



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RAFAELA THAÍS DE ANDRADE SILVA

**ANÁLISE DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS
RASOS NA CIDADE DO RECIFE-PE UTILIZANDO O MODELO SHALSTAB**

JOÃO PESSOA

2021

RAFAELA THAÍS DE ANDRADE SILVA

**ANÁLISE DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS
RASOS NA CIDADE DO RECIFE-PE UTILIZANDO O MODELO SHALSTAB**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal da Paraíba, como um dos
requisitos obrigatórios para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Celso Augusto
Guimarães Santos

JOÃO PESSOA

2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva, Rafaela Thais de Andrade.
ANÁLISE DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTOS
TRANSLACIONAIS RASOS NA CIDADE DO RECIFE-PE UTILIZANDO
O MODELO SHALSTAB / Rafaela Thais de Andrade Silva. -
João Pessoa, 2021.
83 f. : il.

Orientação: Celso Augusto Guimarães Santos.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Desastres naturais. 2. SHALSTAB. 3. escorregamentos
translacionais. 4. modelagens. I. Santos, Celso Augusto
Guimarães. II. Título.

UFPB/BSCT

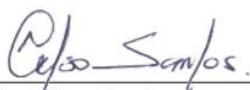
CDU 62

FOLHA DE APROVAÇÃO

RAFAELA THAÍS DE ANDRADE SILVA

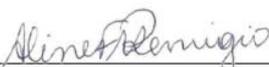
ANÁLISE DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS NA CIDADE DO RECIFE-PE UTILIZANDO O MODELO SHALSTAB

Trabalho de Conclusão de Curso em 06/07/2021 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Celso Augusto Guimarães Santos - Professor Orientador
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADA



Aline Flávia Nunes Remígio Antunes - Professora Examinadora
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADA



Richarde Marques da Silva - Professor Examinador
Departamento de Geociências do CCEN/UFPB

APROVADA



Profª. Andrea Brasiliano Silva
Matrícula Siape: 1549557
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos meus familiares e a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para busca e realização dos meus sonhos. A vocês minha eterna gratidão.

Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo
para todo o propósito debaixo do céu.

Eclesiastes 3:1

AGRADECIMENTOS

Neste momento singular e tão esperado agradeço primeiramente a Deus, pelas suas dádivas, bondades e bençãos derramadas diariamente sobre mim. Sem Ele nada disso seria possível.

Agradeço aos meus pais, Célia Maria de Andrade Bezerra e José Sávio Gomes da Silva e a minha irmã Raysa Suzanny de Andrade Silva, por serem meus maiores incentivadores e estarem sempre ao meu lado, me apoiando e comemorando comigo minhas vitórias. Sou privilegiada em tê-los comigo e é motivo de felicidade poder compartilhar a vida com eles.

Agradeço a minha família por todo apoio.

Agradeço ao meu namorado Alan Henrique Texeira, por todo companheirismo, apoio e incentivo. Sempre me estimulando a alçar voos cada vez maiores.

Aos meus amigos frutos da jornada da faculdade, dos quais não poderia deixar de mencionar Thiago, Raul, Laíssa, Yesus, Eduardo, Ana Carolina e Larissa.

Aos meus amigos Geane, Kariny, Ênio e Diógenes, que sempre fizeram parte da minha vida.

Ao meu professor e orientador Celso Augusto, a quem tenho grande admiração e consideração.

Ao professor Gean Paulo Michel da UFRGS e sua aluna Anne Biehl por todo auxílio prestado.

RESUMO

Os movimentos de massa são desastres naturais de grande impacto socioeconômicos que têm aumentado em frequência e intensidade ao longo dos anos. O Brasil, por se tratar de um país de relevo acidentado e com ocorrência de grandes volumes de chuva de alta intensidade, se torna propenso a esse fenômeno. Entre as medidas de prevenção, se destacam os modelos de estabilidade de encostas que são aplicados a baixos custo e tempo. Nas áreas tropicais, e pelo histórico de resultados coerentes, o modelo mais empregado é o SHALSTAB que foi utilizado no presente trabalho. Esse modelo é uma combinação do modelo da encosta infinita e do modelo hidrológico, que utiliza dados topográficos, pedológicos e hidrológicos para avaliar áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais. Este trabalho tem por objetivo identificar as áreas com predisposição a escorregamentos translacionais rasos na cidade do Recife, Pernambuco, Brasil, que sofre recorrentemente com os desastres naturais desse tipo. Os dados topográficos foram obtidos com base no Modelo Digital do Terreno (MDT) utilizando o QGIS, que se trata de uma ferramenta de sistema de informação geográfica (SIG). O MDT também serviu para os dados hidrológicos, visto que para mapear o padrão espacial de equilíbrio do solo saturado, utiliza a área de contribuição a montante, transmissividade do solo e encosta local. Para obtenção dos dados pedológicos foi realizada uma revisão bibliográfica de trabalhos que aferiram os parâmetros na região, aliado ao Levantamento Exploratório de Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco, desenvolvido pela EMBRAPA. Executou-se sete modelagens diferentes, nas seis primeiras houve a variação da coesão e do ângulo de atrito do solo, todos os parâmetros foram distribuídos uniformemente na área. Já a Modelagem 7 foi uma modelagem discretizada baseada na pedologia. As modelagens foram comparadas com os dados de ocorrência da Defesa Civil para os bairros de Brejo da Guarabira e Cohab, por serem os bairros que mais sofrem com escorregamentos na região. Os resultados se mostraram bem coerentes com a realidade, sendo escolhidas três modelagens (Modelagem 4, Modelagem 1 e Modelagem 6) para representar diferentes cenários (alta, média e baixa estabilidade), a fim de criar norteadores para os gestores e órgãos públicos. Além disso, pode-se perceber que além dos bairros citados, os que se encontram nos seus entornos também apresentam vulnerabilidade a escorregamentos.

Palavras-chave: Desastres naturais; SHALSTAB; escorregamentos translacionais; modelagens.

ABSTRACT

Mass movements are natural disasters of significant socioeconomic impact which have increased in frequency and intensity over the years. Brazil, which is a country with rugged terrain and with the occurrence of high-intensity rain events, is consequently prone to these mass movement events. Among the prevention measures, slope stability models, which are applied at low cost and time, stand out. The most used model in tropical areas is the SHALSTAB due to the history of coherent results, and it is hence used in this work. This model is a combination of the infinite slope model and the hydrological model, which uses topographic, pedological, and hydrological data to assess susceptible areas to translational landslides. Therefore, this work aims to identify areas with a predisposition to shallow translational landslides in the city of Recife, Pernambuco, Brazil, which recurrently suffers from natural disasters of this type. Topographic data results from calculations using the Digital Terrain Model (MDT) in QGIS, which is a geographic information system (GIS) tool. The MDT also served to measure hydrological data because to map the spatial pattern of saturated soil equilibrium, it uses the upstream contribution area, soil transmissivity, and local slope. In order to obtain the pedological data, a bibliographic review of works that measured the parameters in the region was carried out, together with the Exploratory Survey for Recognition of Soils in the State of Pernambuco, developed by EMBRAPA. Seven different modelings were performed. In the first six, there was a variation of cohesion and friction angle of the soil, and all parameters were uniformly distributed in the area. Modeling 7 was a discretized modeling based on pedology. The models were compared with the occurrence data of Civil Defense for the neighborhoods of Brejo da Guarabira and Cohab, as they are the neighborhoods that suffer the most from landslides in the region. The results were very consistent with reality, with three models being chosen (Modeling 4, Modeling 1, and Modeling 6) to represent different scenarios (high, medium, and low stability), in order to create guidelines for managers and public sectors. Moreover, it can be seen that, in addition to the aforementioned neighborhoods, those located in their surroundings are also vulnerable to landslides.

Keywords: Natural disasters; SHALSTAB; translational slips; modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ocorrência de desastres naturais do tipo hidrológico entre 1900–2020	16
Figura 2 – Histórico de mortes por escorregamentos de encostas na RM-Recife	18
Figura 3 – Rastejos	21
Figura 4 – Corridas.....	22
Figura 5 – Quedas.....	22
Figura 6 – Escorregamentos planares ou translacionais.....	24
Figura 7 – Escorregamentos circulares ou rotacionais	25
Figura 8 – Escorregamentos em cunha.....	25
Figura 9 – Representação do modelo de estabilidade de encosta infinita	29
Figura 10 – Elementos usados pelo modelo hidrológico de estado uniforme.	31
Figura 11 – Localização da cidade do Recife.....	35
Figura 12 – Topografia da cidade do Recife	36
Figura 13 – Precipitação média da cidade do Recife	37
Figura 14 – Uso e ocupação do solo.....	37
Figura 15 – Mapa pedológico da cidade do Recife.	40
Figura 16 – Mapa da declividade da cidade do Recife.....	44
Figura 17 – Mapa da área de contribuição a montante da cidade do Recife.	45
Figura 18 – Mapa da estabilidade (Modelagem 1).....	47
Figura 19 – Mapa da estabilidade (Modelagem 2).....	48
Figura 20 – Mapa da estabilidade (Modelagem 3).....	50
Figura 21 – Mapa da estabilidade (Modelagem 4).....	51
Figura 22 – Mapa da estabilidade (Modelagem 5).....	52
Figura 23 – Mapa da estabilidade (Modelagem 6).....	54
Figura 24 – Mapa da estabilidade (Modelagem 7).....	56
Figura 25 – Mapas de estabilidade dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagens 1, 2 e 3).	58
Figura 26 – Mapas de estabilidade dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagens 4, 5 e 6).	59
Figura 27 – Mapas de estabilidade dos bairros Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 7).....	60
Figura 28 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 1).	65
Figura 29 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 2).	66
Figura 30 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 3).	67
Figura 31 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 4).	68
Figura 32 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 5).	69
Figura 33 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 6).	70
Figura 34 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 7).	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de acordo com o modelo SHALSTAB	34
Tabela 2 – Parâmetros dos solos estudados na cidade do Recife.	41
Tabela 3 – Profundidade dos solos, segundo a pedologia	42
Tabela 4 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 1	46
Tabela 5 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 2	48
Tabela 6 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 3	49
Tabela 7 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 4	51
Tabela 8 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 5	52
Tabela 9 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 6	53
Tabela 10 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 7	55
Tabela 11 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 1).....	60
Tabela 12 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 2).....	61
Tabela 13 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 3).....	61
Tabela 14 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 4).....	62
Tabela 15 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 5).....	62
Tabela 16 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 6).....	63
Tabela 17 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 7).....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDia - Banco de Dados de Informações Ambientais
CONTAP - Conselho da Cooperação Técnica da Aliança para o Progresso
EM-DAT - *The International Disaster Database*
ETA - Escritório Técnico de Agricultura
FS - Fator de Segurança
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
LIDAR - *Light Detection and Ranging*
MA - Ministério da Agricultura
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDT – Modelo Digital do Terreno
OSGeo - *Open Source Geospatial Foundation*
PIB - Produto Interno Bruto
PMRR - Plano Municipal de Redução de Risco
SAGA - Sistema para Análises Geocientíficas Automatizadas
SEINFRA - Secretaria de Infraestrutura do Estado de Pernambuco
SHALSTAB - *Shallow Landsliding Stability Model*
SIGs - Sistemas Integrados de Gestão
SINMAP - *Stability Index Mapping*
SRHE - Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
USAIO - Agência Norte-Americana Para o Desenvolvimento Internacional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo geral.....	19
1.1.2	Objetivo específicos.....	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	MOVIMENTOS DE MASSA	19
2.1.1	Tipos de Movimento de Massa	20
2.1.1.1	Rastejos.....	20
2.1.1.2	Corridas.....	21
2.1.1.3	Quedas	22
2.1.1.4	Escorregamentos.....	23
2.2	SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO.....	26
2.2.1	Modelo Digital do Terreno (MDT).....	26
2.2.2	QGIS	27
2.2.3	SAGA	27
2.3	MODELO SHALSTAB.....	28
2.3.1	Modelo da Encosta Infinita.....	28
2.3.2	Modelo Hidrológico	31
2.3.3	SHALSTAB: Combinação entre o Modelo da Encosta Infinita e o Modelo Hidrológico	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	ÁREA DE ESTUDO	34
3.1.1	Aspectos relevantes sobre escorregamentos ocorridos na cidade do Recife.....	38
3.2	DADOS TOPOGRÁFICOS - MDT LIDAR (PE3D).....	38
3.3	DADOS PEDOLÓGICOS	39
3.3.1	Dados das profundidades do solo	41
3.4	METODOLOGIA PARA AS MODELAGENS.....	42
3.5	CALIBRAÇÃO DO MODELO	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	MODELAGEM 1	46
4.2	MODELAGEM 2	47
4.3	MODELAGEM 3	49
4.4	MODELAGEM 4	50
4.5	MODELAGEM 5	52
4.6	MODELAGEM 6	53
4.7	MODELAGEM 7	54
4.8	ANÁLISE DOS BAIRROS BREJO DA GUARABIRA E COHAB.....	57
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
	APÊNDICES	80
	APÊNDICE A – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 1).....	80

APÊNDICE B – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 2)	81
APÊNDICE C – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 3)	82
APÊNDICE D – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 4)	83
APÊNDICE E – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 5)	84
APÊNDICE F – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 6).....	85
APÊNDICE G – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 7).....	86

1 INTRODUÇÃO

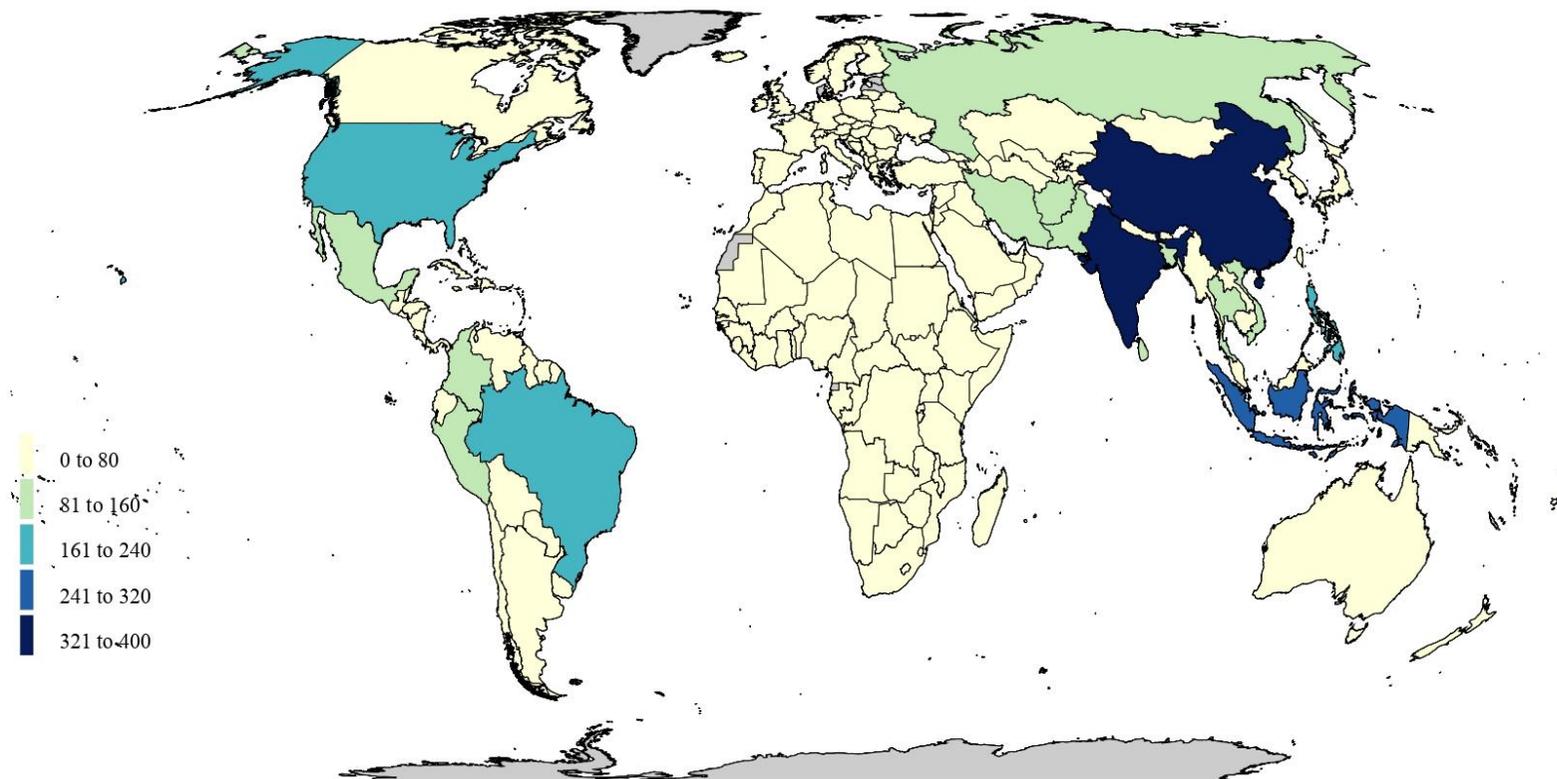
Os movimentos de massa são processos naturais modeladores das encostas, principalmente em regiões com elevada declividade (CRUZ, 1990). Desta forma, observa-se que juntamente com processos endógenos e exógenos, esses agentes geomorfológicos modelam a paisagem natural, causando modificações no relevo através da transferência de rochas, regolito ou solo encosta abaixo, buscando energia potencial menor. Entretanto, é importante salientar que a ocorrência desses fenômenos em áreas ocupadas, causam impactos socioeconômicos severos.

Segundo Kobiyama et al. (2010a), em um processo convencional de ocupação, a população tende a se estabelecer inicialmente nas planícies e ao decorrer do tempo, com a ausência desses espaços, ocupa áreas mais declivosas. É justamente nesta forma de ocupação desordenada, sem planejamento (plano diretor), e devido a grande diferença entre as classes sociais, que lotes e terrenos de menor valor econômico e indevida ocupação, acabam por virar áreas de apropriação da população. Além disso, a influência antrópica potencializa os processos de escorregamentos, por modificarem o meio de forma significativa e repentina.

Os primeiros estudos desenvolvidos acerca do tema remontam a mais de dois mil anos, em países como China e Japão. Na China há 186 anos a.C. já eram desenvolvidos trabalhos de reconhecimento e identificação de escorregamentos. No ocidente, o estudo desses processos foi estimulado nas últimas cinco décadas, principalmente diante da necessidade de corrigir problemas de taludes associados à construção de ferrovias de grande porte e de rodovias modernas. Estima-se que os escorregamentos ocorridos no mundo inteiro causem prejuízos de milhares de mortes e dezenas de bilhões de dólares por ano (LIMA, 2002).

A Figura 1 mostra a distribuição espacial quantitativa dos desastres hidrológicos, mapeados pelo EM-DAT (*The International Disaster Database*) entre os anos de 1900 (quando a base de dados começou a funcionar) até 2020, levando em consideração que são contabilizados os que seguem pelo menos um dos critérios de: 10 ou mais óbitos; 100 ou mais pessoas afetadas; declaração de estado de emergência ou pedido de auxílio emergencial; sendo assim, a proporção dos desastres são maiores do que os avaliados. Vale ressaltar que segundo tal suporte, os escorregamentos ocorridos devido às estações chuvosas (escorregamentos úmidos) são classificados como desastres hidrológicos.

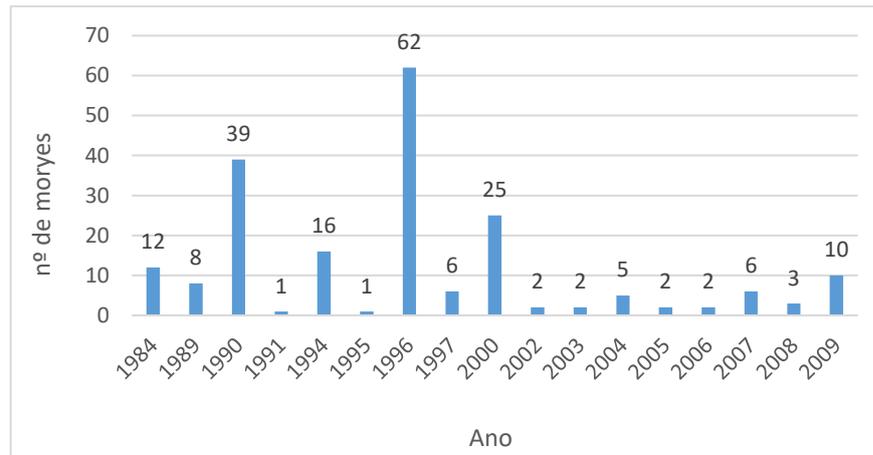
Figura 1 – Ocorrência de desastres naturais do tipo hidrológico entre 1900–2020



Fonte: EM-DAT (2021).

O Brasil tem apresentado números elevados de registro de desastres naturais. Em 2008, esteve entre os 10 países com maiores perdas econômicas e com 1,8 milhões de pessoas afetadas (vítimas e mortes), considerando apenas desastres hidrológicos, ou seja, aqueles que englobam inundações, enchentes e movimentos de massa (OFDA/CRED, 2009). Apesar das inundações e enchentes apresentarem números expressivamente maiores que aqueles relativos a movimentos de massa, um estudo apresentado por Tominaga et al. (2009) para o período de 1990 a 2008 mostra que os números de mortes registrados em decorrência de movimentos de massa são mais expressivos. Segundo Sidle e Ochiai (2006), estima-se um valor médio de 88 mortes por ano em decorrência de eventos de deslizamentos.

Grandes cidades brasileiras como Salvador, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Santa Catarina apresentam várias situações de deslizamento de taludes. No estado de Pernambuco, a região metropolitana do Recife é uma área com alta ocorrência deste fenômeno, principalmente a cidade do Recife, área de estudo do presente trabalho. Conforme dados do Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR, 2006), cerca de 47.000 moradores vivem em áreas de morro na cidade, representando cerca de um terço de toda população. Deste total, aproximadamente 10.374 estão em situação de risco alto ou muito alto, com 140 áreas de risco a escorregamentos distribuídas pelo município. Isso mostra a razão do alto índice de mortes devido a movimentos de massa, já que como supracitado, a ocupação desorganizada e imprópria de áreas de risco potencializa a ocorrência de movimentos de massa. A Figura 2 permite mensurar o quão grandioso é o impacto causado, expresso em número de vidas perdidas por ano na região metropolitana do Recife.

Figura 2 – Histórico de mortes por escorregamentos de encostas na RM-Recife

Fonte: Adaptado de Bandeira (2010).

Diante de um cenário tão alarmante, fica notório a importância em estudar a predisposição dos movimentos de massa, principalmente em encostas urbanas, surgindo a necessidade de um monitoramento das áreas de suscetibilidade, assim como a adoção de medidas públicas efetivas para conter os danos socioeconômicos causados às pessoas com maior vulnerabilidade social. Sendo assim, a modelagem entra nessa conjuntura como uma técnica de avaliação de suscetibilidade, a qual gera informações quantitativas que podem ser usadas diretamente em projetos de engenharia ou na quantificação e localização de locais com tendência a escorregamentos.

As modelagens são desenvolvidas ao decorrer dos anos nas ferramentas de monitoramento por processamento digital, plataformas SIGs (Sistemas Integrados de Gestão). Dentre as ferramentas utilizadas para prognosticar tal fenômeno existem diversos modelos de estabilidade de encostas que consideram parâmetros hidrológicos, geotécnicos e topográficos, dentre eles os mais conhecidos são o SHALSTAB (Dietrich e Montgomery, 1998) e SINMAP (Pack et al., 1998), largamente utilizadas pelo mundo.

Sendo assim e levando em consideração que o SHALSTAB, quando calibrado corretamente, apresenta um melhor e mais preciso desenvolvimento no delineamento de locais propícios a escorregamentos translacionais (MICHEL, 2011), optou-se por utilizar este modelo para o presente trabalho, com o objetivo aplicá-lo na cidade do Recife, a fim de determinar as áreas de suscetibilidade a escorregamento de massa no município.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Aplicar o modelo SHALSTAB na região da cidade do Recife com o propósito de identificar áreas com predisposição a escorregamentos translacionais rasos, assim como comparar os cenários das modelagens com o inventário de ocorrência gerado a partir dos dados da Defesa Civil.

1.1.2 Objetivo específicos

- a) Desenvolver mapas de estabilidade para a cidade do Recife com base no modelo SHALSTAB;
- b) Analisar a sensibilidade do modelo SHALSTAB aos parâmetros pedológicos;
- c) Construir cenários de suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos sobre diferentes perspectivas, que auxiliem no processo de tomada de decisões;
- d) Identificar bairros do município de Recife que apresentem predisposição a escorregamentos translacionais rasos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

De acordo com Selby (1993), os movimentos de massa são conceituados como escorregamento de material sólido influenciado pela gravidade, constituídos por diferentes componentes (solos, rochas e vegetação), e são desencadeados por agentes naturais (chuvas, terremotos, entre outros) ou antrópicos (má distribuição de águas servidas, explosões, alteração da geometria dos taludes, lixo em encostas, entre outros). Contribuem na evolução das formas do relevo e são, também, causadores de grandes danos socioeconômicos (CARVALHO E RIEDEL, 2005). Os movimentos de massa surgem da deflagração das condições de equilíbrio

que regem a natureza, de forma que as forças resistentes não conseguem ser superiores ou iguais as cisalhantes, fazendo com que ocorra este evento.

Embora existam inúmeros estudos relacionados a estes processos, ainda existem dúvidas nas nomenclaturas de classificação de tais processos, havendo ligeiras diferenças a depender do autor. Porém, de forma geral, as classificações se baseiam na velocidade, geometria, direção do movimento, o tipo de material, a profundidade, entre outros. Augusto Filho (1992) dividiu os movimentos em quatro grupos principais: rastejos, corridas, quedas e escorregamentos. Neste estudo, optou-se por usar tal classificação por se mostrar mais detalhada e utilizada.

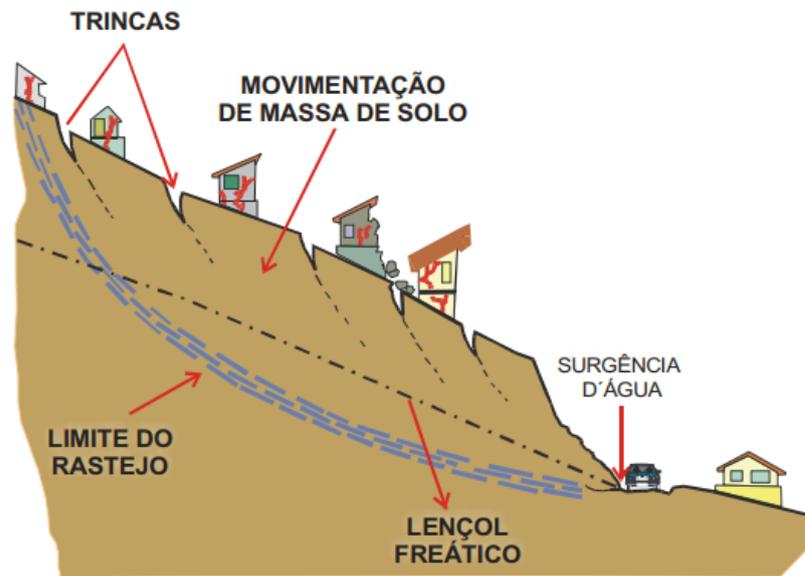
2.1.1 Tipos de Movimento de Massa

2.1.1.1 Rastejos

O rastejo é um fenômeno bem lento (velocidade de deslocamento menor que 0,30 metros em dez anos), não apresenta superfície de ruptura definida, e seu potencial de destruição é menor a curto prazo, em relação aos demais tipos de movimentos de massa (Figura 3). Pode ser facilmente identificado pela mudança na verticalidade de árvores, presença de troncos curvados, blocos deslocados, variações nos estratos e camadas rochosas, deslocamentos de muros, postes e cercas, surgimento de pequenos degraus na encosta, e pelas trincas e rupturas em elementos rígidos (muretas, muros, paredes ou até matacões arredondados). Este tipo de movimento ocorre em solos que apresentam estruturas da rocha original preservadas ou em solos que já sofreram intensa ação do intemperismo (LIMA, 2002).

A movimentação ocorre devido à ação da gravidade e é potencializada pelos efeitos derivados das variações de temperatura e umidade. Além da continuidade e da velocidade do processo, difere dos escorregamentos nos mecanismos de deformação, isso porque quando as tensões estiverem acima da tensão de fluência é que ocorre o rastejo, já quando atingirem valores iguais aos de resistência máxima ao cisalhamento são caracterizados como escorregamento (GUIDICINI E NIEBLE, 1976).

Figura 3 – Rastejos



Fonte: Lima (2002).

2.1.1.2 Corridas

As corridas de massa se caracterizam por serem movimentos rápidos (velocidade de deslocamento variando entre 1,5 m/dia a 0,3 m/min), nos quais os materiais se comportam como fluidos altamente viscosos (Figura 4). Seu caráter é essencialmente hidrodinâmico, ocasionadas pela perda de atrito interno, em consequência da destruição da estrutura do solo/rocha na presença do excesso de água (SILVA, 2006). Apesar de serem fenômenos mais raros que os escorregamentos, podem provocar efeitos de magnitudes muito superiores, devido ao seu grande poder destrutivo e extenso raio de alcance.

De acordo com Lima (2002), as corridas de massa recebem diferentes nomenclaturas, que vão de acordo com as características do material e da velocidade de deslocamento. Dentre as classificações estão as (i) corridas de lama, constituídas de solo com grande concentração de água, (ii) corridas de terra, cujo material predominante é o solo e apresenta menor teor de água, e (iii) corridas de detritos, cujo material é predominante grosseiro, com fragmentos de rocha de vários tamanhos.

Figura 4 – Corridas



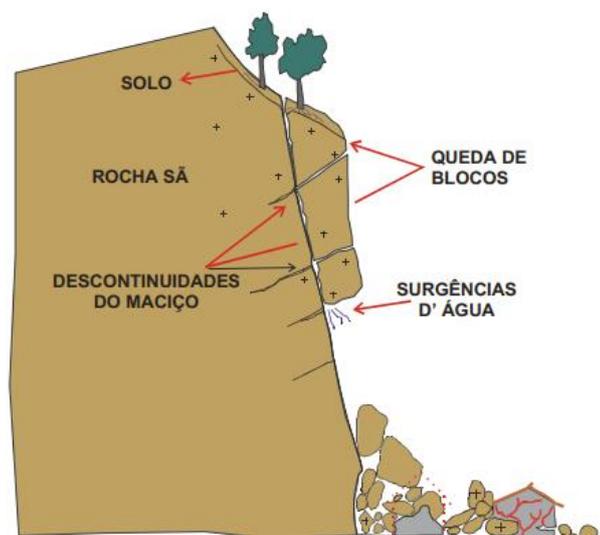
Fonte: Oliveira e Brito (1998).

2.1.1.3 Quedas

São movimentos muito rápidos (velocidade de deslocamento variando entre 0,3 m/min a 3,0 m/seg) de blocos e/ou lascas de rocha influenciados pela ação da gravidade e não apresentam plano de deslocamento (AUGUSTO FILHO, 1992).

Este processo ocorre onde há afloramentos rochosos em encostas íngremes, declives ou taludes de escavação, e são potencializados pelas amplitudes térmicas. As causas básicas são descontinuidades do maciço rochoso, que permite separação em blocos unitários; subpressão pelo acúmulo de água; e descontinuidades ou penetração de raízes (Figura 5). Assim como a maior parte dos movimentos, este processo pode ser acelerado pelas ações antrópicas (BRASIL, 2006).

Figura 5 – Quedas



Fonte: Oliveira e Brito (1998).

2.1.1.4 Escorregamentos

São movimentos rápidos (velocidade de deslocamento variando entre 1,5 m/dia a 0,3 m/min) e apresentam curta duração e plano de ruptura bem definido, o que permite a distinção entre o material deslizado e aquele não movimentado, já que o material se desloca para baixo e para fora do talude (FERNANDES & AMARAL, 1996). Podem envolver solo, rocha e depósitos, e tem como principal agente deflagrador a chuva. São subdivididos segundo o mecanismo de ruptura, a geometria e os materiais que mobilizam.

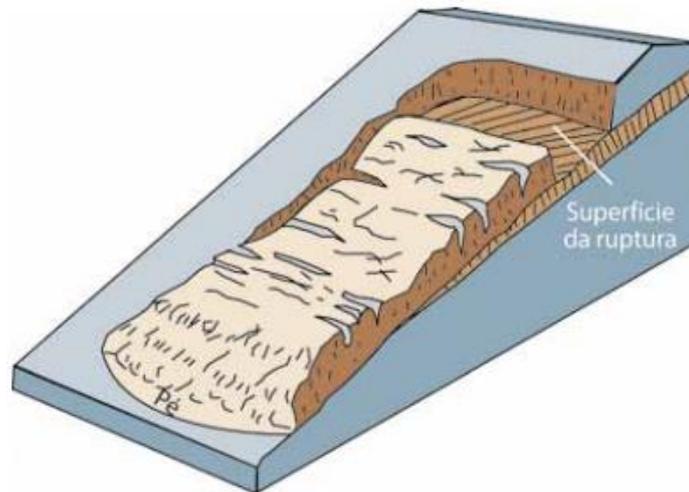
Os tipos de escorregamentos são divididos em planares ou translacionais, circulares ou rotacionais, em cunha, e os induzidos. A geometria do fenômeno que permite a distinção entre tais classificações, varia em função da existência ou não de planos de fraqueza dos materiais movimentados.

2.1.1.4.1 Escorregamentos planares ou translacionais

Os escorregamentos planares ou translacionais em solo são processos frequentes no Brasil, e ocorrem predominantemente em solos rasos com altas declividades. Têm o plano de ruptura retangular bem definido e suas geometrias apresentam pequena espessura que variam de 0,5 a 5 metros e vão geralmente até o contato com a rocha subjacente (Figura 6). Além disso são estreitos com comprimentos bem superiores às larguras (FERNANDES; AMARAL, 2003; CARVALHO et al., 2007; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Em concordância com Lima (2002), nesse tipo de escorregamento, a grande anisotropia presente no interior do solo ou rocha acarreta em planos de movimentação preferenciais. Os escorregamentos translacionais também podem ocorrer em taludes menos íngremes, ou seja, aqueles menos declivosos e extensos. Na maioria das vezes, atingem centenas ou milhares de metros.

Figura 6 – Escorregamentos planares ou translacionais



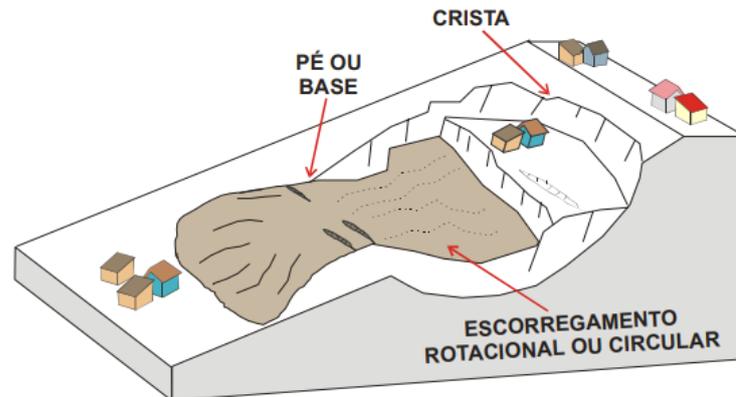
Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

2.1.1.4.2 Escorregamentos circulares ou rotacionais

Os escorregamentos circulares ou rotacionais possuem superfícies de deslizamento curvas, bem definidas (Figura 7). É comum a ocorrência catastrófica de várias rupturas combinadas e sucessivas e estão relacionados a aterros, pacotes de solo ou camadas mais espessas, rochas sedimentares ou cristalinas intensamente fraturadas. Seu raio de alcance é menor que os escorregamentos planares (BRASIL, 2006).

A forma e a posição da superfície de ruptura do terreno são resultado da distribuição de pressões neutras e da variação de resistência ao cisalhamento dentro da massa (KRYNINE e JUDD, 1957). Levando isto em consideração, assume-se a forma simplificada e próxima da realidade, de um arco de circunferência, supondo que haja continuidade na seção do talude, com tensão de cisalhamento e a resistência distribuídos uniformemente por toda superfície de ruptura.

Figura 7 – Escorregamentos circulares ou rotacionais

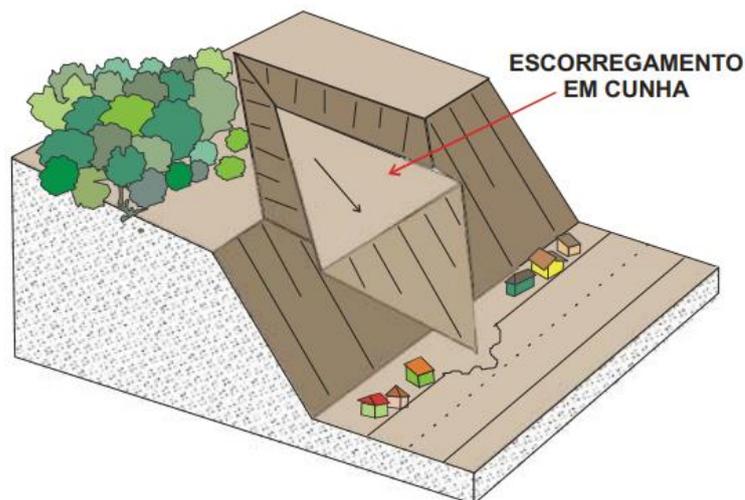


Fonte: Oliveira e Brito (1998).

2.1.1.4.3 Escorregamentos em cunha

Os escorregamentos em cunha estão associados a maciços rochosos que passaram por desconfinamento, seja por ação do homem ou natural, e se caracterizam pela existência de dois planos de fraqueza desfavoráveis à estabilidade (GUESSER, 2013), conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Escorregamentos em cunha



Fonte: Oliveira e Brito (1998).

2.1.1.4.4 Escorregamentos induzidos

Os escorregamentos induzidos, ou seja, aqueles causados pela ação antrópica, são oriundos da execução de cortes e aterros inadequados, concentração indevida de águas pluviais

e servidas, e pela retirada total da vegetação, deixando o solo exposto. Muitas vezes, mobilizam materiais produzidos pela própria ocupação humana, envolvendo massas de solo, lixos e entulhos de dimensões variadas (BRASIL, 2006).

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO

A utilização de ferramentas de sensoriamento remoto para pesquisa de vários temas, inclusive relacionados à suscetibilidade a deslizamentos e a delimitação de áreas de risco, estão crescendo consideravelmente nas últimas décadas. Isso se dá pela relativa facilidade de obtenção dos dados e por trazer clareza na interpretação visual das feições do terreno.

O sensoriamento remoto associado ao geoprocessamento constitui ferramentas fundamentais para obtenção e manutenção de registros da terra ao longo do tempo. As imagens de satélite e drones, no formato digital, são muito importantes e úteis, visto que permitem avaliar as mudanças ocorridas na paisagem de uma região em um determinado período, assim como a possibilidade de estudar e analisar as informações de forma mais fácil.

2.2.1 Modelo Digital do Terreno (MDT)

Segundo Madureira Cruz & Pina (1999), os modelos digitais são usados para se obter informações a respeito da superfície, sem a necessidade de se trabalhar diretamente nela. Estas informações podem ser de caráter qualitativo (visualização da superfície) ou quantitativo (cálculos de áreas, volumes, curvas de isovalores e outros).

Os modelos digitais são por natureza imagens com a informação no formato de uma matriz, com linhas e colunas, cada pixel corresponde a um ponto X-Y. Nos modelos digitais de terreno (MDT), além disso há também a altitude do terreno corrigido para cada pixel, ou seja, desconsiderando a vegetação e edificações, no nível de solo. A utilização destes *rasters* nos modelos de suscetibilidade de áreas é de fundamental importância, pois fornecem os fatores topográficos, possibilitando cálculos de áreas de contribuição, declividade, além de serem elementos chave no modelo de suscetibilidade em questão

2.2.2 QGIS

O QGIS é um software SIG livre e gratuito, o qual possibilita ao usuário visualizar, tratar e analisar dados geoespaciais, permitindo a confecção de mapas, a partir de camadas vetoriais e/ou raster, também possibilita a instalação de plugins. De acordo com o sítio eletrônico do QGIS, ele é um projeto voluntário e oficial, criado em 2002, desenvolvido pela *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo).

O QGIS tem sido amplamente utilizado em diversos tipos de aplicações como análises urbanas, geomorfológicas, demográficas e ambientais (ROBAÍNA, 2017). A escolha deste software levou em consideração além das características supracitadas, a compatibilidade com o *script* do modelo de estabilidade, o qual aceita apenas a versão 2.18.28 do QGIS.

2.2.3 SAGA

O Sistema para Análises Geocientíficas Automatizadas (SAGA) é um sistema de informação geográfica, licenciado principalmente sob o GNU *General Public*, inserida ao QGIS no ano de 2013. Surgiu no ano de 2004, diante da necessidade de uma plataforma de sistema operacional cruzado com suporte integrado para análise de geodados, se fazendo necessário para implementação de métodos geocientíficos (CONRAD et al., 2015).

As ferramentas do SAGA envolvem gerenciamento e análise de geodados, tarefas computacionais gerais, compreendendo ferramentas para alocação de memória, manipulação de *string*, acesso a arquivos, análise de fórmula, criação de índice, álgebra vetorial, operações matriciais, e análises geométricas e estatísticas. Para o presente trabalho, a partir do MDT descrito posteriormente, utilizou-se as ferramentas de *pit fill* para preencher pequenas depressões residuais que ficaram representadas no MDT. Também foi utilizada o *flow direction*, pelo método de direções infinitas, possibilitando o uso do *flow accumulation* para encontrar a área de contribuição das bacias da área de estudo, levando em consideração a contribuição de cada pixel, desde o montante da bacia hidrográfica até o exultório. E por fim, foi utilizado a função *slope* para calcular a declividade da área. Todas as ferramentas são calculadas pixel a pixel.

2.3 MODELO SHALSTAB

2.3.1 Modelo da Encosta Infinita

A estabilidade da encosta depende das forças estruturantes e desestruturantes que atuam sobre ela, de forma que segundo Bishop (1995) expressa-se um FS (fator de segurança), que é a relação entre a real resistência ao cisalhamento do solo e a resistência ao cisalhamento mínima necessária ao equilíbrio. Então, a ruptura ocorre quando há predominância das forças desestruturantes. Se o valor de FS for menor que 1, a encosta está propensa a falha, e quando FS for maior que 1, a encosta está teoricamente estável.

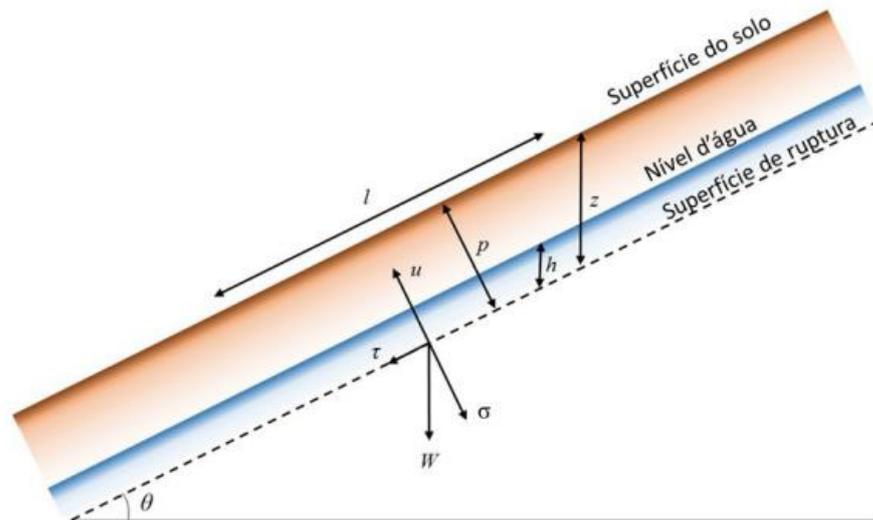
De acordo com Michel et al. (2014), o modelo de estabilidade de encosta infinita faz uma comparação entre as partes desestabilizadores da gravidade e os elementos restauradores do atrito e coesão em um plano falho paralelo à superfície do solo, sem considerar os efeitos das margens. Este tipo de análise é amplamente utilizado no Brasil, visto que são recorrentes os escorregamentos translacionais rasos. Essa teoria se adequada para situações em que o comprimento da encosta é muito superior a profundidade do solo. E segundo Guimarães et al. (2003), o escorregamento translacional, por apresentar contato abrupto solo-rocha, tem características de fenômenos envolvidos, sendo justificável a aplicação da teoria de encosta infinita.

O modelo de estabilidade de encosta infinita baseia-se na Lei de Mohr-Coulomb, representada na Figura 9, onde no momento da ruptura de uma encosta, as forças cisalhantes igualam-se às forças estruturantes, ou seja:

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \tan\phi \quad \text{Eq. (1)}$$

onde τ [N/m²] é a tensão cisalhante no momento da ruptura; c [N/m²] é a coesão do solo; σ [N/m²] é a tensão normal; u é a poro-pressão [N/m²]; e ϕ [graus] é o ângulo de atrito interno do solo.

Figura 9 – Representação do modelo de estabilidade de encosta infinita



Fonte: Selby (1993).

Essa lei vincula a tensão de um solo para um nível de deformação que permita caracterizar à condição de ruptura. O atrito interno do solo representa tanto o atrito físico quanto o fictício, proveniente da interação entre as partículas. Já a coesão do solo reflete o efeito das forças eletroquímicas de atração entre suas partículas.

Utilizando a Figura 9 para descrever as equações que regem tal modelo, o peso do solo (W) é obtido com base na profundidade vertical do solo (Z), a qual é dada por:

$$z = \frac{p}{\cos \theta} \quad \text{Eq. (2)}$$

onde p é a espessura do solo [m] e θ é a declividade da encosta [graus].

O valor de peso do solo (W) é calculado como:

$$W = l \cdot p \cdot p_s \cdot g \quad \text{Eq. (3)}$$

onde l é o comprimento da encosta [m]; p_s é a densidade do solo úmido [kg/m^3] e g é a aceleração gravitacional [m/s^2].

Levando em consideração que a tensão é resultante de um par de forças de sentidos contrários atuantes em uma unidade de área, decompõem-se os vetores do peso, subentendendo-se de que se trata de uma análise bidimensional de talude infinito. E assim como, em uma análise bidimensional, considera-se uma largura unitária abrangendo toda extensão da encosta, e as

componentes pesos, paralela e perpendicular a encosta representam τ e σ , respectivamente, são regidas pelas Equações 4 e 5:

$$\tau = \frac{W \cdot \sin \theta}{l} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$\sigma = \frac{W \cdot \cos \theta}{l} \quad \text{Eq. (5)}$$

Desta forma, obtém-se

$$\tau = z \cdot p_s \cdot g \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\sigma = z \cdot p_s \cdot g \cdot \cos^2 \theta \quad \text{Eq. (8)}$$

A poro-pressão (u) é a pressão submetida pela água presente nos poros do solo e atua para aliviar a componente do peso do solo perpendicular à encosta (σ). Então, u é expressa como:

$$u = h \cdot p_w \cdot g \cdot \cos^2 \theta \quad \text{Eq. (9)}$$

onde h é a altura vertical da coluna d'água dentro da coluna de solo [m] e p_w é a densidade da água [kg/m^3].

Sendo assim, Selby (1993) define a equação da encosta infinita como:

$$p_s \cdot g \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta = c_r + c_s + (z \cdot p_s \cdot g \cdot \cos^2 \theta - h \cdot p_w \cdot g \cdot \cos^2 \theta) \cdot \tan \phi \quad \text{Eq. (10)}$$

onde c_r é a coesão das raízes [N/m^2] e c_s é a coesão do solo [N/m^2]. Desta forma, o lado direito da Equação (10) representa as forças de estabilidade, enquanto que o lado esquerdo representa as forças de instabilidade.

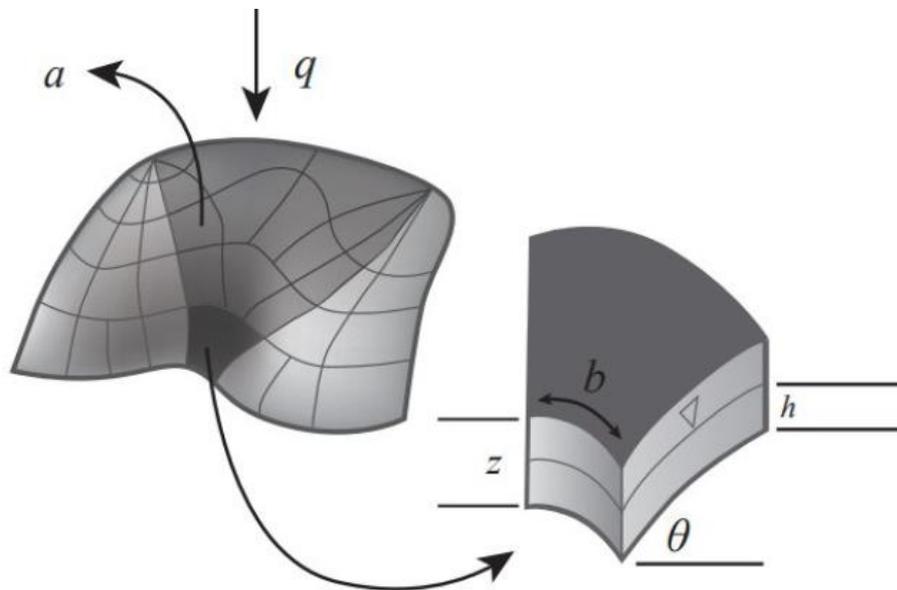
Portanto, o fator de segurança é:

$$FS = \frac{c_r + c_s + (z \cdot p_s \cdot g \cdot \cos^2 \theta - h \cdot p_w \cdot g \cdot \cos^2 \theta) \cdot \tan \phi}{p_s \cdot g \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad \text{Eq. (12)}$$

2.3.2 Modelo Hidrológico

Sabe-se que a água é um dos principais agentes deflagradores de escorregamentos. Desta forma, buscou-se incluir um modelo hidrológico que viesse a abranger tal influência. O modelo utilizado no presente trabalho, representado ilustrativamente na Figura 10, considera um estado uniforme de recarga e é baseado no trabalho de Beven e Kirkby (1979) e O'loughlin (1986). Este modelo considera a recarga uniforme e simula o padrão de variação espacial da umidade, ou seja, da altura da coluna d'água que ocorre durante uma época chuvosa, a qual evidentemente não está em estado uniforme.

Figura 10 – Elementos usados pelo modelo hidrológico de estado uniforme.



Fonte: Adaptado de Montgomery e Dietrich, 1994.

onde a [m^2] representa a área de contribuição a montante da bacia, b [m] é o comprimento de contorno da fronteira inferior de cada elemento e q [m/d] é a taxa de recarga uniforme. A quantidade total de água que entra (Q_e) [m^3/d] em cada área de contribuição é dada por:

$$Q_e = q \cdot a \quad \text{Eq. (13)}$$

Sabe-se que solo não precisa estar completamente saturado para que ocorra a ruptura. Montgomery & Dietrich (1994) recomendam que o modelo hidrológico seja escrito em função da razão h/z . Para isto, utiliza-se a Lei de Darcy, onde a quantidade total da água que sai (Q_s)

[m³/d] pela camada saturada (escoamento subsuperficial) é expressa pelo produto da velocidade do fluxo pela área de saída.

$$Q_s = v \cdot (h \cdot \cos\theta) \quad \text{Eq. (14)}$$

Esta lei também estabelece que a velocidade de fluxo pode ser expressa pelo produto do gradiente hidráulico (quociente entre a carga hidráulica e o comprimento do meio poroso a ser percorrido) e uma constante de proporcionalidade, conhecida por condutividade hidráulica saturada. A carga hidráulica é representada pela diferença altimétrica entre o ponto inicial e o ponto final do escoamento.

$$v = K_s \cdot i \quad \text{Eq. (15)}$$

O gradiente hidráulico (i) [m/m] também pode ser expresso por:

$$i = \sin\theta \quad \text{Eq. (16)}$$

Sendo assim, o produto entre a área de contribuição a montante (a) e o valor do escoamento subsuperficial (q), que indica a quantidade de escoamento através do comprimento (b), é expresso por:

$$q \cdot a = Q \cdot b = K_s \cdot \sin\theta \cdot h \cdot \cos\theta \cdot b \quad \text{Eq. (17)}$$

Quando o solo atinge a saturação, a quantidade da água que sai pela camada se torna máxima, e a Equação (17) modifica-se para:

$$Q_{s_{max}} = b \cdot (K_s \cdot z \cdot \cos\theta) \cdot \sin\theta = b \cdot T \cdot \sin\theta \quad \text{Eq. (18)}$$

onde T é a transmissividade [m²/d], que é o produto entre K_s [m/d] e a profundidade do solo.

O'Loughlin (1986) definiu a umidade (U) [m/m] como o escoamento que ocorre quando o solo atinge a saturação. Expressa pela parcela de água que entra no sistema em um determinado estado uniforme sobre a quantidade máxima da água que sai deste sistema pela camada de solo.

$$U = \frac{Q_e}{Q_{s_{max}}} = \frac{q \cdot a}{b \cdot T \cdot \sin\theta} \quad \text{Eq. (19)}$$

Substituindo as Equações (17) e (18) na Equação (19), obtém-se:

$$U = \frac{K_s \sin\theta \cdot h \cdot \cos\theta \cdot b}{b \cdot K_s \cdot z \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta} = \frac{h}{z} \quad \text{Eq. (20)}$$

Assim, juntando as Equações (19) e (20), pode-se reescrever:

$$U = \frac{q.a}{b.T.\sin\theta} = \frac{h}{z} \quad \text{Eq. (21)}$$

2.3.3 SHALSTAB: Combinação entre o Modelo da Encosta Infinita e o Modelo Hidrológico

O SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) foi criado por Montgomery e Dietrich (1994) e é um modelo matemático determinístico de base física, direcionado à identificação de locais com predisposição a escorregamentos translacionais, que usa a associação do MDT juntamente com equações derivadas da combinação entre o modelo de estabilidade de encosta infinita e o modelo hidrológico (GUIMARÃES et al., 2008). Além disso, através do Modelo Digital do Terreno, pelo SAGA, são calculadas as áreas de contribuição específica e a declividade. Cada célula contém um valor único dos parâmetros morfométricos; logo, trata-se de uma análise individual.

Reescrevendo a Equação (10) em função de h/z , e considerando que $c = c_s + c_r$, tem-se que:

$$\frac{h}{z} = \frac{p_s}{p_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot p_w \cdot g \cdot z} \quad \text{Eq. (22)}$$

Igualando as Equações (10) e (21), visto que estão em função de h/z , tem-se que:

$$\frac{q.a}{b.T.\sin\theta} = \frac{p_s}{p_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot p_w \cdot g \cdot z} \quad \text{Eq. (23)}$$

No caso do SHALSTAB, a equação deverá ficar em função de q/T , e desta forma, a Equação (24) descreve o modelo:

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \sin\theta \cdot \left\{ \frac{p_s}{p_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot p_w \cdot g \cdot z} \right\} \quad \text{Eq. (24)}$$

Existe uma parametrização para classificação do grau de instabilidade, classificada em sete partes, incondicionalmente instável a incondicionalmente estável. Entende-se como incondicionalmente instável quando o valor de (h/z) é igual a zero; nesta condição os parâmetros do solo não superam os efeitos de instabilidade da encosta (MICHEL et al., 2014).

$$\tan\theta \geq \tan\phi + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot p_w \cdot g \cdot z} \quad \text{Eq. (25)}$$

No estado incondicionalmente estável, tem-se que h/z é igual a um, desta forma, ou seja, mesmo com o solo saturado, a dependência dos parâmetros do solo supera os efeitos de instabilidade da encosta, ocorre no caso das planícies (MICHEL et al., 2014).

$$\tan\theta \leq \tan\phi \cdot \left(1 - \frac{p_w}{p_s}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot p_w \cdot g \cdot z} \quad \text{Eq. (26)}$$

As classes intermediárias são estabelecidas pela razão q/T , por serem valores muito baixos. Utiliza-se a aplicação da função logarítmica (PRIETRO et al, 2016), conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Classes de acordo com o modelo SHALSTAB

ID	CLASSES
1	Incondicionalmente Instável
2	$\log q/T < -3,1$
3	$-3,1 < \log q/T < -2,8$
4	$-2,8 < \log q/T < -2,5$
5	$-2,5 < \log q/T < -2,2$
6	$\log q/T > -2,2$
7	Incondicionalmente Estável

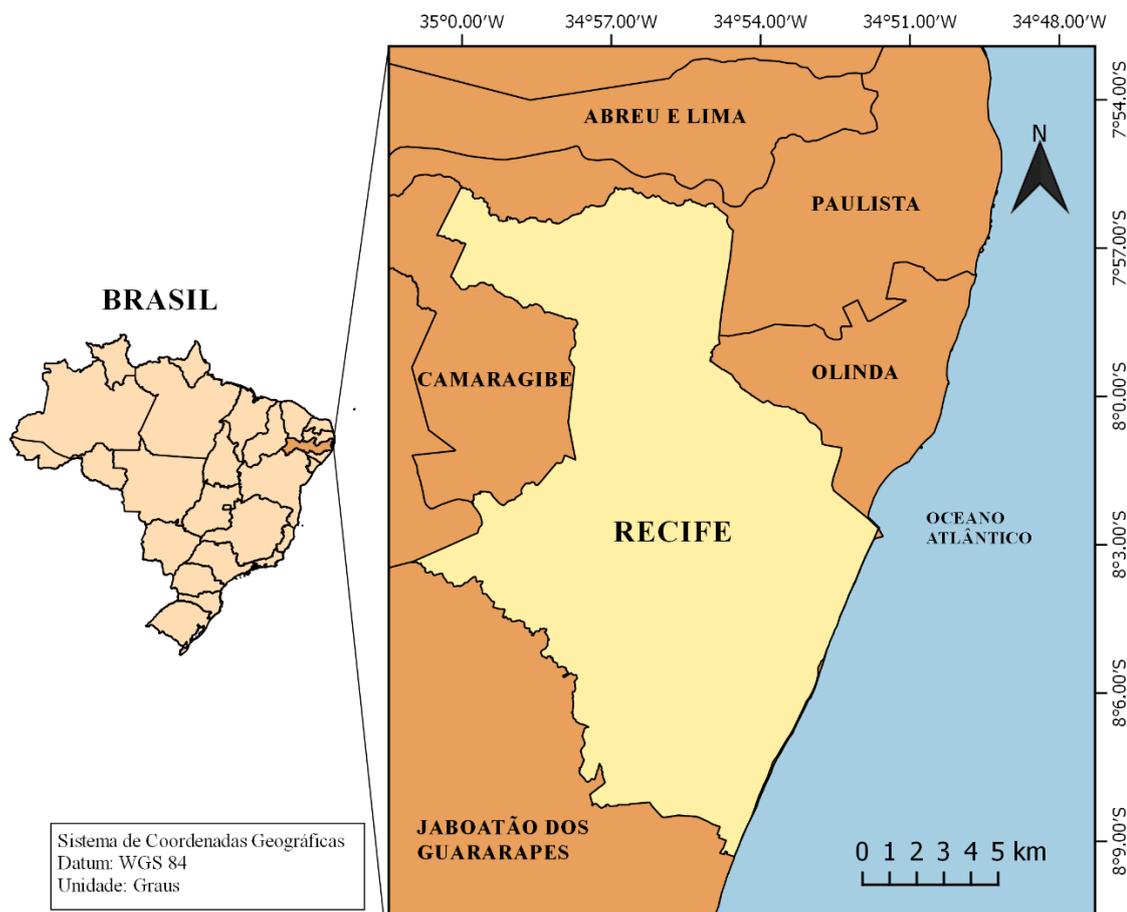
Fonte: Elaborado pelo autor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A cidade do Recife, identificada na Figura 11, é localizada no estado de Pernambuco, Nordeste Brasileiro. Recife está situada a uma latitude de $8^\circ 03' 14''$ Sul e longitude $34^\circ 52' 51''$ oeste, numa planície fluviomarinha – composta de ilhas, penínsulas, alagados e mangues, envolvidos por braços de rios – possui altitude média que varia entre 4 e 10 metros acima do nível do mar, e compreende uma área de 218,84 km² (GOMES, 2007). A Figura 12 mostra a espacialização das elevações da região, representada com um tom que vai desde o verde (cerca de 1,25 metros) até o vermelho (104 metros).

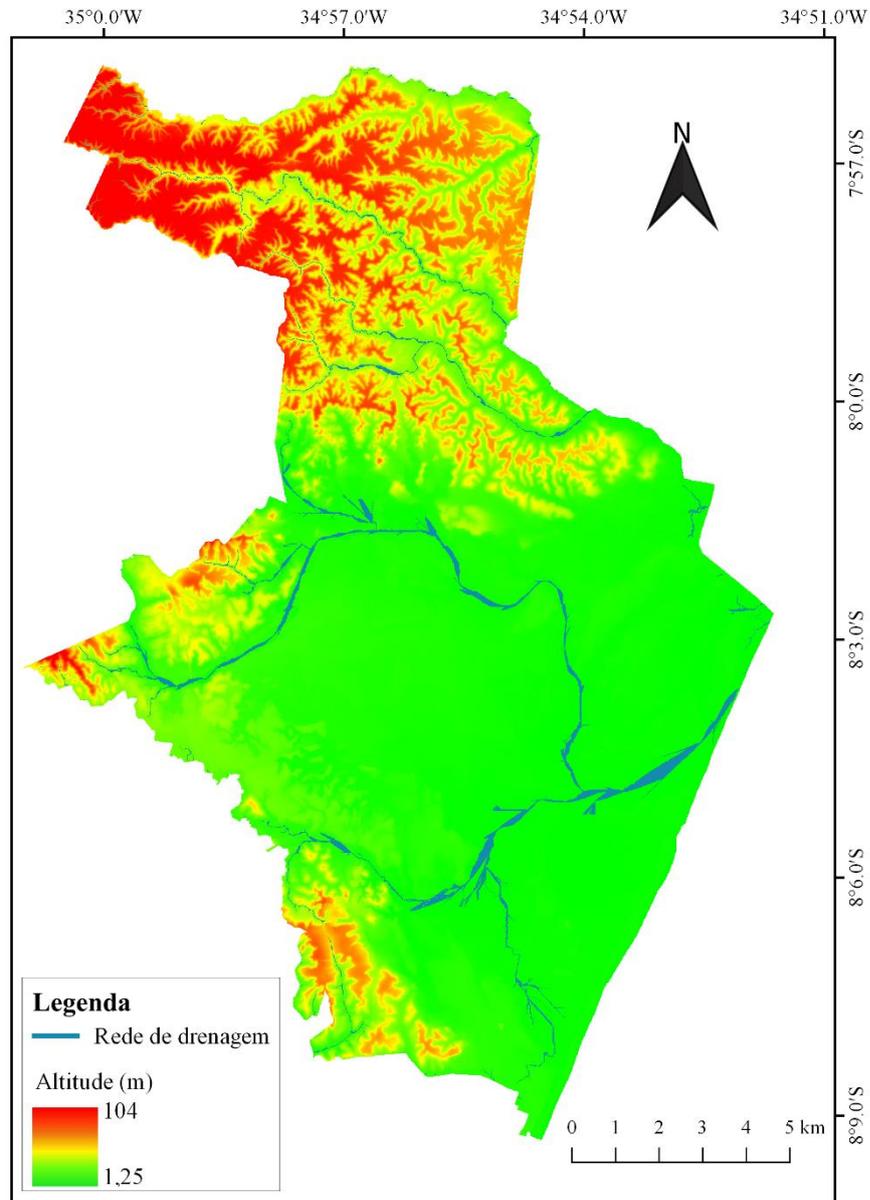
Figura 11 – Localização da cidade do Recife.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A população estimada do Recife para 2020, segundo o IBGE (2010), chega a 1.653.461 habitantes, com uma densidade demográfica de 7.039,64 hab/km², e o PIB (Produto Interno Bruto) foi de R\$ 30,03 bilhões, sendo o terceiro maior do Nordeste.

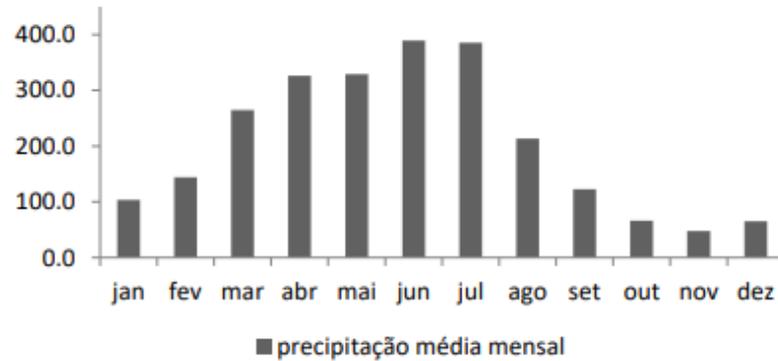
O clima é do tipo As' (clima tropical quente e úmido, com estação seca no inverno) a Ams' (clima tropical úmido ou subúmido), segundo a classificação de Köppen (1940-1946), caracteriza-se por um clima tropical chuvoso, que sofre influência das massas tropicais marinhas. Apresenta altas temperaturas, com temperatura média do ar, sempre, superior a 18°C (MELO, 2021). Por estar situada em zona de baixas latitudes, as temperaturas médias mensais são em torno de 25,5°C, com amplitude térmica anual de aproximadamente 5°C, e umidade relativa do ar com valores médios anuais de 84%, (INMET,2021).

Figura 12 – Topografia da cidade do Recife

Fonte: Elaborado pelo autor.

O trimestre mais chuvoso na cidade do Recife engloba, normalmente, os meses de maio, junho e julho, somando em média 52% dos totais anuais. Já o mais seco ocorre nos meses de outubro, novembro e dezembro, representam cerca de 6% dos totais anuais, conforme Figura 13. Wanderley et al. (2018) relata que para a cidade do Recife, todos os meses do ano são propícios à ocorrência de precipitação com valores diários extremos, porém historicamente o período entre março e agosto apresenta maior possibilidade.

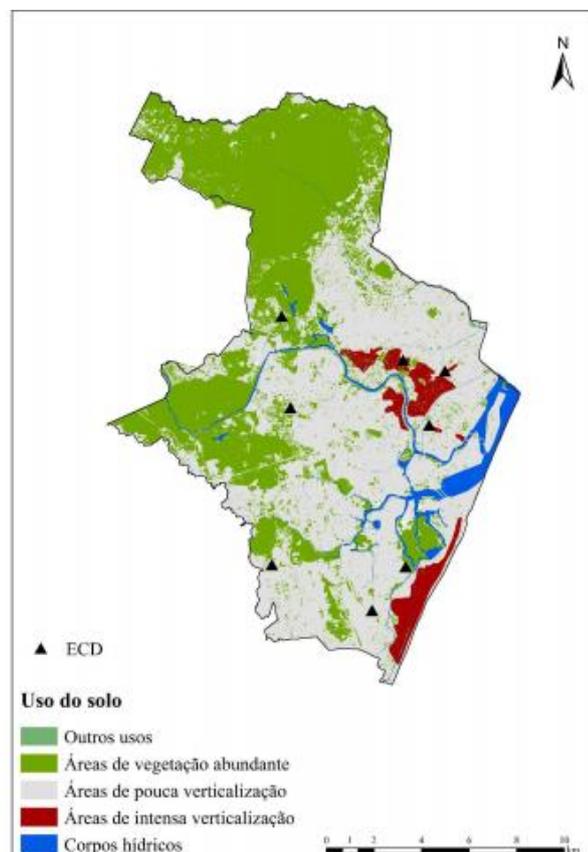
Figura 13 – Precipitação média da cidade do Recife



Fonte: Wanderley et.al (2018).

O uso e ocupação do solo da capital pernambucana é marcado pela dinâmica de um centro econômico terciário, e a morfologia urbana segue o padrão do uso, conforme Figura 14. As áreas verticalizadas são utilizadas para os comércios e moradias, e se encontram nas porções nordeste e sudeste da cidade. As áreas importantes vegetadas estão ao norte e oeste de seu território (CAVALCANTI, 2018).

Figura 14 – Uso e ocupação do solo.



Fonte: Cavalcanti (2018).

3.1.1 Aspectos relevantes sobre escorregamentos ocorridos na cidade do Recife

Durante o crescimento urbano da cidade do Recife, houve um mau planejamento, antes só as planícies eram ocupadas, entretanto, com o aumento acelerado da população, os morros começaram a ser habitados de forma desordenada e incorreta. Esse acúmulo de erros de planejamento ao longo da história afetou alguns elementos da paisagem natural, da vegetação e da drenagem, principalmente devido as interferências antrópicas com aterramento de mangues e cortes desordenados dos morros (LIMA, 2002). Desta forma, é perceptível a grande parcela no aumento do deslizamento de taludes provocado pela ação antrópica.

Os principais tipos de processos de instabilidade de encostas, que frequentemente ocorrem nas áreas de riscos do Recife, são a erosão hídrica pluvial e os escorregamentos planares. Segundo Gusmão Filho et al. (1997), a maioria dos escorregamentos não são profundos, chegam a no máximo 3 metros e sua superfície de ruptura é translacional, ou seja, com superfície potencial de ruptura paralela ao talude.

O problema dos escorregamentos de taludes se tornou mais grave a partir da década de 1980 quando foram registradas dezenas de escorregamentos na zona norte da cidade do Recife. Entre 1993 e 1996 foram registrados 757 escorregamentos, os quais causaram cerca de 50 mortes por ano (GUSMÃO, 1997).

A área foi escolhida para ser estudada devido aos fatos explanados e também levando em consideração que ao decorrer dos anos esses números continuaram a crescer. Segundo o censo de 2010, Recife ocupa a 5ª posição entre as cidades brasileiras com maior número de habitantes que vivem em áreas montanhosas, com propensão a deslizamentos de terra. Desta forma, é evidente a necessidade de um monitoramento, gerenciamento e planejamento para contornar tal problemática, através de ferramentas de previsibilidade das áreas suscetíveis a escorregamentos.

3.2 DADOS TOPOGRÁFICOS - MDT LIDAR (PE3D)

O MDT utilizado é o proveniente de um levantamento aerofotogramétrico com perfilamento a laser LIDAR (*Light Detection and Ranging*), realizado pelo Estado de Pernambuco, através da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE), incorporada

atualmente à Secretaria de Infraestrutura do Estado de Pernambuco (SEINFRA), denominado Pernambuco Tridimensional (PE3D). O objetivo dessa pesquisa era justamente poder ter imagens de todo o estado, assim como MDEs e MDTs com boas resoluções espaciais, de 1:5000 para todo o território e 1:1000 para as principais sedes municipais (CIRILO et al., 2015).

Ainda de acordo com Cirilo et al. (2015), com o MDE pronto, foi utilizado um algoritmo de classificação, a fim de filtrar os pontos correspondentes a edifícios, pontes e vegetação para assim poder formar o MDT, fornecidos num arquivo “x, y, z” que contém apenas as três coordenadas dos pontos que representam efetivamente a superfície do terreno. Portanto, o modelo digital adquirido contém a resolução de 1 m².

A resolução do MDT exerce grande influência nos resultados do modelo. Modelos digitais de terreno de baixa resolução subestimam a declividade das encostas e diminuem a precisão dos resultados (Dietrich e Montgomery, 1998; Guimarães et al., 2003). Para o presente trabalho, optou-se por diminuir a resolução, de 1 m para 2 m. A justificativa para tal ação está em que a modificação não geraria danos aos resultados por ainda se tratar de uma excelente resolução, já que a alteração é sutil, e possibilita um ganho operacional considerável, permitindo que os dados sejam processados.

3.3 DADOS PEDOLÓGICOS

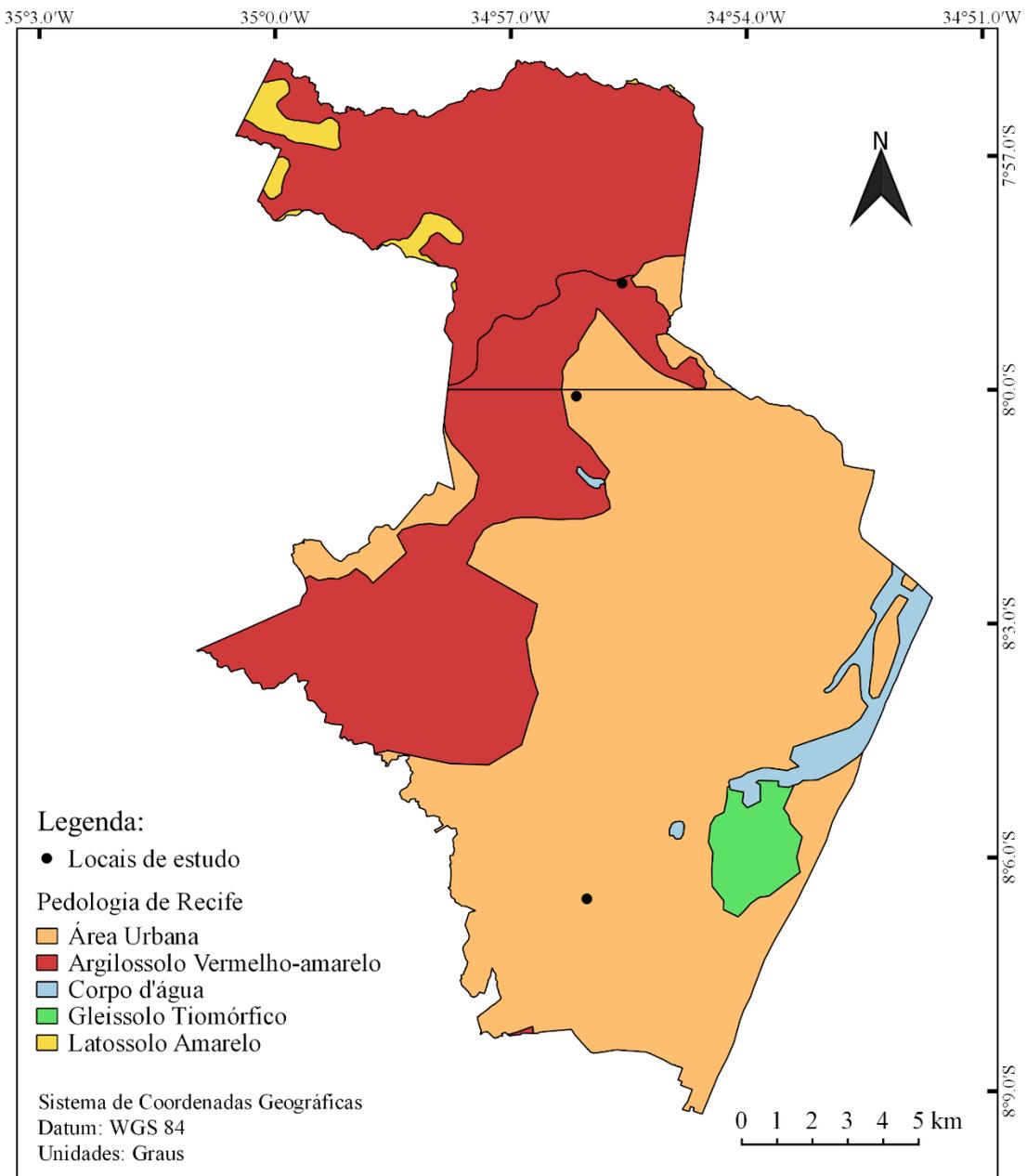
A pedologia exerce uma parcela enorme na influência da estabilidade das encostas, já que determinam a resistência ao cisalhamento dos solos e intervêm na capacidade de transmitir a água que infiltra durante um período chuvoso (FIORI e CAMIGNANI, 2001; SIDLE e OCHIAI, 2006). Ao observar a equação de Coulomb, Equação (1), é notório que a resistência ao cisalhamento depende fundamentalmente do ângulo de atrito interno e da coesão do solo.

Os parâmetros pedológicos são a coesão do solo, responsável pela força de atração entre as superfícies das partículas; o ângulo de atrito do solo que é a atração entre partículas próximas por forças eletrostáticas; a massa específica do solo representando a relação entre a massa compacta e o volume do solo e a profundidade que é a espessura da camada de solo.

O mapa da caracterização pedológica da área de estudo foi obtido através da base de dados do Banco de Dados de Informações Ambientais (BDia) do IBGE (Figura 15). Os dados do solo utilizados no presente trabalho (Tabela 2), são compilados de informações de trabalhos

acadêmicos pontuais dentro da área de estudo, georreferenciados no mapa da Figura 15, a partir dos quais foi feito um levantamento e revisão bibliográfica. Para os solos que tais pesquisas não tratavam, foi usado informações da literatura de outras pesquisas. A metodologia constituiu em conseguir o máximo de pesquisas realizadas dentro da área do Recife que mensuraram os parâmetros de solos necessários, e georreferenciar os pontos para obter os dados para cada tipo de solo.

Figura 15 – Mapa pedológico da cidade do Recife.



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado do Bdia - IBGE (2021).

Tabela 2 – Parâmetros dos solos estudados na cidade do Recife.

Referência	Local	Pedologia	X (°)	Y (°)
LIMA (2002)	Alto do Reservatório - Recife	Área Urbana	-34,936	-8,001
BANDEIRA (2003)	Dois Unidos - Recife	Argilossolo vermelho-amarelo	-34,926	-7,977
MEIRA (2008)	Recife	Área Urbana	-34,934	-8,109
SILVA E CARVALHO (2007)	—	Latossolo Amarelo	—	—
SOUZA JÚNIOR, RIBEIRO E OLIVEIRA (2001)	—	Gleissolo Tiomórfico	—	—

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.1 Dados das profundidades do solo

A estimativa da profundidade dos solos utilizados neste trabalho, onde se considerou a pedologia, sendo tais dados a espessura da camada que sofre a ruptura no escorregamento do material da encosta de acordo com a fórmula do SHALSTAB, foram obtidos do Levantamento Exploratório de Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco do Ministério da Agricultura, realizado em 1973, através de um convênio entre o Ministério da Agricultura (MA), Conselho da Cooperação Técnica da Aliança para o Progresso (CONTAP), Agência Norte-Americana Para o Desenvolvimento Internacional (USAIO) e o Escritório Técnico de Agricultura (ETA). O levantamento foi dividido em dois volumes, neles estão contidos a descrição, coleta e análises dos perfis de solos de todo o estado de Pernambuco.

Pelo mapa em formato *Shapefile*, disponibilizado na plataforma do IBGE, pode-se constatar quatro tipos de solos diferentes, confirmado pelos dados do levantamento exploratório as profundidades encontradas na literatura (Tabela 3).

Tabela 3 – Profundidade dos solos, segundo a pedologia

Tipo de solo	Profundidade (m)
Área urbana	2,5
Argilossolo vermelho-amarelo	2,5
Latossolo amarelo	2,7
Gleissolo Tiomórfico	0,5

Fonte: Levantamento Exploratório de Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco, adaptado pelo autor.

3.4 METODOLOGIA PARA AS MODELAGENS

Devido à falta de uma maior quantidade de dados para os parâmetros de solo, que permitisse uma análise discretizada com todos os valores aferidos na área de estudo, foram feitas sete modelagens diferentes, a fim de ampliar as análises sobre várias óticas. Nas modelagens de 1 a 6, a profundidade adotada foi de 2,5 metros, levando em consideração que a maior parte da área apresenta solos nessa altura, além disso, estudos da região apontam que as rupturas das encostas na capital pernambucana ocorrem até no máximo 3 metros. Os valores da massa específica também se mantiveram constantes para cada tipo de solo, retirados das literaturas citadas (LIMA, 2002; BANDEIRA, 2003; MEIRA, 2008; SILVA E CARVALHO, 2007; SOUZA JÚNIOR, RIBEIRO E OLIVEIRA, 2001).

A coesão e o ângulo de atrito do solo foram alterados a cada modelagem devido a sua alta variabilidade nas aferições de cada pesquisa, permitindo criar diferentes combinações, levando em consideração os seguintes critérios: uma modelagem com os valores mínimos, médios e máximos de cada investigação, de forma que foram espacializados uniformemente sobre toda a área, gerando três modelagens; mais três modelagens com os dados de cada trabalho listado e por fim, uma modelagem discretizada, considerando a espacialização de cada tipo de solo embasado na pedologia.

3.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo SHALSTAB é comumente realizada através da verificação da coincidência espacial entre ocorrências ou cicatrizes de escorregamento e o grau de instabilidade, anteriormente mapeadas e comparadas aos resultados calculados pelo modelo; sendo esta forma adotada para o presente trabalho. Quanto maior for a coincidência entre o inventário de escorregamentos da área com os locais designados instáveis pelo modelo, melhor é seu desempenho.

Os dados dos escorregamentos ocorridos na região, a serem comparados com os resultados do modelo, são provenientes do banco de dados da Defesa Civil do Recife, extraídos do inventário desenvolvido por Silva (2020), onde consta a espacialização dos pontos de ocorrência de escorregamentos.

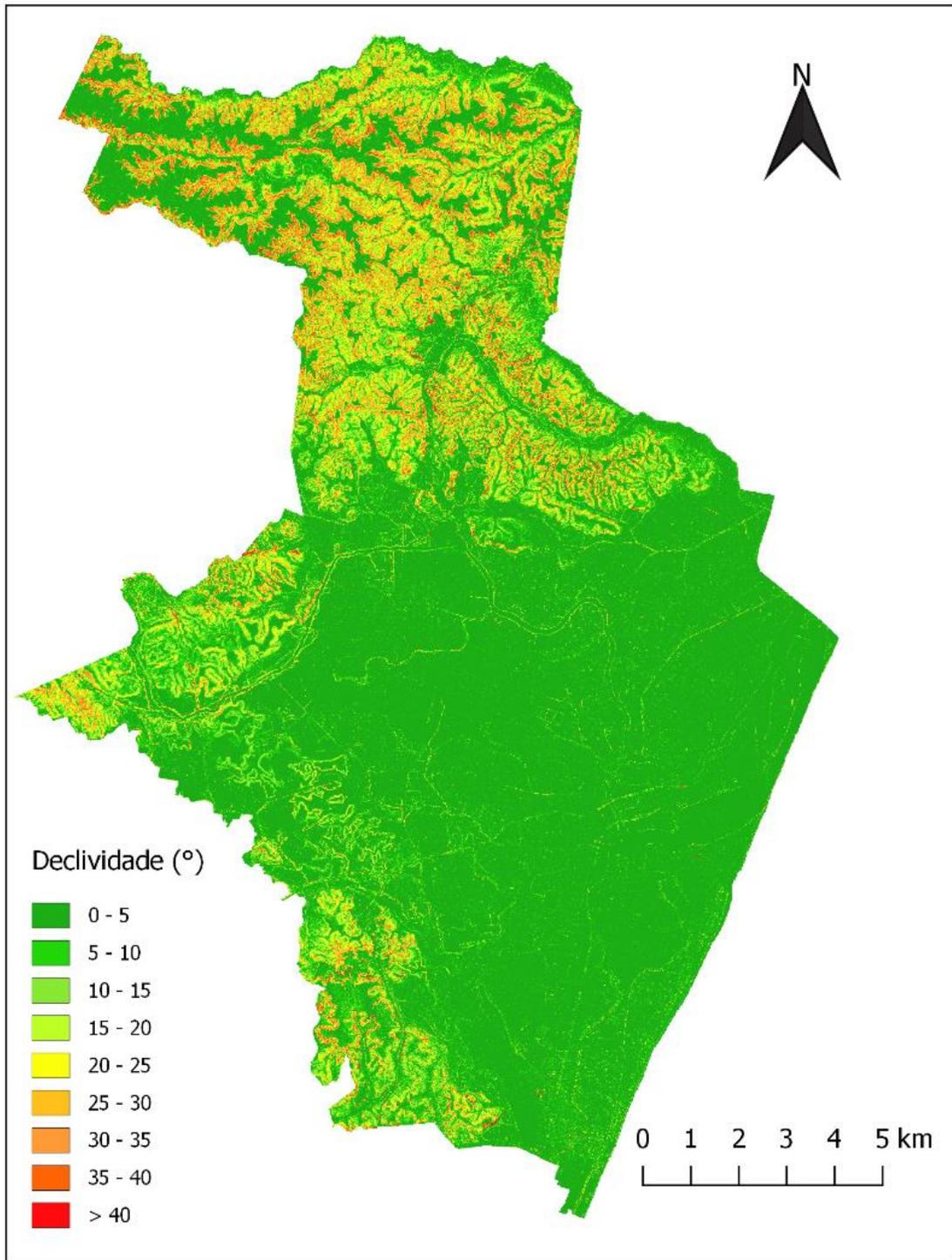
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os escorregamentos vêm causando cada vez mais desastres no Brasil e no mundo. Poder fazer uso do SHALSTAB, através de uma ferramenta SIG, permitiu que a análise fosse realizada para cada célula (pixel) da bacia, sendo uma grande contribuição na investigação da estabilidade das encostas. Sabe-se que existe uma clara relação entre as ocorrências de escorregamentos e as áreas com maior altimetria, devido a uma instabilidade natural. Desta forma, este parâmetro exerce grande influência sobre o cálculo, sendo de extrema importância. Através do MDT, obteve-se o mapa com a declividade em graus do local (Figura 16).

Com o MDT, pode-se extrair o mapa da área de contribuição a montante (Figura 17). Este mapa mostra o efeito da topografia no fluxo de água, conseqüentemente tem muita similaridade com a rede de drenagem. É nítido que os valores aumentam nas partes mais côncavas, pontos de convergência do fluxo.

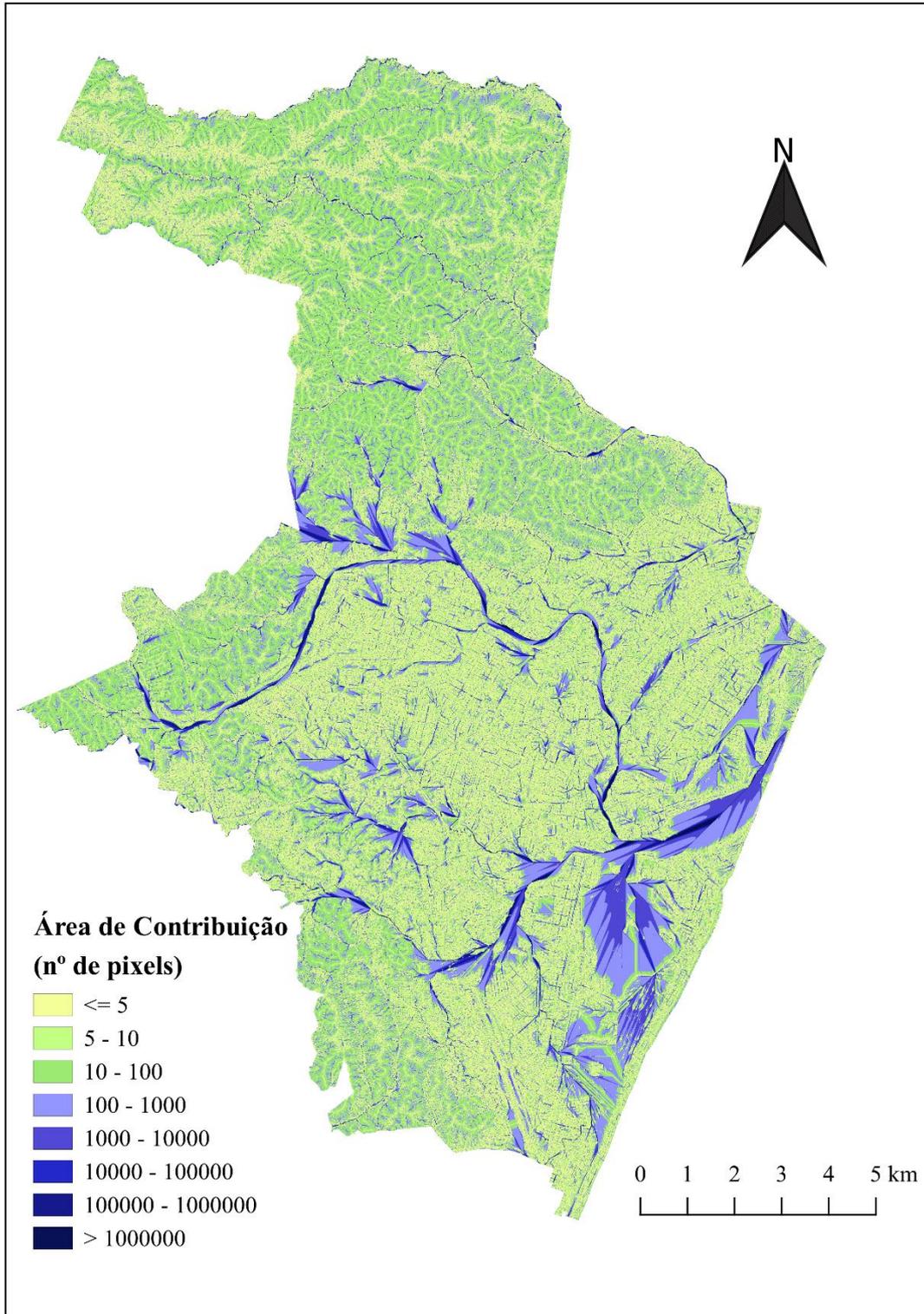
É importante destacar que apesar das áreas do extremo norte do Recife apresentarem altitudes expressivamente superiores que sua vizinhança, se tornando tendenciosas a serem zonas de escorregamentos, a região pertence ao bairro da Guabiraba, cujo território acomoda uma das 25 Unidades de Conservação da Natureza (SILVA, 2020). Sendo assim, não é uma área de vulnerabilidade social.

Figura 16 – Mapa da declividade da cidade do Recife.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 – Mapa da área de contribuição a montante da cidade do Recife.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 MODELAGEM 1

Para a Modelagem 1, foi feito o uso dos valores mínimos para os parâmetros de coesão e ângulo de atrito mensurados pelas pesquisas, as demais propriedades se mantiveram constantes, conforme explicação supracitada. Com os valores mínimos foi calculada a média referente à área de estudo e aplicada uniformemente sobre toda a região (Tabela 4).

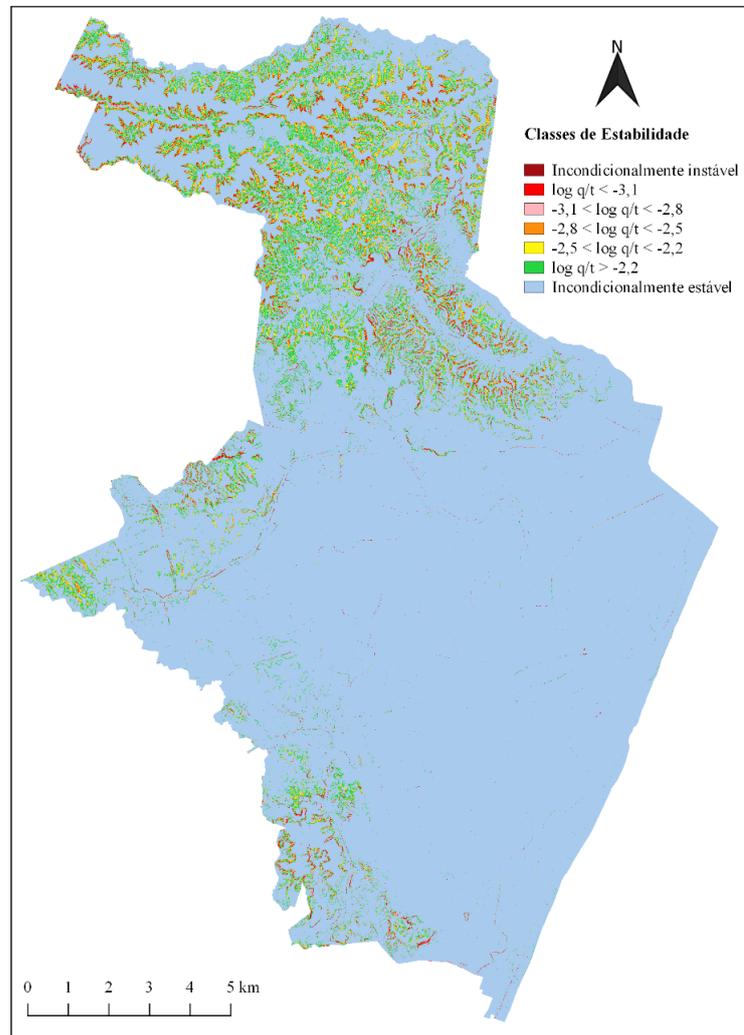
Fica notório que as zonas de instabilidade ocorrem mais a norte, noroeste e sul do município, apresentando alguns pontos também a nordeste (Figura 18). Está compreendida dentro das classes mais instáveis ($\log q/T < -3,1$ e incondicionalmente instável) 1,71% da área total do Recife.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 1

Local	Referência	c (Pa)	Ângulo de atrito (graus)	γ_s (kg/m ³)	Profundidade (m)
Nova Descoberta PIV1	Lima (2002)	10000,00	32,00	1325,63	2,50
Dois unidos	Bandeira (2010)	7700,00	28,60	1794,70	2,50
Ibura P01	Meira (2008)	1800,00	25,96	1537,99	2,50
	MÉDIA	6500,00	28,85	1552,77	2,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Mapa da estabilidade (Modelagem 1)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 MODELAGEM 2

Para a Modelagem 2, foi feito o uso dos valores médios dos parâmetros aferidos, sendo apenas alterado os dados da coesão e ângulo de atrito do solo; todos os demais se mantiveram constantes (Tabela 5). Calculou-se a média destes valores e aplicou-se uniformemente sobre toda a região (Figura 19). Percebe-se uma estabilidade geral maior que a Modelagem 1, com diminuição de 58% de áreas instáveis e apresentando instabilidade em 0,71% da região. Isso porque houve um aumento da coesão e do ângulo de atrito do solo em 8,33% e 5,68%, respectivamente. Estes parâmetros de entrada são os mais influentes e o aumento de seus valores está correlacionado com a diminuição de áreas predispostas a escorregarem. As zonas

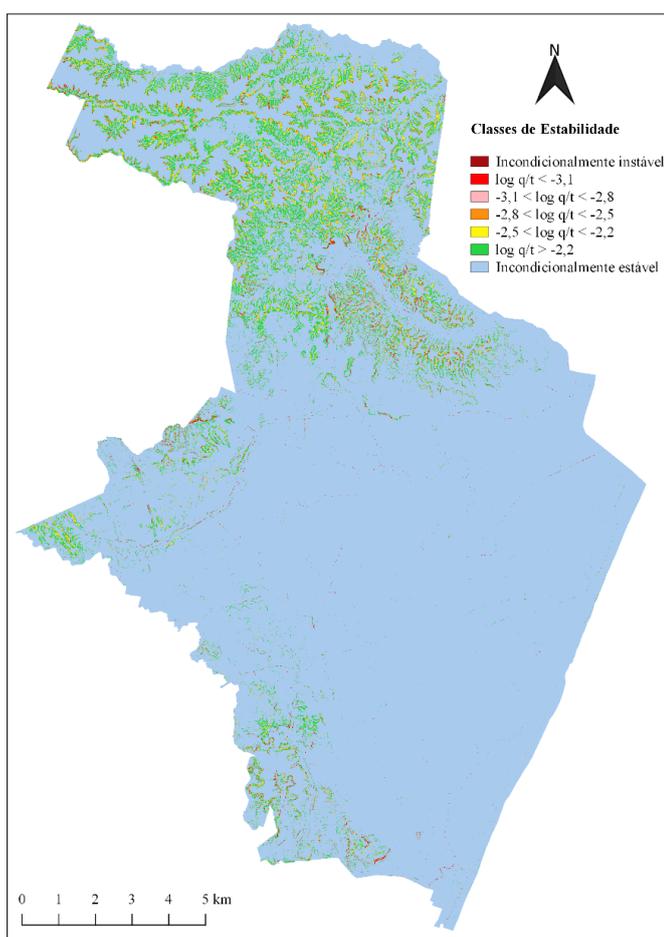
de maior instabilidade se localizam pontualmente no noroeste e sul, e mais expressivamente a nordeste.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 2

Local	Referência	c (Pa)	Ângulo de atrito (graus)	γ_s (kg/m ³)	Profundidade (m)
Nova					
Descoberta	Lima (2002)	10000,00	32,00	1325,63	2,50
P1V1					
Dois unidos	Bandeira (2010)	8950,00	32,15	1794,70	2,50
Ibura P01	Meira (2008)	2175,00	27,33	1537,99	2,50
	MÉDIA	7041,67	30,49	1552,77	2,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Mapa da estabilidade (Modelagem 2)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 MODELAGEM 3

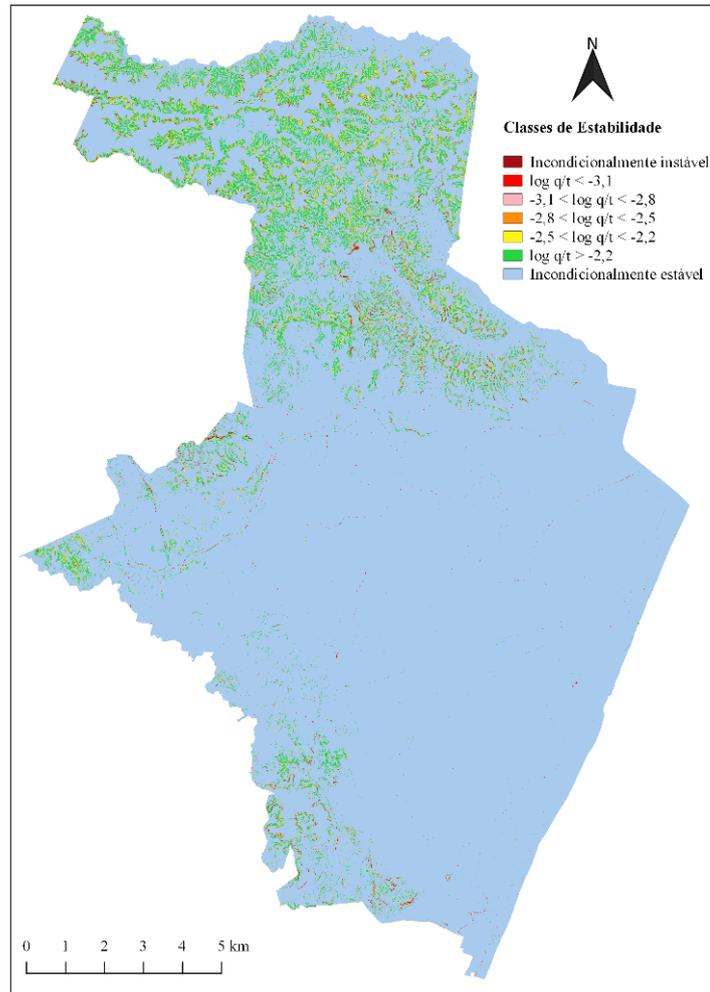
A Modelagem 3 foi realizada utilizando a média dos valores máximos de coesão e ângulo de atrito encontrados na literatura da região, e todos os demais parâmetros se mantiveram constantes (Tabela 6). Os dados foram aplicados uniformemente sobre toda a região (Figura 20). Percebe-se uma estabilidade geral levemente maior que a Modelagem 2 e bem maior que a Modelagem 1, havendo uma diminuição de áreas instáveis em 67% em relação a esta, de forma que as áreas suscetíveis ocupam 0,57% da região. As zonas com predisposição a escorregamentos localizam-se pontualmente no noroeste e sul, e mais expressivamente a nordeste.

Tabela 6 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 3

Local	Referência	c (Pa)	Ângulo de atrito (graus)	γ_s (kg/m ³)	Profundidade (m)
Nova					
Descoberta	Lima (2002)	10000,00	32,00	1325,63	2,50
PIV1					
Dois unidos	Bandeira (2010)	10200,00	35,70	1794,70	2,50
Ibura P01	Meira (2008)	2550,00	28,70	1537,99	2,50
	MÉDIA	7583,33	32,13	1552,77	2,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Mapa da estabilidade (Modelagem 3)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de entender separadamente a influência dos parâmetros de cada trabalho realizado na área, foram feitas as modelagens 4, 5 e 6, as quais são apresentadas a seguir.

4.4 MODELAGEM 4

A Modelagem 4 utilizou nos parâmetros os valores médios obtidos por Lima (2002), mostrados na Tabela 7, e o resultado se encontra apresentado na Figura 21. Dentre as modelagens, esta foi a que apresentou maior quantidade de área estável, ficando bem notório na análise visual e também em na porcentagem de área instável, mensurada em 0,14%. Apresentou uma diminuição de 92% em relação a instabilidade do Modelo 1, esta diminuição

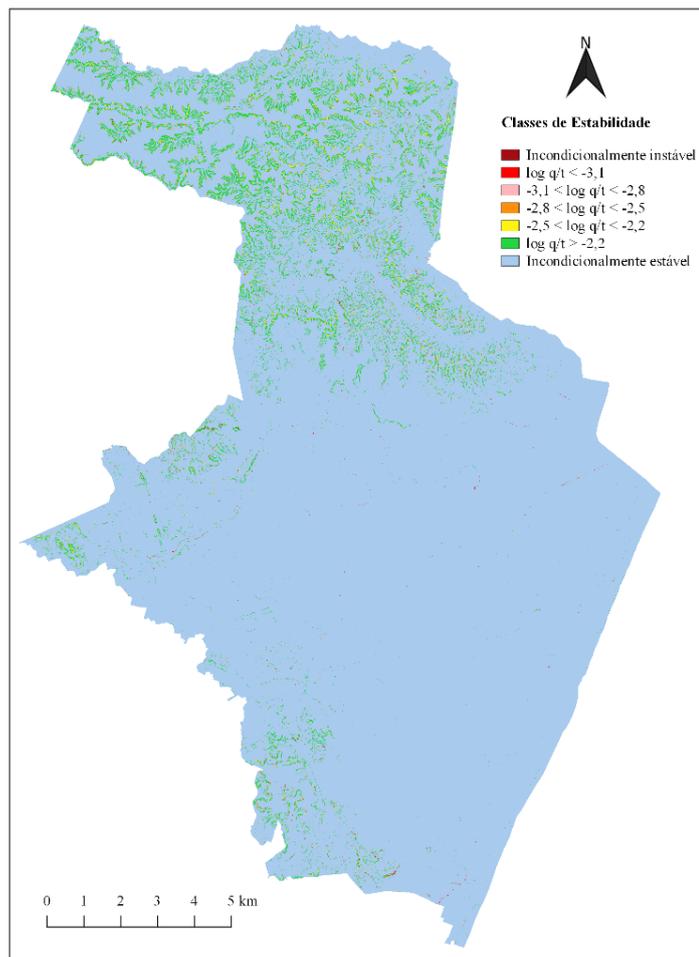
está atrelada ao fato da coesão e ângulo de atrito do solo terem aumentado 53,85% e 10,91%, respectivamente. Algumas poucas áreas, bem pontuais, no nordeste e sul do Recife, se mantiveram instáveis, mas de maneira geral, o mapa apresenta alto grau de estabilidade.

Tabela 7 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 4

Local	Referência	c (Pa)	Ângulo de atrito (graus)	γ_s (kg/m ³)	Profundidade (m)
Nova Descoberta P1V1	Lima (2002)	10000,00	32,00	1325,63	2,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Mapa da estabilidade (Modelagem 4)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 MODELAGEM 5

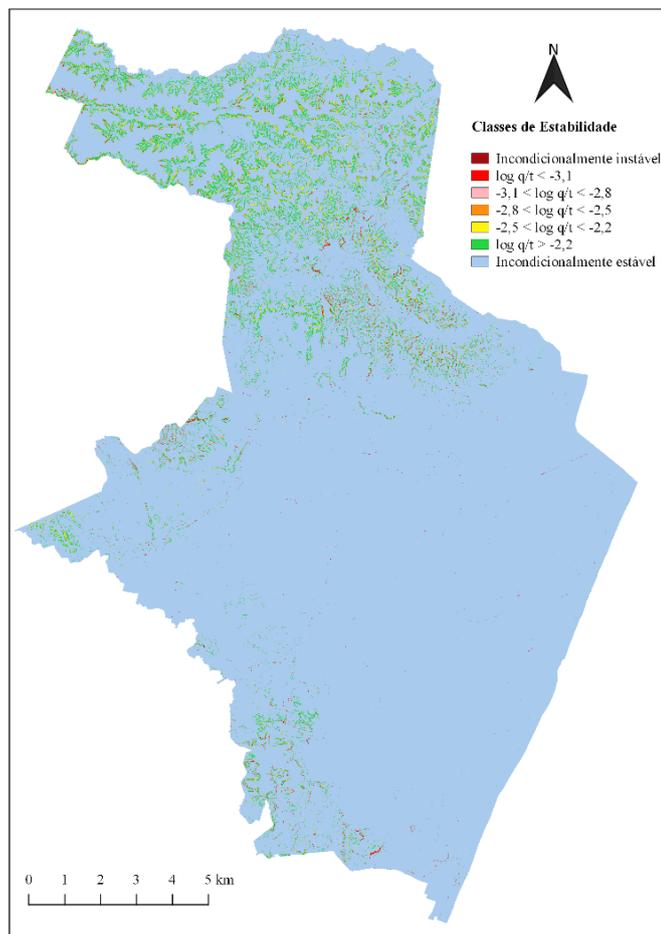
Na Modelagem 5, utilizou-se valores médios mensurados por Bandeira (2010), mostrados na Tabela 8. Analisando os resultados obtidos (Figura 22), observa-se um leve aumento das áreas de instabilidade, comparados com o Modelo 4, porém em relação ao Modelo 1, houve uma diminuição de 73% de área instável. As áreas com predisposição estão nas regiões noroeste e sul da área de estudo, ocupando 0,46% do todo.

Tabela 8 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 5

Local	Referência	c (Pa)	Ângulo de atrito (graus)	γ_s (kg/m ³)	Profundidade (m)
Dois unidos	Bandeira (2010)	8950,00	32,15	1794,70	2,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Mapa da estabilidade (Modelagem 5)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 MODELAGEM 6

A Modelagem 6 foi feita com os valores médios mensurados por Meira (2008), mostrados na Tabela 9. É notório uma acentuada diferença desta análise quando comparada as outras esplanadas até o momento, justificada pela discrepante redução dos valores da coesão e do ângulo de atrito do solo, quando comparada as outras modelagens. Confrontando com a Modelagem 1, visualiza-se um aumento de 354% das áreas instáveis, isto porque a coesão do solo reduziu 66,54% e o ângulo de atrito reduziu 5,28%. Este último, apesar da diferença mais sutil, é um fator preponderante na estabilidade, por apresentar maior sensibilidade em relação a todos os demais parâmetros; desta forma, ele contribui também para ocorra essa queda na estabilidade geral.

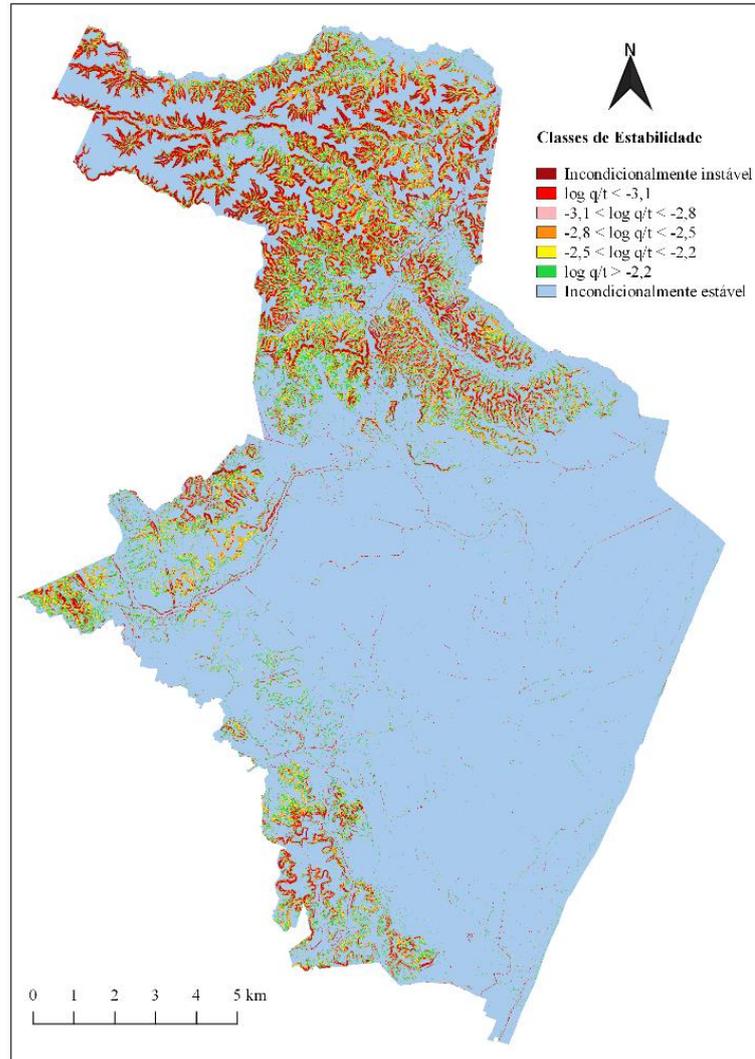
Com essa modelagem, observa-se que as áreas de instabilidade se concentram no norte, nordeste, noroeste e sul do município, conforme Figura 23. Pode-se dizer que se trata do cenário mais crítico dentre todos.

Tabela 9 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 6

Local	Referência	c (Pa)	Ângulo de atrito (graus)	γ_s (kg/m ³)	Profundidade (m)
Ibura P01	Meira (2008)	2175,00	27,33	1537,99	2,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Mapa da estabilidade (Modelagem 6)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 MODELAGEM 7

A Modelagem 7, diferente de todas as demais, foi uma modelagem discretizada, levando em consideração a espacialização dos dados, conforme a pedologia. Como dois pontos dos catalogados na literatura estavam sobre o mesmo tipo pedológico de solo (área urbana), fez-se a média com os dois valores, para primeiro aplicar na área correspondente. Os parâmetros utilizados para o cálculo deste cenário através do SHALSTAB estão apresentados na Tabela 10.

O resultado dessa modelagem está apresentado na Figura 24, onde percebe-se uma redução de 23% de áreas instáveis em relação a Modelagem 1, significando que a área instável ocupa 1,35% de toda a região.

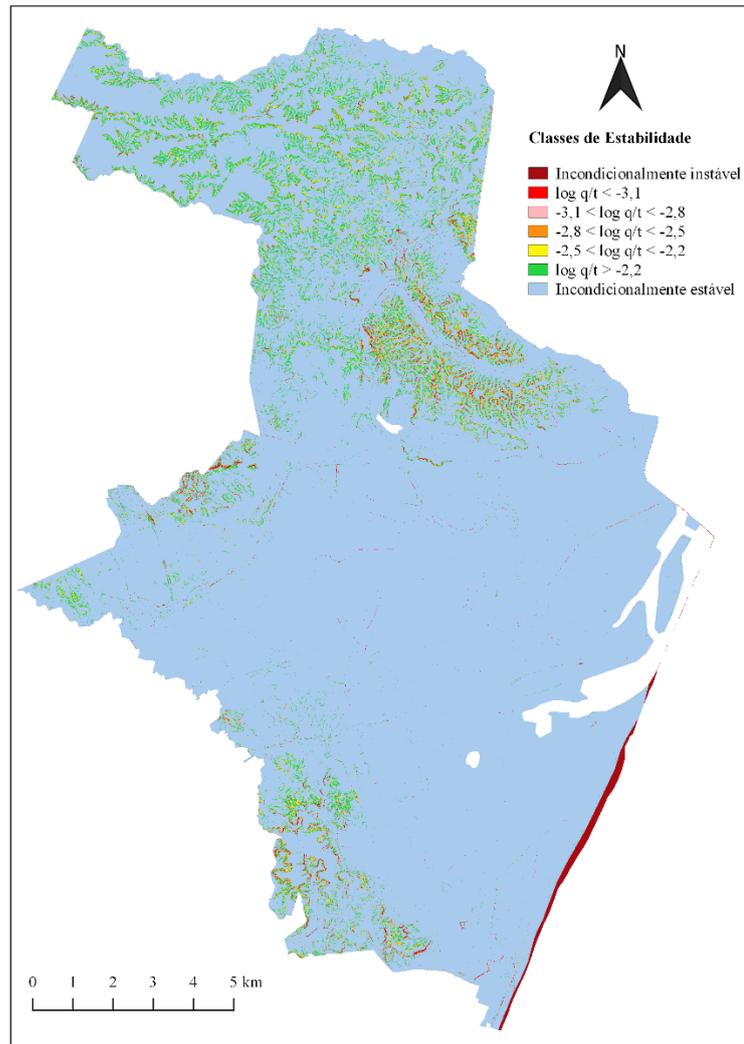
Outro ponto importante a ser destacado são as áreas transparentes do mapa. Estas surgem nas regiões dos corpos de água, por apresentarem alguns parâmetros zerados. Pela lógica física, isso causa o surgimento de algumas áreas com erro de análise pelo modelo, isso porque na Equação (24), o parâmetro z é um denominador, e sabe-se que quando um valor é dividido por 0 ocorre uma indeterminação matemática.

Tabela 10 – Valores dos parâmetros utilizados na Modelagem 7

Pedologia	c (Pa)	Ângulo de atrito (graus)	γ_s (kg/m ³)	Profundidade (m)
Área urbana	6087,50	29,67	1431,81	2,50
Argilossolo vermelho-amarelo	8950,00	32,15	1794,70	2,50
Corpo d'água	0,00	0,00	997	0,00
Latossolo amarelo	20500,00	35,75	1600,95	2,7
Gleissolo Tiomórfico	10900,00	25,5	1845	0,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Mapa da estabilidade (Modelagem 7)



Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma geral, percebe-se que o modelo é bem sensível aos parâmetros utilizados. Além da declividade, que já é esperado ser um fator pertinente, destaca-se a importância do ângulo de atrito (ϕ) e da coesão do solo (c_s), que sofreram as variações e provaram que alterações não tão acentuadas causam resultados bastante distintos. Ainda é válido salientar que o aumento dessas duas variáveis traz resultados benéficos para estabilidade. Sendo assim, se torna ainda mais evidente a necessidade do conhecimento dos parâmetros de solos para a obtenção de resultados condizentes com a realidade, que possam ajudar aos órgãos competentes e pesquisas a localizar as zonas que devem sofrer intervenção devido a seu grau de instabilidade.

De acordo com Michel (2013), a coesão do solo sofre a sensibilidade da variação por se tratar de um solo raso (menor que 3 metros), visto que a resistência proveniente das forças coesivas se sobressai em condições de baixa tensão normal. Entretanto, dentre esses dois parâmetros (c_s e ϕ), o ϕ é o parâmetro que tem maior influência nos resultados.

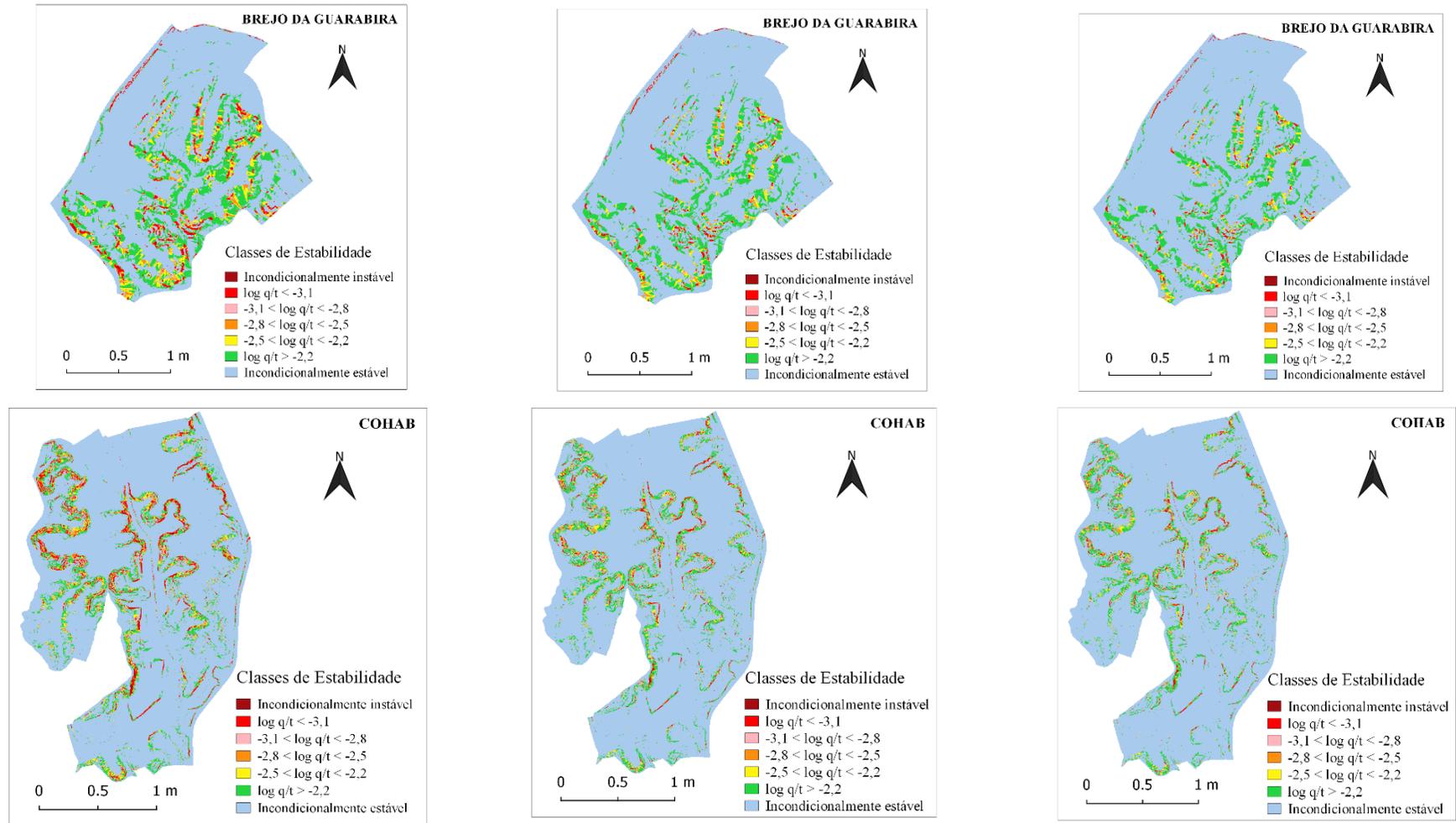
Uma redução entre as Modelagens 4 e 6 de 78,25% na coesão do solo e 14,59% no ângulo de atrito, fizeram com que a instabilidade caísse 5306%. Esta porcentagem enorme se deve justamente pela combinação da brusca diminuição dos principais parâmetros de entrada influentes sobre o modelo. Desta forma, o Fator de Segurança (FS) depende diretamente destes, ficando perceptível que as modelagens apresentaram resultados coerentes.

Analisando o todo, Recife apresenta grandes áreas com estabilidade, motivados pela baixa declividade na maior parte da região. Entretanto, maior atenção deve ser dada às áreas com de maiores altitudes e com predisposição a escorregamentos que se localizam no norte, nordeste e sul da área de estudo.

4.8 ANÁLISE DOS BAIROS BREJO DA GUARABIRA E COHAB

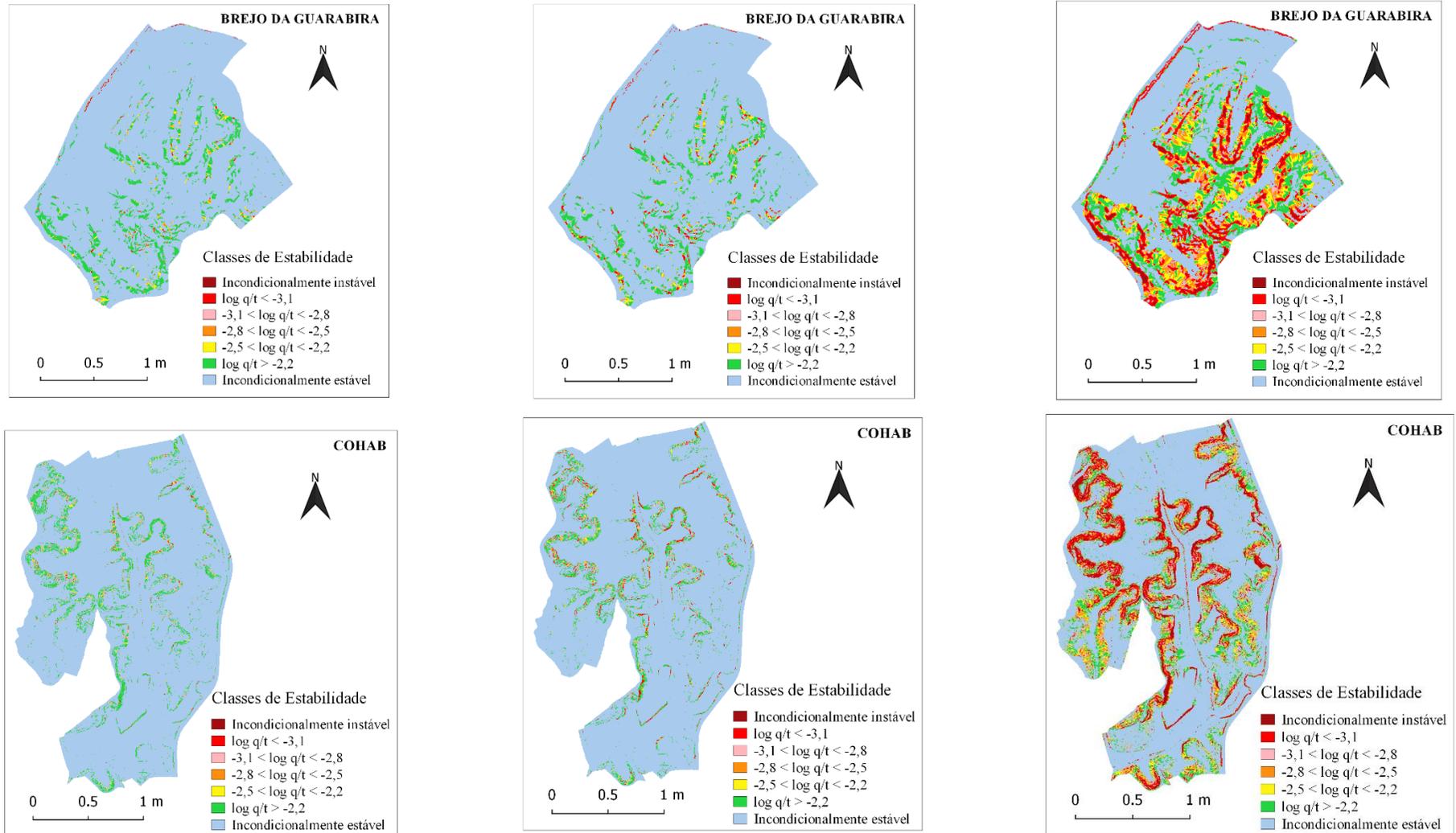
Silva (2020) elaborou um inventário mapeando as ocorrências dos escorregamentos entre os anos de 2014 a 2017 na cidade do Recife, baseados nos dados disponibilizados pela Defesa Civil, onde ficou constatado que os bairros que mais sofrem com esse fenômeno são o Brejo da Guarabira e Cohab, a nordeste e sul do município, respectivamente. A fim de especificar e observar o grau de instabilidade desses bairros separadamente, analisou-se caso a caso dentre as modelagens realizadas. Os mapas de estabilidade se encontram nas Figuras 25 a 27.

Figura 25 – Mapas de estabilidade dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagens 1, 2 e 3).



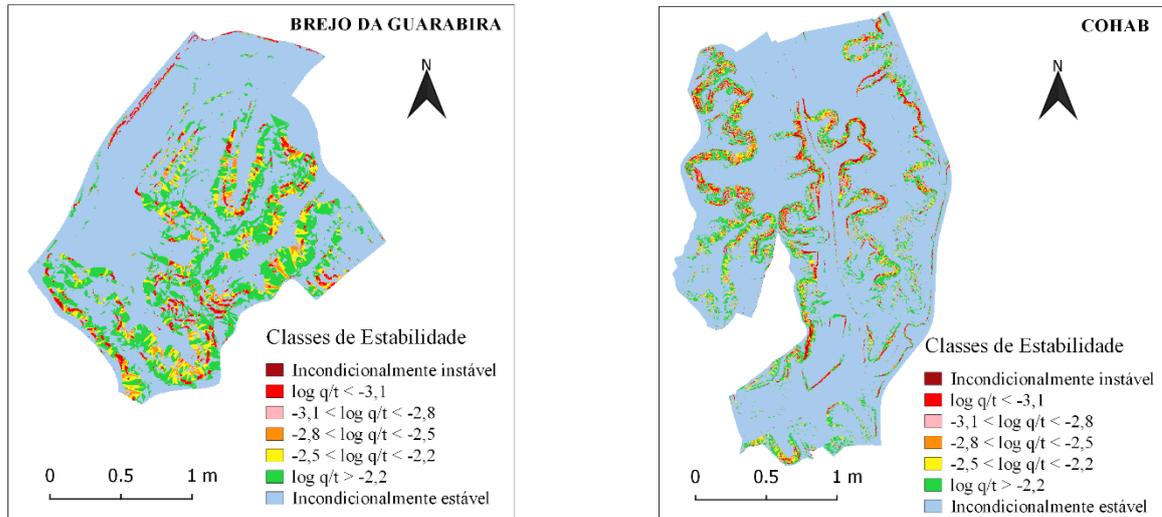
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Mapas de estabilidade dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagens 4, 5 e 6).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Mapas de estabilidade dos bairros Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 7)



Fonte: Elaborado pelo autor.

As Tabela 11 a Tabela 17 mostram as distribuições das áreas dentro das classificações do SHALSTAB para cada modelagem.

Tabela 11 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 1)

Classes	Brejo da Guarabira		Cohab	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Incondicionalmente instável	0,001	0,09%	0,0088	0,20%
log q/T < -3,1	0,024	3,29%	0,1555	3,61%
-3,1 < log q/T < -2,8	0,005	0,64%	0,0335	0,78%
-2,8 < log q/T < -2,5	0,011	1,50%	0,0567	1,32%
-2,5 < log q/T < -2,2	0,032	4,34%	0,1122	2,60%
log q/T > -2,2	0,119	16,34%	0,3712	8,61%
Incondicionalmente estável	0,538	73,81%	3,5730	82,88%
TOTAL	0,729	100,00%	4,311	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 2)

Classes	Brejo da Guarabira		Cohab	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Incondicionalmente instável	0,000	0,01%	0,002	0,04%
log q/T < -3,1	0,012	1,69%	0,079	1,84%
-3,1 < log q/T < -2,8	0,003	0,40%	0,024	0,56%
-2,8 < log q/T < -2,5	0,006	0,86%	0,038	0,88%
-2,5 < log q/T < -2,2	0,021	2,82%	0,083	1,91%
log q/T > -2,2	0,104	14,30%	0,366	8,49%
Incondicionalmente estável	0,583	79,92%	3,719	86,27%
TOTAL	0,729	100,00%	4,311	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 3)

Classes	Brejo da Guarabira		Cohab	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Incondicionalmente instável	0,000	0,00%	0,001	0,03%
log q/T < -3,1	0,010	1,40%	0,065	1,51%
-3,1 < log q/T < -2,8	0,002	0,34%	0,021	0,50%
-2,8 < log q/T < -2,5	0,005	0,70%	0,033	0,77%
-2,5 < log q/T < -2,2	0,017	2,31%	0,072	1,66%
log q/T > -2,2	0,094	12,91%	0,348	8,08%
Incondicionalmente estável	0,600	82,33%	3,770	87,46%
TOTAL	0,729	100,00%	4,311	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 4)

Classes	Brejo da Guarabira		Cohab	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Incondicionalmente instável	0,000	0,00%	0,000	0,00%
log q/T < -3,1	0,003	0,40%	0,014	0,33%
-3,1 < log q/T < -2,8	0,001	0,10%	0,009	0,22%
-2,8 < log q/T < -2,5	0,002	0,25%	0,017	0,40%
-2,5 < log q/T < -2,2	0,009	1,21%	0,040	0,93%
log q/T > -2,2	0,061	8,30%	0,282	6,55%
Incondicionalmente estável	0,654	89,74%	3,948	91,57%
TOTAL	0,729	100,00%	4,311	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 5)

Classes	Brejo da Guarabira		Cohab	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Incondicionalmente instável	0,000	0,00%	0,001	0,02%
log q/T < -3,1	0,008	1,17%	0,055	1,29%
-3,1 < log q/T < -2,8	0,002	0,24%	0,016	0,36%
-2,8 < log q/T < -2,5	0,003	0,43%	0,021	0,49%
-2,5 < log q/T < -2,2	0,009	1,17%	0,042	0,97%
log q/T > -2,2	0,058	8,02%	0,249	5,77%
Incondicionalmente estável	0,648	88,97%	3,927	91,10%
TOTAL	0,729	100,00%	4,311	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 6)

Classes	Brejo da Guarabira		Cohab	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Incondicionalmente instável	0,015	2,11%	0,100	2,31%
log q/T < -3,1	0,084	11,52%	0,407	9,45%
-3,1 < log q/T < -2,8	0,017	2,32%	0,075	1,74%
-2,8 < log q/T < -2,5	0,037	5,13%	0,141	3,28%
-2,5 < log q/T < -2,2	0,062	8,54%	0,215	4,98%
log q/T > -2,2	0,110	15,09%	0,408	9,47%
Incondicionalmente estável	0,403	55,29%	2,965	68,77%
TOTAL	0,729	100,00%	4,311	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Distribuição das áreas de escorregamentos (Modelagem 7)

Classes	Brejo da Guarabira		Cohab	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Incondicionalmente instável	0,000	0,05%	0,0078	0,18%
log q/T < -3,1	0,022	2,99%	0,1423	3,30%
-3,1 < log q/T < -2,8	0,005	0,68%	0,0556	1,29%
-2,8 < log q/T < -2,5	0,013	1,72%	0,0769	1,78%
-2,5 < log q/T < -2,2	0,037	5,10%	0,1437	3,33%
log q/T > -2,2	0,136	18,63%	0,3882	9,00%
Incondicionalmente estável	0,516	70,82%	3,4966	81,11%
TOTAL	0,729	100,00%	4,311	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Baseados nas Tabelas 12 a 17, percebe-se a variabilidade das áreas instáveis e estáveis a cada modelagem. Em média 3,53% da área do Brejo da Guarabira e 3,44% da área do bairro da Cohab são zonas que apresentam instabilidade. Isso mostra que apesar dos diferentes cenários, é esperado que apresente ocorrências com certa frequência.

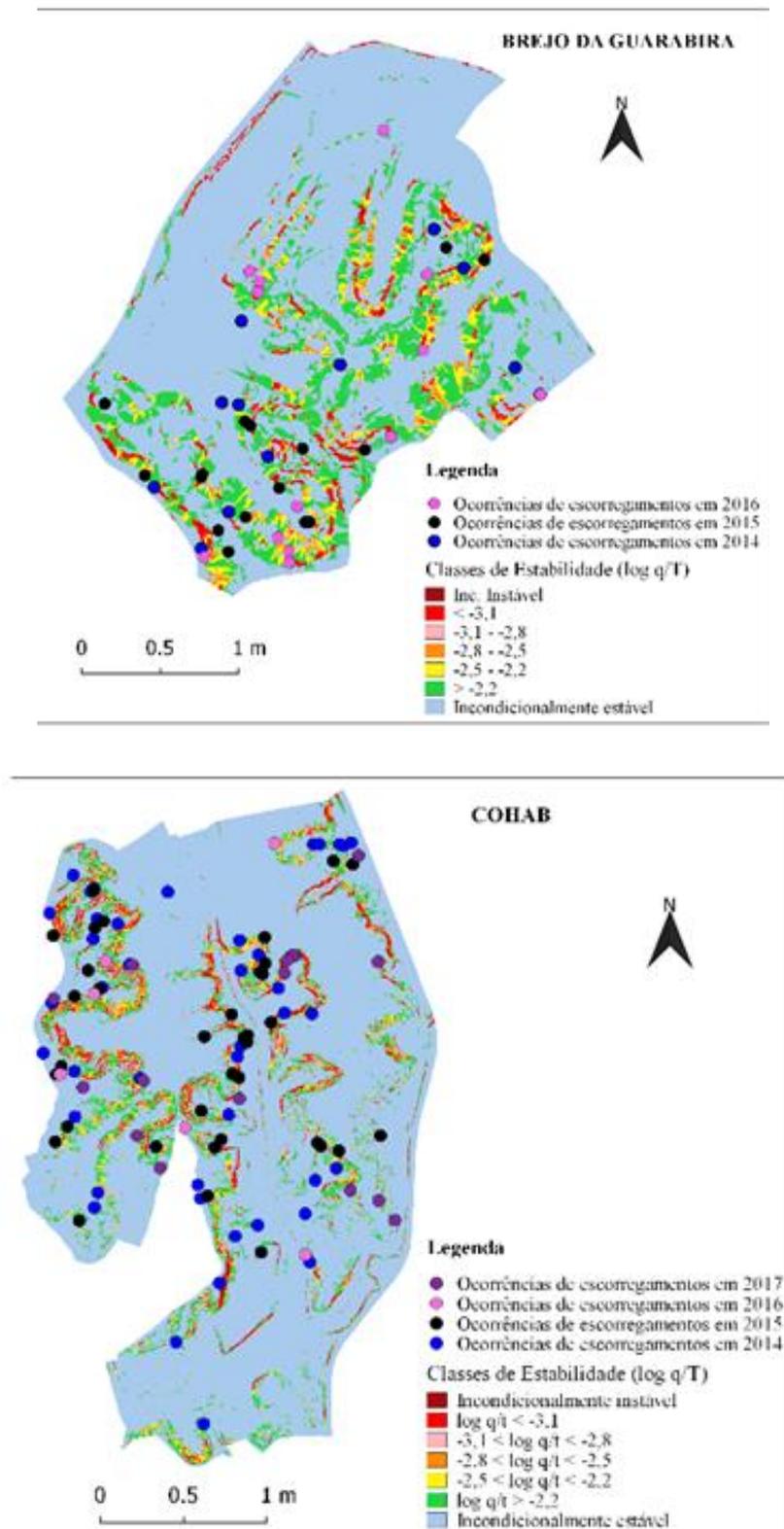
Embasado nos mapas desenvolvidos por Silva (2020), os pontos de ocorrências de escorregamentos foram georreferenciados e inseridos nos mapas de estabilidade. Os resultados

são mostrados nas Figuras 28 a 34. Vale ressaltar que para o ano de 2017 o bairro do Brejo da Guarabira não apresentou eventos de escorregamentos.

Apesar da variabilidade dos parâmetros e das diferentes frequências de instabilidade nas modelagens explanadas, percebe-se uma repetição de áreas com alta e média predisposição a escorregamentos, as quais coincidem com as ocorrências da Defesa Civil. Desta forma, os resultados apresentados se mostram coerente com a realidade e, conseqüentemente, é um excelente guia na tomada de decisões pelos órgãos competentes, se tornando uma ferramenta auxiliadora para os gestores. Estendendo a análise após essa constatação, identifica-se que além dos bairros do Brejo da Guarabira e Cohab, os resultados mostram que é preciso ter atenção com os bairros nos seus entornos (Passarinho, Guarabira, Dois Unidos, Córrego do Jenipapo, Macaxeira, Vasco da Gama, Alto José Bonifácio, Barro e Ibura), pois os mesmos apresentaram uma quantidade considerável de áreas instáveis.

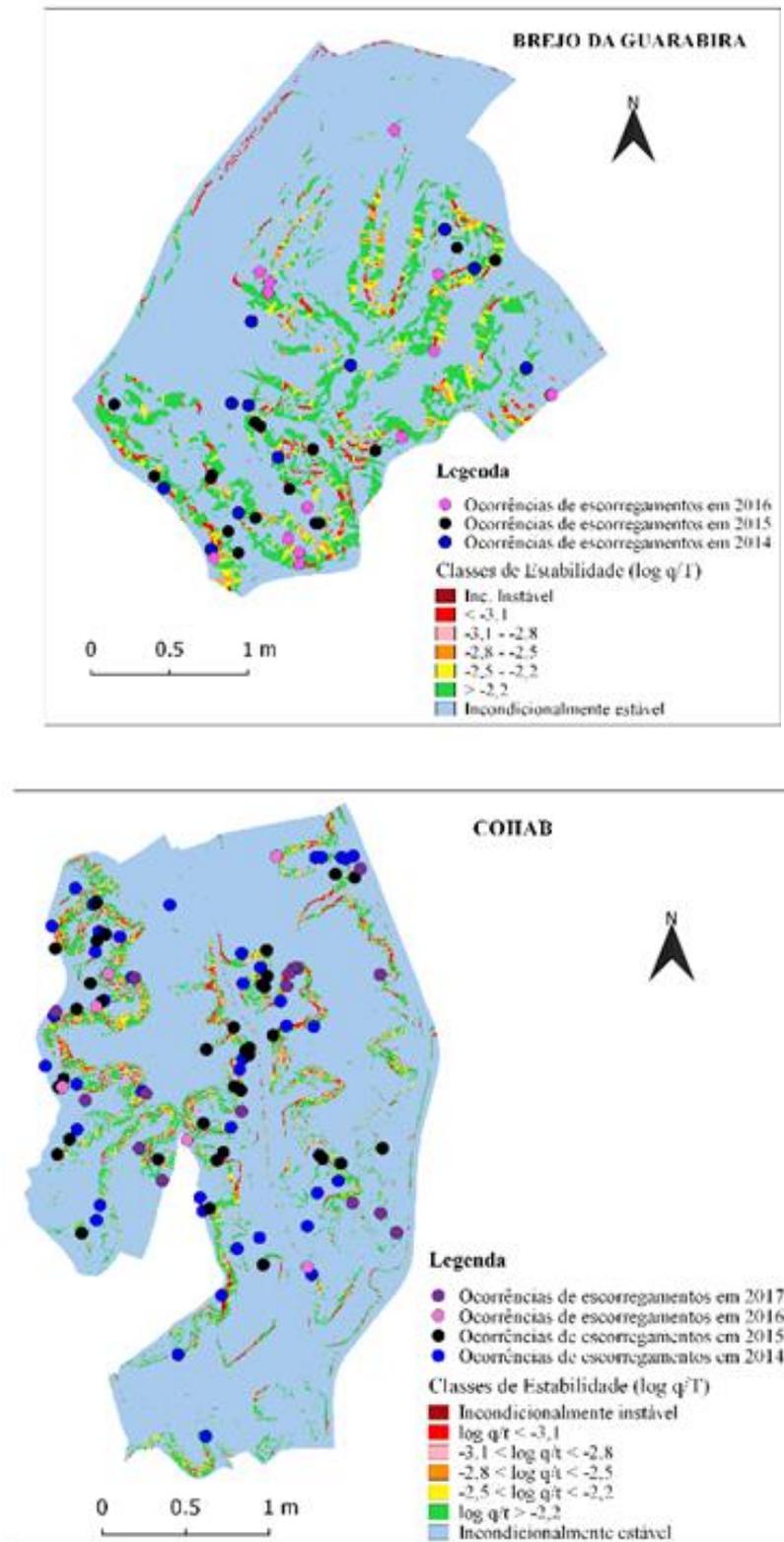
Sobre esse ponto de vista, destacam-se três diferentes cenários que podem ocorrer, isto porque além do mensurado pela modelagem matemática, através da análise de dados topográficos, pedológicos e hidrológico, outros fatores que não estão englobados, como a variabilidade pluviométrica, ações antrópicas no solo, se tornam gatilhos para que os escorregamentos ocorram. Sendo assim, e levando em consideração três diferentes perspectivas, considerou-se a Modelagem 4 como a mais representativa para alta estabilidade, o que não estaria tão a favor da segurança, mas a depender do período, caracterizaria o local. Um mapa de estabilidade intermediária, podendo servir de norteador na tomada de decisões, quando não se sabe por onde deve seguir, representado pela Modelagem 1, escolhido pois apresentou 1,71% de instabilidade e se comparado com a média de instabilidade de todos os mapas (1,81%) se torna um bom representante. Por fim, um mapa mais conservador, ideal para os meses de alta pluviometria, representado pela Modelagem 6. As escolhas foram feitas de forma que, conseguisse abordar as diferentes situações que podem ocorrer na região.

Figura 28 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 1).



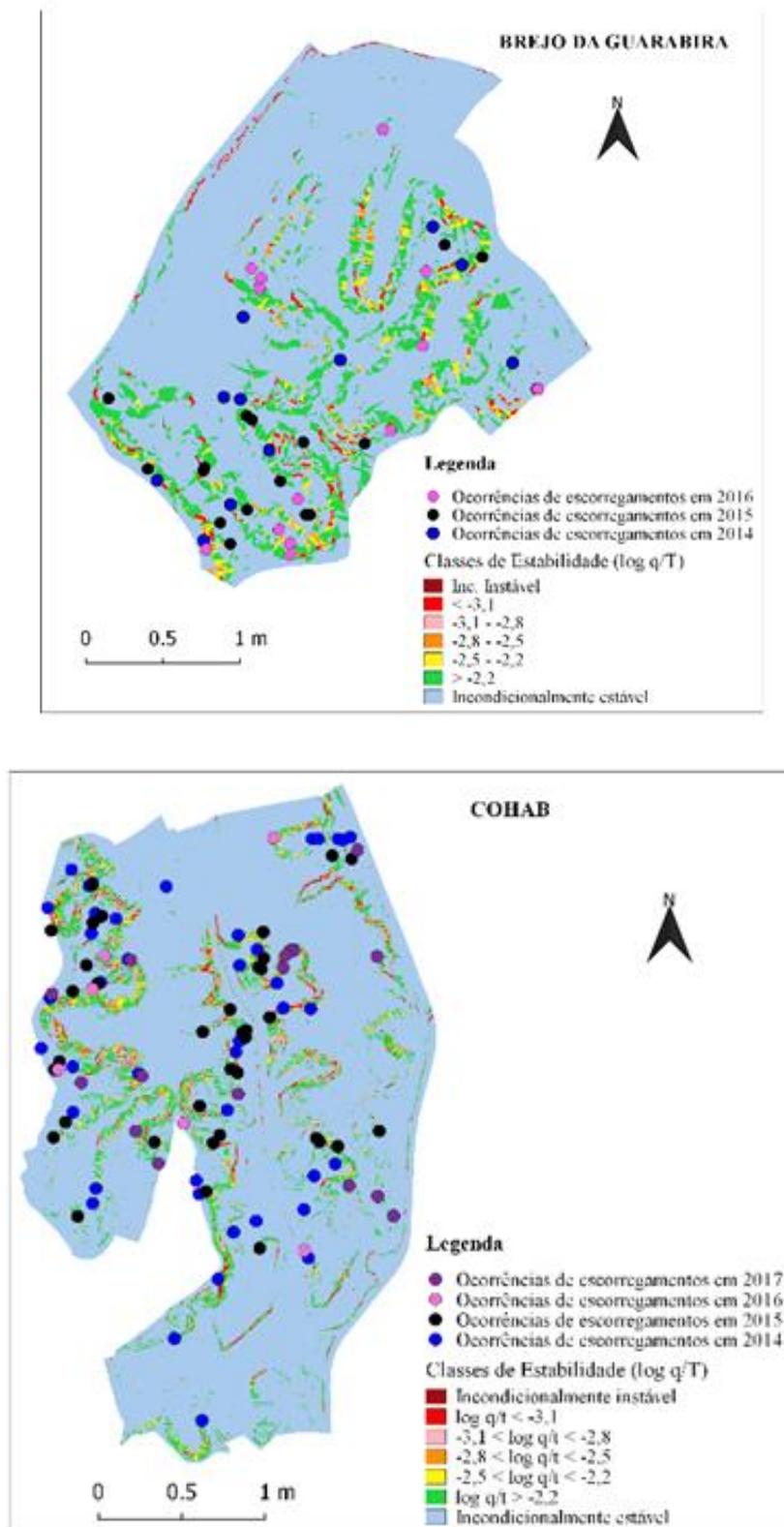
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 2).



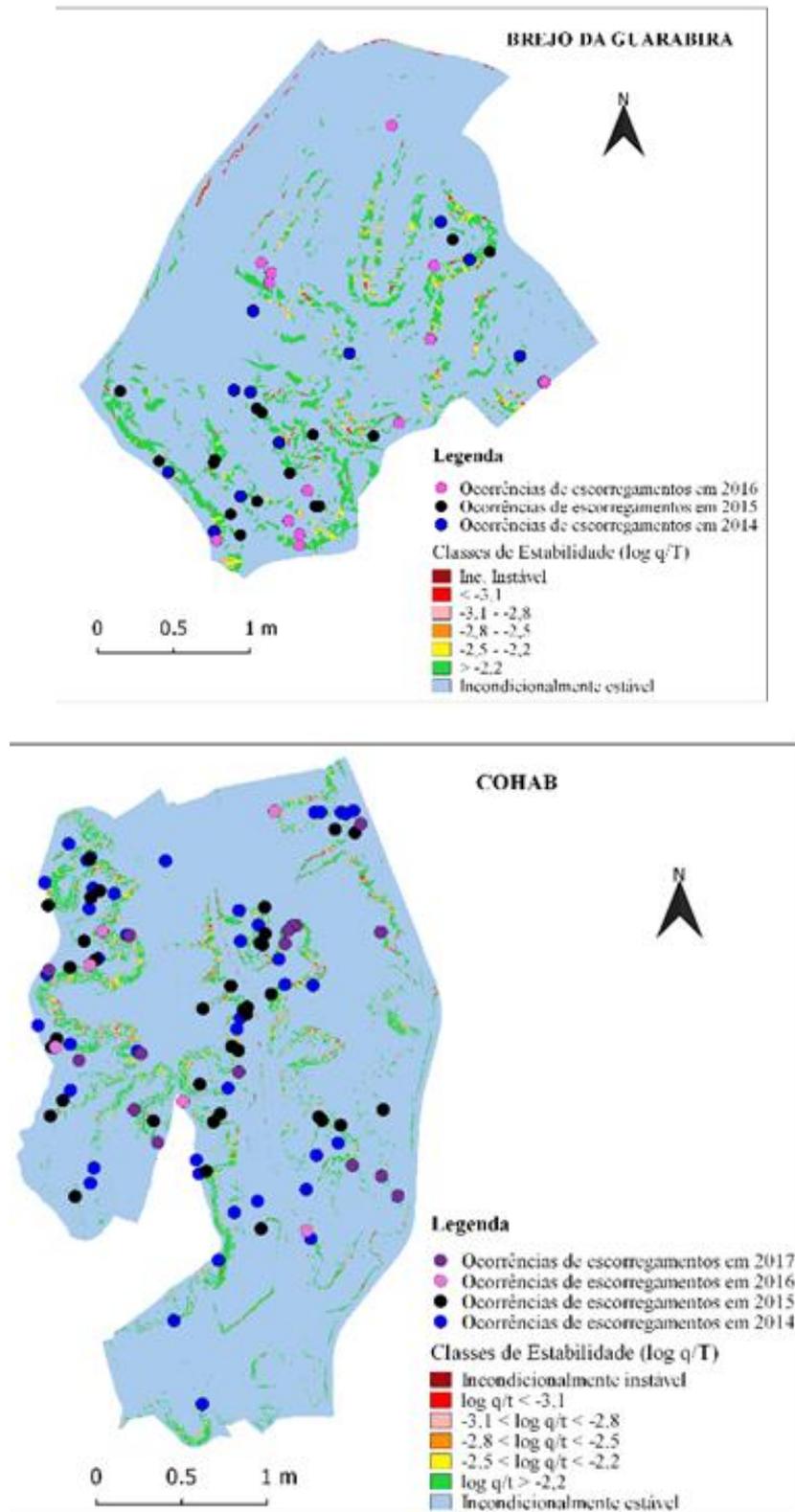
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 3).



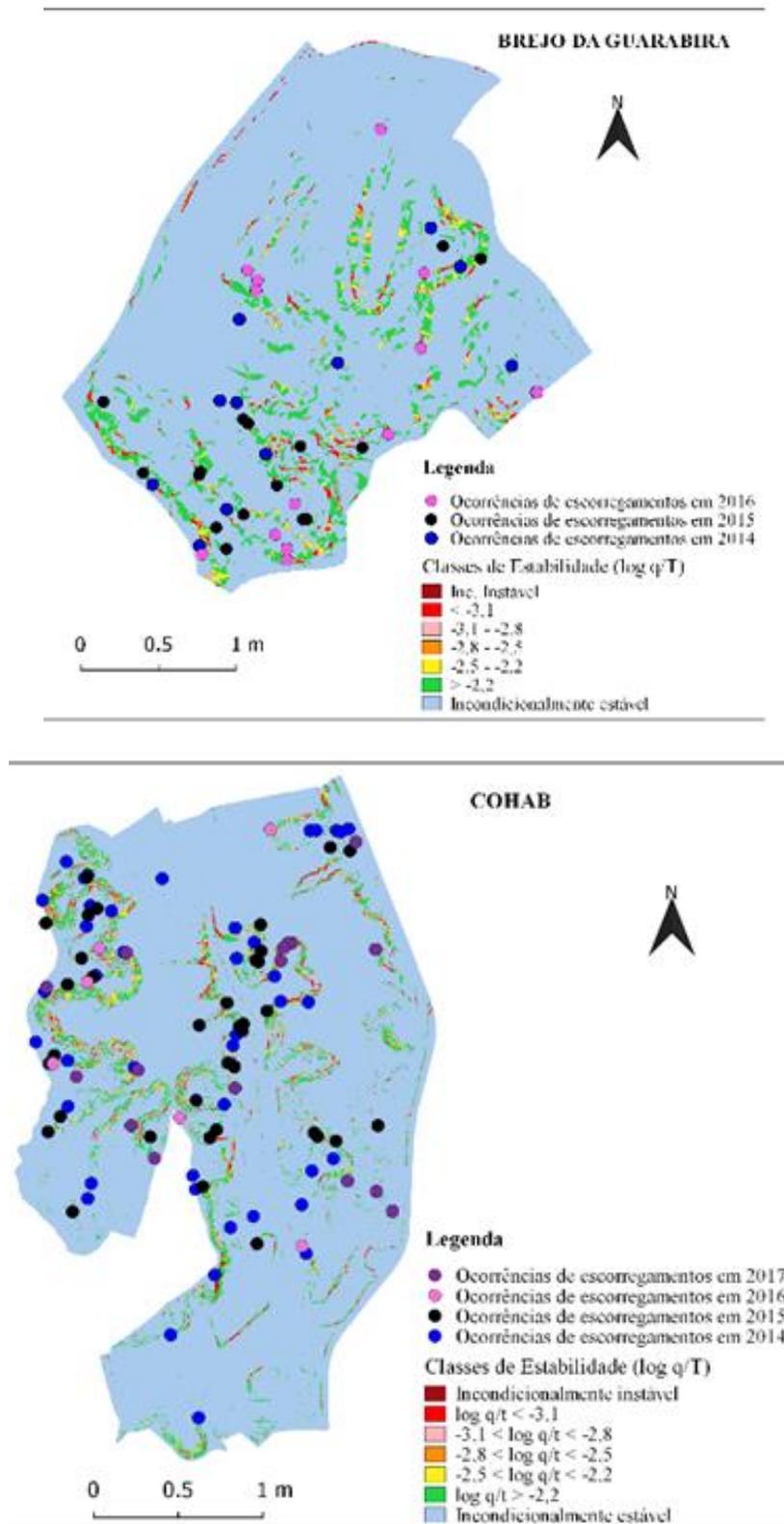
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 4).



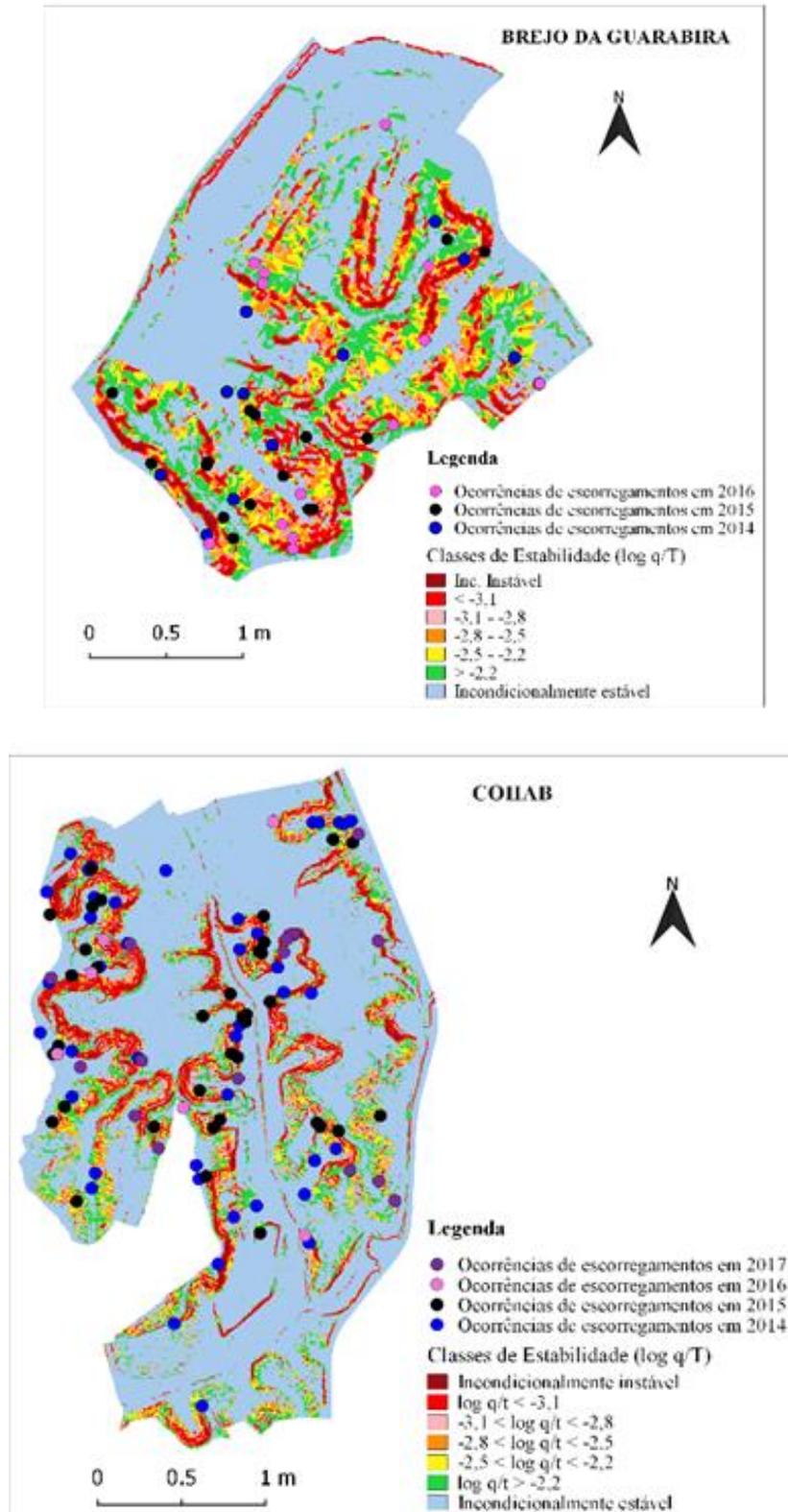
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 5).



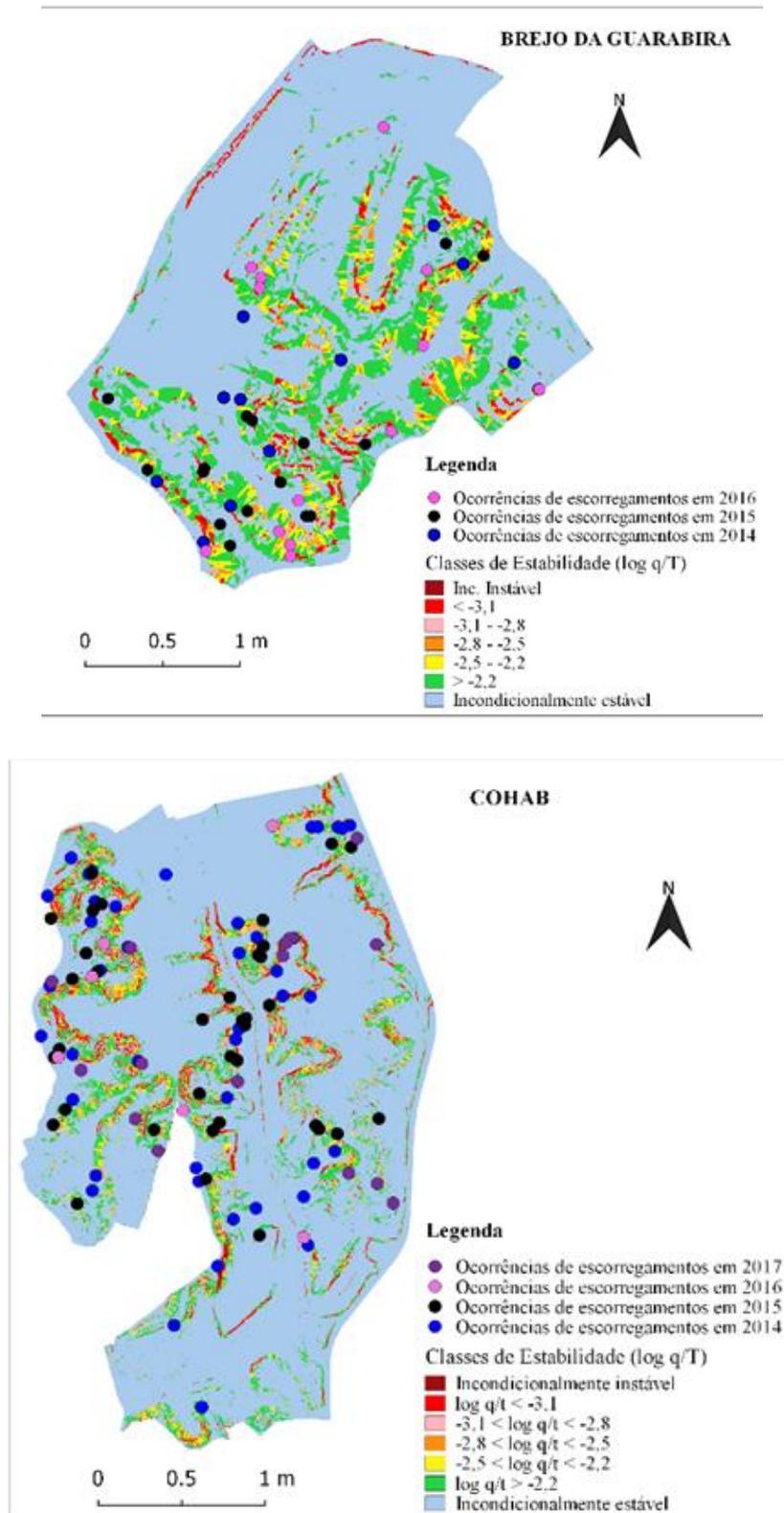
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 6).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 – Mapas de estabilidade com pontos de ocorrência de escorregamentos dos bairros de Brejo da Guarabira e Cohab (Modelagem 7).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os escorregamentos são fenômenos naturais que fazem parte da busca da natureza pelo seu equilíbrio; entretanto, quando ocorrem em áreas vulneráveis, ocupadas pela população, geram transtornos socioeconômicos gigantescos. Sendo assim, o mapeamento de áreas com predisposição a escorregamentos se torna imprescindível, principalmente para o planejamento da expansão urbana e no desenvolvimento de medidas mitigadoras como resposta dos órgãos públicos aos desastres. A utilização de ferramentas computacionais como o SHALSTAB para realização destes mapeamentos, garantem considerável grau de confiança, além disso, poupam tempo e dinheiro.

O SHALSTAB, por meio da modelagem matemática, faz uma análise de dados topográficos, pedológicos e hidrológico para descrever os processos envolvidos na estabilidade das encostas. É notório a influência da topografia sobre os resultados das modelagens, por isso é importante trabalhar com um bom MDT. A resolução de 2 metros permitiu conclusões bem detalhadas e fidedignas. A partir dos MDT são gerados os mapas de declividade e das linhas de fluxo e é justamente na união dos fluxos que ocorre o acúmulo de água e o carreamento de partículas, desencadeando os escorregamentos.

A pedologia se mostrou como outro fator bem importante. Conhecer bem o solo e suas propriedades físicas faz com que se consiga retratar fidedignamente a realidade do local, quando aplicar o modelo. Quanto maior a quantidade de dados, mais coerentes são as respostas do modelo. Vale lembrar que isto ainda é um problema, pois os dados disponíveis são poucos. A sensibilidade do SHALSTAB aos parâmetros de entrada, coesão e ao ângulo de atrito do solo, ficaram bem explícitas, realçando que mudanças não tão acentuadas causam resultados bem distintos. Como trabalhou-se com variações para mais ou para menos para estes dois parâmetros, percebeu-se o efeito causado pelo somatório da influência deles.

O modelo hidrológico é importante a ser considerado, pois historicamente no Brasil o desencadeamento dos escorregamentos ocorre devido ao grande acúmulo de chuva. Esse modelo considera a chuva permanente e o mapeamento do padrão espacial de equilíbrio do solo saturado, considerando a área de contribuição a montante, transmissividade do solo e topografia da encosta local.

Os resultados do modelo foram bem coerentes quando confrontados com os dados de ocorrência de escorregamento da Defesa Civil do Recife. Além dos bairros do Brejo da

Guarabira e da Cohab, os bairros Passarinho, Guarabira, Dois Unidos, Córrego do Jenipapo, Macaxeira, Vasco da Gama, Alto José Bonifácio, Barro e Ibura apresentaram regiões com áreas instáveis, devendo serem levados em consideração, pois o modelo mostrou que existe uma alta probabilidade de escorregamentos nesses locais. Além disso, três modelagens principais se mostraram representativas diante três diferentes cenários que podem ocorrer a depender do conjunto de fatores desencadeadores. A Modelagem 4 para maior estabilidade, a Modelagem 1 para média estabilidade e a Modelagem 6 para menor estabilidade.

O SHALSTAB se revela como sendo uma boa ferramenta para nortear os gestores na tomada de decisões. A recorrência das ocorrências de escorregamentos na cidade do Recife, atrelado à quantidade de vidas perdidas todos os anos, reforça mais ainda o benefício da utilização de modelos em ferramentas SIGs pelos órgãos competentes, principalmente a Defesa Civil, visto que monitora e fornece assistência à população atingida. Por fim, é importante destacar a relevância da criação e manutenção de um banco de dados de solos com acesso livre para uma modelagem cada vez mais precisa, por isso os órgãos federais, estaduais e municipais devem sempre investir em campanhas de campo para coleta desse tipo de dados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHEIROS, M. M. (1998). “Riscos de Escorregamentos na Região Metropolitana do Recife”. Tese de Doutorado, UFBA, Salvador-BA.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica, In: Conferência brasileira sobre estabilidade de encostas. Anais... Rio de Janeiro, v.2. p. 721-733, 1992.

BANDEIRA Ana Patrícia Nunes. Parâmetros Técnicos para Gerenciamento de Áreas de Riscos de Escorregamentos de Encostas na Região Metropolitana do Recife. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5126/1/arquivo2391_1.pdf>. Acesso em: 17 de maio de 2021.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Bulletin of Hydrological Sciences, v. 24, 1979, p. 43-69.

BRASIL. Ministério das Cidades. Capacitação em Mapeamento e Gerenciamento de Risco. Brasília, DF, 2006.

BRESSIANI, Jaciane Xavier. Delimitação de áreas variáveis de afluência em ambientes de microbacias urbanas através da comparação dos métodos TauDEM e HAND. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2016.

CARVALHO, C. M. de; RIEDEL, P. S. Técnicas de geoprocessamento aplicadas ao estudo da suscetibilidade há escorregamentos translacionais dos polidutos de Cubatão-SP. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, São Paulo. Anais. São Paulo: INPE, 2005.

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (orgs.). Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios. Ministério das Cidades. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, Brasília, 2007. 176p.

CAVALCANTI, P.; SANTOS, D. Microclimas Urbanos na Cidade do Recife-PE: proposta de zoneamento sob o enfoque do conforto térmico Recife. 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/32867/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Pedro%20Felipe%20Cavalcanti%20dos%20Santos.pdf>>. Acesso em: 24 de maio de 2021.

CIRILO, J. et al. Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. Recife, 2015 Disponível em: <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/156/PAP020211.pdf>>. Acesso em: 22 de maio de 2021.

CONRAD, O., BECHTEL, B., BOCK, M., DIETRICH, H., FISCHER, E., GERLITZ, L., WEHBERG, J., WICHMANN, V., E BÖHNER, J. : System for Automated Geoscientific Analyzes (SAGA) v. 2.1.4, Geosci. Model Development, 2015. Disponível em: <<https://gmd.copernicus.org/articles/8/1991/2015/gmd-8-1991-2015.pdf>>. Acesso: 22 de maio de 2021.

CRUZ, O. Contribuição Geomorfológica ao estudo de escarpas da Serra do Mar. Revista IG, v. 8-10,11 n. 1, 1990, p. 9-20.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement) Technical Report, 1998, 29p.

FERNANDES, N. F. & AMARAL, C. P., Movimentos de Massa: Uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Geomorfologia e Meio Ambiente. Ed. Bertrand, Rio de Janeiro, Brasil, 1996.

FIORI, A.F.; CAMIGNANI, L. Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas, Aplicações na Estabilidade de Taludes. Curitiba, PR. Ed. UFPR. 2001.

GOMES, Edvânia Torres Aguiar. Recortes de paisagens na cidade do Recife : uma abordagem geográfica. Recife: Massangana, 2007.

GUESSER, Luis Henrique. Elaboração do mapa geotécnico preliminar e mapa de áreas suscetíveis a movimentos de massa do município de Antônio Carlos-SC. Trabalho de Conclusão de Curso, 142f. Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

GUIDICINI, G. e YWASA, O.Y. Ensaio de Correlação entre Pluviosidade e Escorregamentos em Meio Tropical Úmido. São Paulo, 1976.

GUIMARÃES, R.F.; FERNANDES N.F.; GOMES R.A.T.; CARVALHO O.A.J. Fundamentação teórica do modelo matemático para previsão de escorregamentos rasos shallow stability. Espaço e Geografia, Vol.6, No 2, ISSN: 1516-9375, 2003, p. 133-150.

GUIMARAES, R.F.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H.M.; FERNANDES, N.F.; GOMES, R.A.T.; DE CARVALHO JUNIOR, O.A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*, v. 69, n. 1, p. 99–108, 2003.

GUSMÃO FILHO, J.A.; FERREIRA, S.R.M. e AMORIM JR, W.M. (1997). “Escorregamentos em Morros Urbanos do Recife: O caso do Boleiro”. In: 2nd Panamerican Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, ABMS. Anais, Vol.2, pp.985-994.

HIGHLAND, L.; BOBROWSKY, P. O Manual de Deslizamento - Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos Serviço Geológico do Canadá. Serviço Geológico do Canadá, 2008. Disponível em: <https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/Deslizamentos_M5DS_0.pdf>. Acesso: 19 de maio de 2021.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: Acesso em: 06 de março de 2021.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F.; CORREA, G.P.; MICHEL, G.P. Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorological and geomorphic aspects. In: WRACHIEN, D.; BREBBIA, C.A. (Orgs.) *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows III*. Southampton: WITpress., 2010b, p.77-88.

KRYNINE, D.P. e JUDD, W.R. Landslides and other Crustal Displacements. In: *Principles of Engineering Geology and Geotechnics*. Tóquio, 1957.

LIMA, Analice França. Comportamento Geomecânico e Análise de Estabilidade de uma Encosta da Formação Barreiras na Área Urbana da Cidade do Recife. Recife, 2002. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5835/1/arquivo6693_1.pdf>. Acesso em: 16 de maio de 2021.

MADUREIRA CRUZ, C. B. & PINA, M. F., Fundamentos de Cartografia. Curso de Especialização em Geoprocessamento. UFRJ, IGEO, Dep. Geografia, LAGEOP, Rio de Janeiro, 1999.

MEIRA, Franklale Fabian Diniz de Andrade. Estudo Do Processo Erosivo Em Encostas Ocupadas. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp143324.pdf>>. Acesso em: 10 de maio de 2021.

MELO, Cristiane Ribeiro de. Utilização de Informações Espaciais de Alta Resolução para Análise de Suscetibilidade de Deslizamento sob situação de Precipitações Intensas. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2021. Disponível em: <http://dspace.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/22181/tese_cristiane_melo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 de maio de 2021.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Comparative Analysis of SHALSTAB and SINMAP for Landslide Susceptibility Mapping in the Cunha River Basin, Southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, v. 14, ed. 7, 2014, p. 1266-1277.

MICHEL, Gean Paulo. Estudo de Escorregamentos na Bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/Sc, com os Modelos Shalstab e Sinmap. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011. Disponível em: <http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/TCC_Gean_Paulo_Michel.pdf>. Acesso em: 17 de maio de 2021.

MONTGOMERY, D. R. & DIETRICH, W. E., A Physically-Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding. *Water Resources Research*, v. 30, 1994. p.1153-1171.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*. v. 22, 1986, p. 794-804.

OFDA/CRED – The Office of US Foreign Disaster Assistance/Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – Université Catholique de Louvain – Annual Disaster Statistical Review 2008 – The numbers and trends, Brussels, Belgium, 2009.

OLIVEIRA, A.M.S. e BRITO, S.N.A. Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, 1998.

PFALTZGRAFF, Pedro Augusto dos Santos. Mapa de suscetibilidade a deslizamentos da região metropolitana de Recife. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2007.

PRIETO, Carla Corrêa *et al.* Comparação entre a Aplicação do Modelo Shalstab com Mapas de Suscetibilidade e Risco de Deslizamentos na Bacia do Córrego Piracuama em Campos Do Jordão – Sp. *Revista Brasileira de Cartografia*. São José dos Campos, São Paulo, 2016.

ROBAINA, Rafael Gomes. Utilização do Sistema de Informações Geográficas (Sig) para o Mapeamento da Criminalidade da Cidade de Bagé-RS. Bagé, 2017. Disponível em:

<<http://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/rii/2898/1/TCC%20Rafael%20Robaina%202017.pdf>>. Acesso em: 22 de abril de 2021.

SANTANA, John Kennedy Ribeiro de, et. al. Análise Multicritério e Álgebra de Mapas na Identificação de Áreas de Perigo a Escorregamentos na Cidade do Recife (PE). XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Fortaleza, 2019. ISBN: 978-85-7282-778-2. Disponível em: < <http://www.editora.ufc.br/images/imagens/pdf/geografia-fisica-e-as-mudancas-globais/247.pdf>>. Acesso em: 25 de maio de 2021.

SELBY, M. Hillslope Materials and Processes. Oxford: Oxford University Press, 1993. 289p.

SIDLE, R. C., e OCHIAI, H. Landslides: processes, prediction, and land use. American Geophysical Union, 2006.

SILVA, Apolino José Nogueira da Silva e CARVALHO, Fabíola Gomes de. Coesão e Resistência ao Cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Minas Gerais, nº 31, p. 31853-862, junho de 2007.

SILVA, Desirée Christine de Oliveira e. Aplicação do Modelo Shalstab na previsão de deslizamentos em Petrópolis. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

SILVA, Dinah Rebeca Dantas. Análise da Ocorrência e Inventário de Escorregamentos em Recife (PE) entre 2014 e 2017. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2020.

SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO, M. R. e OLIVEIRA, L. B. Caracterização e Classificação de Solos Tiomórficos da Várzea do Rio Coruripe, no Estado de Alagoas. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Minas Gerais, nº25, p. 977-986, 2001. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/sb95h93vmG5nQ4PVcxGg3Tn/?lang=pt&format=pdf>>. Acesso em: 6 de maio de 2021.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resources Research, v.33, n.2, p. 309-319, 1997.

TARBOTON, D. Terrain Analysis using digital elevation models - TAUDDEM. Disponível em: < <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem3.1/>>. Acesso em: março de 2021.

TEIXEIRA, M. A. C. Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais. Utilização de modelos matemáticos de base física na bacia de Tibo, Arcos de

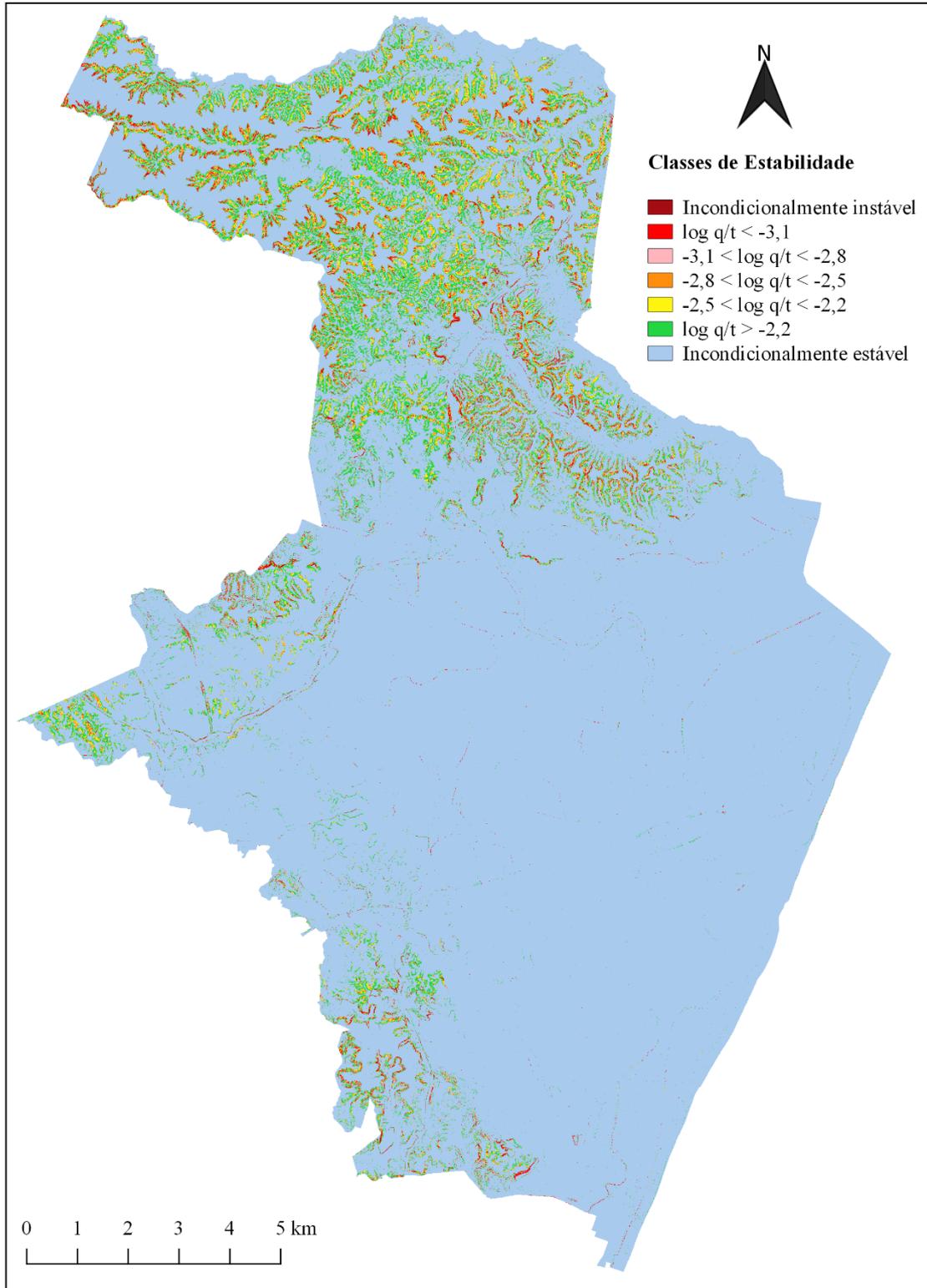
Valdevez. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território), Universidade do Porto, Portugal, 2012.

TOMINAGA, L. K., SANTORO, J., e AMARAL, R. (2009) Desastres Naturais: conhecer para prevenir. Instituto Geológico Secretaria do Meio Ambiente Governo do Estado de São Paulo. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.sidec.sp.gov.br/defesacivil/media/OSDownloads/1438375861_DesastresNaturais.pdf>. Acesso em: 16 maio. 2021

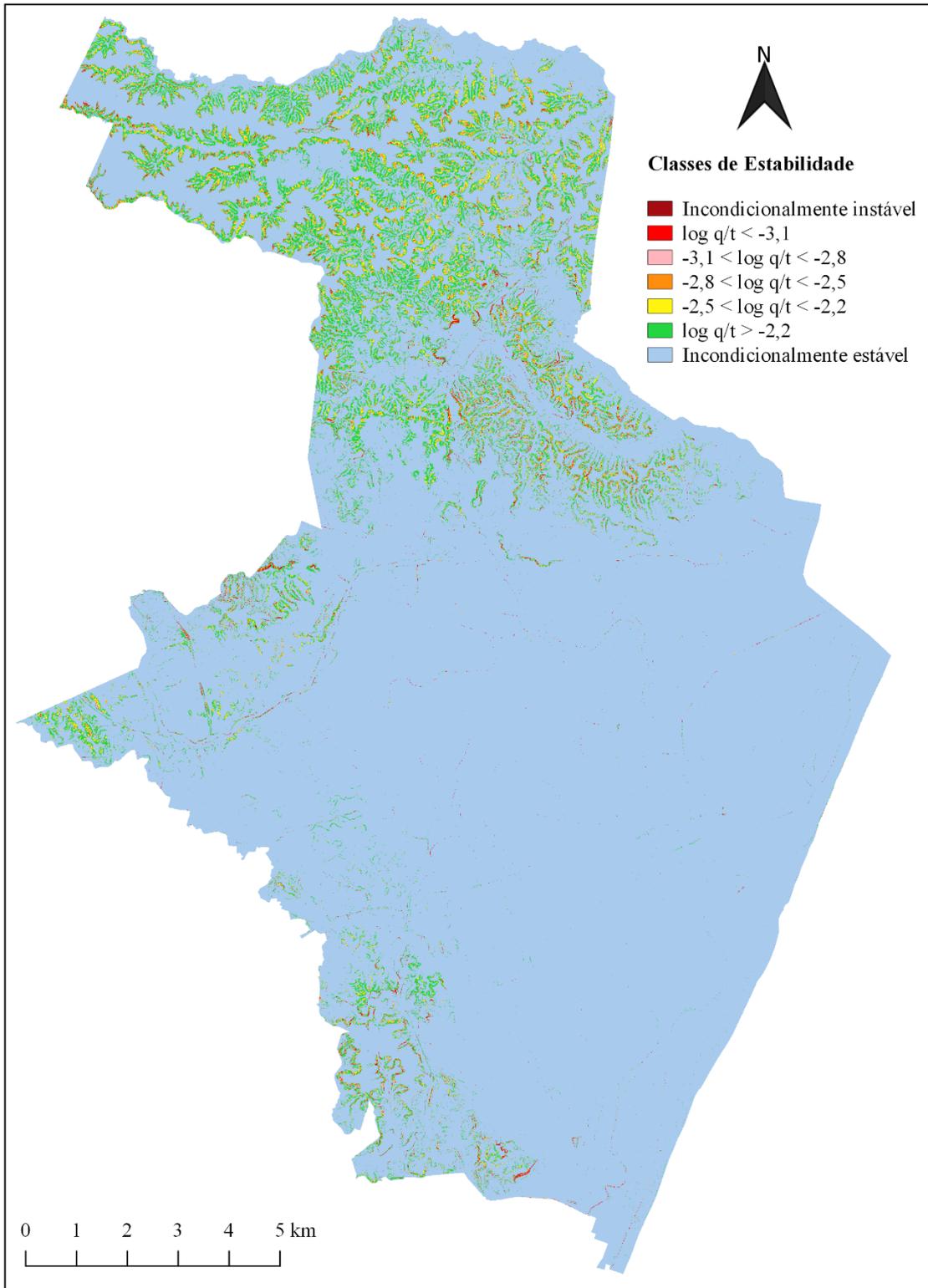
WANDERLEY, L. S. A.; NÓBREGA, R. S.; MOREIRA, A. B.; AANJOS, R. S.; ALMEIDA, C. A. P. As Chuvas na Cidade do Recife: Uma Climatologia de Extremos. Revista Brasileira de Climatologia. 22: 149-164 p. 2018.

APÊNDICES

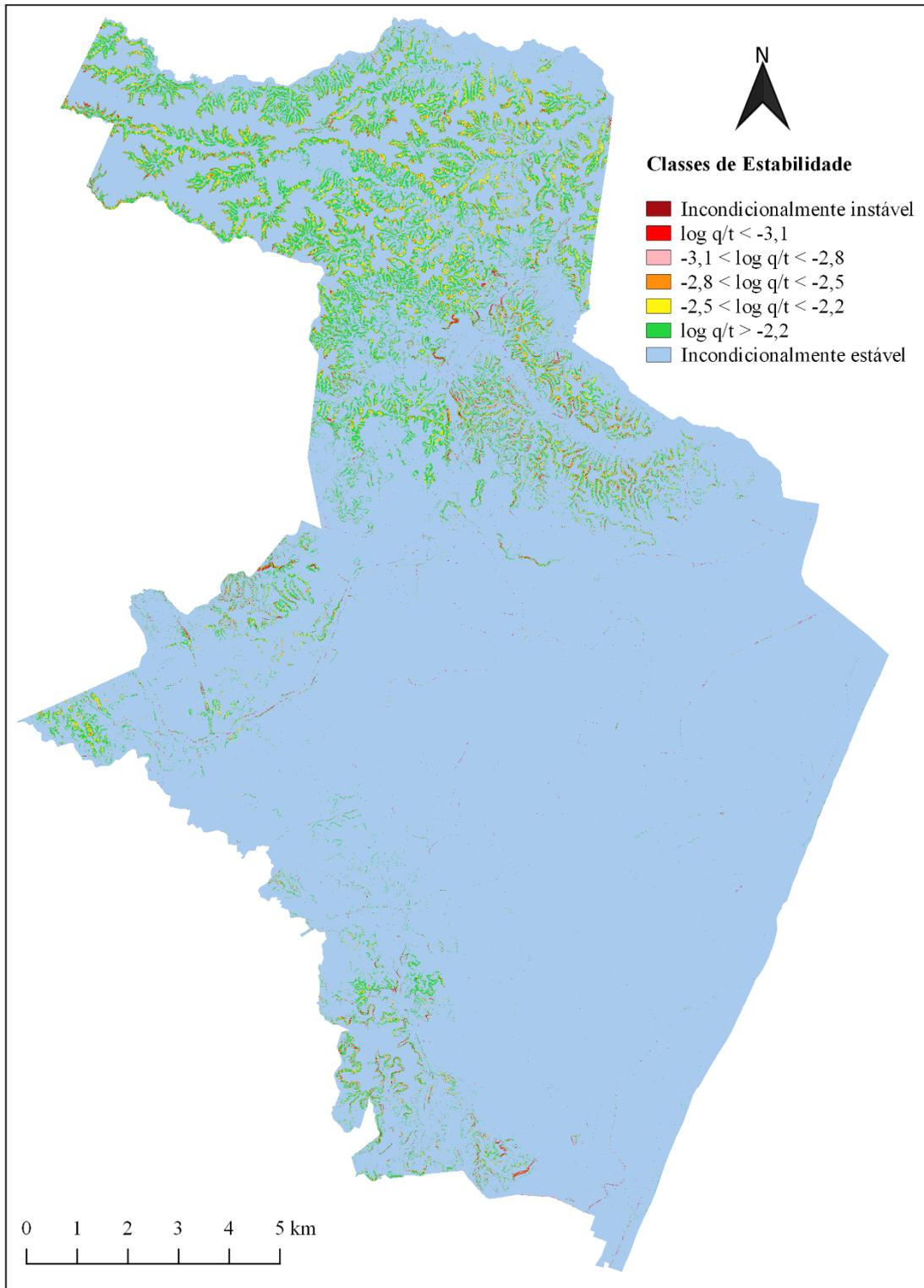
APÊNDICE A – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 1)



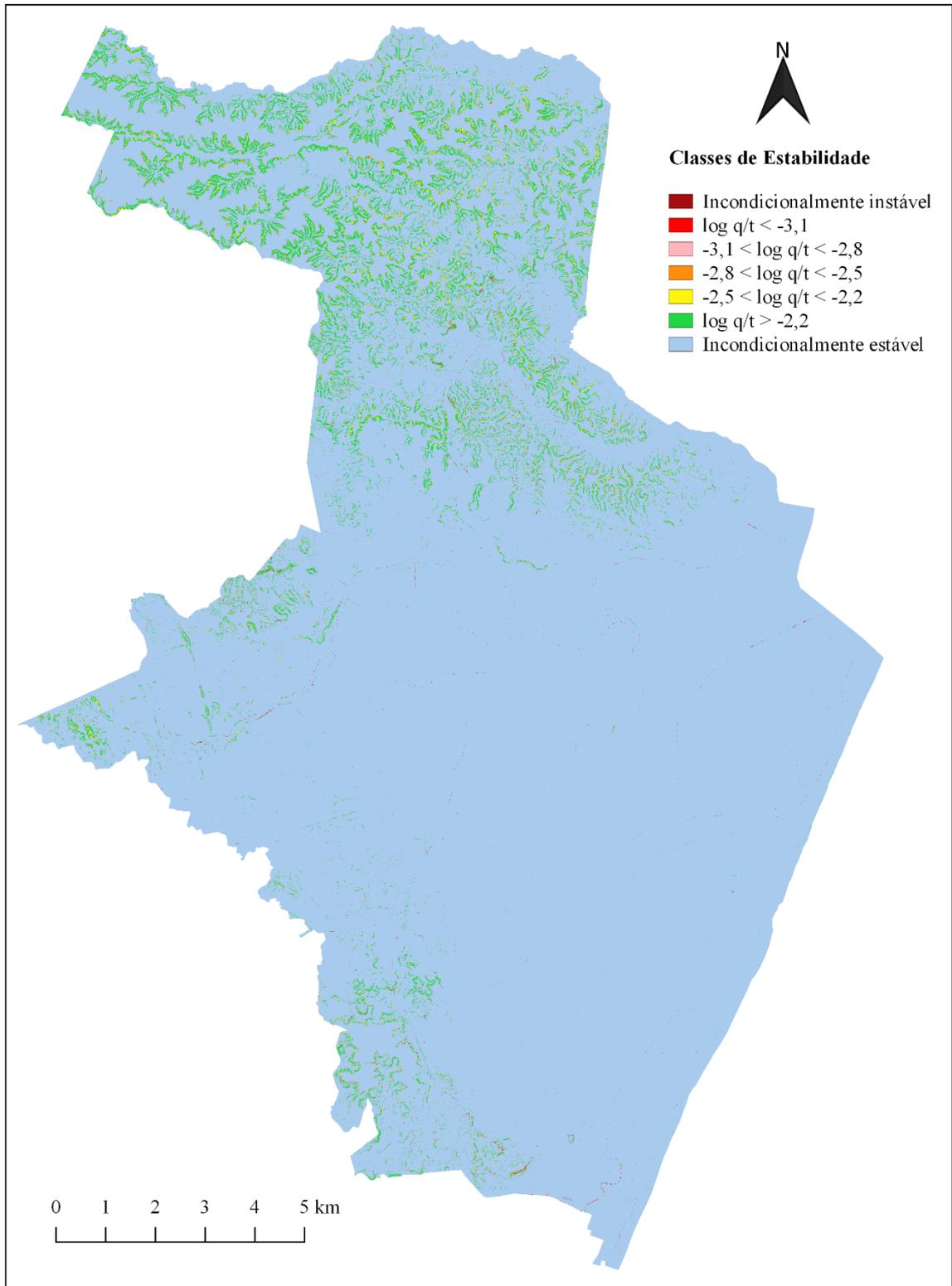
APÊNDICE B – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 2)



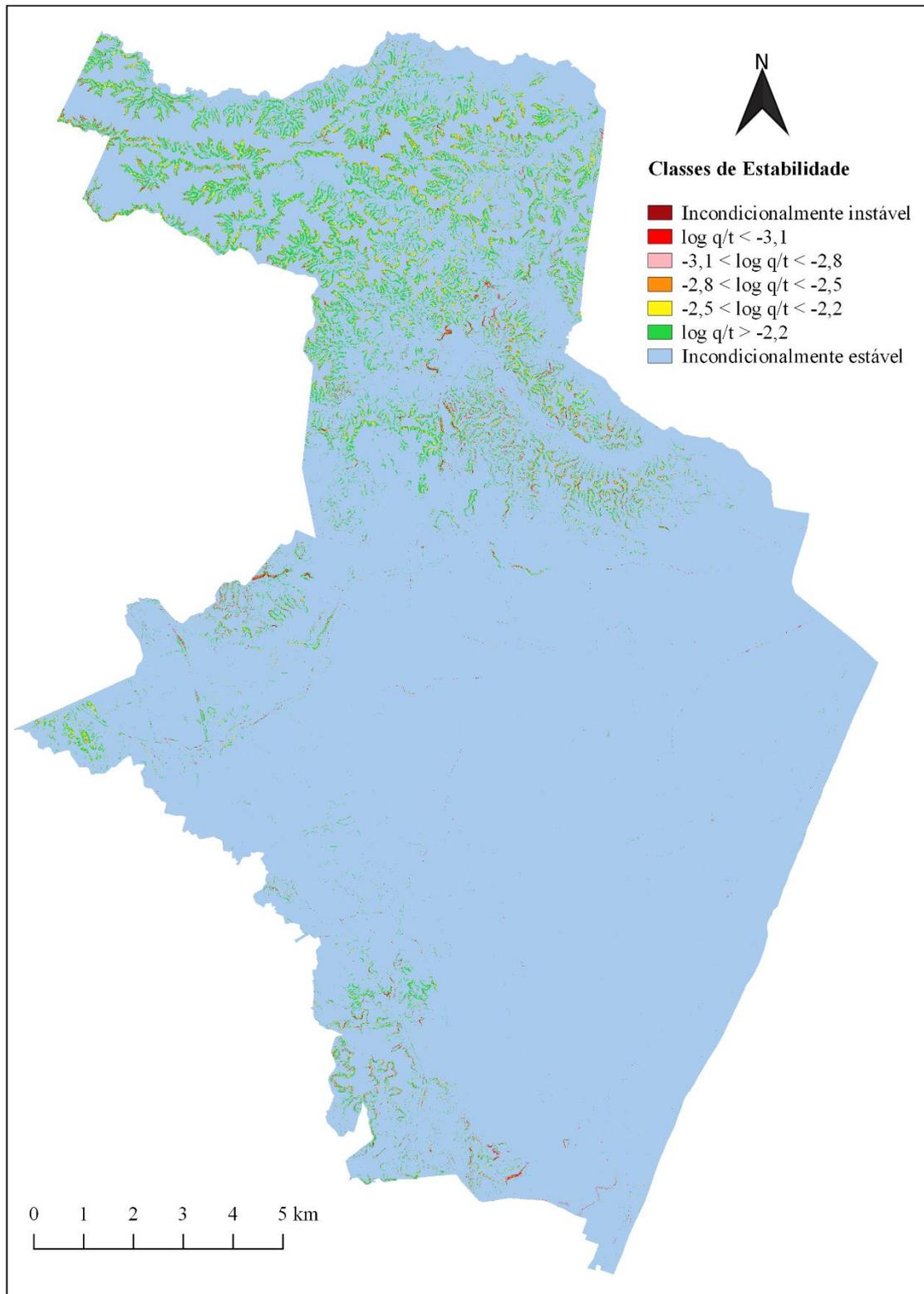
APÊNDICE C – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 3)



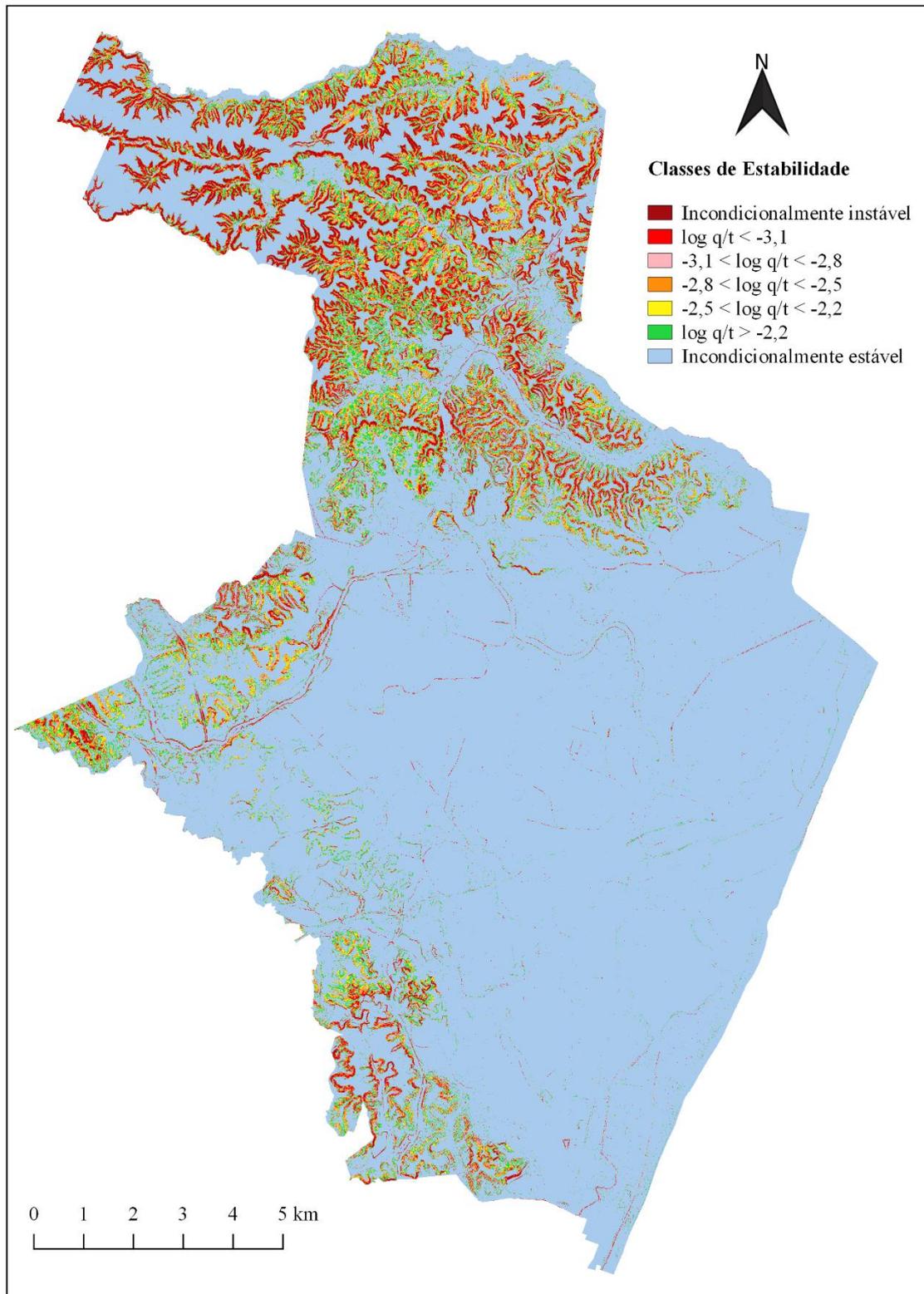
APÊNDICE D – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 4)



APÊNDICE E – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 5)



APÊNDICE F – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 6)



APÊNDICE G – MAPA DE ESTABILIDADE (MODELAGEM 7)

