos atuais e dos possíveis locais de perigo, além da espacialização das áreas de escorregamentos em Recife. Ressalta-se, assim, a relevância desta pesquisa, que poderá auxiliar no planejamento

estratégico do município do Recife, auxiliando no processo de expansão urbana e no gerenciamento de áreas de perigo a escorregamentos.

Sugere-se, em trabalhos futuros, que os resultados obtidos nesta pesquisa possam ser comparados com outros modelos, sejam eles heurísticos, estatísticos ou determinísticos, visando-se avaliar qual o modelo se adaptaria melhor a realidade do Recife. Sugere-se, também, a inclusão de novos parâmetros (variáveis) na construção das cartas de perigo.

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, T. V.; YANG, I. T.; LEE, D. H. GIS-based landslide susceptibility mapping of Bhotang, Nepal using Frequency Ratio and Statistical Index methods. **Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography**. v. 35, n. 5, p. 357-364, 2017.
- ALMEIDA, M. C.; BATTY, M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. FILHO, B. S. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. **Computers, Environment and Urban Systems**. n. 27, p. 481–509, 2003.
- ALMEIDA, M. C. J.; FREITAS, C. G. L. **Uso do solo urbano: suas relações com o meio físico e problemas decorrentes**. Simpósio brasileiro de cartografia geotécnica, São Carlos, p. 195-200, 1996.
- ALHEIROS, M. M.; SOUZA, M. Â. A.; BITOUN, J; MEDEIROS, S. M. G. M.; JÚNIOR, W. M. A. **Manual de ocupação dos morros da Região Metropolitana do Recife**. Fundação de Desenvolvimento Municipal FIDEM; coord. Margareth Mascarenhas Alheiros... (*et al.*), Recife, 2003.
- ALHEIROS, M.M. **Risco de escorregamentos na Região Metropolitana do Recife**. Tese(Doutorado) – Geologia Sedimentar, UFBA, Salvador, p. 129, 1998.
- ASHOK, A.; REGHUNATH, R. **Application of analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a study from southern Western Ghats, Kerala, India**. Disaster, Risk and Vulnerability Conference, Dept of Geology, University of Kerala, India, p. 33-41, 2017.
- AYALA, I. A. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, v. 47, p. 107-124, 2002.
- BANDEIRA, A. P. N. **Parâmetros técnicos para o gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos de encostas na Região Metropolitana do Recife**. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Civil, UFPE, p.42, 2010.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES/IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, p. 175, 2017.
- BRASIL. Lei Nº 12.608- de 10 de abril de 2012, institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil.
- BAUZYS, F. Mapa de inventário dos movimentos de massa ocorridos no alto da bacia do Ribeirão Belchior, Gaspar, Santa Catarina. **Revista GEONORTE**, v.3, n.4, 2012.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. v. 1, Florianópolis: Ed. UFSC, 2003.

BRITO, M. M.; WEBER, E. J.; SILVA FILHO, L. C. P. Multi-Criteria Analysis Applied to Landslide Susceptibility Mapping. **Revista Brasileira de Geomorfologia (online)**, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 719-735, 2017.

BRITO, M. M. **Geoprocessamento aplicado ao mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no município de Porto Alegre, RS**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (dissertação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BRITO, M. M.; WEBER, J. E. **Mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massa no bairro Cascata, Porto Alegre – RS, com o auxílio de técnicas de geoprocessamento**. Grupo de Gestão de Riscos de Desastres (GRID); Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia (LABGEO), UFRGS, 2013.

BISPO, C. O. **Suscetibilidade natural e induzida à ocorrência de escorregamentos no litoral de Maceió, Alagoas**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Geografia (UFPE), Recife, 2018.

BITOUN, J. **O que revelam os índices de desenvolvimento humano**. Atlas de Desenvolvimento Humano da Cidade do Recife, 2005.

CAPOANE, V. Determinação do índice de potência de escoamento para o município de Palmitinho/RS utilizando modelos digitais de elevação. **Estudos Geográficos**, v.13, p. 106-117, 2015.

CHAE, B. G.; PARK, H. J.; CATANI, F. SIMONI, A. BERTI, M. Landslide prediction, monitoring and early warning: a concise review of state-of-the-art. **Geosciences Journal**, v. 21, n. 6, p. 1033-1070, 2017.

CARTER, B. G. F. **Geographic Information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Ontario: PERGAMON, p. 398, 1994.

CERRI, L.E.S. **Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para a prevenção de acidentes**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1993.

CERRI, L. E. S. *et al.* **Mapeamento de risco em assentamentos precários no município de São Paulo (SP)**. Geociências, v. 26, n. 2, p. 143-150, 2007.

CASSETI, V. **Elementos de Geomorfologia**. Editora UFG, Goiana, 2001.

CARDOZO, F. S.; HERRMANN, M. L. **Uso da técnica AHP no mapeamento das áreas suscetíveis a escorregamentos**. Anais XV do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, 2011.

CPRM; IPT. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000**. Coordenação Omar Yazbek Bitar. São Paulo, 2013.

CROZIER, M. J. **Landslides: causes, consequences and environment**. Ed. Routledge Kegan & Paul, Cap. 2. Classification of slope movements. p. 02- 31, 1986.

DAI, F. C.; LEE, C. F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. **Geomorphology**, v. 42, n. 3-4, p. 213-228, 2002.

DIAS, F. P HERRMANN, M. L. P. Análise da susceptibilidade a deslizamentos no bairro Saco Grande, Florianópolis SC. *Revista Universidade Rural. Série Ciências Exatas e da Terra*, Vol. 21 (1): 91-104, 2002.

DREW, D. **Processos interativos homem-meio ambiente**. ed. 3, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.

DUARTE, C. C.; NÓBRAGA, R. S.; COUTINHO, R. Q. **Análise climatológica e dos eventos extremos de chuva no município do Ipojuca, Pernambuco**. *Revista de Geografia (Recife)*, Recife, v. 32, n. 2, 2015.

EMBRAPA. **Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco**. Embrapa Solos UEP Recife; Governo do Estado de Pernambuco - Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária, Recife. (Embrapa Solos. Documentos, 35). 2001.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C. CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, p. 99–111, 2008.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. **Movimentos de massa: uma abordagem Geológico-Geomorfológica**. In: CUNHA, A. J. T. G. S. B. Rio de Janeiro: Geomorfologia e Meio Ambiente. p. 123-194, 1996.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista brasileira de Geomorfologia**, UGB, v. 2, n. 1, 2002.

FILHO, J. C. A.; ARAÚJO, M. S. B.; MARQUES, F. A.; LOPES, H. L. **Solos**. In: CPRM. Recife: Geodiversidade do Estado de Pernambuco. p. 109-139, 2014.

FILHO, O. A. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - COBRAE, 1992.

FONSÊCA, D. N.; CORRÊIA, A. C.; SILVA, A. C. Compartimentação geomorfológica da Região Metropolitana do Recife (RMR) a partir da análise morfoestrutural. **Revista GEO UFRJ**, p. 201-219, 2016.

FOTHERINGHAM, A. S.; WEGENER, M. **Spatial models and GIS; new potential and new models**. Taylo e Francis Group, ed. 1, p. 3-18, 1999.

GALDINO, D. Nova descoberta: recortes dos territórios e territorialidades em um bairro da cidade do Recife. **Web Artigos**, 2010.

GIRÃO, O.; CORRÊIA, A. C. B.; GUERRA, A. J. T. Influência da climatologia rítmica sobre áreas de risco: o caso da Região Metropolitana do Recife para os anos de 2000 e 2001. **Revista de Geografia (Recife)**, Recife, v. 23, p. 05-42, 2006.

GIRÃO, O. ; CORRÊA, A. Contribuição da geomorfologia para o planejamento da ocupação de novas áreas. **Revista de Geografia (Recife)**, Recife, v. 21, n.2, p. 36-76, 2004.

GUERRA, A. J. T.; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia ambiental**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2006.

GUIDICINI, G & NIEBLE, C.M. (1984). **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blücher. 196p.

GUSMÃO FILHO, J. A. a experiência em encostas ocupadas do Recife: integração técnica, institucional e comunitária. **Rev. IG.**, São Paulo, Volume Especial, p. 9-22, 1995.

GUZZETI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslides hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, p. 181-216, 1999.

HARKER, P. **The Art and Science of Decision Making: The Analytic Hierarchy Process**. In book: The Analytic Hierarchy Process, ed. Springer-Verlag, 1998.

HASEKIOGULLARI, G. N.; ERCANOGLU, M. A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). **Natural Hazards**, n. 67, p. 1157-1179.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **O Manual de deslizamento – um guia para a compreensão de deslizamentos**. Serviço Geológico dos Estados Unidos, 2008.

HUABIN, W.; GANGJUN, L.; WEIYA, X.; GONGHUI, W. GIS-based landslide hazard assessment: an overview. **Progress in Physical Geography**, ed. 29, p. 548–567, 2005.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. **Ocupação de encostas**. Coord. Cunha, M. A. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991.

IBGE. **Manual técnico de uso da terra**. Manuais técnicos em Geociências, n. 7, Rio de Janeiro, v.3, 2013.

ISDR. **Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives**. Geneva: UN/ISDR, 2004.

JAAFARI, A.; NAJAFI, A.; POURGHASEMI, H. R. REZAEIAN, J.; SATTARIAN, A. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 11, p. 909-926, 2014.

JUCÁ, G. N. M. O processo de urbanização e crescimento urbano do Recife. **Revista do Instituto do Ceará**, p. 126-152, 2004.

LEITE, N. B. F. **Associação da análise Booleana e lógica Fuzzy ao sistema de informação geográfica aplicados a planos diretores**. Estudo de caso: Ponte Nova, MG. 2005.

LIMA, F. L. **Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta da Formação Barreiras na área urbana da cidade do Recife**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPE, 2002.

LISTO, F. R. **Análise da suscetibilidade e do grau de risco a escorregamentos rasos na Bacia do Alto Aricanduva, RMSP (SP)**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo (USP), 2011.

LONGLY, P. A.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Systems & Science**. John Wiley e Sons Ltd, ed. 3, cap. 1, 2011.

MACEDO, E.S.; CANIL, K; GRAMANI, M.F.; ALMEIDA FILHO, G.S.; YOSHIKAWA, N.K.; MIRANDOLA, F.A.; VIEIRA, B.C.; BAIDA, L.M.A.; FILHO; O.A.; SHINOHARA, E.J. **Mapeamento de áreas de risco de escorregamentos e solapamento de margens do município de São Paulo - SP: o exemplo da favela Serra Pelada, Subprefeitura Butantã**. In Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1, p. 59-72. GEDN/UFSC, Florianópolis, 2004.

MARANDOLA, J. R.; HOGAN, D. J. Natural hazards: o estudo geográfico dos riscos e perigos. **Ambiente & Sociedade**, v. 7, n. 2, p. 96-109, 2004.

MENEZES JÚNIOR, E. M. **Análise Geomorfológica da Suscetibilidade a Deslizamentos na Folha Paulista (1:25.000) – RMR**. 157 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

MELO, M. L. **Metropolização e subdesenvolvimento: o caso do Recife**. Universidade Federal de Pernambuco /Dep. de Ciências Geográficas, Recife, 1978.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**. v. 5, p. 3-30, 1991.

MONTEIRO, C. A. F. **Clima e Excepcionalismo**. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 1-15, 1991.

NERY, T. D. **Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na Bacia da Ultrafértil, Serra do Mar (SP)**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo (USP). p. 99, 2011.

OLIVEIRA, G.C.S.; JUNIOR, J.P.S.; NÓBREGA, R.S; GIRÃO, O. Uma Abordagem da Geografia do Clima Sobre os Eventos Extremos de Precipitação em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 2, p.238-251, 2011.

PACHAURI, A.K.; PANT, M. Landslide hazard mapping basea on geological attributes. **Engineering Geology**, v. 32, p. 81-100, 1992.

PARISE, M. Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. **Physics and Chemistry of the Earth**. v. 26, n. 9, p. 697-703, 2001.

POURGHASEMI, H. R.; PRADHAN, B.; GOKCEOGLU, C. Application of fuzzy logic and Analytical Hierarchy Process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. **Natural Hazards**, v. 63, p. 965-996, 2012.

PFALTZGRAFF, A. S. **Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na Região Metropolitana Do Recife**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação Em Geologia-UFPE, Recife, 2007.

PREFEITURA DO RECIFE. **Serviços para o cidadão**. Disponível em: <http://www2.recife.pe.gov.br/servicos/cidadao>. Acesso em 11/04/19, 2016. RECIFE. lei de uso e ocupação do solo na cidade do Recife. Lei N°16.176/96, Art, 13, 2008.

RAFFO, J. G. G. O Processo Analítico Hierárquico e seu uso na modelagem do espaço geográfico. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, Volume Especial 30 Anos, p. 26-37, 2012.

RECIFE. **Lei de uso e ocupação do solo da cidade do Recife**. Lei N° 16.176/96, Art. 13, 2008.

RODRIGUES, C. S. **Mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo-RJ por meio de Inferência FUZZY e elaboração de cenários de alerta com uso do TERRAMA2**. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2013.

RODRIGUES, C. Morfologia original e morfologia antropogênica na definição de unidades espaciais de planejamento urbano: exemplo na metrópole paulista. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, v.17, p.101-111, 2005.

ROCHA, A. P.; SCHULER, C. A. B. Avaliação espaço temporal da suscetibilidade a movimentos de massa, áreas de risco nas microrregiões do Jordão e Ibura, Recife-PE. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 9, n. 68, p.1747-1770, jun. 2016.

SAADATKHAH, N.; KASSIM, A.; LEE, M. L. Susceptibility assessment of shallow landslides in Hulu Kelang area, Kuala Lumpur, Malaysia, using Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio. **Geotech Geol Eng.** n. 33, p. 43-57, 2015.

SAATY, L. T. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: Mcgraw-hill, Makron, 1991. Tradução e Revisão Técnica Wainer da Silveira e Silva.

SAATY, L. T. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *Int. J. Services Sciences*, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

SANTANA, J. K. R.; LISTO, F.L.R. Alterações morfológicas de encostas e deflagração de escorregamentos em áreas densamente urbanizadas: uma análise evolutiva em uma sub-bacia do município de Recife (PE). **Revista de Geografia (Recife)**. v. 35, n. 3, p. 1-19, 2018.

SANTANA, J. K. R.; XAVIER, J. P. S.; LISTO, F. L. R. **Parâmetros topográficos e a distribuição espacial dos escorregamentos rasos no bairro de Nova Descoberta, Região Metropolitana do Recife (PE)**. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM, R. R. Os desafios da Geografia Física na fronteira do conhecimento. Campinas: UNICAMP, v. 1, 2017. p. 4207-4212.

SANTOS, O.; GOMES, E. T. A. A questão do desenvolvimento e os desdobramentos recentes do processo de fragmentação do espaço urbano em Recife/PE – o caso do “projeto novo Recife”. **Bol. Goia. Geogr. (Online)**. Goiânia, v. 36, n. 2, p. 379-398, maio/ago. 2016.

SANTOS, E.; LISTO, F. L. R. PEREIRA, T. M. **Mapa de ocorrências de escorregamentos translacionais rasos no município de Camaragibe (PE)**. Simpósio Brasileiro de Geografia Física (SBGFA), Fortaleza (Ceará), p. 1-11, v. 1, 2019.

SELBY, M. J. Landslides: Causes, consequences and environment. **Journal of the Royal Society of New Zealand**, v. 18, 1988.

SELBY, M. J. **Hillslope: materials & processes**. New York. Publisher: Oxford University Press. USA. p. 480, 1992.

SILVA, C. A.; NUNES, F. P. **Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o métodoAHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, INPE, p. 5435-5442, 2009.

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, (Jan-Mar) p.3-22, 2014.

SIDLE, R. C.; PEARCE, A. J.; LOUGHLIN, C. L. **Hillslope stability and land use**. Water resources monography series, Washington, V. 11, 1985.

SOUZA, J. L.; CORRÊA, A. C. B.; GIRÃO, O. Compartimentação geomorfológica da planície do Recife, Pernambuco, Brasil. **Revista de Geografia (Recife)** v. 34, n. 1, 2017.

TOMINAGA, L.K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP**. Tese (Doutorado em Geografia Física), Universidade Estadual de São Paulo (USP), São Paulo, 2007.

TOMINAGA, L. K.; SORTORO, J; AMARAL, R. (org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. Instituto Geológico, São Paulo, ed. 1, 2009.

TORRES, F. S. M. **Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão do município de Ipojuca-PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

UNDRO- **Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator**. Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Geneva, Switzerland, 1982.

VALERIANO, M. M. **Topodata; guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. INPE, São José dos Campos, 2008.

VARNES, D.J. **Slope movement types and processes**. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J., Eds., Landslides, Analysis and Control, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report No. 176, p. 11-33, 1978.

VARNES, D.J. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice**. Ed. Unesco, Paris, 1984.

VASCONCELOS, T. L.; SÁ, L. A. C. A **Cartografia histórica da Região Metropolitana do Recife**. I Simpósio Brasileiro de Cartografia Histórica, Paraty, p.120, 2011.

XIONG, T.; INDRAWAN, G. B.; PUTRA, D. P. E. Landslide susceptibility mapping using Analytical Hierarchy Process, Statistical Index, Index of Entropy, and Logistic Regression Approaches in the Tinalah watershed, Yogyakarta. **Journal of Applied Geology**, vol. 2, n. 1, p. 66-88, 2017.

KANWAL, S.; ATIF, S.; SHAFIQ, M. GIS based landslide susceptibility mapping of northern areas of Pakistan, a case study of Shigar and Shyok Basins. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**. v. 8, p. 348-366, 2017.

KAYASTHA, P.; DHITAL, M. R. SMEDT, F. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. **Computers & Geosciences**, n.54, p. 398-408, 2013.

KAWASHIMA, R. S.; GIANNOTTI, M. A.; ALMEIDA, C. M.; QUINTANILHA, J. A. modelagem dinâmica espacial como ferramenta para simulação de cenários da paisagem na região portuária da baixada santista. **Bol. Ciênc. Geod**, Curitiba, v. 22, n. 4, p.703 - 718, 2016.

KOBIYAMA, M. *et al.* **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Ed. Editora Organic Trading, ed. 1, p. 16, 2006.

KUMAR, K. M.; ANNADURAI, R.; RAVICHANDRAN, P.T.; ARUMUGAM K. Mapping of landslide susceptibility using Analytical Hierarchy Process at Kothagiri Taluk, Tamil Nadu, India. **International Journal of Applied Engineering Research**, v.10, n. 3, p. 5503-5523, 2015.

KUMAR, K. M.; ANNADURAI, R. Comparison of Frequency Ratio Model and Analytic Hierarchy Process methods upon landslide susceptibility mapping using Geospatial techniques. **Disaster Advances**, v. 8, p. 46-55, 2015.

WANDERLEY, L. S. A.; NÓBREGA, R. S.; MOREIRA, A. B. ANJOS, R. S.; ALMEIDA, C. P. A. as chuvas na cidade do recife: Uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 22, p.149-164, 2018.

WHITE, G.F. **Natural Hazards Research**. In: Chorley, R.J. (Ed.), Directions in Geography, Methuen, London, 1973.

YVERTTE V. **Os riscos: O homem como agressor e vítima do meio ambiente**. Editora contexto, 2003.